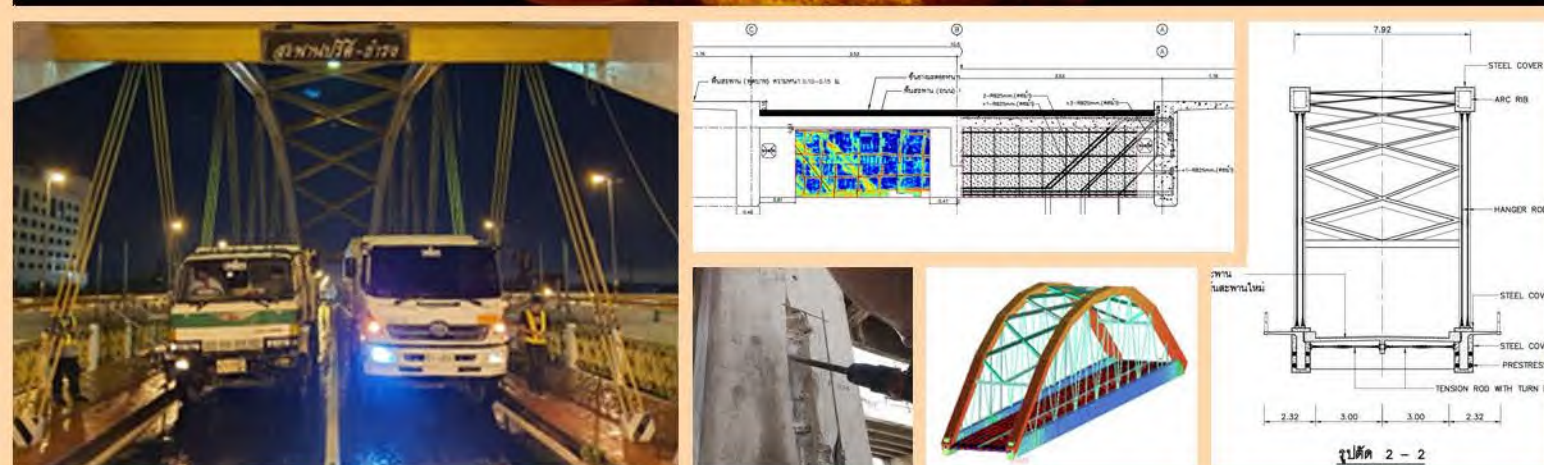




สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

โครงการศึกษาจัดทำแนวทางการบูรณะ
สะพานปรีดี-ธำรงภายหลังการใช้งาน ๗๗ ปี



Final Report รายงานขั้นสุดท้าย

กันยายน 2564

บริษัท แอสโคนา เอ็ม จำกัด



บทที่ 6 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างสะพาน

[6.1] ภาพรวมการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติวัสดุโครงสร้างสะพานในโครงการนี้มีรวมทั้งสิ้น 4 รายการ ประกอบด้วย (1) การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (2) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (3) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม และ (4) การทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน

การทดสอบ 3 รายการแรก เป็นการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Test) โดยจะมีการเจาะคอนกรีตออกจากชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงในห้องปฏิบัติการ หรือมีการสกัดผิวคอนกรีตออกและตัดเหล็กเสริมเพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงดึงในห้องปฏิบัติการ ส่วนการทดสอบรายการสุดท้ายถึงแม้จะมีการทำลายอยู่บ้าง แต่ไม่รุนแรงเท่ากับ 3 รายการแรก โดยจะมีการเจาะรูในคอนกรีตเล็ก ๆ เพื่อนำผงคอนกรีตไปตรวจสอบระดับความลึกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

เนื่องจากการทดสอบทั้ง 4 รายการ มีจำนวนค่อนข้างมาก จึงอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างได้ ดังนั้นการวางแผนทดสอบจึงได้พยายามกระจายตำแหน่งทดสอบไปยังชิ้นส่วนในบริเวณต่าง ๆ ไม่ให้หนาแน่นมากเกินไปที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง และได้คัดเลือกตำแหน่งที่คาดว่าจะมีผลกระทบน้อยต่อโครงสร้าง ภาพรวมการคัดเลือกและการกระจายตำแหน่งการทดสอบทั้ง 4 รายการ แสดงดังตารางที่ 6-1

ตารางที่ 6-1 ภาพรวมการกระจายตำแหน่งทดสอบ 4 รายการ

Test	Member	S1+S2		S3	S4	S5	S6	S7+S8		SUM	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7			
Concrete Compression Test	Deck	6		3	12	4	2	6		33	82
	Floor beam	2		1	3	1	4	2		13	
	Girder	3		1	2	2	2	2		12	
	Cap beam		1					1		2	
	Bracing		2			2				4	
	Pier	3	3		4	2	2	4		18	
Concrete Tension Test	Deck	6		3	11	6	2	6		34	80
	Floor beam	2		1	6		4	2		15	
	Girder	1		1	2	1	1	3		9	
	Cap beam							1		1	
	Bracing		2			2				4	
	Pier	3	1		6	2	2	3		17	
Steel Tension Test	Deck	4		2	2	2	2	2		14	40
	Floor beam				2	1	3			6	
	Girder	2		1			1	2		6	
	Cap beam							1		1	
	Bracing		1			1				2	
	Pier	2	1		4	1	1	2		11	
Carbonation Test	Deck	12		8	16	10	10	14		70	203
	Floor beam	4		2	6	4	4	4		24	
	Girder	4		4	6	4	4	4		26	
	Cap beam	2	2			2	2	2		10	
	Bracing		4			2				6	
	Pier	6	10	12	13	8	8	10		67	



[6.2] การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

[6.2.1] วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

การทดสอบนี้จะอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 42 โดยจะเจาะแท่งตัวอย่างคอนกรีตออกมาจากชิ้นส่วนโครงสร้างตามสภาพการใช้งานจริง เพื่อนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต ค่าที่ได้จะเป็นกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ที่แท้จริงของโครงสร้าง ณ ปัจจุบัน การทดสอบด้วยวิธีนี้จะใช้ควบคู่กับเครื่องมือสแกนหาตำแหน่งเหล็กเสริม (BOSCH D-Tect 120) เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เครื่องเจาะคอนกรีตตัดเหล็กเสริมขาด นอกจากนี้การเลือกตำแหน่งในการเจาะจะเลือกบริเวณที่ส่งผลกระทบต่อตัวโครงสร้างน้อยที่สุด

การเจาะแท่งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C42 มีข้อกำหนด คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างควรมีขนาดไม่น้อยกว่า 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดของวัสดุมวลคละ และระยะความลึกของแท่งตัวอย่างคอนกรีตจะต้องอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง อย่างไรก็ตามโครงการนี้จะเจาะแท่งตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. และมีความลึก 10 ซม. ตามข้อกำหนดงานจัดจ้าง (TOR) เพื่อลดผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นต่อโครงสร้าง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย

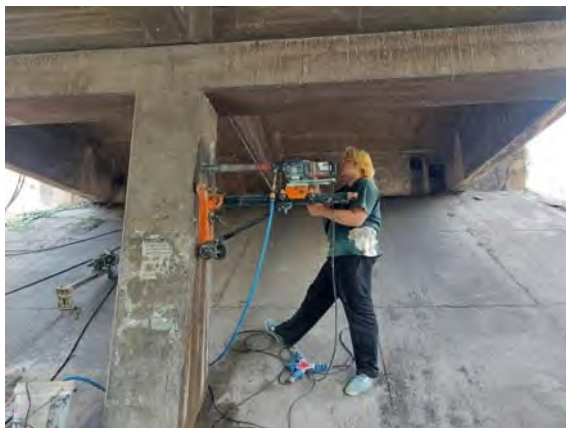
- เครื่องมือสำหรับหาตำแหน่งของเหล็กเสริม (Rebar Locator) ดังรูปที่ 6-1
- เครื่องเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต (Core Drilling Machine) เป็นเครื่องเจาะแบบ Rotary Drilling พร้อมด้วยกระบอกเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต เป็นกระบอกเจาะหัวเพชร (Diamond Barrel) แบบ Single Core โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6-2



(ก) เครื่องมือสำหรับหาดำแหน่งเหล็กเสริม

(ข) การหาดำแหน่งเหล็กเสริม

รูปที่ 6-1 เครื่องมือที่ใช้ในการหาดำแหน่งเหล็กเสริมในโครงสร้าง



(ก) เครื่องเจาะคอนกรีต

(ข) การเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 6-2 เครื่องมือที่ใช้ในการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต (Core Drilling)

[4.2.2] วิธีการทดสอบ

- กำหนดตำแหน่งการเจาะ โดยตำแหน่งนั้นจะต้องส่งผลกระทบต่อตัวโครงสร้างน้อย จากนั้นทำการตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมที่ชัดเจนด้วยเครื่องมือ Rebar Locator
- ติดตั้งเครื่องเจาะคอนกรีต (Concrete Drilling Machine) แบบ Rotary Drilling ด้วย Anchor Bolt บริเวณจุดที่ต้องการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต จากนั้นติดตั้งกระบอกเจาะแบบ Single Core
- ต่อสายยางจากถังน้ำเข้ากับเครื่องเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต



- เมื่อได้ตรวจสอบความเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มทำการเจาะแท่งตัวอย่างคอนกรีต โดยในขณะทำการเจาะ ต้องเปิดน้ำหล่อเลี้ยงเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีระหว่าง Diamond barrel กับคอนกรีต
- เมื่อได้แท่งตัวอย่างคอนกรีตแล้ว (รูปที่ 6-3) ทำความสะอาดแล้วห่อด้วยพลาสติกเพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป
- ทำการซ่อมแซมคอนกรีตบริเวณที่ได้ทำการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีตให้เรียบร้อย โดยใช้ Non-Shrinkage Cement ในการอุดรูที่เจาะ



รูปที่ 6-3 แท่งตัวอย่างคอนกรีตหลังจากการ Core Drilling

- แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการ Core Drilling ที่ภาคสนามได้นำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 6-4 ด้วยอัตราการกดระหว่าง 12 ถึง 24 N/(mm².min)



รูปที่ 6-4 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

[4.2.3] ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

โครงการนี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงสะพาน (Span) S1-S8 และตอม่อสะพาน (Pier) P1-P7 รวมทั้งสิ้น 82 ตำแหน่ง โดยกระจายการทดสอบให้กับชิ้นส่วนประเภทต่าง ๆ ประกอบด้วย พื้นสะพาน (Deck, DK) ทางเท้า (Sidewalk, SW) คานหลัก (Girder, GD) คานรองพื้นสะพาน (Floor beam, FB) คานรัดหัวเสา (Cap beam, CB) ค้ำยันเสาตอม่อ (Bracing, BC) กำแพงตอม่อ (Pier Wall, PW) เสาตอม่อ (Pier, PR) ตารางที่ 6-2 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 6-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ลำดับ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	รหัสทดสอบ	Compressive Strength (MPa)
1	S2	SW1	S2-SW1-1	17.1
2	S2	SW1	S2-SW1-3	14.4
3	S2	SW1	S2-SW1-5	13.6
4	S2	SW2	S2-SW2-1	18
5	S2	SW2	S2-SW2-2	31.6
6	S2	SW2	S2-SW2-6	12.4
7	S2	GD1	S2-GD1-1	17.6
8	S2	GD1	S2-GD1-2	11.3
9	S2	GD1	S2-GD2-1	13.1
10	S2	FB1	S2-FB1-2	6.5
11	S2	FB3	S2-FB3-3	12.3
12	S3	SW1	S3-SW1-2	22.8
13	S3	SW2	S3-SW2-1	15.5
14	S3	SW2	S3-SW2-3	15.2
15	S3	GD2	S3-GD2-1	14.3
16	S3	FB2	S3-FB2-1	10.6
17	S4	SW1	S4-SW1-8	16.8
18	S4	SW1	S4-SW1-10	22.9
19	S4	SW1	S4-SW1-12	17.5
20	S4	SW1	S4-SW1-1	22.7
21	S4	SW1	S4-SW1-2	15.4



ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รหัสทดสอบ	Compressive Strength (MPa)
22	S4	SW1	S4-SW1-6	22.2
23	S4	SW2	S4-SW2-3	23.7
24	S4	SW2	S4-SW2-5	15
25	S4	SW2	S4-SW2-7	10.7
26	S4	SW2	S4-SW2-9	18.7
27	S4	SW2	S4-SW2-11	19.2
28	S4	SW2	S4-SW11.2	15.3
29	S4	GD1	S4-GD1-1	20.8
30	S4	GD2	S4-GD2-3	17.6
31	S4	FB1	S4-FB1-1	22.6
32	S4	FB2	S4-FB2-1	10.6
33	S4	FB2	S4-FB2-2	12.8
34	S5	SW1	S5-SW1-4	14.9
35	S5	SW2	S5-SW2-1	25
36	S5	SW2	S5-SW2-3	16.6
37	S5	SW2	S5-SW2-5	21.7
38	S5	GD1	S5-GD1-1	23.5
39	S5	GD2	S5-GD2-1	19.3
40	S5	FB2	S5-FB2-1	16.5
41	S6	SW1	S6-SW1-2	26.6
42	S6	SW2	S6-SW2-1	20.1
43	S6	GD2	S6-GD2-1	13.4
44	S6	GD3	S6-GD3-1	11.4
45	S6	FB1	S6-FB1-2	24.4
46	S6	FB2	S6-FB2-2	17.5
47	S6	FB3	S6-FB3-3B	24.7
48	S6	FB3	S6-FB3-3F	25.9
49	S7	SW1	S7-SW1-1	20.8
50	S7	SW1	S7-SW1-3	21.4

ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รหัสทดสอบ	Compressive Strength (MPa)
51	S7	SW1	S7-SW1-5	13.6
52	S7	SW2	S7-SW2-2	16.2
53	S7	SW2	S7-SW2-4	32.4
54	S7	SW2	S7-SW2-6	17
55	S7	GD1	S7-GD1-3	13.9
56	S7	GD2	S7-GD2-2	17.6
57	S7	FB1	S7-FB1-3	15.2
58	S7	FB2	S7-FB2-2	18.2
59	P1	PR1	P1-PR1-1	12.9
60	P1	PR2	P1-PR2-1	13.9
61	P1	PR3	P1-PR3-1	14.7
62	P2	BC1	P2-BC1-1	12.5
63	P2	BC2	P2-BC2-1	21.9
64	P2	CB1	P2-CB1-1	15.1
65	P2	PR1	P2-PR1-1	8.6
66	P2	PR2	P2-PR2-1	8.8
67	P2	PR3	P2-PR3-1	16.2
68	P4	PW	P4-B1-1	19.2
69	P4	PW	P4-B4-1	12.7
70	P4	PW	P4-B5-1	10.9
71	P4	PW	P4-B9-1	18
72	P5	BC1	P5-BC1-1	19.5
73	P5	BC1	P5-BC1-2	16.1
74	P5	PR2	P5-PR2-1	17.4
75	P5	PR3	P5-PR3-1	15.1
76	P6	PR2	P6-PR2-1	18.1
77	P6	PR3	P6-PR3-1	20.8
78	P7	CB1	P7-CB1-1	21.1



ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รหัสทดสอบ	Compressive Strength (MPa)
79	P7	PR1	P7-PR1-1	20.8
80	P7	PR2	P7-PR2-1	19.3
81	P7	PR2	P7-PR2-2	18.3
82	P7	PR3	P7-PR3-1	26.2

หมายเหตุ รหัสชั้นส่วน SW = Sidewalk, GD = Girder, FB = Floor beam, CB = Cap beam, BC = Bracing,

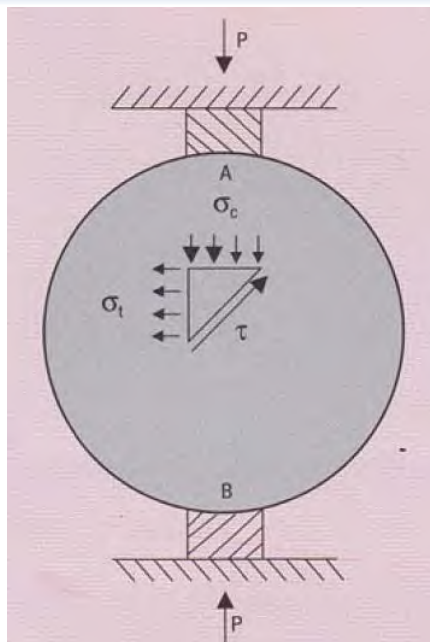
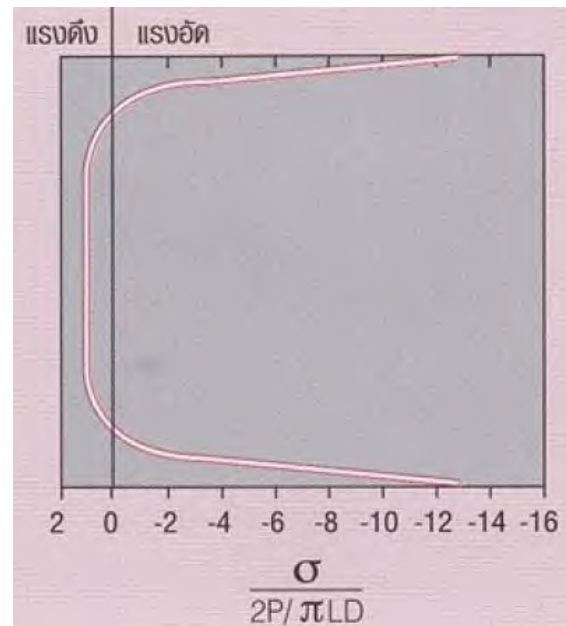
PW = Pier Wall, PR = Pier, DK = Deck

[6.3] การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

[6.3.1] วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตโดยตรง (Direct Tension Test) เป็นสิ่งที่กระทำได้ยากและใช้เวลามาก ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่นิยมใช้ในภาคปฏิบัติ ทางเลือกอื่นที่สามารถให้ค่ากำลังรับแรงดึงได้ คือวิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile test) ซึ่งทดสอบได้ง่ายกว่า อีกทั้งผลการทดสอบมีความแปรปรวนต่ำ จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ดังนั้นโครงการนี้จึงเลือกวิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile test) ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศบราซิล และมีวิธีการทดสอบตาม ASTM C 496 การทดสอบโดยย่อ คือ ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกวางลงในแนวนอนเพื่อรับแรงกดตามแกนที่ส่งผ่านจากแผ่นไม้อัดหนา 3 มม. กว้าง 25 มม. แรงอัดที่กระทำในแนวดิ่งจะทำให้เกิดแรงดึงในแนวนอนเกือบคงที่ตลอดหน้าตัดคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 6-5 โดยแรงอัดในแนวดิ่งที่ผิวสัมผัสไม่ทำให้คอนกรีตวิบัติ แต่แรงดึงในแนวนอนซึ่งเกิดสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตแตกออกเป็น 2 ซีก



รูปที่ 6-5 การทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile test)



รูปที่ 6-6 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile test)

ขั้นตอนการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีต (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ความลึก 10 ซม.) ดำเนินการด้วยวิธีการเดียวกันกับการเจาะแท่งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ได้กล่าวไปแล้ว



[6.3.2] ผลทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

โครงการนี้ได้ทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตในช่วงสะพาน (Span) S1-S8 และตอม่อสะพาน (Pier) P1 – P7 รวมทั้งสิ้น 80 ตำแหน่ง โดยกระจายการทดสอบให้กับชิ้นส่วนประเภทต่าง ๆ ประกอบด้วย พื้นสะพาน (Deck, DK) ทางเท้า (Sidewalk, SW) คานหลัก (Girder, GD) คานรองพื้นสะพาน (Floor beam, FB) คานรัดหัวเสา (Cap beam, CB) ค้ำยันเสาตอม่อ (Bracing, BC) กำแพงตอม่อ (Pier Wall, PW) เสาตอม่อ (Pier, PR) ตารางที่ 6-3 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

ตารางที่ 6-3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

ลำดับ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	รหัสทดสอบ	Tensile Strength (MPa)
1	S2	SW1	S2-SW1-4	4.02
2	S2	SW1	S2-SW1-2	2.96
3	S2	SW1	S2-SW1-6	1.81
4	S2	SW2	S2-SW2-1	3.62
5	S2	SW2	S2-SW2-3	3.33
6	S2	SW2	S2-SW2-5	3.11
7	S2	GD3	S2-GD3-1	1.93
8	S2	FB1	S2-FB1-1	1.96
9	S2	FB2	S2-FB2-1	2.84
10	S3	SW1	S3-SW1-1	3.74
11	S3	SW1	S3-SW1-3	3.86
12	S3	SW2	S3-SW2-2	3.14
13	S3	GD1	S3-GD1-2	3.00
14	S3	FB	S3-FB-2	2.56
15	S4	SW1	S4-SW1-9	2.59
16	S4	SW1	S4-SW1-3	2.65
17	S4	SW1	S4-SW1-5	3.90
18	S4	SW1	S4-SW1-7	2.09
19	S4	SW1	S4-SW1-11	2.56
20	S4	SW2	S4-SW2-2	1.95
21	S4	SW2	S4-SW2-4	2.98
22	S4	SW2	S4-SW2-6	2.87

ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รหัสทดสอบ	Tensile Strength (MPa)
23	S4	SW2	S4-SW2-8	2.88
24	S4	SW2	S4-SW2-10	2.41
25	S4	SW2	S4-SW2-12	2.32
26	S4	GD1	S4-GD1-1	2.66
27	S4	GD2	S4-GD2-2	2.72
28	S4	FB1	S4-FB1-1	2.66
29	S4	FB1	S4-FB1-2	2.25
30	S4	FB1	S4-FB1-2.2	2.37
31	S4	FB1	S4-FB1-2.3	2.19
32	S4	FB1	S4-FB1-3	2.52
33	S4	FB2	S4-FB2-3	2.94
34	S5	SW1	S5-SW1-1	2.93
35	S5	SW1	S5-SW1-2	4.45
36	S5	SW1	S5-SW1-3	2.56
37	S5	SW1	S5-SW1-5	2.74
38	S5	SW2	S5-SW2-2	2.17
39	S5	SW2	S5-SW2-4	3.51
40	S5	GD	S5-GD-2	2.69
41	S6	SW1	S6-SW1-1	3.19
42	S6	SW2	S6-SW2-2	2.67
43	S6	GD1	S6-GD1-2	3.33
44	S6	FB1	S6-FB1-1	2.91
45	S6	FB1	S6-FB1-2	3.48
46	S6	FB2	S6-FB-2-1	2.41
47	S6	FB2	S6-FB-2-2	3.28
48	S7	SW1	S7-SW1-2	2.76
49	S7	SW1	S7-SW1-4	2.65
50	S7	SW1	S7-SW1-6	2.76
51	S7	SW2	S7-SW2-1	2.54



ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รหัสทดสอบ	Tensile Strength (MPa)
52	S7	SW2	S7-SW2-3	2.80
53	S7	SW2	S7-SW2-5	2.38
54	S7	GD	S7-GD-3	3.16
55	S7	GD1	S7-GD1-1	2.44
56	S7	GD3	S7-GD3-1	2.74
57	S7	FB1	S7-FB1-1	2.88
58	S7	FB2	S7-FB2-3	2.32
59	P1	PR1	P1-PR1-1	2.64
60	P1	PR1	P1-PR1-2	2.64
61	P1	PR3	P1-PR3-1	2.37
62	P2	BC1	P2-BC1-1	3.47
63	P2	BC2	P2-BC2-1	2.22
64	P2	PR2	P2-PR2-1	1.97
65	P4	PW	P4-B2-1	3.38
66	P4	PW	P4-B3-1	3.57
67	P4	PW	P4-B6-1	3.44
68	P4	PW	P4-B7-1	3.28
69	P4	PW	P4-B8-1	2.50
70	P4	PW	P4-B10-1	3.20
71	P5	BC2	P5-BC2-B	2.44
72	P5	BC2	P5-BC2-T	2.96
73	P5	PR1	P5-PR1-1	2.54
74	P5	PR3	P5-PR3-1	3.11
75	P6	PR1	P6-PR1-1	3.84
76	P6	PR3	P6-PR3-1	2.56
77	P7	CB2	P7-CB2-1	3.00
78	P7	PR1	P7-PR1-1	2.85
79	P7	PR2	P7-PR2-1	2.50
80	P7	PR3	P7-PR3-1	2.83

หมายเหตุ รหัสชิ้นส่วน SW = Sidewalk, GD = Girder, FB = Floor beam, CB = Cap beam, BC = Bracing,
PW = Pier Wall, PR = Pier, DK = Deck

[6.4] การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

ความสามารถการรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนับว่าเป็นคุณสมบัติทางกลที่สำคัญในการออกแบบและเสริมกำลังโครงสร้าง โดยเหล็กเสริมจะมีคุณสมบัติกำลังรับแรงดึงเท่ากับกำลังรับแรงอัด ดังนั้นจึงทดสอบเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงดึงเท่านั้น

โครงการนี้ได้ทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมรวมทั้งสิ้น 40 ตำแหน่ง กระจายทั่วทั้งสะพาน โดยเหล็กเสริมที่ตัดออกจากโครงสร้างมีความยาวไม่น้อยกว่า 30 ซม. ซึ่งมีขั้นตอนและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบดังนี้



(ก) เครื่องมือสำหรับหาตำแหน่งของเหล็กเสริม

(ข) การหาตำแหน่งของเหล็กเสริม

รูปที่ 6-7 เครื่องมือที่ใช้ในการหาตำแหน่งเหล็กเสริมในโครงสร้าง





(ก) เครื่องเจียรคอนกรีต



(ข) การเซาะร่องผิวคอนกรีต



(ค) เครื่องสกัดคอนกรีต



(ง) การสกัดคอนกรีต



(จ) เครื่องตัดเหล็ก



(ฉ) การตัดเหล็กเสริม



(ช) ชิ้นตัวอย่างเหล็กเสริม

รูปที่ 6-8 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างเหล็กเสริม

[6.4.1] วิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

วัดความยาวของเหล็กเสริมด้วยตลับเมตรให้ละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักเหล็กเสริมให้ละเอียดถึง 1 กรัม กำหนดความยาวพิกัดของเหล็กเสริมเท่ากับ 5D โดยใช้เหล็กสกัดตอกแสดงจุดไว้ นำเหล็กทดสอบใส่ในเครื่องทดสอบ แล้วยึดเหล็กเสริมด้วยอุปกรณ์สำหรับจับชิ้นงานให้แน่น โดยให้ตำแหน่งของความยาวพิกัดอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างอุปกรณ์ดังรูปที่ 6-9 ติดตั้ง Extensometer เพื่อวัดการยืดตัวของเหล็กเสริม ควบคุมอัตราการเพิ่มของแรงดึงประมาณ 300 ksc/วินาที พร้อมทั้งบันทึกการยืดตัวของเหล็กเสริมทุก ๆ แรงดึง 250 กิโลกรัม หรืออาจใช้การแบ่งค่าเองให้ได้ประมาณ 15-20 ค่าในช่วงพิกัดยึดหยุนของเหล็กเสริม ดำเนินการทดสอบจนกระทั่งเหล็กเสริมขาด ถอดชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบแล้วสังเกตรูปลักษณะความเสียหายของชิ้นทดสอบ นำชิ้นทดสอบที่ขาด 2 ท่อนมาต่อกันให้เหมือนเดิม วัดระยะความยาวพิกัดด้วยเวอร์เนียร์ เพื่อคำนวณค่ายืดตัวทั้งหมด



รูปที่ 6-9 การจัดตำแหน่งความยาวพิกัดของเหล็กเสริมกึ่งกลางอุปกรณ์ยึดจับ





รูปที่ 6-10 ชิ้นตัวอย่างเหล็กเสริมหลังการทดสอบ

[4.4.2] ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

ลำดับ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	รหัสทดสอบ	DB/RB	Diameter (mm)	Yield Stress (MPa)	Ultimate Stress (MPa)
1	P1	PR	P1-PR1-1	RB	25	367	430
2	P1	PR	P1-PR2-1	RB	9	434	475
3	P2	PR	P2-PR2-1	RB	25	378	471
4	P2	BC	P2-BC2-1	RB	25	415	482
5	P4	PW	P4-1B	RB	12	317	492
6	P4	PW	P4-2B	RB	12	342	507
7	P4	PW	P4-3B	RB	12	313	498
8	P4	PW	P4-4B	RB	12	338	500
9	P5	PR	P5-PR2-1	RB	20	374	411
10	P5	BC	P5-BC2-1	RB	9	480	648
11	P6	PR	P6-PR2-1	RB	20	367	419
12	P7	PR	P7-PR1-1	RB	25	378	425
13	P7	PR	P7-PR2-1	RB	9	401	490

ลำดับ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	รหัสทดสอบ	DB/RB	Diameter (mm)	Yield Stress (MPa)	Ultimate Stress (MPa)
14	P7	CB	P7-CB2-1	RB	20	373	405
15	S2	SW1	S2SW1-1	RB	6	299	425
16	S2	SW1	S2-SW1-2	RB	6	337	449
17	S2	SW2	S2-SW2-1	RB	6	363	421
18	S2	SW2	S2-SW2-2	RB	6	350	464
19	S2	GD2	S2-GD2-3	RB	9	367	503
20	S2	GD3	S2-GD3-1	RB	9	422	557
21	S3	SW1	S3-SW1-1	RB	9	387	467
22	S3	SW2	S3-SW2-1	RB	6	289	458
23	S3	GD3	S3-GD3-2	RB	9	408	545
24	S4	SW1	S4-SW1-1	RB	12	429	583
25	S4	SW2	S4-SW2-1	RB	12	438	535
26	S4	GD2	S4-GD2-3	RB	12	375	557
27	S4	FB1	S4-FB1-1	RB	6	393	404
28	S4	FB2	S4-FB2-2	RB	9	456	610
29	S5	SW1	S5-SW1-1	RB	6	340	389
30	S5	SW2	S5-SW2-1	RB	6	336	446
31	S5	FB2	S5-FB2-2	RB	6	355	474
32	S6	SW1	S6-SW1-1	RB	6	315	464
33	S6	SW2	S6-SW2-1	RB	6	336	442
34	S6	FB1	S6-FB1-2	RB	6	372	431
35	S6	FB2	S6-FB2-1	RB	6	372	478
36	S6	FB2	S6-FB2-3	RB	25	351	430
37	S7	SW1	S7-SW1-1	RB	6	396	396
38	S7	SW2	S7-SW2-1	RB	6	347	425
39	S7	GD2	S7-GD2-3	RB	9	367	481
40	S7	GD3	S7-GD3-1	RB	9	416	544

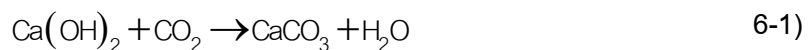
หมายเหตุ รหัสชิ้นส่วน SW = Sidewalk, GD = Girder, FB = Floor beam, CB = Cap beam, BC = Bracing,
PW = Pier Wall, PR = Pier, DK = Deck

[6.5] การทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน

[6.5.1] วิธีการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน

การทดสอบหาความลึกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Carbonation Depth) ในคอนกรีต เป็นการตรวจสอบระดับการเสื่อมสภาพของผิวคอนกรีตที่ใช้ป้องกันสนิมให้กับเหล็กเสริม โดยการเกิดคาร์บอนเนชันในเนื้อคอนกรีตเป็นกระบวนการเปลี่ยนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนเนต โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คอนกรีตในสภาวะเริ่มต้นจะเป็นสารประกอบของซีเมนต์ไฮเดรต จำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งมีสภาวะเป็นด่าง ค่า pH ประมาณ 12 ซึ่งเหล็กเสริมในสภาวะที่เป็นด่างสูงจะไม่เกิดสนิม แต่เมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานาน ๆ ผิวคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ขึ้น ดังสมการ



กระบวนการทางเคมีดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศและความชื้นโดยตรง และจะค่อย ๆ เกิดลึกลงไปเรื่อย ๆ ตามปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นที่ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ผลของคาร์บอนเนชันจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในคอนกรีตถูกใช้ไปในปฏิกิริยา ดังกล่าว หากความลึกของคาร์บอนเนชันเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริม จะทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลง ส่งผลให้เหล็กเสริมสามารถเกิดสนิมขึ้นได้ ซึ่งการตรวจสอบความลึกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันสามารถทำได้ ดังนี้

- สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) 1% ในแอลกอฮอล์



รูปที่ 6-11 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

• วิธีการทดสอบ

- ทำการเจาะเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตดังรูปที่ 6-12 (ก) ที่ระดับความลึก 1 ซม., 2 ซม., 3 ซม., 4 ซม., และ 5 ซม. จากผิวคอนกรีต โดยหลีกเลี่ยงการเจาะถูกเหล็กเสริม
- นำผงตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความลึกต่าง ๆ มาทดสอบด้วยสารละลาย Phenolphthalein 1% ในแอลกอฮอล์ ที่ห้องปฏิบัติการ หากผงคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดง แสดงว่าคอนกรีตยังคงสภาพความเป็นต่างอยู่ แต่หากไม่เปลี่ยนสีหรือเปลี่ยนเป็นสีจางๆ แสดงว่า คอนกรีตมีค่าความเป็นต่างลดลง หรือเกิดการบอเนชันขึ้นในระดับความลึกนี้ดังรูปที่ 6-12 (ข)



(ก) การเจาะเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต



(ข) การตรวจสอบคาร์บอนเนชัน

รูปที่ 6-12 การทดสอบความลึกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน



[6.5.2] ผลการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน

โครงการนี้ได้ทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชันในช่วงสะพาน (Span) S1 – S8 และตอม่อสะพาน (Pier) P1 – P7 รวมทั้งสิ้น 203 โดยกระจายการทดสอบให้กับชิ้นส่วนประเภทต่าง ๆ ประกอบด้วย พื้นสะพาน (Deck, DK) ทางเท้า (Sidewalk, SW) คานหลัก (Girder, GD) คานรองพื้นสะพาน (Floor beam, FB) คานรัดหัวเสา (Cap beam, CB) คานยึดเสา (Bracing, BC) กำแพงตอม่อ (Pier Wall, PW) เสาตอม่อ (Pier, PR) ตำแหน่งตารางที่ 6-4 แสดงผลการทดสอบหาค่าความลึกการเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation Depth)

ตารางที่ 6-4 ผลการทดสอบหาค่าความลึกปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

ลำดับ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	รหัสทดสอบ	ระดับความลึกที่ทดสอบปฏิกิริยา คาร์บอนเนชัน					ความลึกการ พบคาร์บอน เนชัน (cm)
				1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
1	S2	SW1	S2-LT-1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
2	S2	SW1	S2-LT-2	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
3	S2	SW2	S2-RT-1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
4	S2	SW2	S2-RT-2	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
5	S2	DK	DK 1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
6	S2	DK	DK 2	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
7	S2	DK	DK 3	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
8	S2	DK	DK 4	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
9	S2	DK	DK 5	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
10	S2	DK	DK 6	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
11	S2	DK	DK 7	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
12	S2	DK	DK 8	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
13	S2	DK	DK 9	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
14	S2	DK	DK 10	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
15	S2	DK	DK 11	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
16	S2	DK	DK 12	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
17	S2	GD	GD 1-1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
18	S2	GD	GD 1-2	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
19	S2	GD	GD 2-1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
20	S2	GD	GD 2-2	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
21	S2	FB	FB 1-1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0

ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รหัสทดสอบ	ระดับความลึกที่ทดสอบปฏิกิริยา คาร์บอนเนชั่น					ความลึกการ พบคาร์บอน เนชั่น (cm)
				1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
22	S2	FB	FB 1-2	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
23	S2	FB	FB 3-1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
24	S2	FB	FB 3-2	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
25	S2	BC	BC 1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
26	S2	BC	BC 2	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
27	S3	SW1	S3-LT-1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
28	S3	SW1	S3-LT-2	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
29	S3	SW2	S3-RT-1	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
30	S3	SW2	S3-RT-2	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
31	S3	DK	DK 1	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
32	S3	DK	DK 2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
33	S3	DK	DK 3	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
34	S3	DK	DK 4	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
35	S3	DK	DK 5	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
36	S3	DK	DK 6	ไม่พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
37	S3	DK	DK 7	ไม่พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
38	S3	DK	DK 8	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
39	S3	GD	GD 1-1	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
40	S3	GD	GD 1-2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
41	S3	GD	GD 2-1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
42	S3	GD	GD 3-1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
43	S3	FB	FB 1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
44	S3	FB	FB 2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
45	S4	SW1	S4-LT-1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
46	S4	SW1	S4-LT-2	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
47	S4	SW2	S4-RT-1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
48	S4	SW2	S4-RT-2	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
49	S4	SW2	S4-RT-3	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
50	S4	DK	DK 1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
51	S4	DK	DK 2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
52	S4	DK	DK 3	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2



ลำดับ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	รหัสทดสอบ	ระดับความลึกที่ทดสอบปฏิกิริยา คาร์บอนเนชั่น					ความลึกการ พบคาร์บอน เนชั่น (cm)
				1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
53	S4	DK	DK 4	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
54	S4	DK	DK 5	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
55	S4	DK	DK 6	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
56	S4	DK	DK 7	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
57	S4	DK	DK 8	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
58	S4	DK	DK 9	ไม่พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
59	S4	DK	DK 10	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
60	S4	DK	DK 11	ไม่พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
61	S4	DK	DK 12	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
62	S4	DK	DK 13	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
63	S4	DK	DK 14	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
64	S4	DK	DK 15	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
65	S4	DK	DK 16	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
66	S4	GD	GD 1-1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
67	S4	GD	GD 1-2	พบ	ไม่พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
68	S4	GD	GD 1-3	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
69	S4	GD	GD 2-1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
70	S4	GD	GD 2-2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
71	S4	GD	GD 2-3	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
72	S4	FB	FB 1-1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
73	S4	FB	FB 1-2	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
74	S4	FB	FB 2-1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
75	S4	FB	FB 2-2	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
76	S4	FB	FB 3-1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
77	S4	FB	FB 3-2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
78	S5	SW1	S5-LT-1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
79	S5	SW2	S5-RT-1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
80	S5	DK	DK 1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
81	S5	DK	DK 2	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
82	S5	DK	DK 3	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
83	S5	DK	DK 4	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3

ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รหัสทดสอบ	ระดับความลึกที่ทดสอบปฏิกิริยา คาร์บอนเนชั่น					ความลึกการ พบคาร์บอน เนชั่น (cm)
				1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
84	S5	DK	DK 5	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
85	S5	DK	DK 6	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
86	S5	DK	DK 7	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
87	S5	DK	DK 8	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
88	S5	DK	DK 9	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
89	S5	DK	DK 10	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
90	S5	GD	GD 1-1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
91	S5	GD	GD 1-2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
92	S5	GD	GD 2-1	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
93	S5	GD	GD 2-2	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
94	S5	FB	FB 2-1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
95	S5	FB	FB 2-2	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
96	S5	FB	FB 2-3	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
97	S5	FB	FB 2-4	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
98	S5	BC	BC-1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
99	S5	BC	BC-2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
100	S6	SW1	S6-LT-1	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
101	S6	SW2	S6-RT-1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
102	S6	DK	DK 1	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
103	S6	DK	DK 2	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
104	S6	DK	DK 3	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
105	S6	DK	DK 4	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
106	S6	DK	DK 5	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
107	S6	DK	DK 6	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
108	S6	DK	DK 7	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
109	S6	DK	DK 8	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
110	S6	DK	DK 9	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
111	S6	DK	DK 10	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
112	S6	GD	GD 1-1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
113	S6	GD	GD 1-2	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
114	S6	GD	GD 2-1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4



ลำดับ	บริเวณ	ชิ้นส่วน	รหัสทดสอบ	ระดับความลึกที่ทดสอบปฏิกิริยา คาร์บอนเนชั่น					ความลึกการ พบคาร์บอน เนชั่น (cm)
				1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
115	S6	GD	GD 2-2	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
116	S6	FB	FB 1-1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
117	S6	FB	FB 1-2	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
118	S6	FB	FB 2-1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
119	S6	FB	FB 2-2	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
120	S7	SW1	S7-1 LT	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
121	S7	SW1	S7-2 LT	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
122	S7	SW2	S7-1 RT	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
123	S7	SW2	S7-2 RT	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
124	S7	DK	DK 1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
125	S7	DK	DK 2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
126	S7	DK	DK 3	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
127	S7	DK	DK 4	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
128	S7	DK	DK 5	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
129	S7	DK	DK 6	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
130	S7	DK	DK 7	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
131	S7	DK	DK 8	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
132	S7	DK	DK 9	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
133	S7	DK	DK 10	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
134	S7	DK	DK 11	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
135	S7	DK	DK 12	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
136	S7	DK	DK 13	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
137	S7	DK	DK 14	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
138	S7	GD	GD 1-1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
139	S7	GD	GD 1-2	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
140	S7	GD	GD 2-1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
141	S7	GD	GD 2-2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
142	S7	FB	FB 1-1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
143	S7	FB	FB 1-2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
144	S7	FB	FB 2-1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
145	S7	FB	FB 2-2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4

ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รหัสทดสอบ	ระดับความลึกที่ทดสอบปฏิกิริยา คาร์บอนเนชั่น					ความลึกการ พบคาร์บอน เนชั่น (cm)
				1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
146	P1	PR	P1-1 F1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
147	P1	PR	P1-2 F1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
148	P1	PR	P1-1 F2	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
149	P1	PR	P1-2 F2	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
150	P1	PR	P1-1 F3	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
151	P1	PR	P1-2 F3	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
152	P1	CB	P1-CB-F1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
153	P1	CB	P1-CB-F2	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
154	P2	BC	P2-BC 1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
155	P2	BC	P2-BC 2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
156	P2	CB	P2-CB-F1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
157	P2	CB	P2-CB-F2	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
158	P2	PR	P2-1 F1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
159	P2	PR	P2-1 R1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
160	P2	PR	R2-2 F2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
161	P2	PR	P2-2 F1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
162	P2	PR	P2-3 R1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
163	P2	PR	R2-3 F1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
164	P3	PW	P3-R1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
165	P3	PW	P3-R2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
166	P3	PW	P3-R3	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
167	P3	PW	P3-R4	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
168	P3	PW	P3-R5	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
169	P3	PW	P3-R6	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
170	P3	PW	P3-R7	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
171	P3	PW	P3-R8	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
172	P4	PW	P4-F1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
173	P4	PW	P4-F2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
174	P4	PW	P4-F3	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
175	P4	PW	P4-F4	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
176	P4	PW	P4-F5	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5



ลำดับ	บริเวณ	ชั้นส่วน	รหัสทดสอบ	ระดับความลึกที่ทดสอบปฏิกิริยา คาร์บอนเนชั่น					ความลึกการ พบคาร์บอน เนชั่น (cm)
				1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	
177	P4	PW	P4-F6	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	5
178	P4	PW	P4-F7	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
179	P4	PW	P4-F8	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
180	P5	CB	P5-CB-R1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
181	P5	CB	P5-CB-R2	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
182	P5	PR	P5-1 F1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
183	P5	PR	P5-1 R1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
184	P5	PR	P5-2 F1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
185	P5	PR	P5-2 R1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
186	P5	PR	P5-3 F1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
187	P5	PR	P3-3 R1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
188	P6	CB	P6-CB-R1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	5
189	P6	CB	P6-CB-R2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
190	P6	PR	P5-1 F1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
191	P6	PR	P5-1 R1	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	1
192	P6	PR	P5-2 F1	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
193	P6	PR	P5-2 R1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
194	P6	PR	P5-3 F1	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
195	P6	PR	P3-3 R1	ไม่พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
196	P7	CB	P7-CB-R1	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0
197	P7	CB	P7-CB-R2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
198	P7	PR	P7-1 R2	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	2
199	P7	PR	P7-1 R3	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
200	P7	PR	P7-2 R1	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
201	P7	PR	P7-2 R2	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	4
202	P7	PR	P7-3 R1	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3
203	P7	PR	P7-3 R2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	3

[6.6] สรุปผลทดสอบวัสดุสะพานปรีดี-ช้าง

ตารางที่ 6-5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแยกตามประเภทชิ้นส่วน ซึ่งพบว่าชิ้นส่วนทางเท้า (SW), คานตามยาว (GD), คานรองพื้นสะพาน (FB), คานรัดหัวเสา (CB), ค้ำยันเสาตอม่อ (BC) กำแพงตอม่อ (PW) และเสาตอม่อ (PR) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.0, 16.2, 16.7, 18.1, 17.5, 15.2 และ 16.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งนับว่าค่อนข้างต่ำมาก ทั้งนี้อาจเกิดจากคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างสะพานผ่านการใช้งานมานานกว่า 77 ปี ยกเว้นทางเท้าที่อาจมีการก่อสร้างใหม่

ตารางที่ 6-5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

Member	N	Avg (MPa)	SD (MPa)
Side Walk (SW)	33	19.0	5.1
Girder (GD)	12	16.2	3.9
Floor beam (FB)	13	16.7	6.2
Cap beam (CB)	2	18.1	4.2
Bracing (BC)	4	17.5	4.1
Pier Wall (PW)	4	15.2	4.0
Pier (PR)	14	16.5	4.7

ตารางที่ 6-6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตแยกตามประเภทชิ้นส่วน ซึ่งพบว่าชิ้นส่วนทางเท้า (SW), คานตามยาว (GD), คานรองพื้นสะพาน (FB), คานรัดหัวเสา (CB), ค้ำยันเสาตอม่อ (BC) กำแพงตอม่อ (PW) และเสาตอม่อ (PR) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.20, 3.04, 2.91, 3.30, 3.05, 3.56 และ 2.98 MPa ตามลำดับ โดยทั่วไปการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะไม่พิจารณากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต โดยการออกแบบจะใช้เหล็กเสริมในการรับแรงดึงทั้งหมด ดังนั้นจึงไม่มีการกำหนดเกณฑ์ตรวจวัดสำหรับค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

ตารางที่ 6-6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

Member	N	Avg (MPa)	SD (MPa)
Side Walk (SW)	34	3.20	0.67
Girder (GD)	9	3.04	0.45
Floor beam (FB)	15	2.91	0.46
Capbeam (CB)	1	3.30	-
Bacing (BC)	4	3.05	0.62
Pier Wall (PW)	6	3.56	0.42
Pier (PR)	11	2.98	0.52



ตารางที่ 6-7 แสดงผลการทดสอบค่าความลึกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันแยกตามประเภทชิ้นส่วน ซึ่งพบว่าชิ้นส่วนทางเท้า (SW) คานตามยาว (GD) คานรองพื้นสะพาน (FB) คานรัดหัวเสา (CB) ค้ำยันเสาตอม่อ (BC) กำแพงตอม่อ (PW) เสาตอม่อ (PR) และพื้นสะพาน (Deck) มีความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันสูงสุดของแต่ละตำแหน่งเฉลี่ยเท่ากับ 1.19, 3.00, 3.17, 1.50, 2.50, 3.75, 2.40 และ 2.77 ตามลำดับ ถ้าคาร์บอนเนชันเกิดลึกถึงชั้นเหล็กเสริม เหล็กเสริมสามารถเกิดสนิมได้ ซึ่งชิ้นส่วนแต่ละประเภทอาจมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมไม่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาความแปรปรวนของค่าที่ตรวจวัดได้ ชิ้นส่วนทางเท้า (SW) คานตามยาว (GD) คานรองพื้นสะพาน (FB) คานรัดหัวเสา (CB) ค้ำยันเสาตอม่อ (BC) กำแพงตอม่อ (PW) เสาตอม่อ (PR) และพื้นสะพาน (Deck) มีโอกาสที่ความลึกคาร์บอนเนชันจะเกิดลึกถึงชั้นเหล็กเสริมเท่ากับ 2.19, 69.80, 72.75, 3.77, 1.16, 27.53, 13.00 และ 49.23% ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าปัจจุบัน ชิ้นส่วนคานตามยาว (GD) และคานรองพื้นสะพาน (FB) มีโอกาสจะเกิดสนิมได้มากที่สุด (70% และ 73%) สอดคล้องกับการสำรวจความเสียหาย ซึ่งพบการหลุดล่อนของคอนกรีตจากเหล็กเสริมเป็นสนิมเป็นจำนวนมากบริเวณ คานตามยาว และ คานรองพื้นสะพาน ในส่วนของพื้นสะพาน (Deck) มีโอกาสจะเกิดสนิม (49%) และมีพื้นที่ผิวมากกว่าชิ้นส่วนอื่นจึงมีโอกาที่เหล็กเสริมจะเป็นสนิมได้มาก

ตารางที่ 6-7 ผลทดสอบความลึกการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

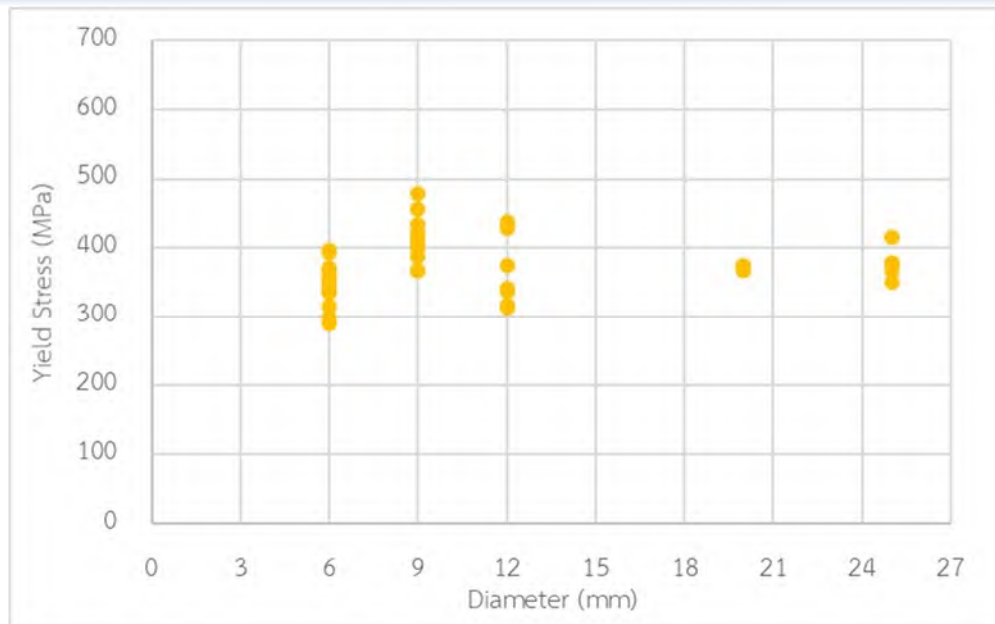
Member	N	Avg (cm)	SD (cm)	Covering (cm)	Prob (depth > field covering) (%)
				Field (GPR)	
Side Walk (SW)	21	1.19	0.98	3.3	2.19%
Girder (GD)	26	3.00	1.52	2.2	69.80%
Floor Beam (FB)	24	3.17	1.74	2.1	72.75%
Cap beam (CB)	10	1.50	1.84	5.2	3.77%
Bracing (BC)	6	2.50	0.84	5.2	1.16%
Pier Wall (PW)	16	3.75	1.06	4.4	27.53%
Pier (PR)	30	2.40	1.57	4.2	13.00%
Deck (DK)	70	2.77	1.48	2.8	49.23%

ตารางที่ 6-8 แสดงผลการทดสอบเหล็กกล่ม (RB) ในแบบก่อสร้างสะพานปรีดี-ช้าง ไม่พบข้อมูลการออกแบบสะพาน ดังนั้นจึงสมมุติว่าการใช้เหล็กเสริมเหมือนสะพานรุ่นเก่าของกรมทางหลวง โดยที่เหล็กกล่มใช้เกรด SD24 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (Yield Tensile Strength) ไม่น้อยกว่า 240 MPa ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลแต่ละกลุ่มมาวิเคราะห์ ผลการทดสอบเหล็กกล่มจำนวน 40 ตัวอย่าง พบว่ามีค่าเฉลี่ยความเค้นดึงที่จุดครากเท่ากับ 372 MPa ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 43 MPa และโอกาสที่เหล็กกล่มจะมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากต่ำกว่า 240 MPa มีอยู่ 0.18% แสดงว่าปัจจุบันเหล็กกล่มจำนวนน้อยที่กำลังต่ำกว่ามาตรฐาน รูปที่ 6-13 และ รูปที่ 6-14 แสดงลักษณะการกระจายตัวของผลทดสอบเหล็กกล่ม

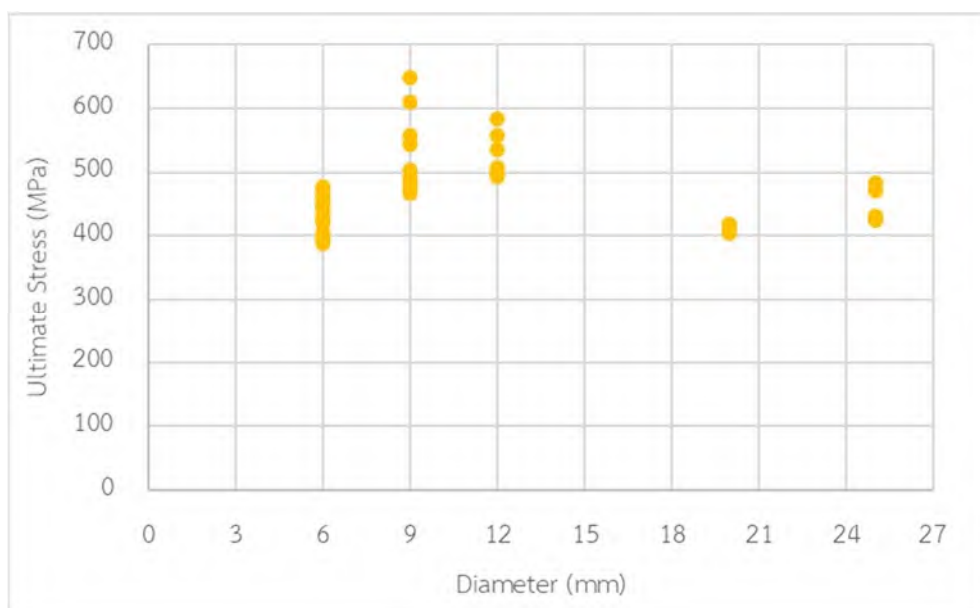
ตารางที่ 6-8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

Member	Yield Tensile Strength (MPa)				Ultimate Tensile Strength (MPa)		
	N	Avg	SD	Prob (fsy < 240 MPa) (%)	N	Avg	SD
Sidewalk (SW)	14	354	44	1.15%	14	455	51
Girder (GD)	6	392	26	0.10%	6	531	32
Floor beam (FB)	6	383	39	0.71%	6	471	74
Capbeam (CB)	1	373	-	-	1	405	-
Bacing (BC)	2	447	46	6.91%	2	565	117
Pier Wall (PW)	11	377	45	0.63%	11	475	62
All	40	372	43	0.18%	40	476	60





รูปที่ 6-13 กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดตรวจ (Yield Tensile Strength, MPa)



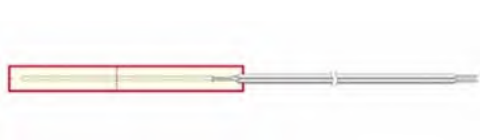
รูปที่ 6-14 กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดประลัย (Ultimate Tensile Strength, MPa)

บทที่ 7 การตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน

การตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุก (Bridge Load Test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกรูปแบบต่าง ๆ เพื่อนำผลตอบสนองของโครงสร้าง (Structural Response) ที่ได้ไปใช้ปรับปรุงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสะพานให้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของสะพานมากที่สุด และใช้แบบจำลองที่ปรับแก้แล้วในการศึกษาพฤติกรรมด้านต่าง ๆ ที่สนใจ และใช้วิเคราะห์หาแรงกระทำภายในโครงสร้างสำหรับใช้ออกแบบเสริมกำลังสะพาน

[7.1] อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวคอนกรีต (Strain Gauge for Concrete) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวคอนกรีตจากการยืดหรือหดตัวของโครงสร้างสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ณ ตำแหน่งที่กำหนด
- 2) อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวเหล็ก (Strain Gauge for Steel) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กจากการยืดหรือหดตัวของโครงสร้างสะพานเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ณ ตำแหน่งที่กำหนด
- 3) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการรับน้ำหนักบรรทุกหรือผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยจะใช้ในการวัดค่าการแอ่นตัวของคานพื้นและคานหลักของสะพาน
- 4) อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหวของโครงสร้างสะพาน เพื่อใช้วิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ รูปแบบโหมดการสั่นไหว อัตราส่วนความหน่วง และแฟคเตอร์แรงกระทำ
- 5) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Data Acquisition) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้รวบรวมสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์
- 6) อุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบพกพา (Computer Notebook) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณและบันทึกผล



(ก) อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวคอนกรีต
(Strain Gauge for Concrete)



(ข) อุปกรณ์วัดความเครียดบนผิวเหล็ก
(Strain Gauge for Steel)



(ค) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่
(Displacement Transducer)



(ง) อุปกรณ์วัดความเร่งจากการสั่นไหว
(Accelerometer)



(จ) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Data Acquisition)



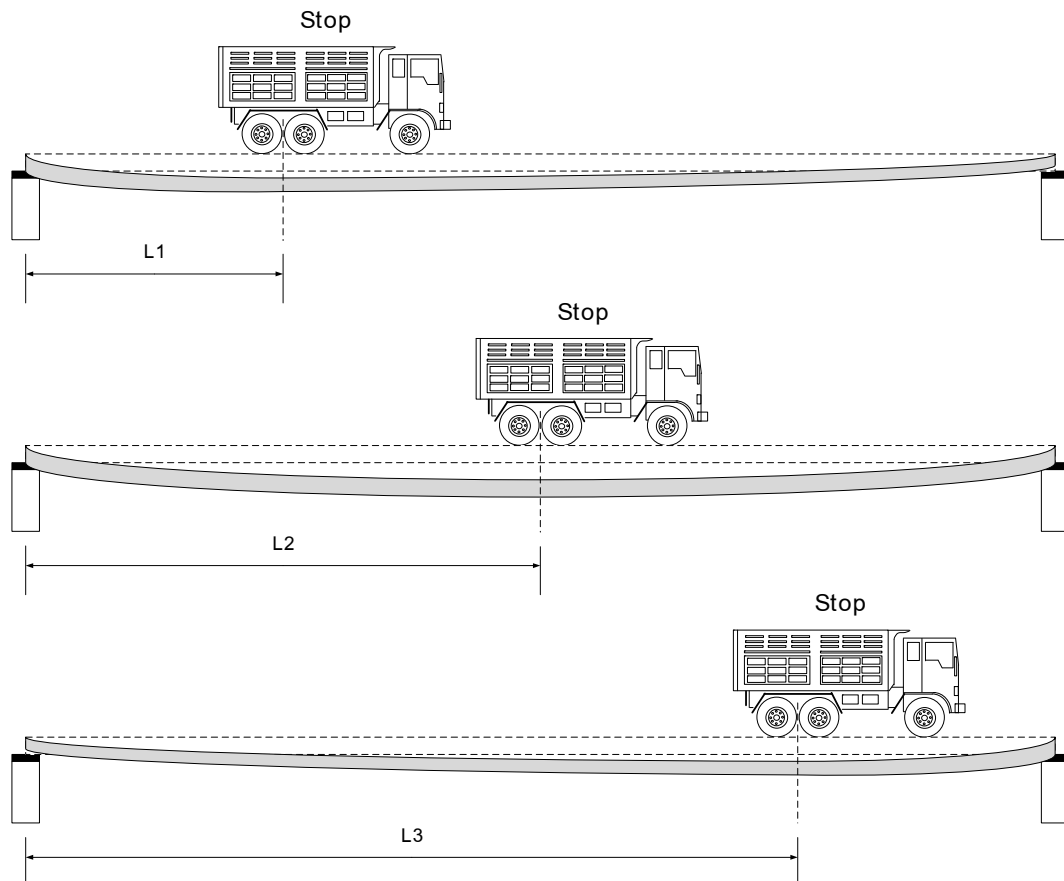
(ฉ) อุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบพกพา
(Computer Notebook)

รูปที่ 7-1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสะพาน

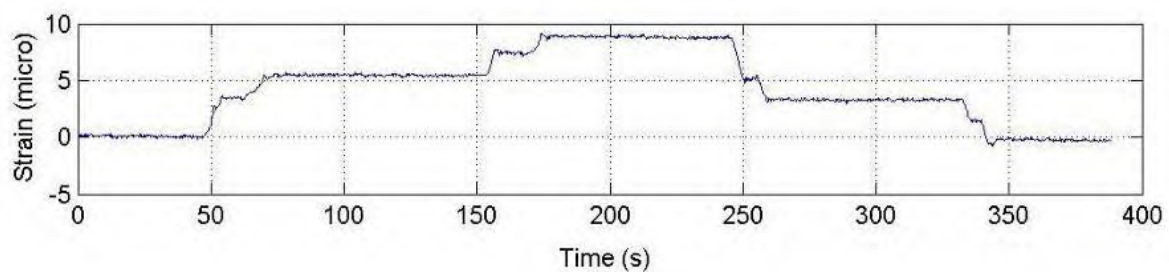
[7.2] การทดสอบสะพานแบบสถิต (Static Load Test)

การทดสอบสะพานแบบสถิต (Static Load Test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักและตำแหน่งของรถบรรทุกที่กระทำต่อสะพานแบบสถิต ในการทดสอบจะนำรถบรรทุกมาจอดนิ่งอยู่กับที่ โดยให้ระยะกึ่งกลางของชุดเพลาลังตรงกับตำแหน่งต่าง ๆ ที่ต้องการจะทดสอบดังรูปที่ 7-2 ในแต่ละตำแหน่งที่ทำการหยุดรถ จะบันทึกผลการตอบสนองของโครงสร้าง เช่น ค่าความเครียด (Strain) ค่าการแอ่นตัว (Deflection) ดังแสดงในรูปที่ 7-3 และรูปที่ 7-4 ตามลำดับ โดยจะนำข้อมูลจากการตรวจวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ นี้มาวิเคราะห์และแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ต่าง ๆ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับตำแหน่งของรถบรรทุก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวแนวตั้งกับตำแหน่งของรถบรรทุก เป็นต้น นอกจากนี้ผลการตอบสนองที่ได้จากตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำกับสะพาน สามารถนำไปใช้ในการปรับแก้แบบจำลองของสะพานให้มีพฤติกรรมสอดคล้องกับโครงสร้างจริงมากที่สุด

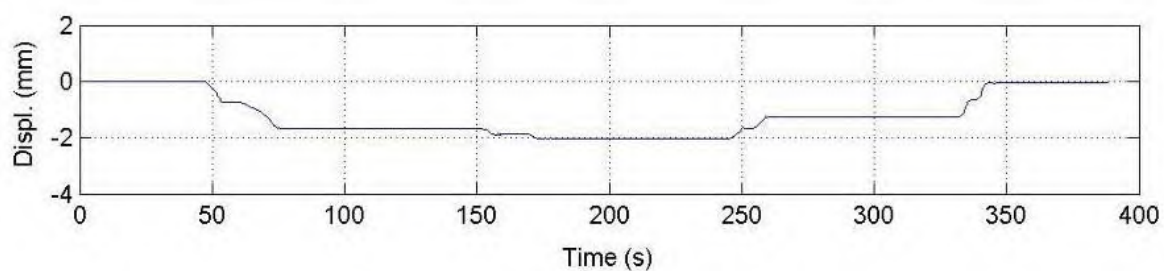




รูปที่ 7-2 การทดสอบสะพานแบบสถิต โดยการให้รถบรรทุกจอดที่ตำแหน่งต่างๆ บนสะพาน



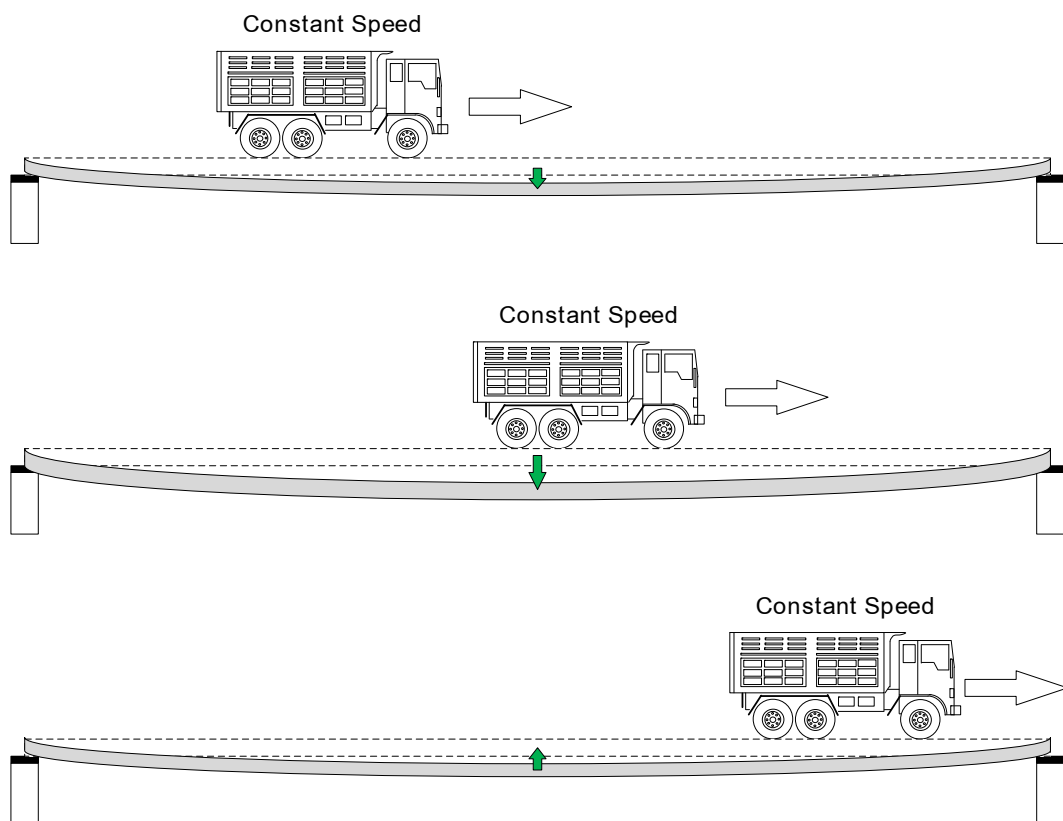
รูปที่ 7-3 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าความเครียดจาก Strain Gauge



รูปที่ 7-4 ตัวอย่างผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่ได้จาก Displacement Transducer

[7.3] การทดสอบสะพานแบบพลวัต (Dynamic Load Test)

การทดสอบสะพานแบบพลวัต (Dynamic Load Test) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักเชิงพลวัตของโครงสร้างสะพานเนื่องจากน้ำหนักและความเร็วของรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพาน ในการทดสอบจะนำรถบรรทุกมาวิ่งผ่านสะพานที่ความเร็วต่าง ๆ กัน ในแต่ละความเร็วที่วิ่งบนสะพาน จะทำการตรวจวัดการสั่นไหวของโครงสร้างสะพาน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ (Dynamic Properties) ของสะพานด้านต่าง ๆ เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) รูปร่างการสั่นไหวในโหมดต่าง ๆ (Mode Shape) อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratios) และค่าแฟคเตอร์แรงกระแทก (Impact Factor)



รูปที่ 7-5 การทดสอบแบบพลวัตโดยให้รถบรรทุกวิ่งด้วยความเร็วคงที่บนสะพาน

[7.3.1] แฟคเตอร์แรงกระแทก (Impact Factor)

เป็นค่าแฟคเตอร์ที่ใช้คูณกับแรงกระทำของรถบรรทุกที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานแบบสถิต เพื่อพิจารณาผลกระทบจากแรงกระแทกและการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานเมื่อมีรถบรรทุกวิ่งผ่าน ค่าแฟคเตอร์แรงกระแทกสามารถคำนวณได้โดยสมการ (7-1)

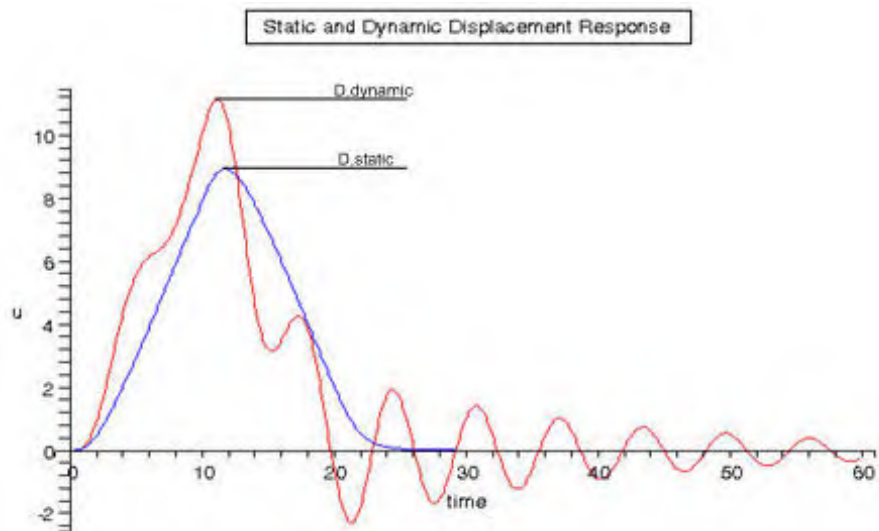
$$I = \frac{R_{Dyn}}{R_{Sta}} \quad (7-1)$$

โดยที่ R_{Dyn} = ค่าสูงสุดของผลการตอบสนองแบบพลวัต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา



R_{Sta} = ค่าสูงสุดของผลการตอบสนองแบบสถิต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

ในกรณีที่ไม่สามารถตรวจวัดแบบสถิตได้ จะทำการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดแบบ Dynamic Load Test มาผ่านกระบวนการกรองความถี่แบบ Low Pass Filter เพื่อแยกส่วน Pseudo-Static ออกมาจาก Dynamic Response โดยส่วนที่เป็น Pseudo-Static นี้จะเปรียบเสมือนผลการตอบสนองของโครงสร้างแบบสถิต ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ซึ่งไม่รวมผลกระทบจากการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยจะใช้ค่าสูงสุดของ Pseudo-Static สำหรับค่า R_{Sta} เพื่อใช้คำนวณในสมการ

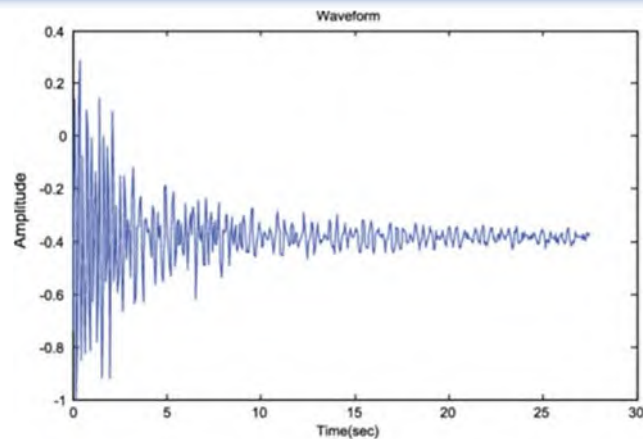


รูปที่ 7-6 ค่าการตอบสนองของโครงสร้างแบบ Pseudo Static และแบบ Dynamic

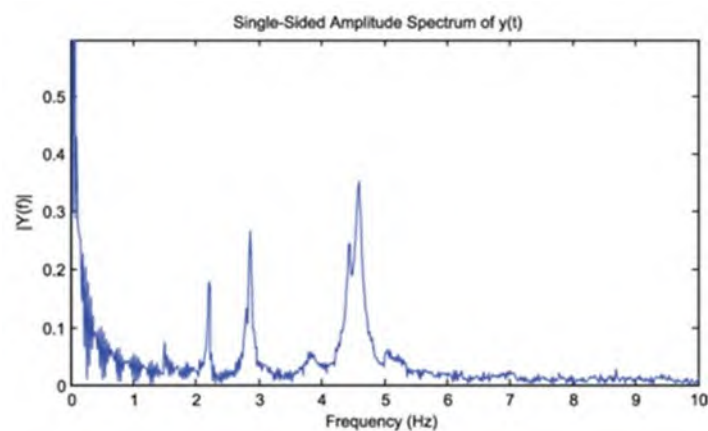
[7.3.2] ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

ค่าความถี่ธรรมชาติเป็นคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพาน สามารถตรวจวัดได้จากการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้าง (Free Vibration) ถ้าสะพานได้รับแรงกระทำจากภายนอกที่มีความถี่ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ สะพานจะมีการตอบสนองแบบสั่นพ้อง (Resonance) โดยระดับการตอบสนองจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งวิบัติ

การวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ สามารถทำได้โดยนำข้อมูลการสั่นไหวที่บันทึกในรูปแบบ Time-History (เช่น ประวัติข้อมูลความเร่ง) มาวิเคราะห์ดังตัวอย่างในรูปที่ 7-7 จากนั้นทำการแปลงข้อมูลด้วยวิธี Fourier Transform ให้อยู่ในรูปของ Frequency Domain สุดท้ายจะพิจารณาค่าความถี่ที่มีขนาดค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สูงสุดเป็นค่าความถี่หลักหรือความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานดังรูปที่ 7-8



รูปที่ 7-7 ตัวอย่างข้อมูลการสั่นไหวในแนวดิ่งแบบ Time History



รูปที่ 7-8 ตัวอย่าง Frequency Domain ของการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพาน

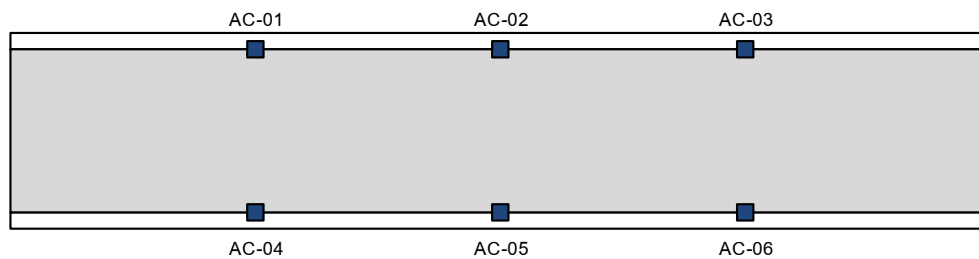
[7.3.3] รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shapes)

รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shapes) เป็นลักษณะจำเพาะของการเสียรูปแบบพลวัตของแต่ละสะพาน โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นได้หลายโหมด แต่โหมดที่สำคัญจะเป็นโหมดแรกๆ (มีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำ) ส่วนโหมดท้ายๆ (ซึ่งมีค่าความถี่สูง) จะเป็นการสั่นสะเทือน หรือ Noise และจะมีความสำคัญน้อยกว่าโหมดแรกๆ

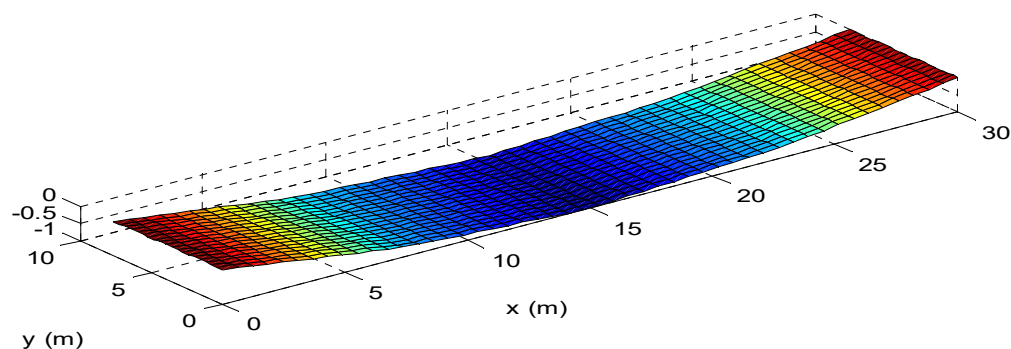
การหารูปร่างการสั่นไหวจำเป็นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ให้กระจายและครอบคลุมช่วงสะพานที่พิจารณา โดยตำแหน่งที่ติดตั้งต้องเป็นตำแหน่งที่อ่อนไหว (Sensitive) ต่อค่าความถี่ธรรมชาติ และควรสามารถสั่นไหวได้หลายโหมด การสร้าง Mode Shape จะสร้างตามค่าความถี่ธรรมชาติที่เลือก โดยใช้ค่า Amplitude ของแต่ละตำแหน่งอุปกรณ์เป็นตัวแทนการพล็อตค่าการแอ่นตัว และใช้ Phase ของ Accelerometer ในการกำหนดทิศทางของการแอ่นตัวว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม โดยตัวอย่างการติดตั้ง Accelerometer และ Mode Shape ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 7-9 หากมีตำแหน่งการติดตั้ง Accelerometer น้อยเกินไป จะไม่สามารถตรวจสอบรูปร่างการสั่นไหวที่เกิดขึ้นได้ แต่การติดตั้ง Accelerometer จำนวนมากเกินไปจะมีค่าทดสอบที่สูง



ดังนั้นโครงการนี้จะใช้ Accelerometer จำนวน 6 ตัว ซึ่งเพียงพอต่อการหา Mode Shape แรก ๆ ของสะพาน เช่น Bending Mode 1 ซึ่งเป็นโหมดที่มีความสำคัญมากของสะพาน



(ก) ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ Accelerometer

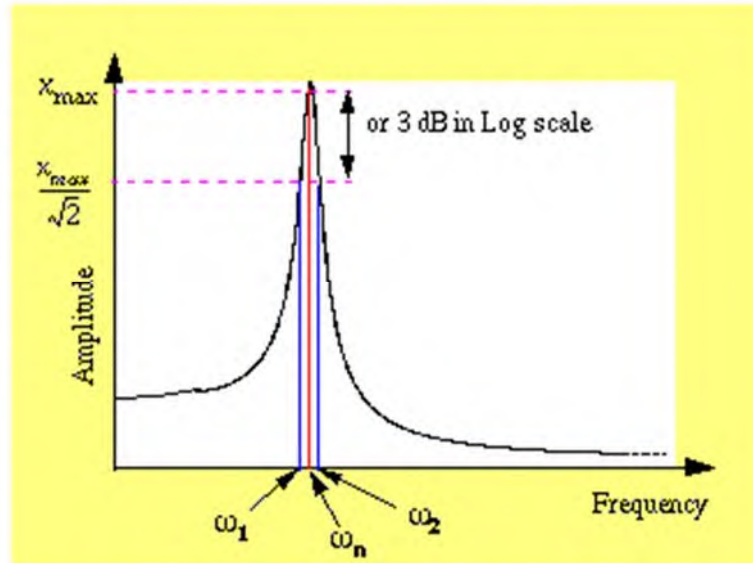


(ข) Mode Shape ของสะพาน

รูปที่ 7-9 ตัวอย่าง Mode Shape ของการสั่นไหวแบบอิสระของโครงสร้างสะพาน

[7.3.4] ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio)

ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างสะพาน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการลดลงของพลังงานการสั่นไหวของโครงสร้างให้กลับมาอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง ถ้าสะพานมีอัตราส่วนความหน่วงสูง เมื่อถ่วงออกจากสะพานแล้ว สะพานจะสั่นไหวแบบอิสระเพียงไม่กี่รอบก็จะกลับมาอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง ในทางกลับกัน ถ้าสะพานที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงต่ำ การสั่นไหวจนกระทั่งหยุดนิ่งจะใช้เวลาาน การหาค่าอัตราส่วนความหน่วงกระทำได้โดย นำข้อมูลการสั่นไหวแบบอิสระ (Free Vibration) มาแปลงให้อยู่ในรูปความถี่ (Frequency Domain) ทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติ และวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความหน่วงด้วยวิธี Half Power Bandwidth ดังรูปที่ 7-10 และสมการที่ (7-2)



รูปที่ 7-10 ตัวอย่างการหาค่า Damping Ratio ด้วยวิธี Half Power Bandwidth

$$\zeta_n = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (7-2)$$

โดยที่

- ζ_n = ค่าอัตราส่วนความหน่วงของโหมดการสั่นไหว n ที่พิจารณา
- ω_n = ค่าความถี่ธรรมชาติของโหมด n
- ω_2 = ค่า Upper frequency ที่ระดับ Amplitude = Half power ($2^{-0.5} = 0.707$)
ของค่า Amplitude ที่ความถี่ธรรมชาติที่พิจารณา ω_n
- ω_1 = ค่า Lower frequency ที่ระดับ Amplitude = Half power ($2^{-0.5} = 0.707$)
ของค่า Amplitude ที่ความถี่ธรรมชาติที่พิจารณา ω_n



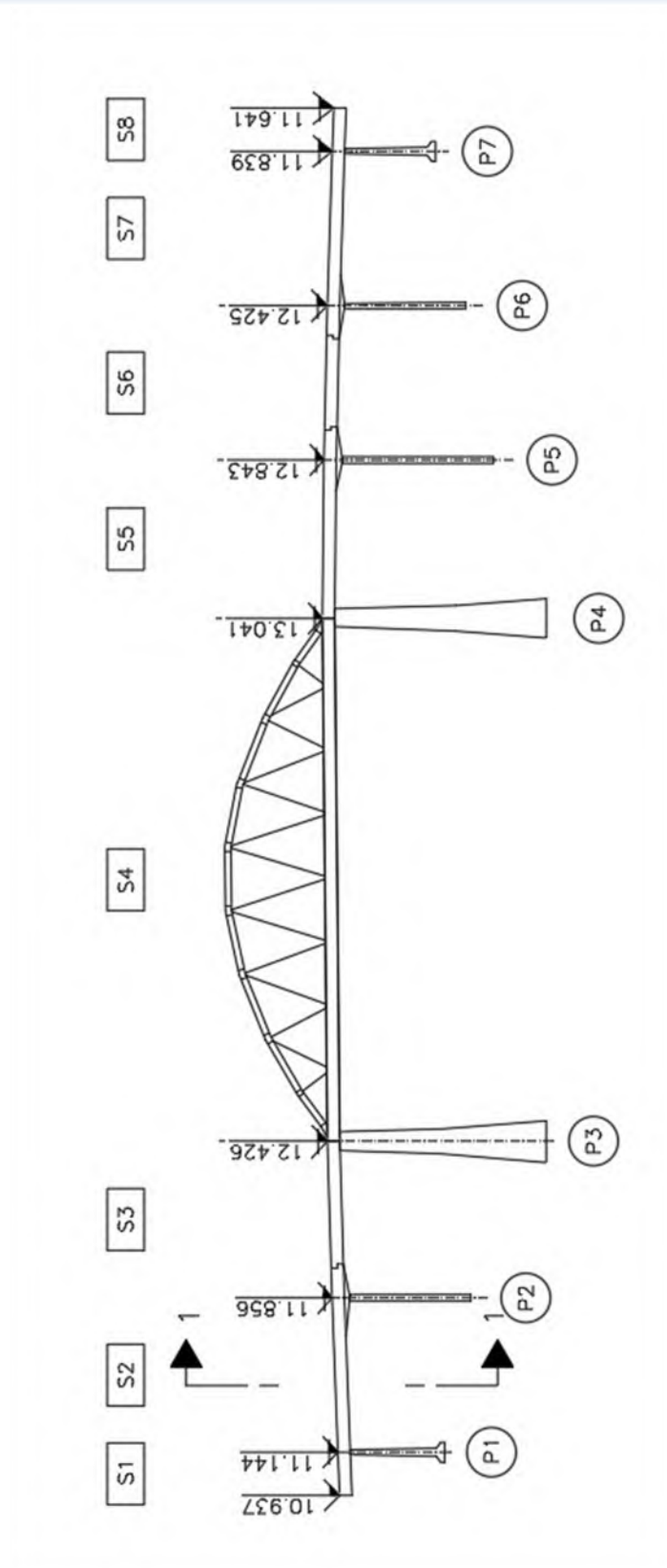
[7.4] ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตและแบบพลวัตประกอบไปด้วยอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ และมีจำนวนดังนี้

- อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนผิวคอนกรีต (Strain Gauge for Concrete) จำนวน 163 ตำแหน่ง (ไม่น้อยกว่าข้อกำหนด TOR ที่ระบุไว้ 160 ตำแหน่ง)
- อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนผิวเหล็ก (Strain Gauge for Steel) จำนวน 322 ตำแหน่ง (ไม่น้อยกว่าข้อกำหนด TOR ที่ระบุไว้ 320 ตำแหน่ง)
- อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) สำหรับวัดการแอ่นตัว จำนวน 49 ตำแหน่ง (ไม่น้อยกว่าข้อกำหนด TOR ที่ระบุไว้ 48 ตำแหน่ง)
- อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) จำนวน 140 ตำแหน่ง (ไม่น้อยกว่าข้อกำหนด TOR ที่ระบุไว้ 48 ตำแหน่ง)

รูปที่ 7-11 แสดงภาพรวมของโครงสร้างสะพาน ซึ่งพฤติกรรมของโครงสร้างสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้ดังนี้

- กลุ่มที่ 1: สะพานส่วนที่ยื่น (Cantilever) ได้แก่ ช่วงสะพาน S1 และ S8
- กลุ่มที่ 2: เชิงลาดสะพานที่มีส่วนยื่น (Approach with Cantilever) ได้แก่ ช่วงสะพานที่ S2, S5, และ S7
- กลุ่มที่ 3: เชิงลาดสะพานแบบแขวน (Suspended Approach) ได้แก่ ช่วงสะพานที่ S3, และ S6
- กลุ่มที่ 4: ช่วงสะพานโค้ง (Arch Span) ได้แก่ ช่วงสะพานที่ S4



รูปที่ 7-11 โครงสร้างสะพานปรีดี-ช้าง

ตารางที่ 7-1 แสดงการกระจายการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทต่าง ให้กับชั้นส่วนโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) ที่สำคัญ ซึ่งประกอบไปด้วย พื้นสะพาน (Deck) คานรองพื้นสะพาน (Floor Beam) คานหลัก (Girder) คานโค้ง (Arch Girder) และลวดซิง (Rod) เพื่อทำการตรวจวัดพฤติกรรมการถ่ายแรงภายในโครงสร้างที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร สะพานปรีดี-ช้างเปิดให้บริการตั้งแต่ปี 2486 ปัจจุบัน (2563) มีอายุมากถึง 77 ปี และผลการตรวจสอบสะพาน พบว่ามีความเสียหายหลายตำแหน่ง ดังนั้นการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกจรของสะพานจึงใช้รถบรรทุกสับล้อจำนวน 2 คัน น้ำหนักคันละ 18 ตัน เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพาน การใช้น้ำหนักบรรทุกปานกลางกับโครงสร้างขนาดใหญ่อาจทำให้ผลตอบสนองของโครงสร้าง (Structural Response) มีค่าไม่สูงมากนัก ดังนั้นบริเวณที่คาดว่าจะให้ผลการตรวจวัดที่น้อยเกินไป หรือน้อยกว่าค่าสัญญาณรบกวน (Noise) จะไม่ทำการตรวจวัดในบริเวณดังกล่าว

การตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานนิยมใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ในการตรวจวัดความเร่งการสั่นไหวของสะพานที่ตำแหน่งสำคัญที่จะทำให้ทราบรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) และค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ในโหมดแรก ๆ ซึ่งมีความสำคัญสูงต่อพฤติกรรมโดยรวมของสะพาน สะพานโดยทั่วไปจะมีพฤติกรรมคล้ายกับคาน คือมีการแอ่นตัวหรือดัดงอ การตรวจวัดจึงนิยมติดตั้ง Accelerometer ที่ตำแหน่งควบคุม (Control Points) การแอ่นตัวอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง คือ $L/4$, $L/2$, $3L/4$ จะแบ่งการติดตั้งเป็น 2 แนว คือ แนวตามยาวด้านซ้าย และแนวตามยาวด้านขวา หากการแอ่นตัวของ 2 แนวเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน อาจทำให้ได้ค่าโหมดการบิดของสะพานด้วย ส่วนช่วงสะพานโค้ง (Arch Span) จะติดตั้ง Accelerometer เพิ่มบริเวณคานโค้งเพียง 1 แนว โดยจะติดตั้ง 3 ตำแหน่ง $L/4$, $L/2$, $3L/4$ ค่าความถี่ธรรมชาติที่ตรวจวัดได้มีความหมายทางกายภาพ คือ ถ้าสะพานได้รับแรงกระทำเป็นจังหวะเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติ สะพานจะเกิดการสั่นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (Resonance) จนกระทั่งวิบัติ โดยค่าความถี่ธรรมชาติหาได้จากการวิเคราะห์ Eigen Value ของ Global Stiffness Matrix และ Global Mass Matrix ดังนั้น ค่าความถี่ธรรมชาติ จึงเป็นค่าที่บ่งบอกถึง Global Stiffness Matrix และ Global Mass Matrix ของสะพาน ที่อยู่ในรูปของ Scalar ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมทริกซ์ที่มีตัวเลขเป็นจำนวนมาก มวลของสะพานไม่มีการเปลี่ยนหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจึงบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสติฟเนสของสะพาน หากสะพานมีสภาพชำรุด สติฟเนสมีแนวโน้มที่จะอ่อนลง หากสะพานได้รับการเสริมกำลัง สติฟเนสมีแนวโน้มที่จะแข็งแรงขึ้น ดังนั้นค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นไหวจึงนิยมใช้เป็นพารามิเตอร์หลักในการประเมินแบบจำลองสะพานให้มีพฤติกรรมสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของสะพานในแต่ละช่วงอายุการใช้งาน

ในกรณีที่สามารรถตั้งนั่งร้านจากพื้นดินได้ การตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานนิยมใช้อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (LVDT) ในการตรวจวัดพฤติกรรมการแอ่นตัวของสะพานด้วย เพื่อให้

ทราบพฤติกรรมการกระจายแรงจากน้ำหนักบรรทุกทุกเข้าสู่คานตัวนอก (Exterior Girder) และคานตัวใน (Interior Girder) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนสำคัญในการรับน้ำหนักของสะพาน โดยทั่วไปสะพานช่วงเดียว (Simple Span) จะวัดการแอ่นตัวตามแนวยาวสะพานที่ระยะประมาณ $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ หากสะพานมีคานหลายตัว จะตรวจวัดที่คานตัวนอกและคานตัวในอย่างน้อยประเภทละ 1 ตัว สะพานปรีดี-ช้างรมีช่วงสะพานที่เป็นช่วงเดียวและที่เป็นช่วงยื่น ดังนั้นกรณีที่มีช่วงยื่นจะตรวจวัดเพิ่มอีก 1 จุด ที่ปลายช่วงยื่น เพื่อให้ทราบพฤติกรรมการแอ่นลงในช่วงเดียวและแอ่นตัวขึ้นที่ปลายช่วงยื่น บริเวณที่เป็นเชิงลาดสะพาน (Approach) สามารถตั้งนั่งร้านจากพื้นดินบางส่วน (S1, S2, S6, S7 และ S8) ที่สามารถตั้งนั่งร้านจากพื้นดินได้ อีก 2 ช่วงที่เหลือ (S3 และ S4) รวมถึงช่วงสะพานโค้ง (Arch Span) (S4) อยู่สูงจากพื้นน้ำ การเข้าถึงท้องสะพานต้องใช้นั่งร้านแขวน ซึ่งการแขวนนั่งร้านกับท้องสะพานจะทำให้ไม่สามารถวัดค่าการแอ่นตัวได้ เนื่องจากนั่งร้านแขวนจะแอ่นตัวไปพร้อม ๆ กับคานสะพาน ในกรณีดังกล่าวจะติดตั้ง LVDT ที่ปลายคานทั้งสองฝั่ง เพื่อวัดการเคลื่อนตัวตามแนวยาวของสะพาน ข้อมูลค่าการแอ่นตัวหรือการเคลื่อนที่ที่ตรวจวัดได้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเสริมในการการิเบตแบบจำลองสะพานได้

ในกรณีที่ไม่สามารถตั้งนั่งร้านจากพื้นดินเพื่อวัดค่าการแอ่นตัวได้ การตรวจวัดความเครียดก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะทำให้ทราบพฤติกรรมการแอ่นตัว (Flexural Behavior) หรือพฤติกรรมการยืดหดตัวตามแนวแกน (Axial Behavior) ของชิ้นส่วนโครงสร้างได้ โดยการตรวจวัดพฤติกรรมการแอ่นตัวจะตรวจวัดที่ชิ้นส่วน คานพื้น และคานหลัก โดยทั่วไปจะติดตั้ง Strain Gauge ที่ด้านล่างของชิ้นส่วนที่มีการแอ่นตัว โดยจะติดตั้งที่ตำแหน่งการแอ่นตัวที่สำคัญ เช่น ที่ระยะประมาณ $L/4$, $L/2$, $3L/4$ นอกจากนี้ อาจติดตั้งตลอดความสูงของคานบริเวณกึ่งกลางช่วงสะพาน ($L/2$) เพื่อดูการกระจายความเครียดตลอดความสูงของคานหลัก โดยคานหลักจะรับแรงอัดด้านบนและรับแรงดึงด้านล่าง สามารถใช้วิเคราะห์หาจุดที่แรงกระทำเป็นศูนย์หรือจุดสะเทิน (Neutral Axis) ได้ อย่างไรก็ตาม ผลการตรวจวัดด้วย Strain Gauge ที่ผิวคอนกรีตอาจได้ค่าที่ค่อนข้างแปรปรวน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยหลายอย่างในแต่ละตำแหน่ง (Local Effect) เช่น การยืดหดตัวของผิวคอนกรีตที่มีรอยร้าวจะเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ การติด Strain Gauge คร่อมรอยร้าวจะได้ค่าที่สูงมาก ขณะที่การติด Strain Gauge บนผิวที่อยู่ระหว่างรอยร้าวจะได้ค่าที่ต่ำมาก นอกจากนี้คอนกรีตเสริมเหล็กไม่ได้เป็นวัสดุเนื้อเดียวกันและมีพฤติกรรมทุกทิศทางเหมือนกัน (Isotropic Elastic Material) ตำแหน่งที่มีก้อนหินอยู่ใกล้ผิวคอนกรีตอาจให้ค่าต่างจากตำแหน่งที่มีมอร์ตาร์อยู่ใกล้ผิวคอนกรีต หรือบริเวณที่มีการเสริมเหล็กหนาแน่นอาจให้ค่าแตกต่างจากบริเวณที่มีปริมาณเหล็กเบาบาง อีกทั้งการยืดหดของวัสดุได้รับอิทธิพลจากอัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) และการยึดรั้งในทิศทางต่าง ๆ ดังนั้นค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้บนผิวคอนกรีตจึงมีลักษณะผสมกันหลายอย่าง การใช้ข้อมูลความเครียดที่ผิวคอนกรีตจำเป็นต้องใช้วิจารณญาณ โดยอาจใช้เป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างร่วมกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



การตรวจวัดความเครียดของโครงสร้างคอนกรีตที่มีรอยแตกหรือรอยร้าวมาก หรือเหล็กเสี้ยนตำแหน่งที่มีความเสียหายได้ลำบาก การตรวจวัดความเครียดที่ผิวเหล็กเสริมซึ่งอยู่ในชั้นส่วนโครงสร้างก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เช่น พื้นสะพานที่รับแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกโดยตรง ทำให้เกิดการแอ่นตัวได้มาก และเกิดขึ้นหลายครั้งต่อวันเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้เกิดรอยร้าวจากความล้าได้ ซึ่งอาจมีทั้งรอยร้าวที่มองเห็นหรือรอยร้าวที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า (Micro Cracks) นอกจากนี้ชั้นส่วนที่รับแรงดัดประเภทอื่น ๆ ในสะพานก็ตรวจพบว่ามีรอยร้าว รอยแตก หรือหลุดล่อน ดังนั้นจะทำการตรวจวัดพฤติกรรมการณ์การแอ่นตัวของชั้นส่วนรับแรงดัดประเภทต่าง ๆ ได้แก่ พื้นสะพาน คานพื้น และคานหลัก โดยจะติดตั้ง Strain Gauge ที่ด้านล่างของชั้นส่วนที่ตำแหน่งการแอ่นตัวที่สำคัญ เช่น ที่ระยะประมาณ $L/4$, $L/2$, $3L/4$ นอกจากนี้จะติดตั้ง Strain Gauge ที่ลวดซิ่ง (Steel Rod) ด้วย เพื่อวัดการยืดตัวขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อสะพาน อย่างไรก็ตาม ผลการตรวจวัดด้วย Strain Gauge ที่ผิวเหล็กเสริมอาจได้ค่าที่ค่อนข้างแปรปรวน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยหลายอย่างในแต่ละตำแหน่ง (Local Effect) เช่น ความไม่สม่ำเสมอการถ่ายแรงระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตโดยรอบ ความไม่สม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม การยึดรั้งระหว่างเหล็กตามยาวและเหล็กตามขวาง การทาบเหล็ก การงอเหล็ก เป็นต้น ดังนั้นค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้จึงมีลักษณะผสมกันหลายอย่าง การใช้ข้อมูลความเครียดที่ผิวเหล็กเสริมจำเป็นต้องใช้วิจารณญาณ โดยอาจใช้เป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างร่วมกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 7-1 การกระจายตำแหน่งการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน

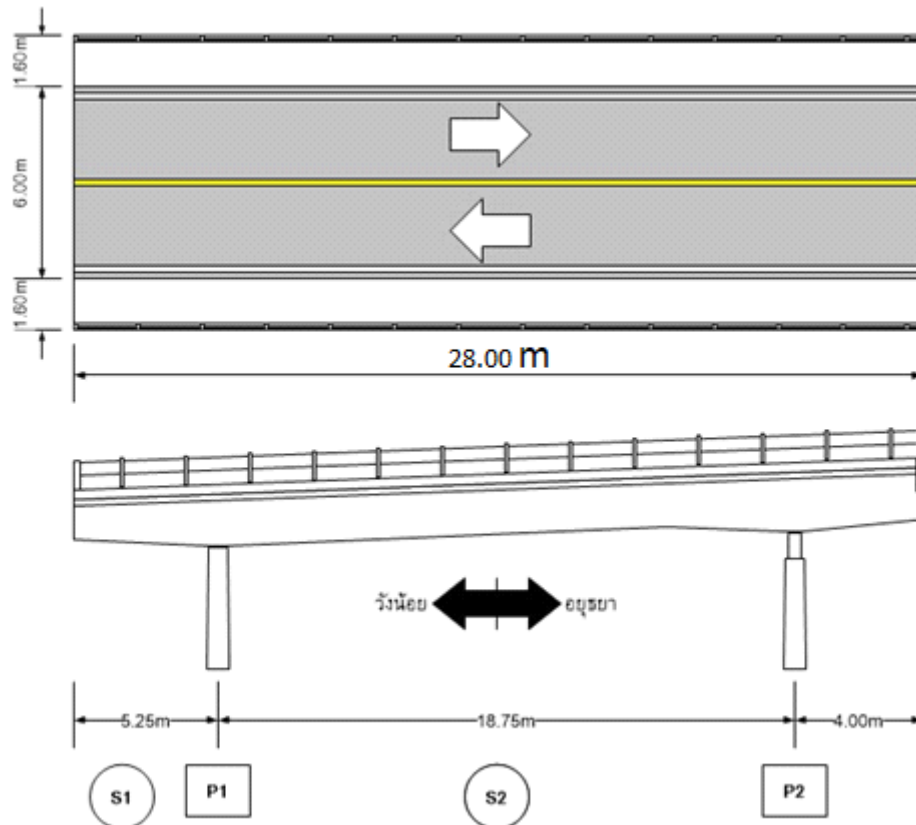
Sensor	Member	S1+S2	S3	S4	S5	S6	S7+S8	Sum	
								Member	All
Strain Gauge (Concrete)	Deck	-	-	-	-	-	-	0	163
	Diaphragm	8	6	15	6	6	8	49	
	Girder	21	15	18	15	15	21	105	
	Arch Beam	-	-	7	-	-	-	7	
	Rod	-	-	2	-	-	-	2	
Strain Gauge (Steel)	Deck	32	16	48	16	16	32	160	322
	Diaphragm	12	6	3	6	6	12	45	
	Girder	9	3	6	3	3	9	33	
	Arch Beam	-	-	-	-	-	-	0	
	Rod	-	-	84	-	-	-	84	
Accelerometer	Deck	-	-	-	-	-	-	0	140
	Diaphragm	-	-	-	-	-	-	0	
	Girder	11	7	7	9	7	11	52	
	Arch Beam	-	-	4	-	-	-	4	
	Rod	-	-	84	-	-	-	84	
Displacement Transducer	Deck	2	4	4	4	2	-	16	49
	Diaphragm	-	-	-	-	-	-	0	
	Girder	9	-	-	3	9	12	33	
	Arch Beam	-	-	-	-	-	-	0	
	Rod	-	-	-	-	-	-	0	



[7.5] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานช่วงที่ 1 และ 2 (Span 1 และ Span 2)

โครงการนี้ได้ดำเนินการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานช่วงที่ 1 และ 2 (Span 1 และ Span 2) มีความยาวช่วงระหว่างรอยต่อสะพานเท่ากับ 28.00 เมตร ความยาวช่วงระหว่างตอม่อเท่ากับ 18.75 เมตร โดยทำการทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต และแบบพลวัต เมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม 2564 ซึ่งมีรายละเอียดการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน ดังนี้

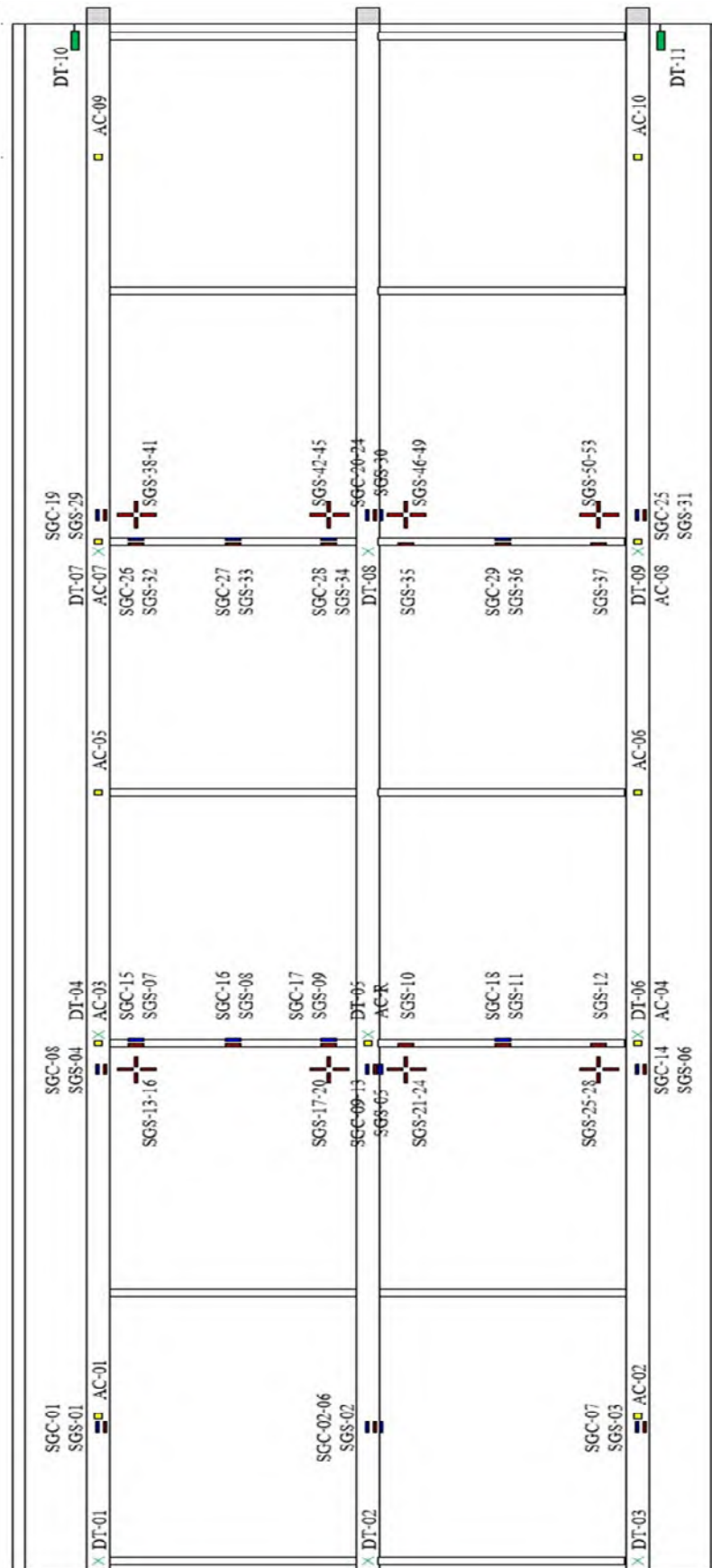
[7.5.1] ช่วงสะพานทดสอบ



รูปที่ 7-12 ช่วงสะพานทดสอบ

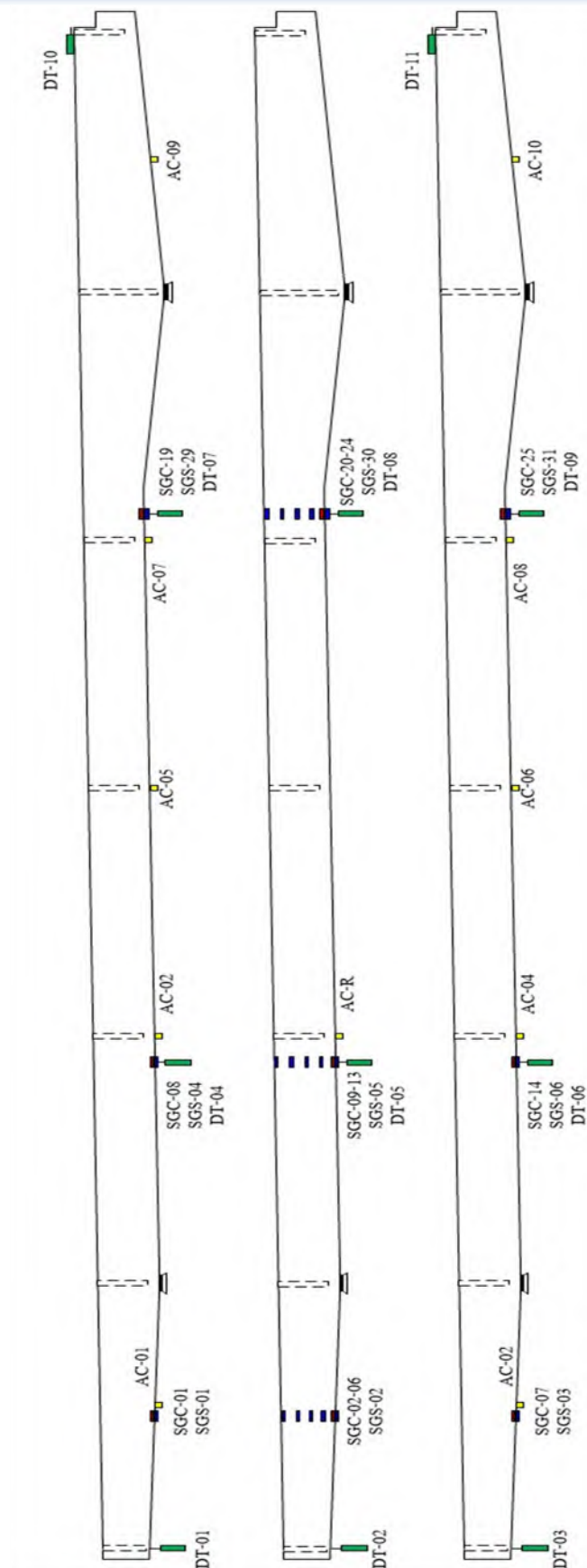
[7.5.2] ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

ในช่วงสะพานนี้ ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับคอนกรีต (Strain Gauge Concrete) จำนวน 29 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับเหล็ก (Strain Gauge Steel) จำนวน 53 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) จำนวน 11 ตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) จำนวน 11 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 7-13 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 1&2)





รูปที่ 7-13 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 1&2) (ต่อ)



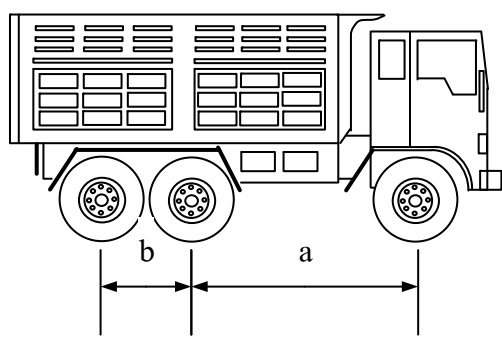
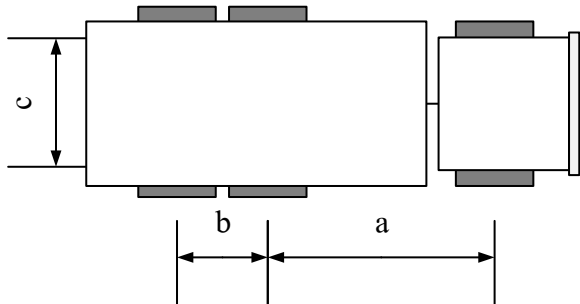
รูปที่ 7-14 ตัวอย่างภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 1&2)

[7.5.3] น้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ในช่วงสะพานนี้ได้ใช้รถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวมประมาณ 18 ตัน จำนวน 2 คัน ทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุม โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 7-2 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ

คันที่	1	2
ประเภท	รถบรรทุก (80-7169)	รถบรรทุก (81-1439)
น้ำหนักรถบรรทุก (ตัน)	18.040	18.120
ระยะเพลลาที่ 1 ถึง 2 (a, เมตร)	4.00	4.10
ระยะเพลลาที่ 2 ถึง 3 (b, เมตร)	1.35	1.35
ความกว้างฐานล้อ (c, เมตร)	1.90	2.00



รูปที่ 7-15 รถบรรทุกทดสอบ (Span 1&2)

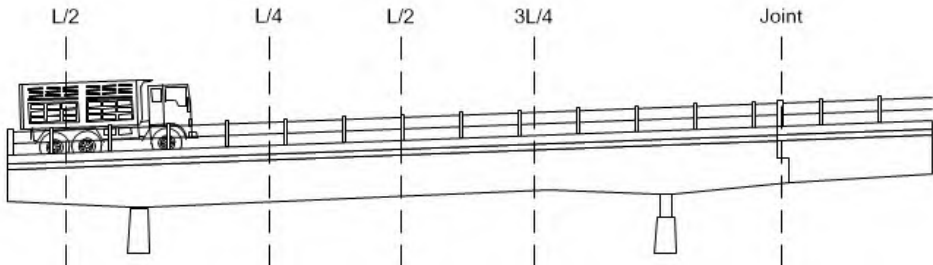
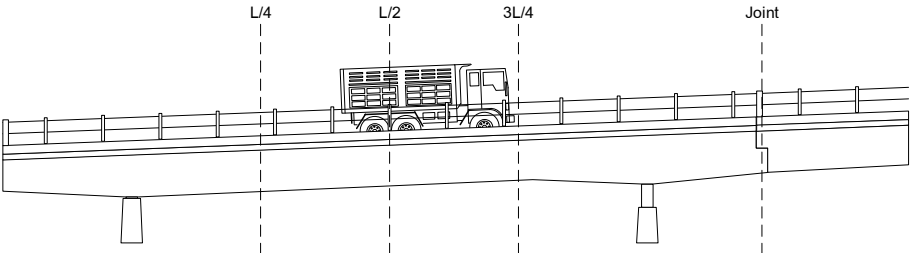
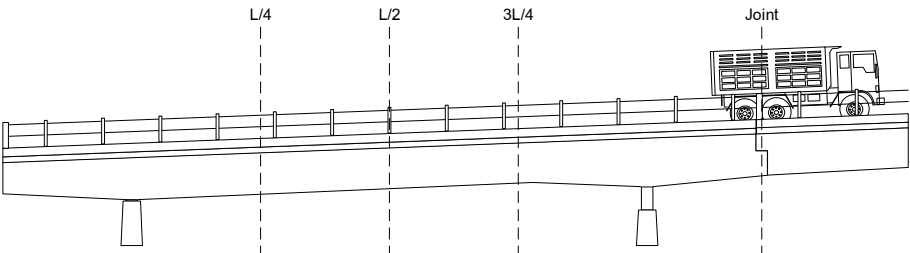
[7.5.4] รูปแบบการทดสอบแบบสถิต

การทดสอบแบบสถิต (Static Test) เป็นการนำรถบรรทุกทดสอบจอดตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนดหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

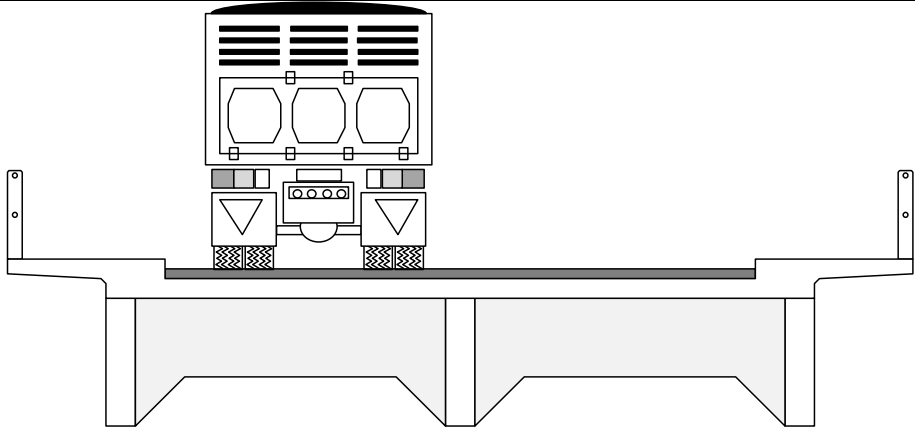
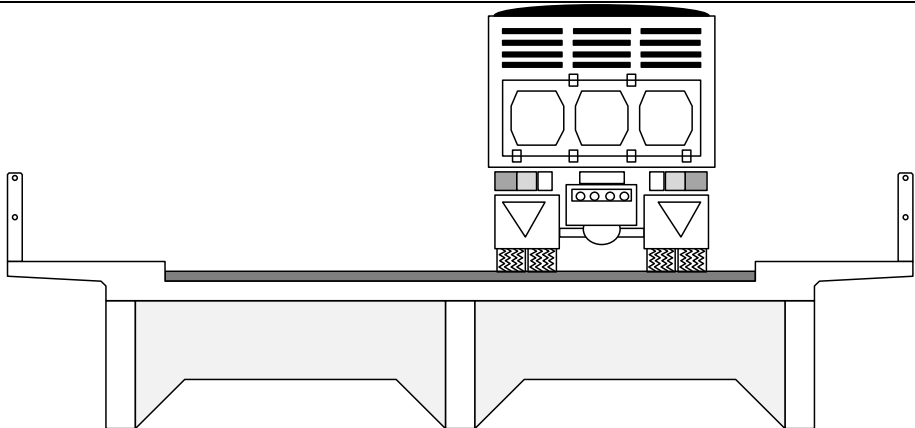
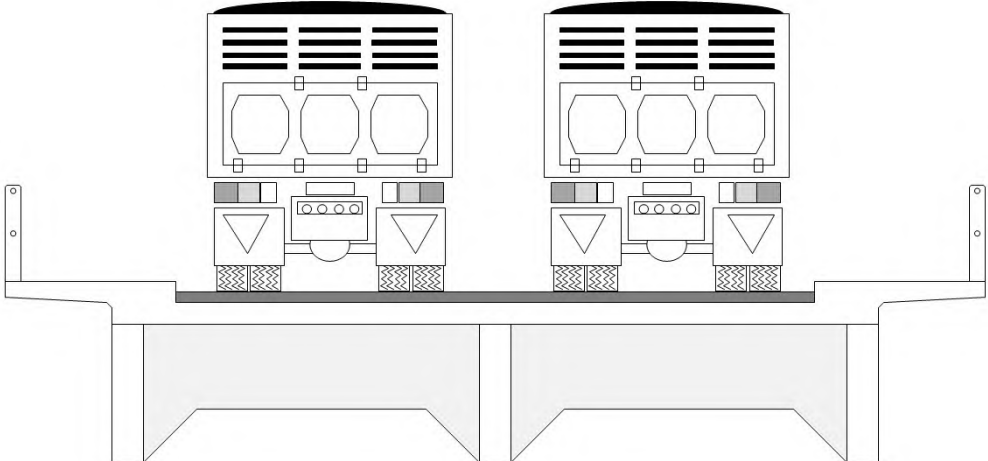
- Static 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง L/2(S1), L/2(S2) ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ และ Joint ในช่องจราจรทางซ้าย
- Static 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง L/2(S1), L/2(S2) ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ และ Joint ในช่องจราจรทางขวา
- Static 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดตามตำแหน่ง L/2(S1), L/2(S2) ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ และ Joint ทั้งสองช่องจราจร



ตารางที่ 7-3 ระยะจอตกรบรรทุกตามตำแหน่ง L/2(S1), L/2(S2) และ Joint (Span 1&2)

ระยะ	ตำแหน่งจอตกรบรรทุก
L/2(S1)	
L/2(S2)	
Joint	

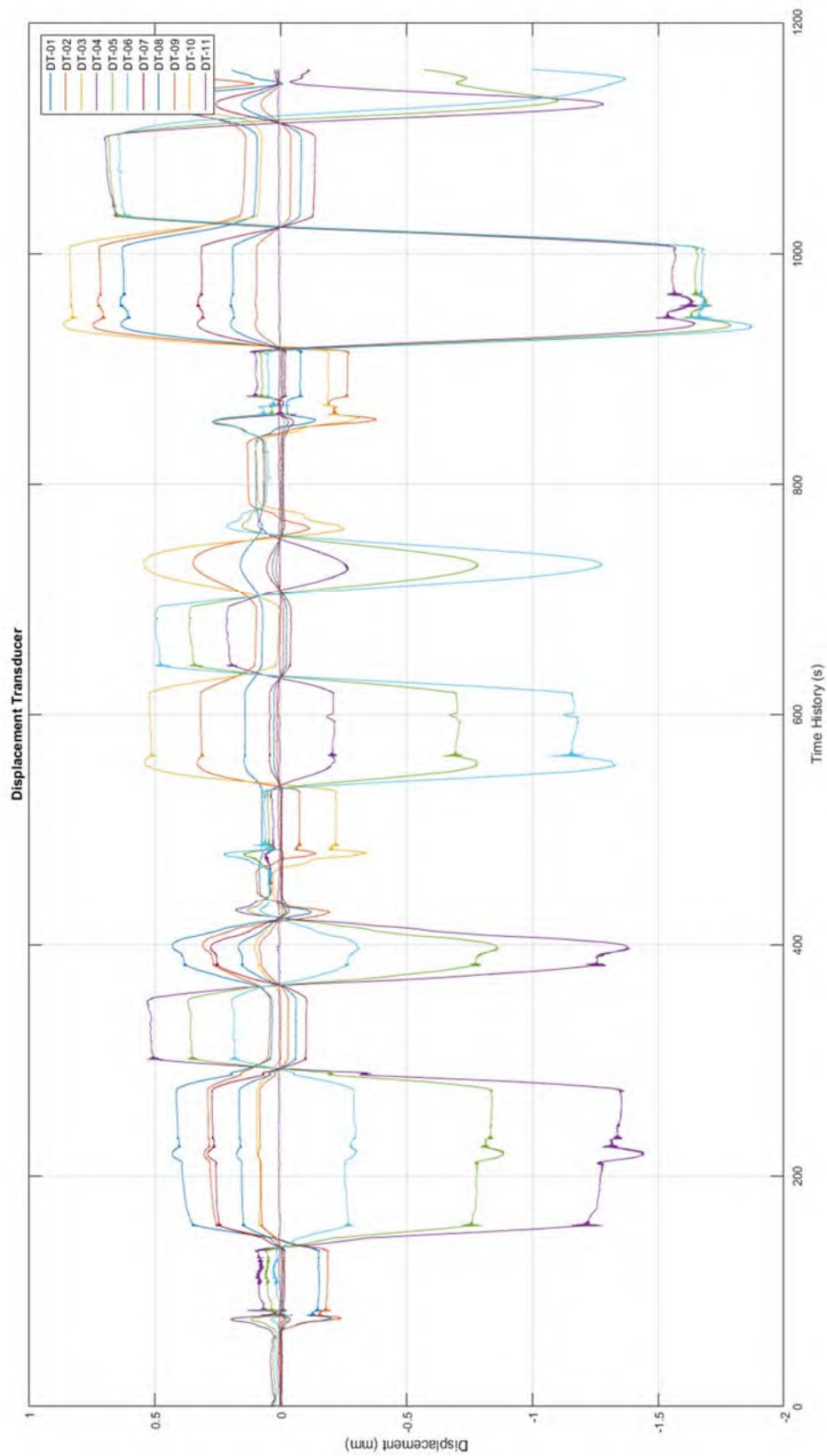
ตารางที่ 7-4 รูปแบบการทดสอบแบบสถิต ด้วยรถบรรทุกน้ำหนัก (Span 1&2)

Case	Pattern
Static 1	
Static 2	
Static 3	



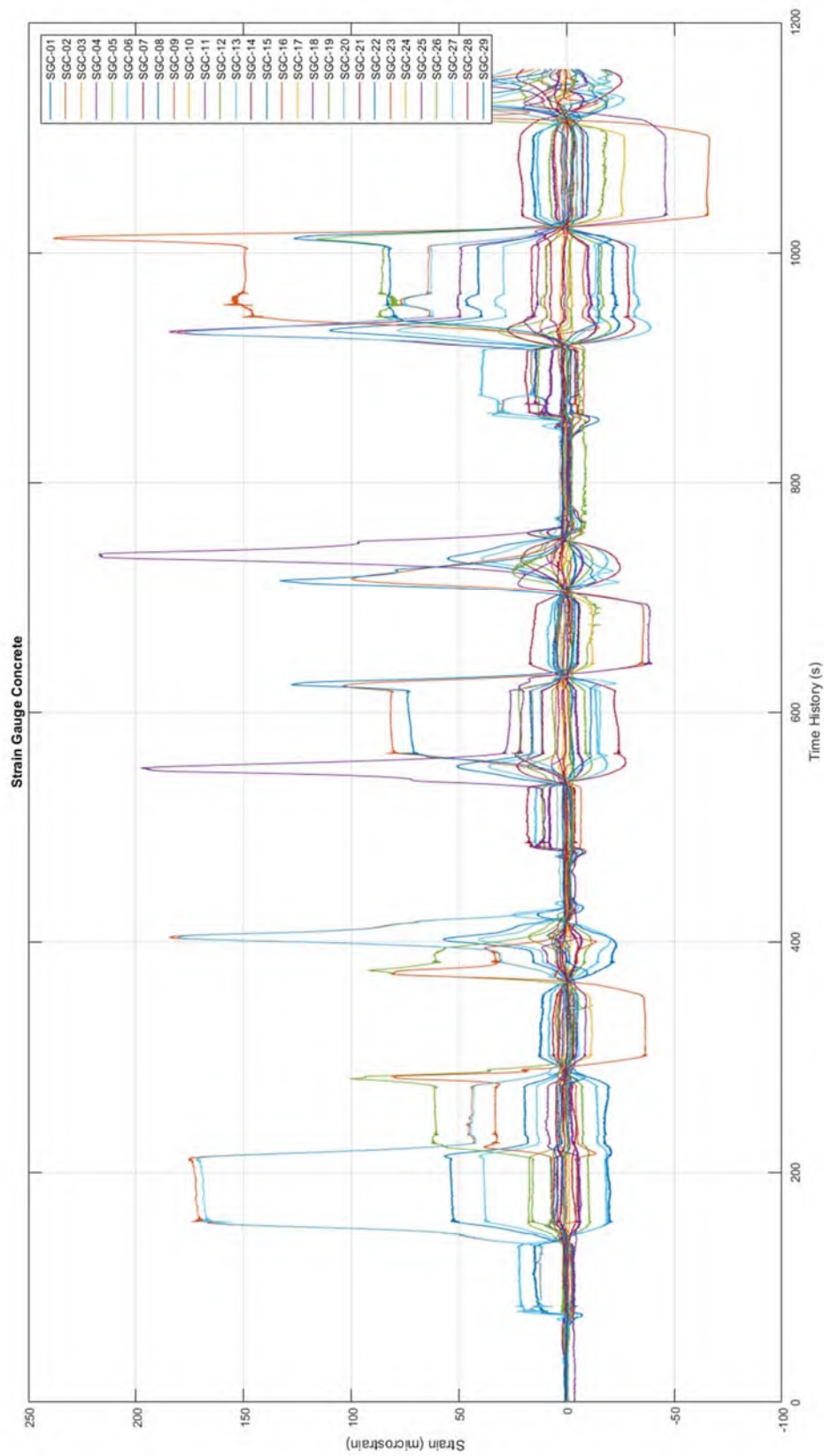


รูปที่ 7-16 ภาพการทดสอบแบบสถิต (Span 1&2)

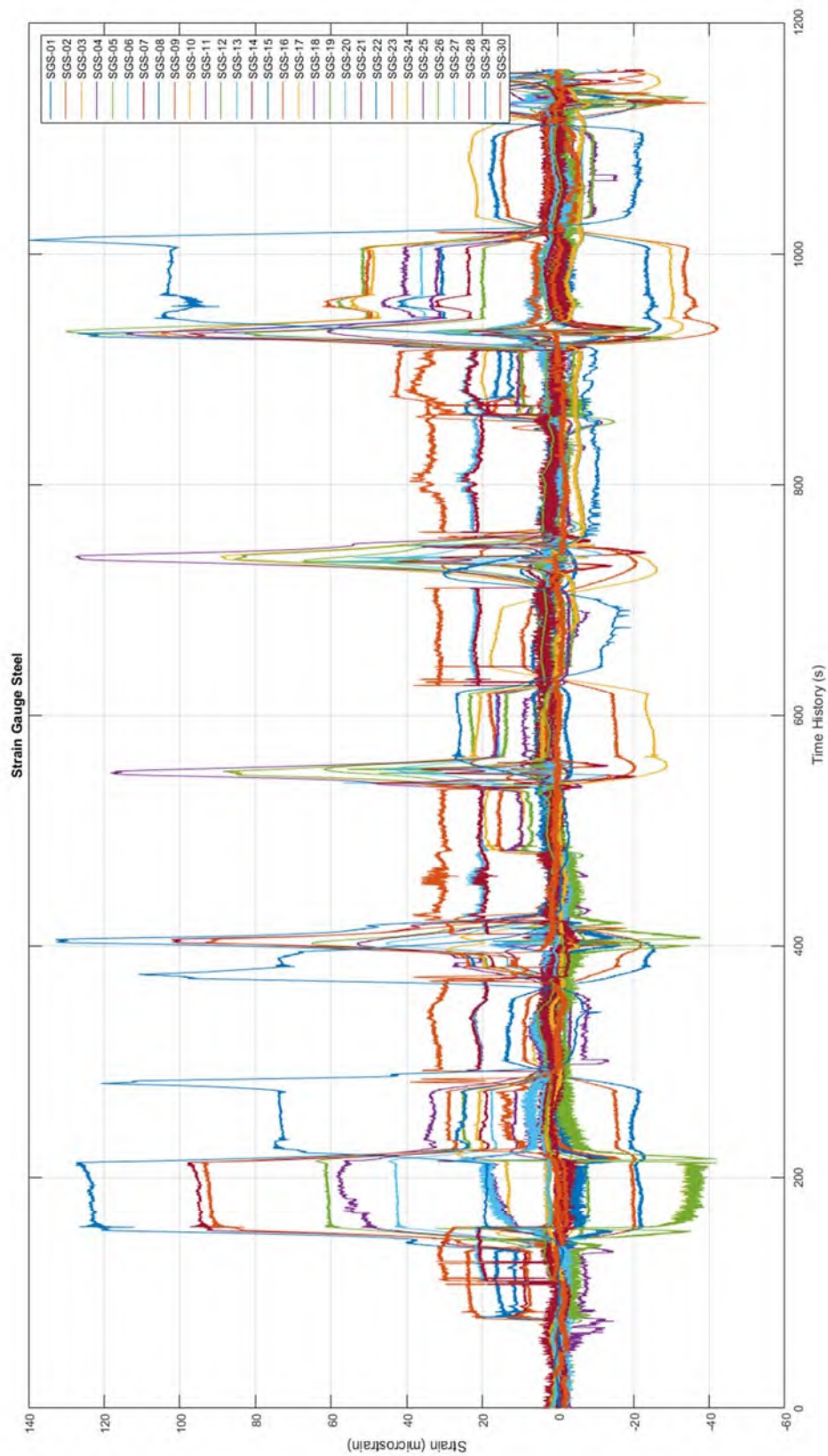


รูปที่ 7-17 สัญญาณการตรวจวัด Displacement Transducer(Span 1&2)



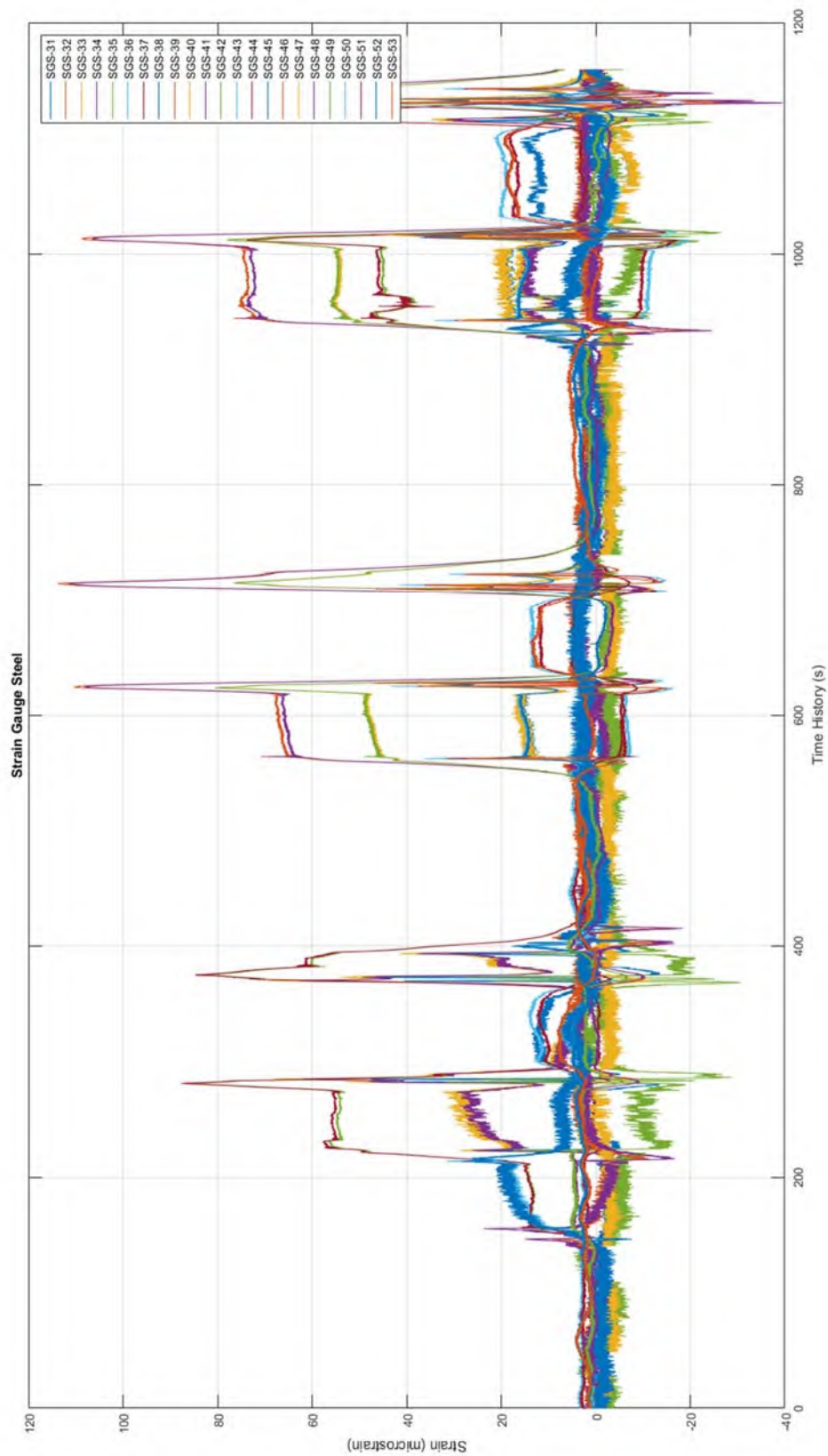


รูปที่ 7-18 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (Span 1&2)



รูปที่ 7-19 สัญญาณการตรวจวัดแบบ Strain Gauge Steel (Span 1&2)





รูปที่ 7-19 สัญญาณการตรวจวัดแบบ Strain Gauge Steel (Span 1&2) (ต่อ)

[7.5.5] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิต

ตารางที่ 7-5 ผลการตรวจวัด Displacement Transducer (หน่วย : mm) (Span 1&2)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint
DT-01	-0.153	0.383	0.410	0.072	0.140	0.072	-0.179	0.622	-0.156
DT-02	-0.187	0.273	0.286	-0.075	0.318	0.097	-0.269	0.714	-0.188
DT-03	-0.011	0.080	0.091	-0.096	0.519	0.010	-0.189	0.832	-0.010
DT-04	0.083	-1.268	-1.353	0.028	-0.200	0.204	0.095	-1.555	0.086
DT-05	0.050	-0.779	-0.839	0.047	-0.676	0.350	0.074	-1.646	0.053
DT-06	0.015	-0.260	-0.293	0.064	-1.126	0.483	0.050	-1.673	0.017
DT-07	-0.017	0.254	0.271	-0.006	0.040	-0.041	-0.019	0.311	-0.017
DT-08	-0.010	0.152	0.162	-0.003	0.024	-0.024	-0.011	0.187	-0.010
DT-09	-0.005	0.076	0.081	-0.002	0.012	-0.012	-0.006	0.093	-0.005
DT-10	-0.002	0.006	0.005	0.007	0.006	0.004	0.004	0.005	0.003
DT-11	-0.002	0.006	0.005	0.007	0.006	0.004	0.004	0.005	0.003



ตารางที่ 7-6 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (หน่วย : microstarin) (Span 1&2)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint
SGC-01	24.210	-20.100	-17.440	0.325	-1.650	5.617	14.050	-21.590	13.950
SGC-02	-1.024	6.144	4.345	-6.510	4.970	-2.417	-7.908	9.498	-0.885
SGC-03	-3.367	-1.302	0.450	1.398	-0.417	1.565	0.185	-2.098	-3.652
SGC-04	-3.158	-5.848	-1.517	7.315	-3.813	4.315	7.479	-10.210	-3.602
SGC-05	1.706	-10.240	-7.242	10.850	-8.283	4.029	13.180	-15.830	1.475
SGC-06	21.680	-18.710	-13.990	13.680	-13.110	8.252	39.100	-31.330	21.630
SGC-07	-0.573	-2.817	-3.396	17.850	-22.220	15.860	18.680	-28.510	-0.856
SGC-08	-3.718	53.648	18.844	-2.001	16.786	-5.226	-4.988	65.878	-3.284
SGC-09	0.575	-4.750	-4.656	1.773	-0.779	4.108	3.106	-7.550	0.673
SGC-10	-0.225	1.871	0.656	0.554	1.233	1.846	1.735	-0.048	-0.073
SGC-11	0.517	5.756	0.102	0.206	1.933	1.181	1.931	0.969	0.679
SGC-12	-0.892	17.060	5.017	-1.098	6.263	-1.715	-1.019	9.727	-0.827
SGC-13	-2.656	38.320	13.460	-1.429	11.990	-3.733	-3.563	47.056	-2.346
SGC-14	-0.925	2.019	3.475	-3.785	11.440	-5.690	-4.258	25.792	-0.517
SGC-15	1.238	7.169	-0.548	-2.967	-1.681	-2.996	-0.277	-1.508	1.317
SGC-16	12.275	172.305	43.935	4.309	15.950	2.682	16.405	64.135	12.380
SGC-17	1.373	4.342	1.760	-0.423	1.033	-0.783	1.496	1.808	1.356
SGC-18	-3.835	-6.240	8.629	10.230	26.490	-2.646	14.070	49.510	-3.590
SGC-19	0.046	15.660	61.010	-1.519	21.650	-10.100	-7.940	85.480	-0.344
SGC-20	0.531	1.654	3.290	1.608	-15.710	-0.398	0.342	-13.400	0.235
SGC-21	0.096	0.460	1.113	0.908	3.483	-2.244	1.873	7.363	0.225
SGC-22	1.167	1.446	-0.823	1.915	-11.210	4.788	2.356	-14.780	0.975
SGC-23	-1.996	6.769	33.150	-3.788	81.720	-35.250	-4.617	149.160	-2.171
SGC-24	-0.452	0.256	2.156	-1.329	1.331	-11.430	0.150	2.271	-0.673
SGC-25	-0.194	2.575	4.696	-2.344	21.200	-37.770	-2.002	13.540	-0.356
SGC-26	1.201	6.954	-0.531	-2.878	-1.631	-2.906	-0.269	-1.463	1.277
SGC-27	12.030	168.859	43.056	4.222	15.631	2.628	16.077	62.852	12.132
SGC-28	1.332	4.212	1.707	-0.410	1.002	-0.760	1.451	1.754	1.315
SGC-29	0.123	4.552	2.090	-1.440	73.300	-3.440	-0.860	82.150	0.475

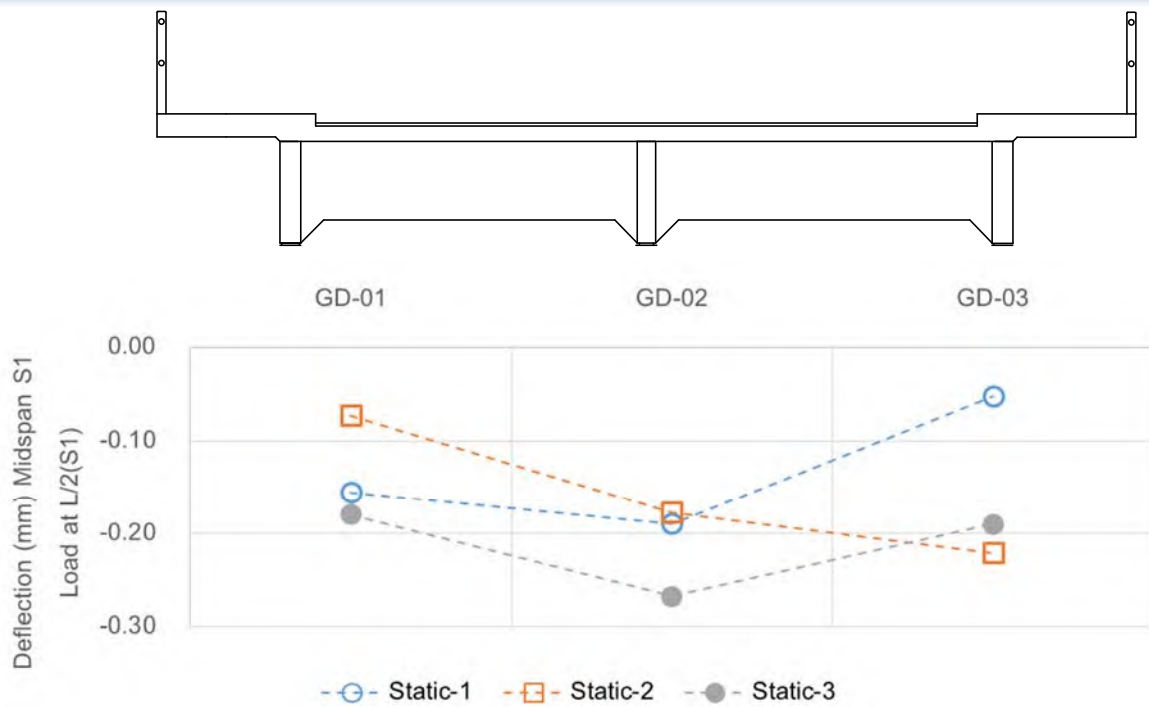
ตารางที่ 7-7 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel (หน่วย : microstarin) (Span 1&2)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint
SGS-01	25.631	-22.110	-19.184	0.358	-1.815	6.179	25.455	-23.749	15.345
SGS-02	23.414	-20.207	-15.109	14.774	-14.159	8.912	42.228	-33.836	23.360
SGS-03	-0.602	-2.958	-3.566	18.743	-23.331	16.653	19.614	-29.936	-0.899
SGS-04	-7.842	57.350	32.830	-0.108	9.390	-3.569	-2.600	65.648	-7.617
SGS-05	-1.863	60.860	24.920	-1.352	22.980	-3.721	-3.977	83.344	-1.679
SGS-06	-1.118	36.516	14.952	-0.811	13.788	-2.233	-2.386	50.006	-1.007
SGS-07	8.608	94.610	18.920	0.454	4.598	0.342	9.133	23.880	9.094
SGS-08	11.190	122.993	24.596	0.590	5.977	0.444	11.873	31.044	11.822
SGS-09	7.433	91.990	28.380	2.067	17.470	0.213	9.671	50.780	7.885
SGS-10	0.129	12.820	20.740	9.200	20.660	-0.831	9.721	49.260	0.633
SGS-11	-2.940	-1.896	11.100	9.615	16.150	-3.085	10.280	32.530	-2.708
SGS-12	-2.271	-8.273	2.669	6.846	13.800	-1.452	9.402	20.420	-1.608
SGS-13	-1.896	-2.037	2.841	2.008	2.346	3.053	3.154	2.389	0.082
SGS-14	-1.877	-2.017	2.813	1.988	2.323	3.023	3.123	2.365	0.081
SGS-15	-3.771	-4.981	-0.973	1.273	2.690	1.533	3.115	-1.550	-0.442
SGS-16	-2.246	-2.585	2.323	0.771	1.090	2.375	2.067	0.713	-0.379
SGS-17	-5.740	-35.630	-2.469	-0.227	3.300	2.396	2.860	0.448	-2.723
SGS-18	-2.454	17.360	7.206	0.665	3.660	3.127	3.981	4.754	-0.819
SGS-19	-5.797	-35.986	-2.494	-0.229	3.333	2.420	2.889	0.452	-2.750
SGS-20	-3.288	18.270	7.231	0.617	3.275	3.167	3.867	5.367	-1.088
SGS-21	-2.498	-1.675	3.256	-0.308	3.229	3.079	2.129	0.742	0.215
SGS-22	-2.163	2.906	2.475	-0.775	3.563	0.367	-5.675	-2.544	-1.908
SGS-23	-1.306	-1.508	2.981	30.060	3.529	31.090	36.070	1.019	-1.415
SGS-24	-2.120	2.848	2.426	-0.760	3.492	0.359	-5.562	-2.493	-1.870
SGS-25	-1.044	3.069	4.521	19.990	2.604	22.270	23.430	3.823	-0.365
SGS-26	-0.900	3.158	3.013	2.783	3.554	4.442	3.179	4.456	-0.529
SGS-27	-1.054	3.100	4.566	20.190	2.630	22.493	23.664	3.861	-0.368
SGS-28	-2.765	1.306	1.592	20.030	2.592	21.670	23.490	3.054	-2.623
SGS-29	0.055	18.792	73.212	-1.823	25.980	-12.120	-9.528	102.576	-0.413
SGS-30	-2.277	0.138	14.320	1.146	-1.090	-1.152	-0.319	7.135	-1.075

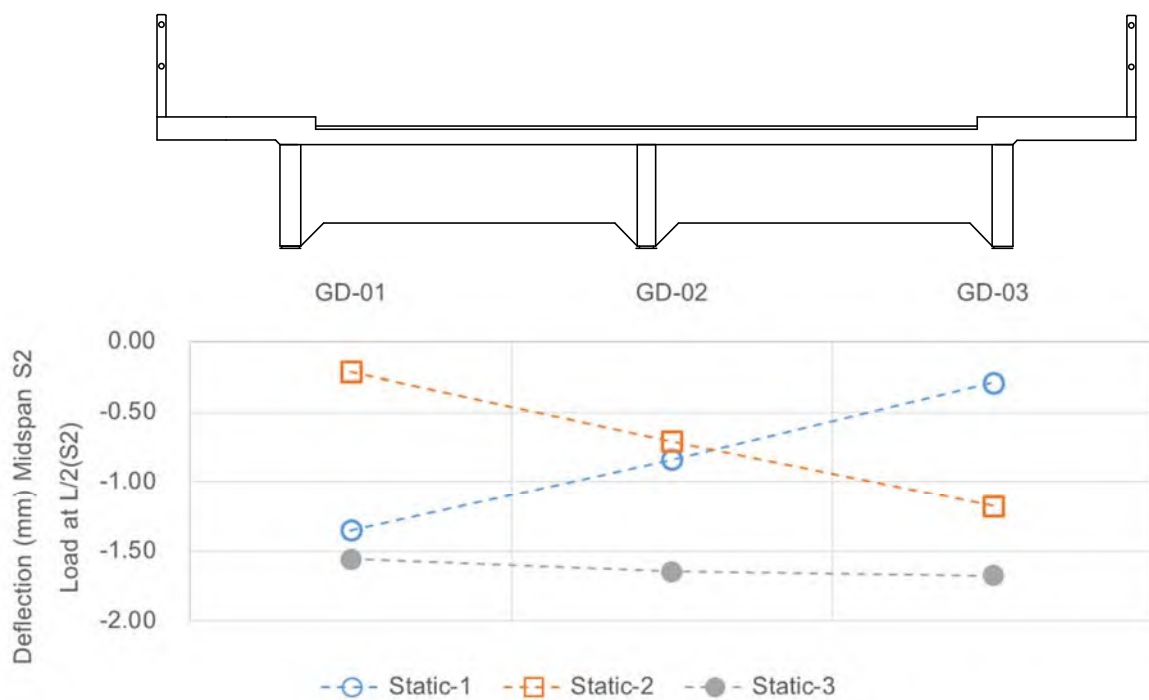


ตารางที่ 7-7 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (หน่วย : microstarin) (Span 1&2)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint
SGS-31	-2.252	-2.608	3.842	1.494	-2.765	3.273	0.781	3.610	-0.965
SGS-32	-3.381	-3.745	26.432	1.389	-1.808	-2.167	-0.619	16.352	-1.761
SGS-33	-3.683	-4.079	28.787	1.513	-1.969	-2.361	-0.674	17.809	-1.918
SGS-34	-3.348	-3.708	26.170	1.375	-1.790	-2.146	-0.613	16.190	-1.744
SGS-35	-5.921	-4.815	-7.942	-2.221	-4.306	-3.171	-1.588	-3.550	-2.767
SGS-36	2.691	2.568	0.546	4.126	-6.692	13.363	3.627	-11.020	2.468
SGS-37	2.340	2.233	0.475	3.588	-5.819	11.620	3.154	-9.583	2.146
SGS-38	-4.419	-2.233	0.948	-2.138	14.380	-4.404	-2.715	21.180	-2.273
SGS-39	-1.858	-1.997	2.785	1.968	2.300	2.993	3.092	2.341	0.080
SGS-40	-4.507	-2.278	0.967	-2.181	14.668	-4.492	-2.769	21.604	-2.318
SGS-41	-2.268	-2.611	2.346	0.779	1.101	2.399	2.088	0.720	-0.383
SGS-42	0.044	13.160	54.440	1.685	-6.004	4.429	0.988	45.440	-0.013
SGS-43	-2.429	17.186	7.134	0.658	3.623	3.096	3.941	4.706	-0.811
SGS-44	0.045	13.423	55.529	1.719	-6.124	4.518	1.007	46.349	-0.013
SGS-45	-3.321	18.453	7.303	0.623	3.308	3.199	3.906	5.421	-1.099
SGS-46	0.948	4.310	1.458	-0.431	67.090	-3.096	0.038	73.610	0.956
SGS-47	1.131	4.333	2.463	0.958	48.060	-1.608	1.750	53.910	1.675
SGS-48	0.929	4.224	1.429	-0.423	65.748	-3.034	0.037	72.138	0.937
SGS-49	1.142	4.376	2.488	0.968	48.541	-1.624	1.768	54.449	1.692
SGS-50	0.922	1.651	3.347	2.081	15.718	-0.385	4.076	15.494	1.460
SGS-51	0.968	1.212	2.540	3.110	1.770	13.312	5.002	-0.274	1.429
SGS-52	0.904	1.619	3.281	2.040	15.410	-0.377	3.996	15.190	1.431
SGS-53	0.958	1.200	2.515	3.079	1.752	13.180	4.952	-0.271	1.415

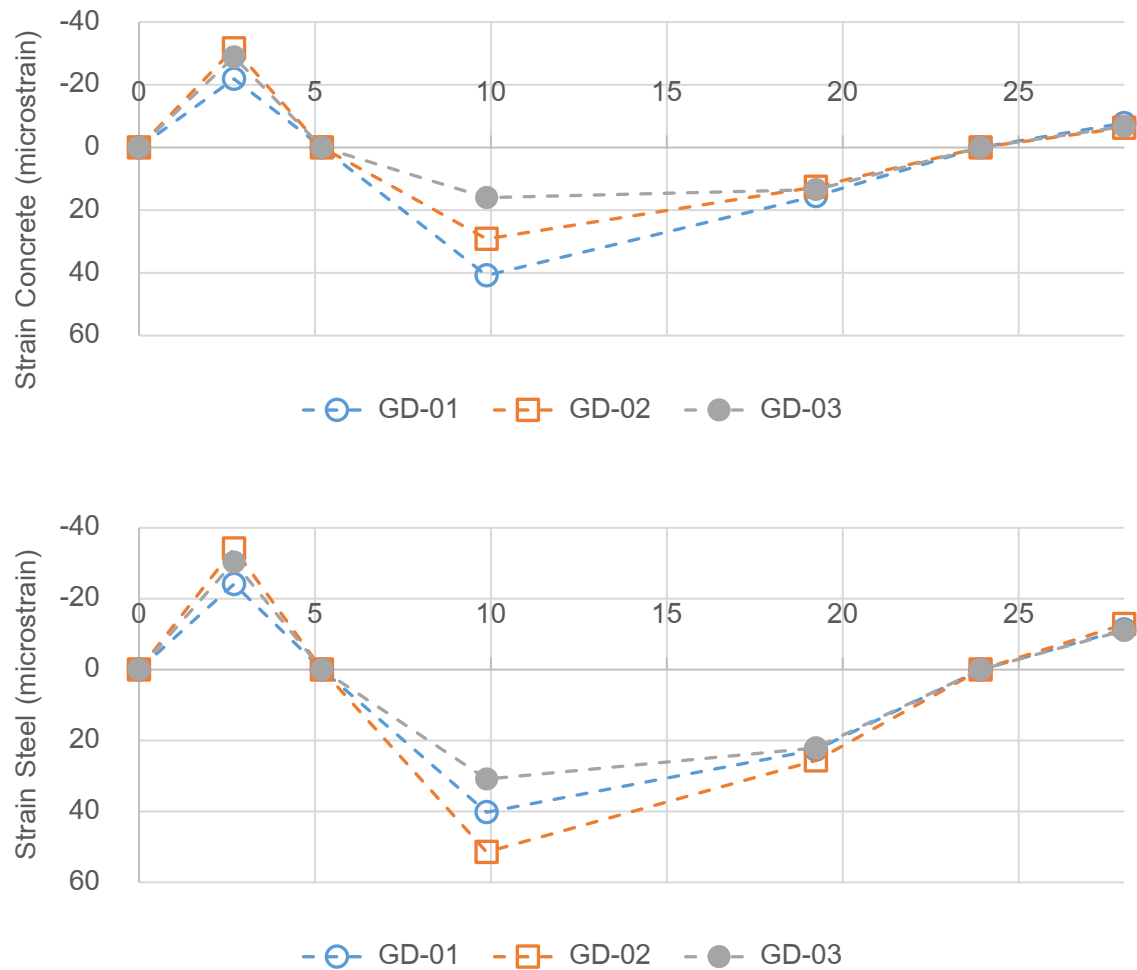


รูปที่ 7-20 พฤติกรรมการแอ่นตัวที่กึ่งกลางสะพาน (Span 1)



รูปที่ 7-21 พฤติกรรมการแอ่นตัวที่กึ่งกลางสะพาน (Span 2)





รูปที่ 7-22 พฤติกรรมความเครียดตามแนวยาวของสะพาน Staitc-3 (Span 1&2)

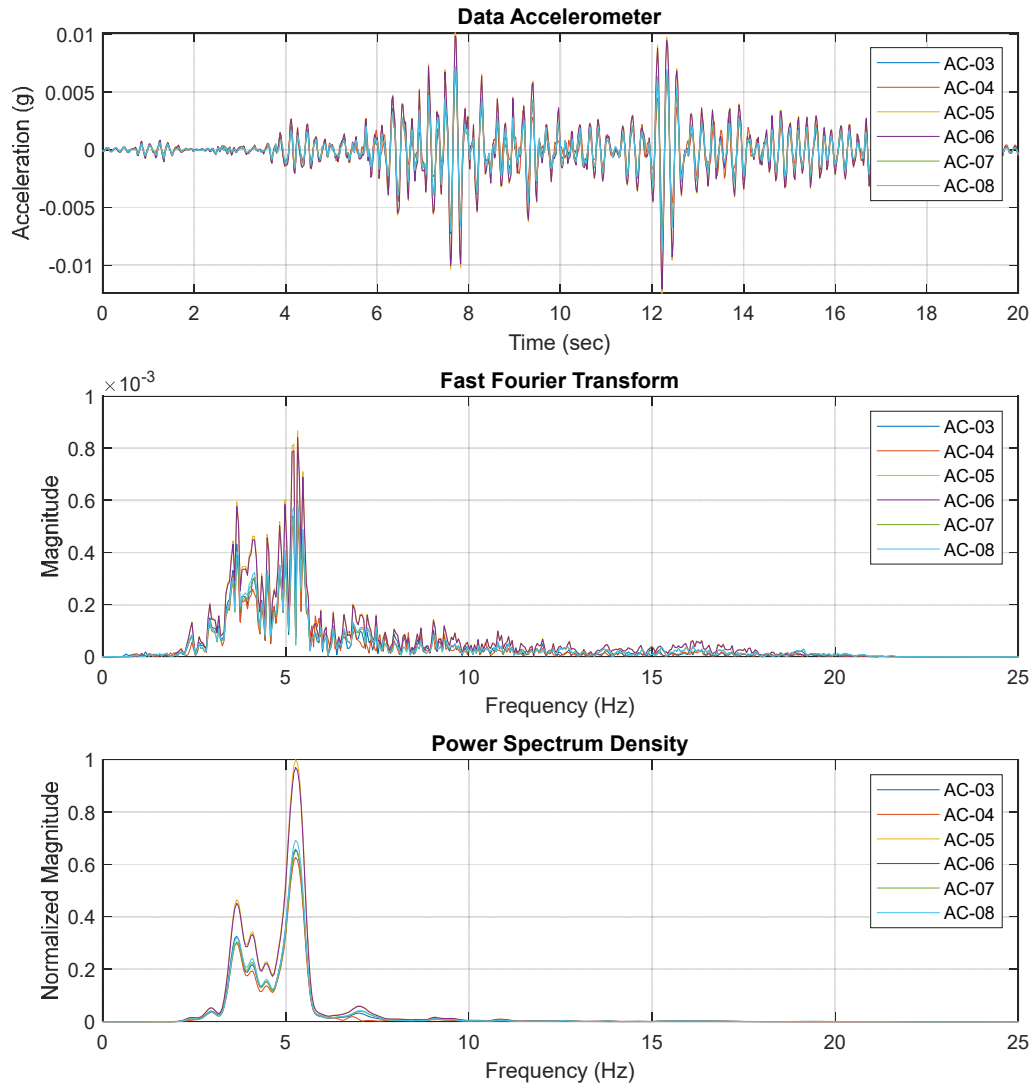
[7.5.6] รูปแบบการทดสอบแบบพลวัต

การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) เป็นการทดสอบโดยใช้รถบรรทุกวิ่งผ่านช่วงสะพานทดสอบหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

- Dynamic 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 20 กม./ชม. กึ่งกลางสะพาน
- Dynamic 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 30 กม./ชม. กึ่งกลางสะพาน
- Dynamic 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. กึ่งกลางสะพาน

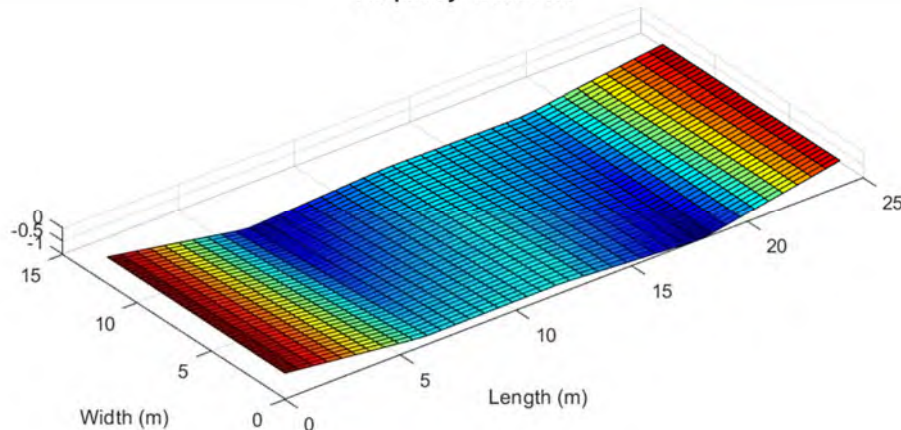
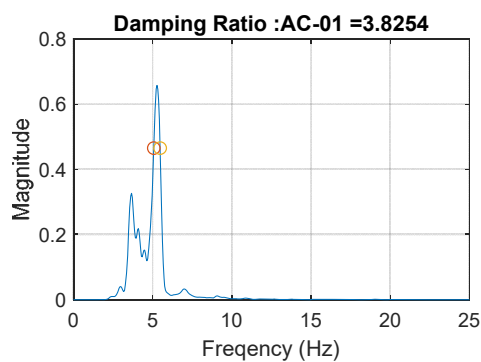
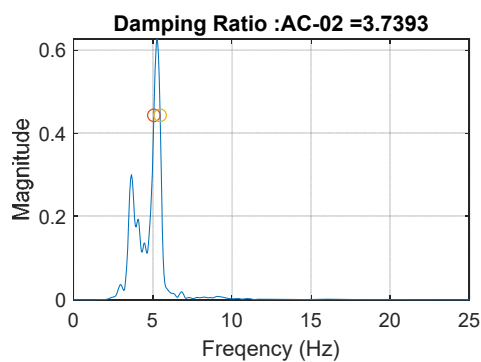
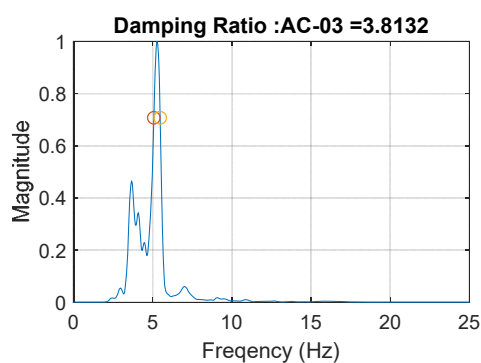
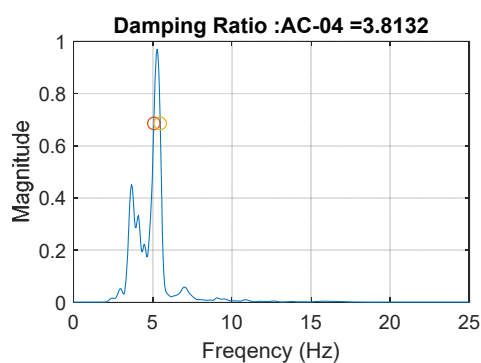
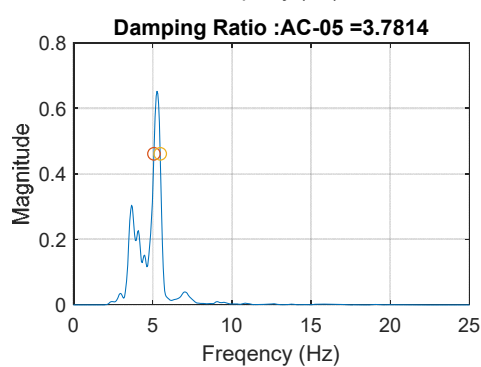
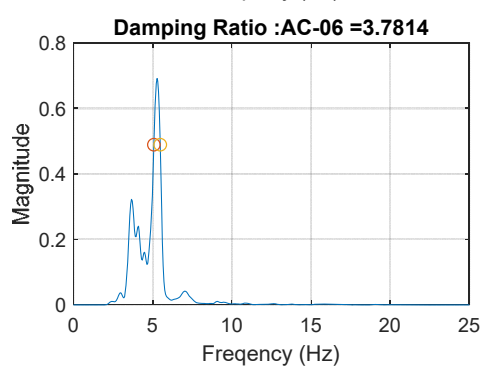
[7.5.7] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต

Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 1&2)

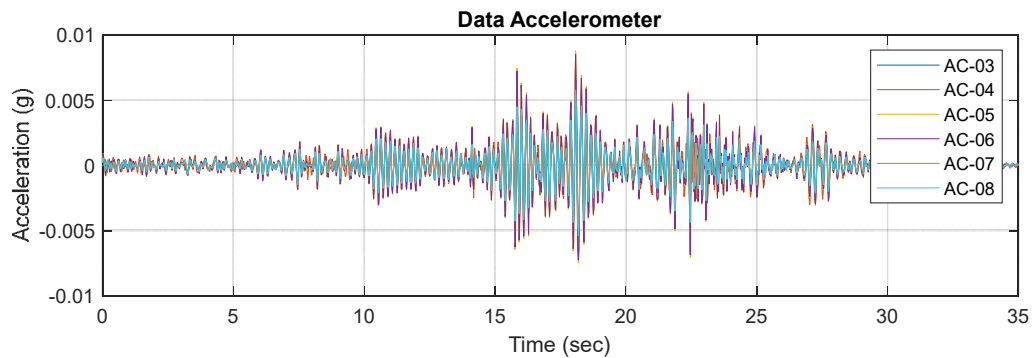
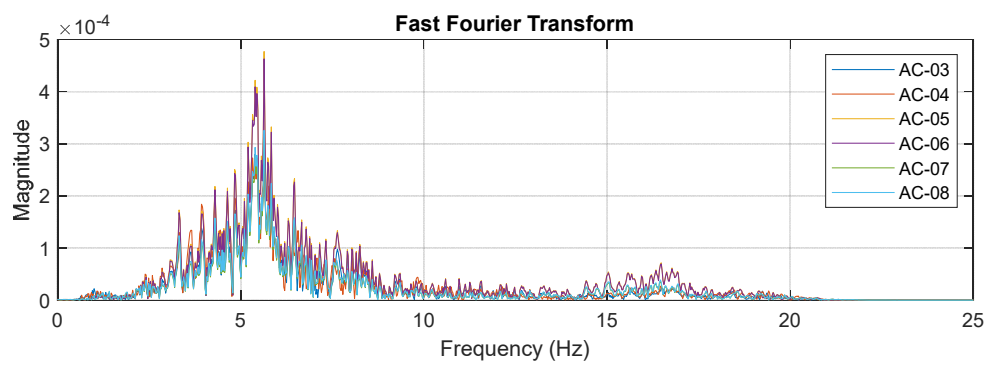
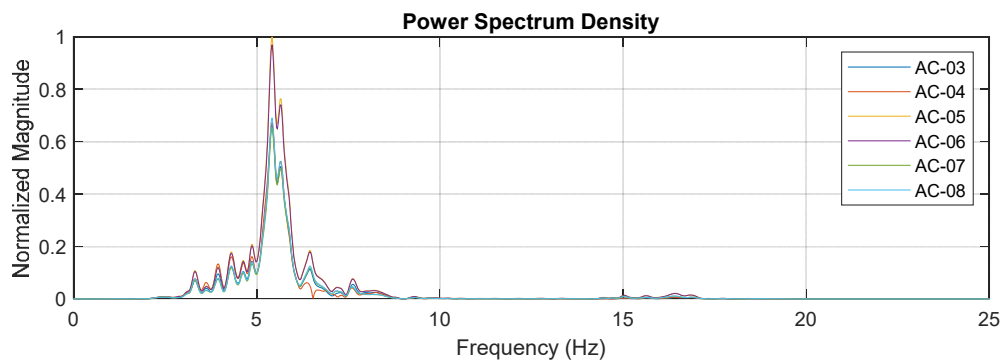
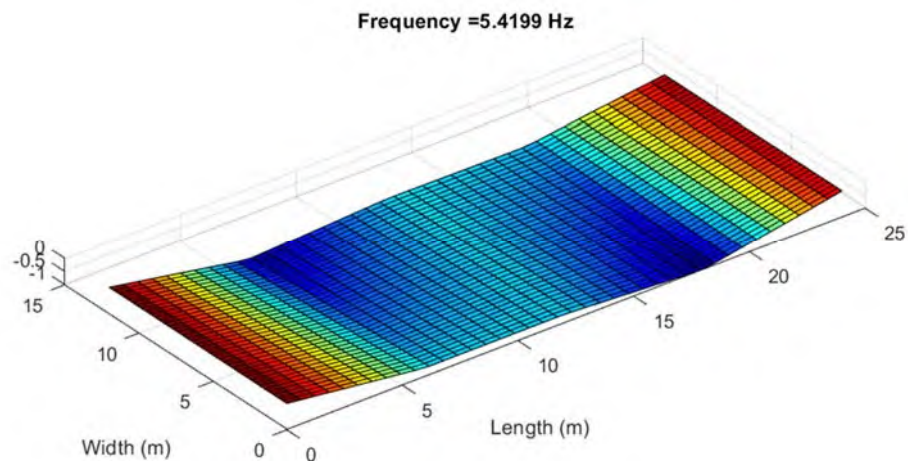


Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 1&2)

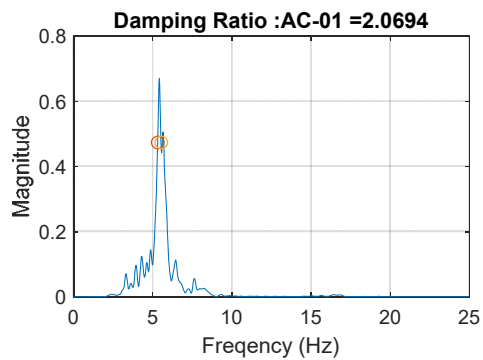
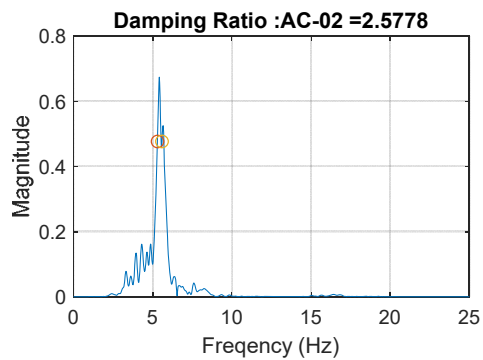
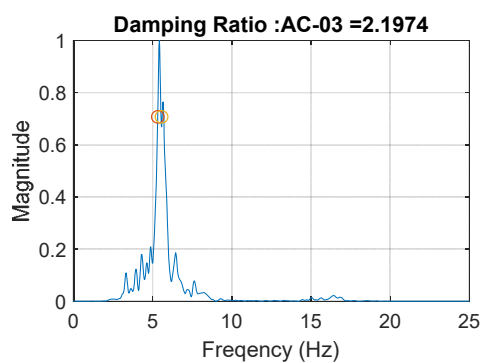
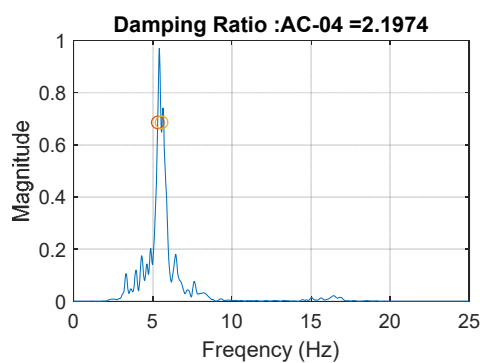
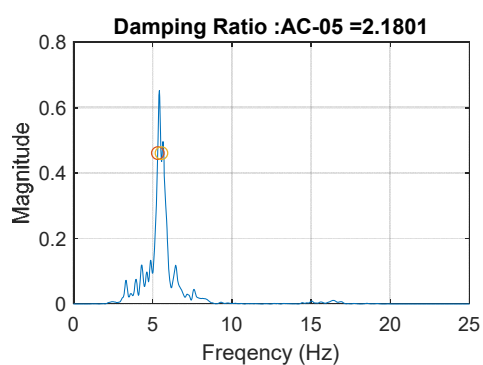
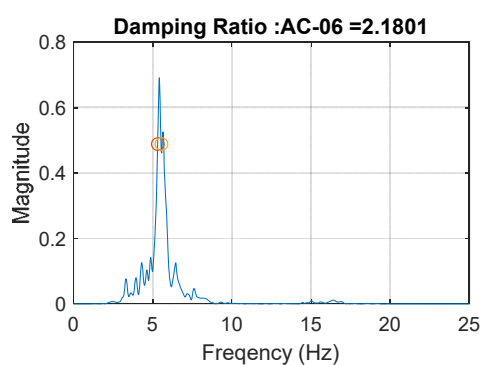
Frequency = 5.2734 Hz



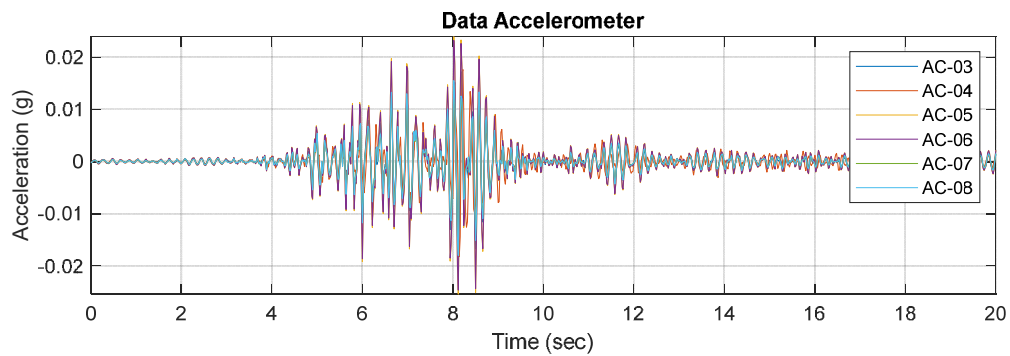
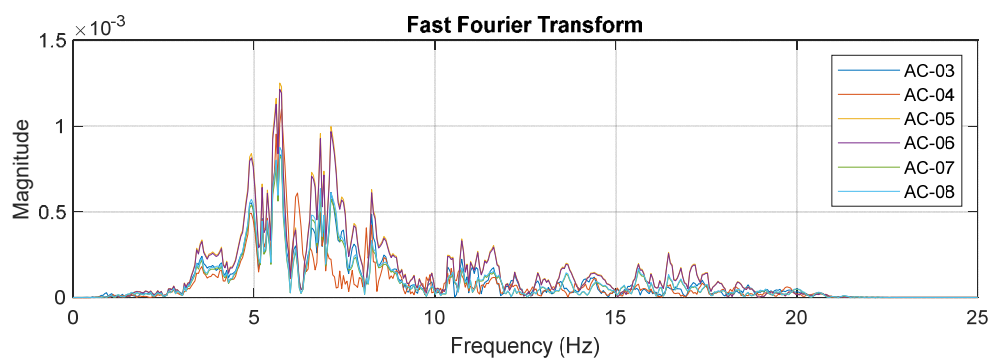
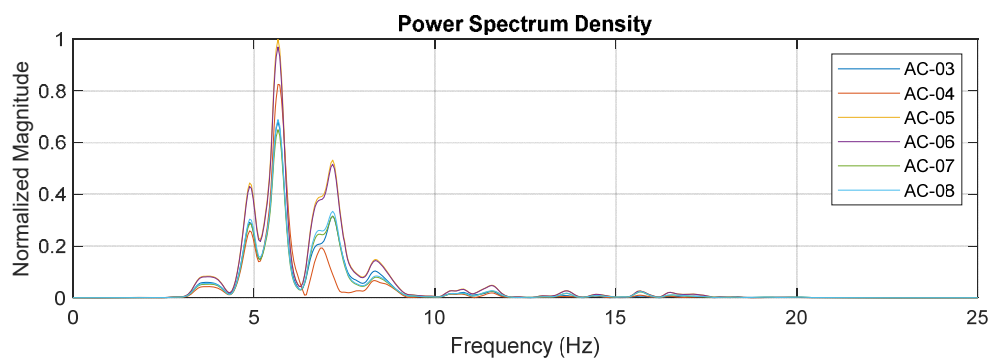
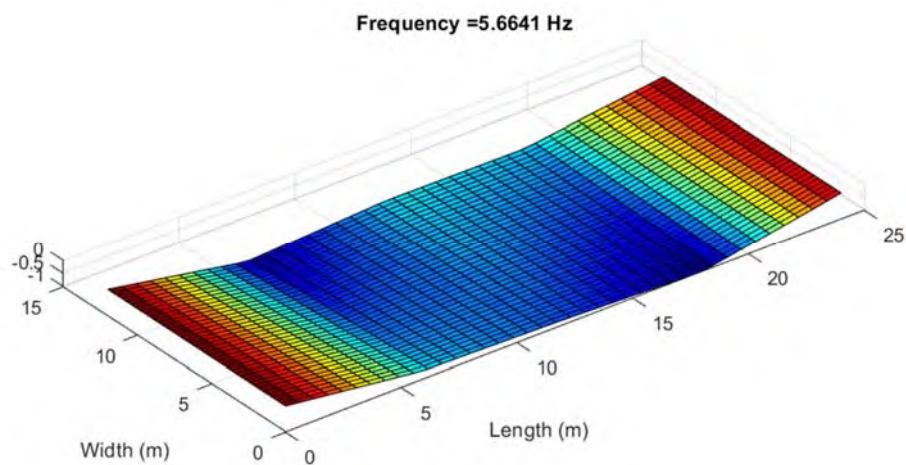
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 1&2)



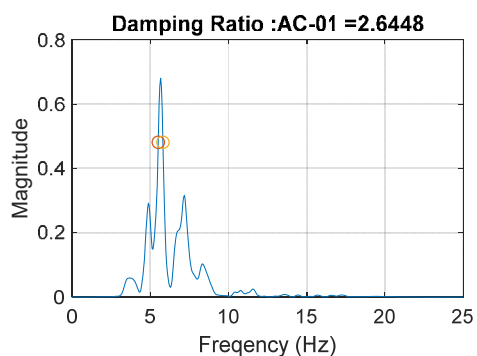
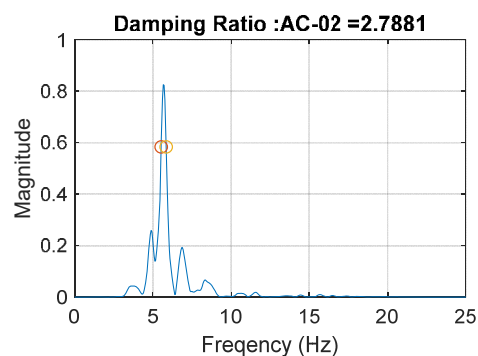
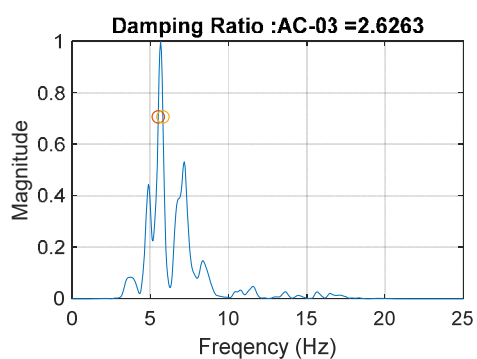
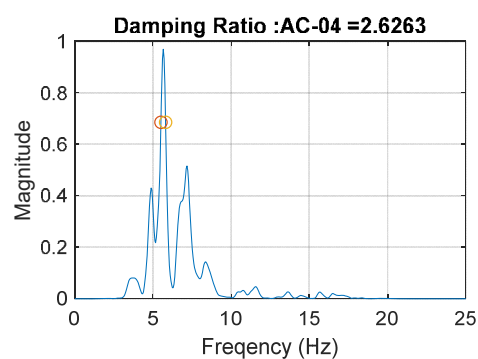
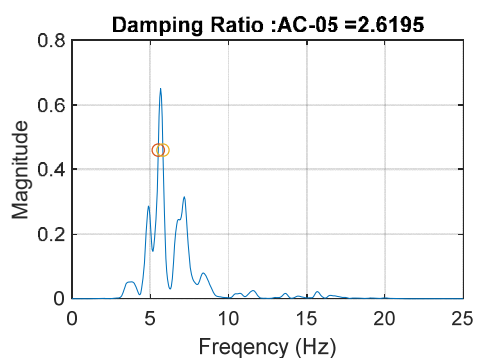
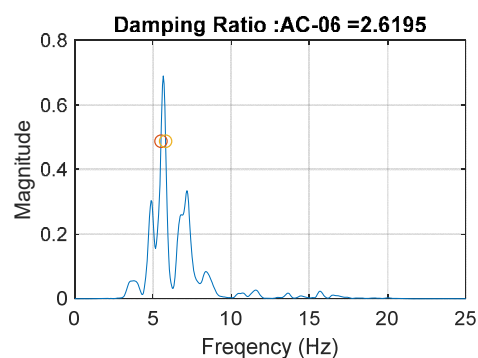
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 1&2)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 1&2)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 1&2)



ตารางที่ 7-8 ผลการวิเคราะห์ Natural Frequency, Mode Shape และ Damping Ratio (Span 1&2)

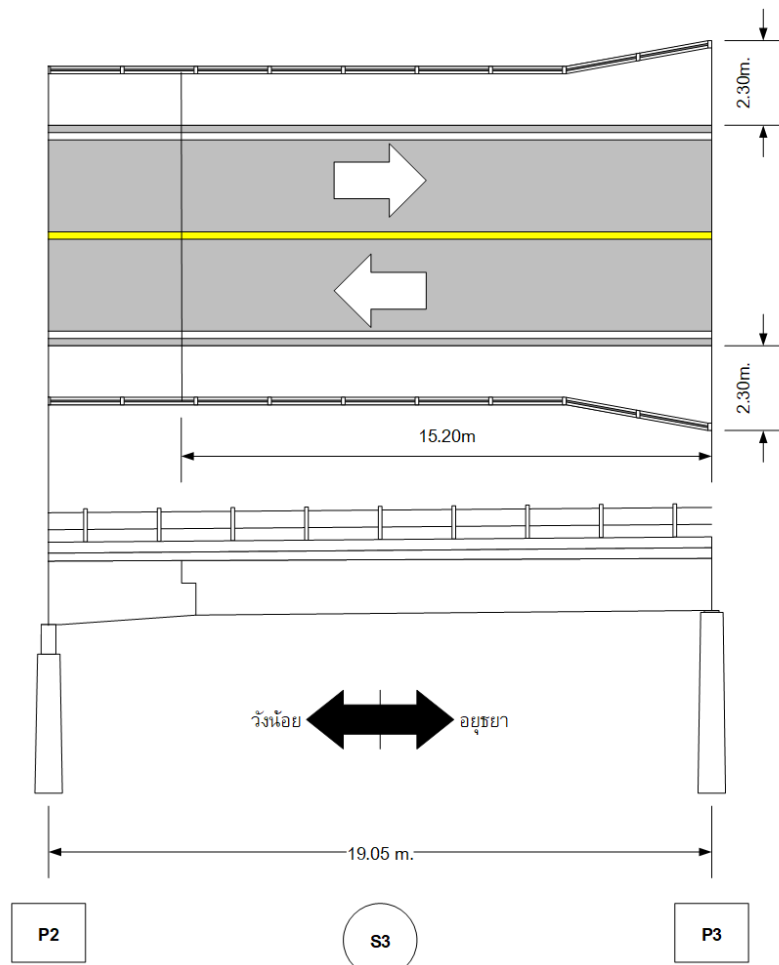
Dynamic Case	Speed (km/h)	Frequency (Hz)	Mode Shape (1st Mode)	Damping Ratio (%)
Dynamic1	20	5.27	Bending	3.78 - 3.82
Dynamic2	30	5.42	Bending	2.07 - 2.58
Dynamic3	50	5.66	Bending	2.61 - 2.78



[7.6] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานช่วงที่ 3 (Span 3)

โครงการนี้ได้ดำเนินการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานช่วงที่ 3 (Span 3) ความยาวช่วงระหว่างรอยต่อสะพานเท่ากับ 19.05 เมตร ความยาวช่วงระหว่างตอม่อเท่ากับ 15.20 เมตร โดยทำการทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต และแบบพลวัต เมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2564 ซึ่งมีรายละเอียดการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน ดังนี้

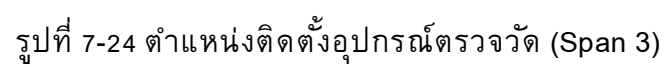
[7.6.1] ช่วงสะพานทดสอบ

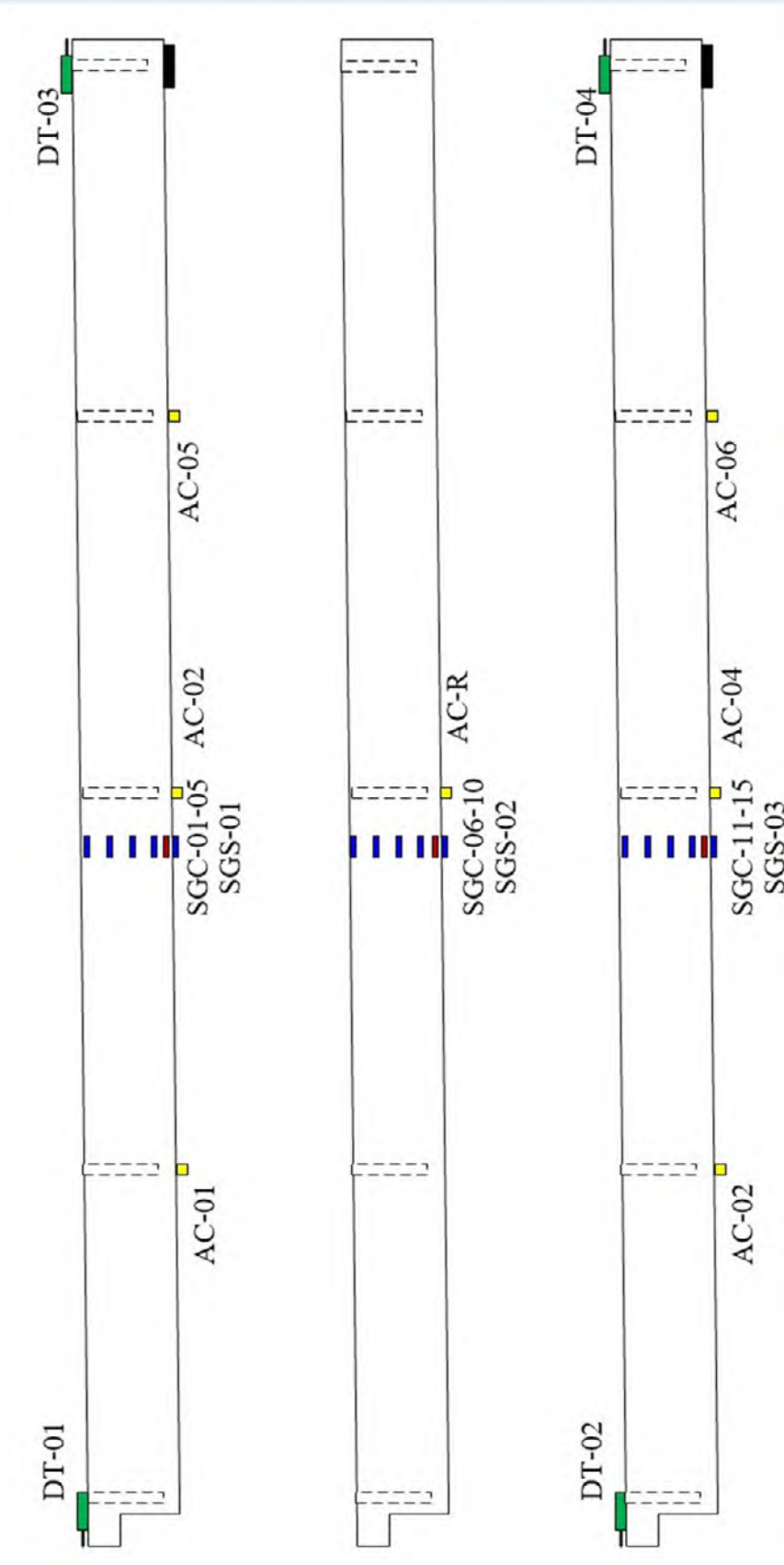


รูปที่ 7-23 ช่วงสะพานทดสอบ (Span 3)

[7.6.2] ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

ในช่วงสะพานนี้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับคอนกรีต (Strain Gauge Concrete) จำนวน 21 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับเหล็ก (Strain Gauge Steel) จำนวน 25 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) จำนวน 4 ตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) จำนวน 7 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้





รูปที่ 7-24 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 3) (ต่อ)



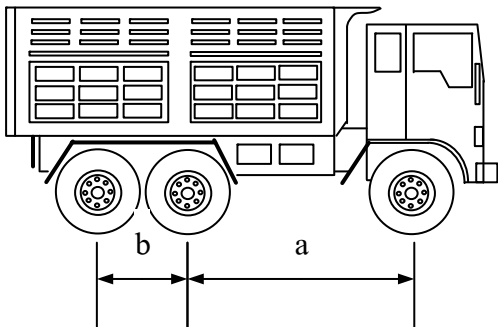
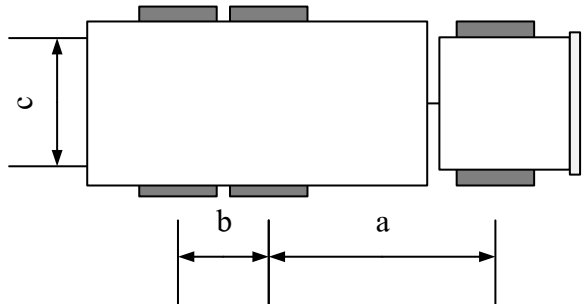
รูปที่ 7-25 ตัวอย่างภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน (Span 3)

[7.6.3] น้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ในช่วงสะพานนี้ได้ใช้รถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวมประมาณ 18 ตัน จำนวน 2 คัน ทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุม โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 7-9 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (Span 3)

คันที่	1	2
ประเภท	รถบรรทุก (80-7169)	รถบรรทุก (81-1439)
น้ำหนักรถบรรทุก (ตัน)	18.520	18.530
ระยะเพลลาที่ 1 ถึง 2 (a, เมตร)	4.00	4.10
ระยะเพลลาที่ 2 ถึง 3 (b, เมตร)	1.35	1.35
ความกว้างฐานล้อ (c, เมตร)	1.90	2.00

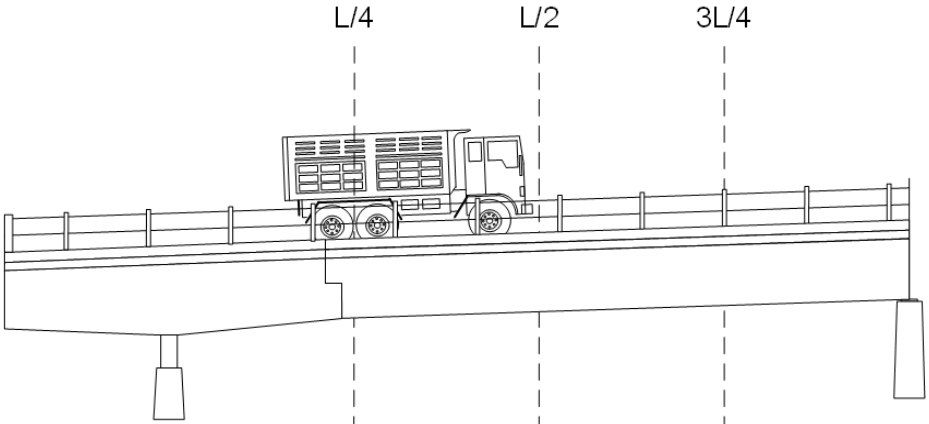
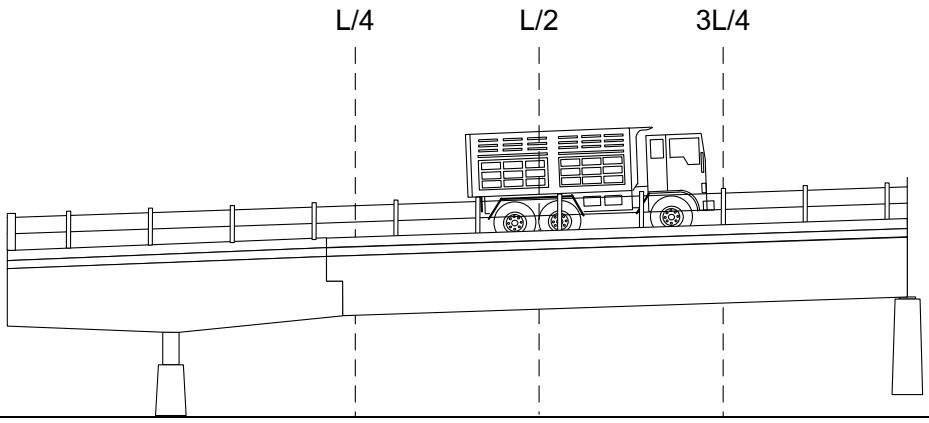
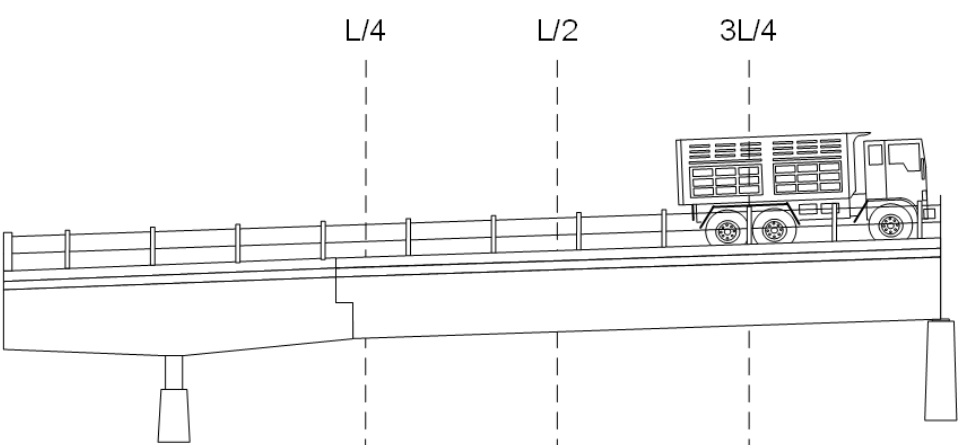



[7.6.4] รูปแบบการทดสอบแบบสถิต

การทดสอบแบบสถิต (Static Test) เป็นการนำรถบรรทุกทดสอบจอดตามตำแหน่งต่างๆ ที่กำหนดหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

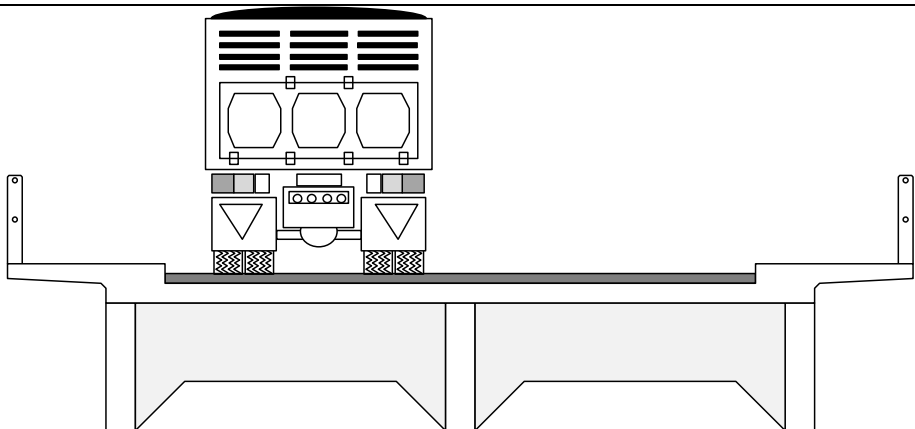
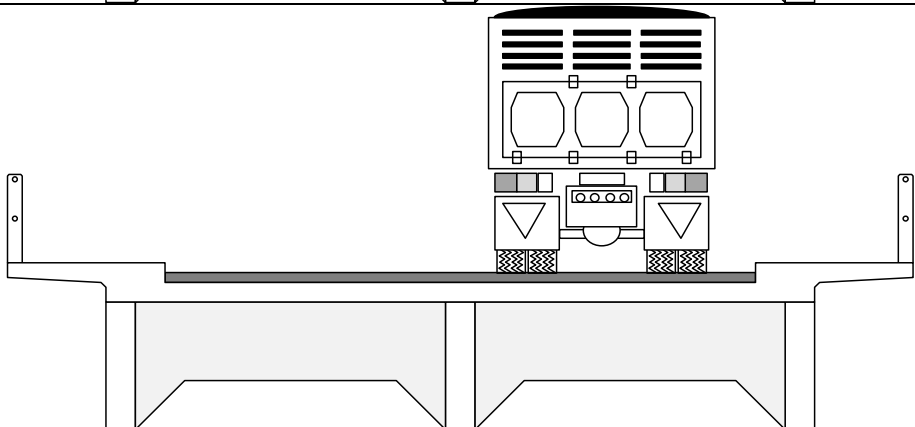
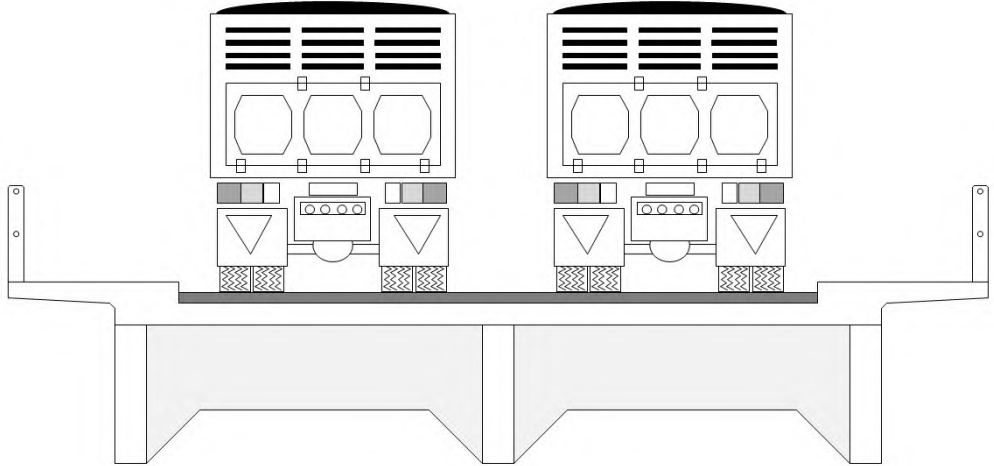
- Static 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ ในช่องจราจรทางซ้าย
- Static 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ ในช่องจราจรทางขวา
- Static 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ ทั้งสองช่องจราจร

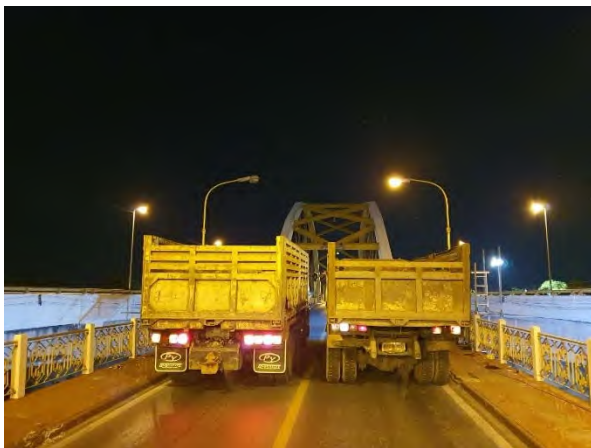
ตารางที่ 7-10 ระยะจอดรถบรรทุกตามตำแหน่ง L/4, L/2 และ 3L/4 (Span 3)

ระยะ	ตำแหน่งจอดรถบรรทุก
L/4	
L/2	
3L/4	



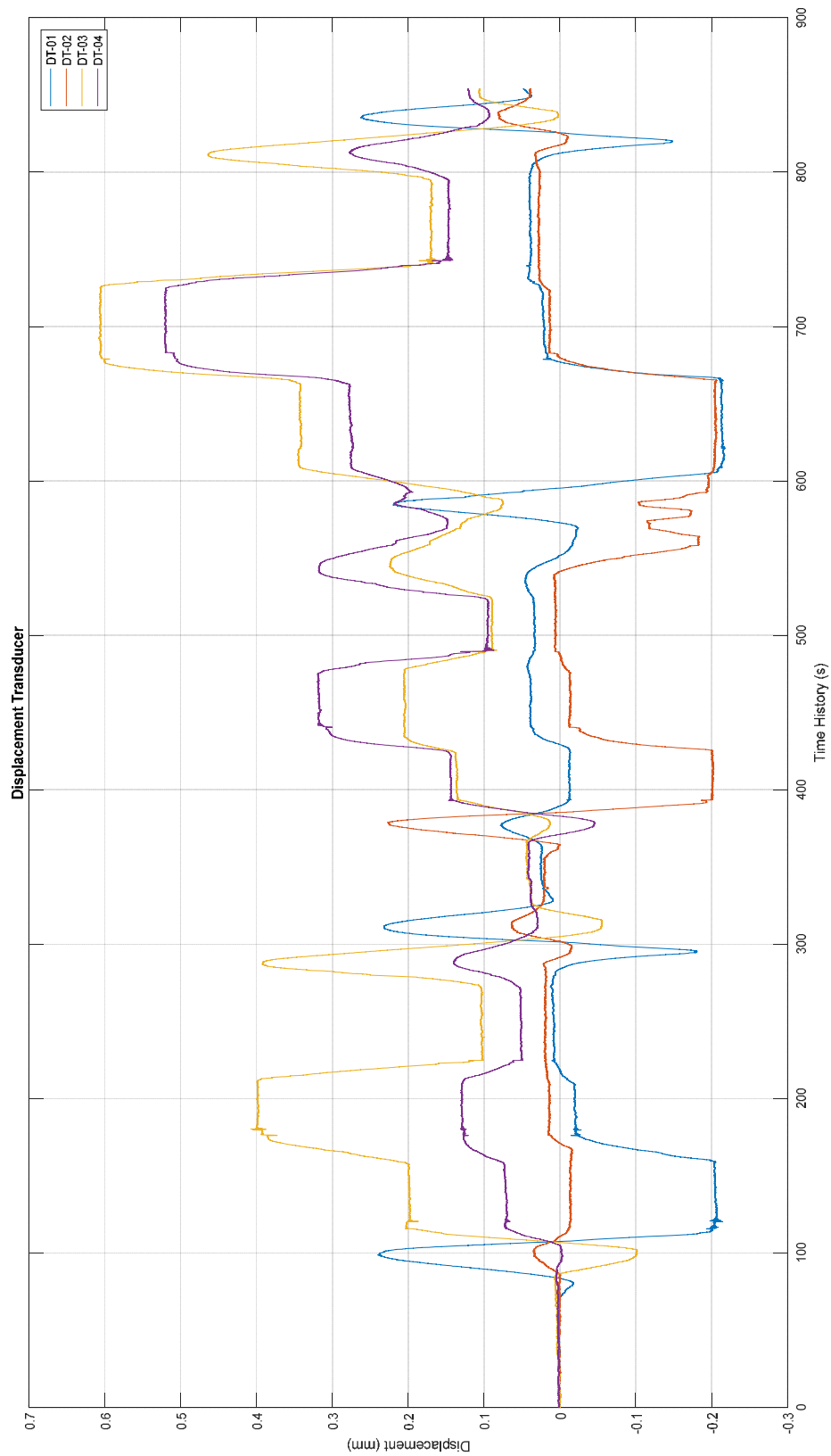
ตารางที่ 7-11 รูปแบบการทดสอบแบบสถิต ด้วยรถบรรทุกน้ำหนัก (Span 3)

Case	Pattern
Static 1	
Static 2	
Static 3	

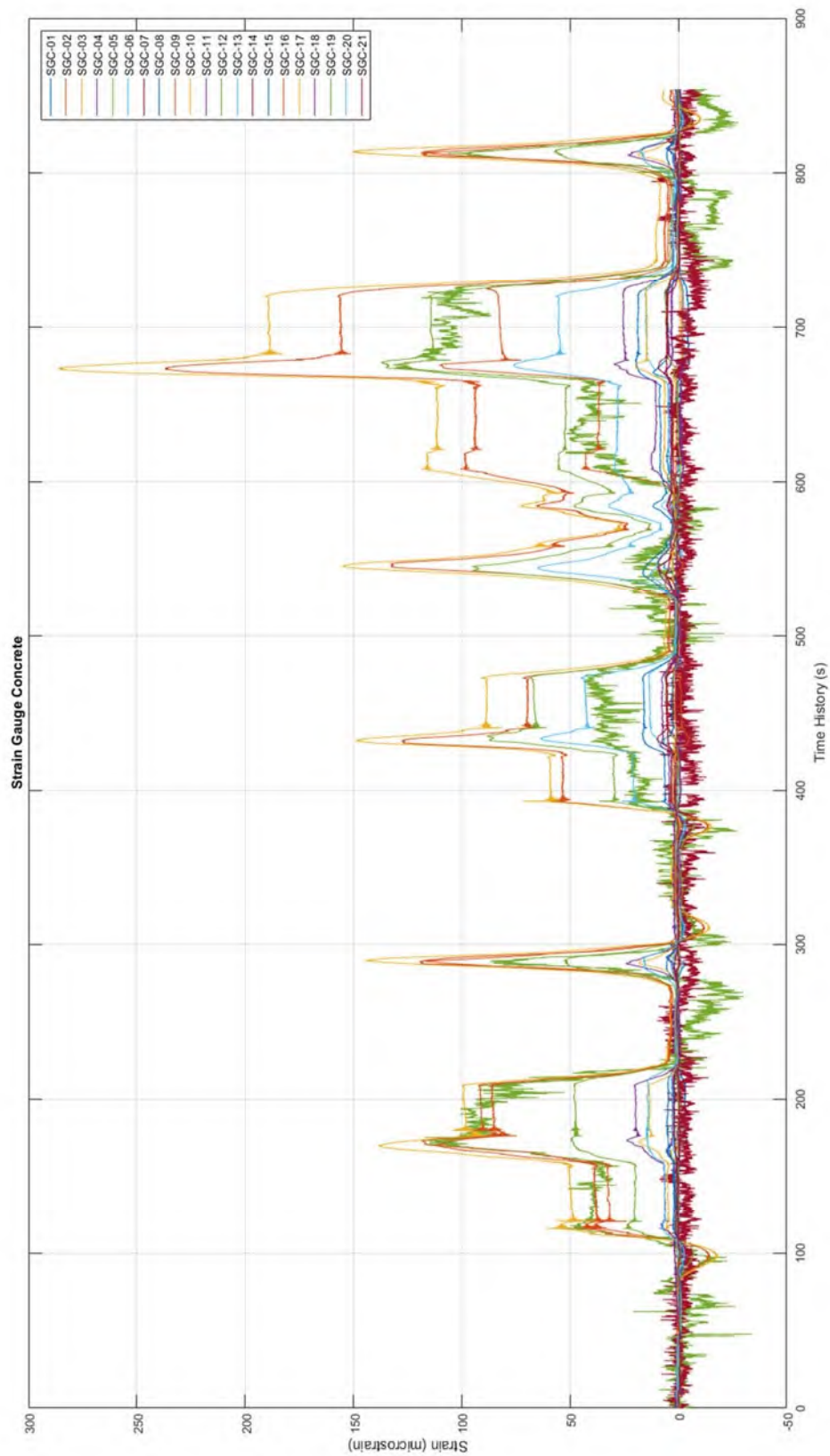


รูปที่ 7-26 ภาพการทดสอบแบบสถิต (Span 3)

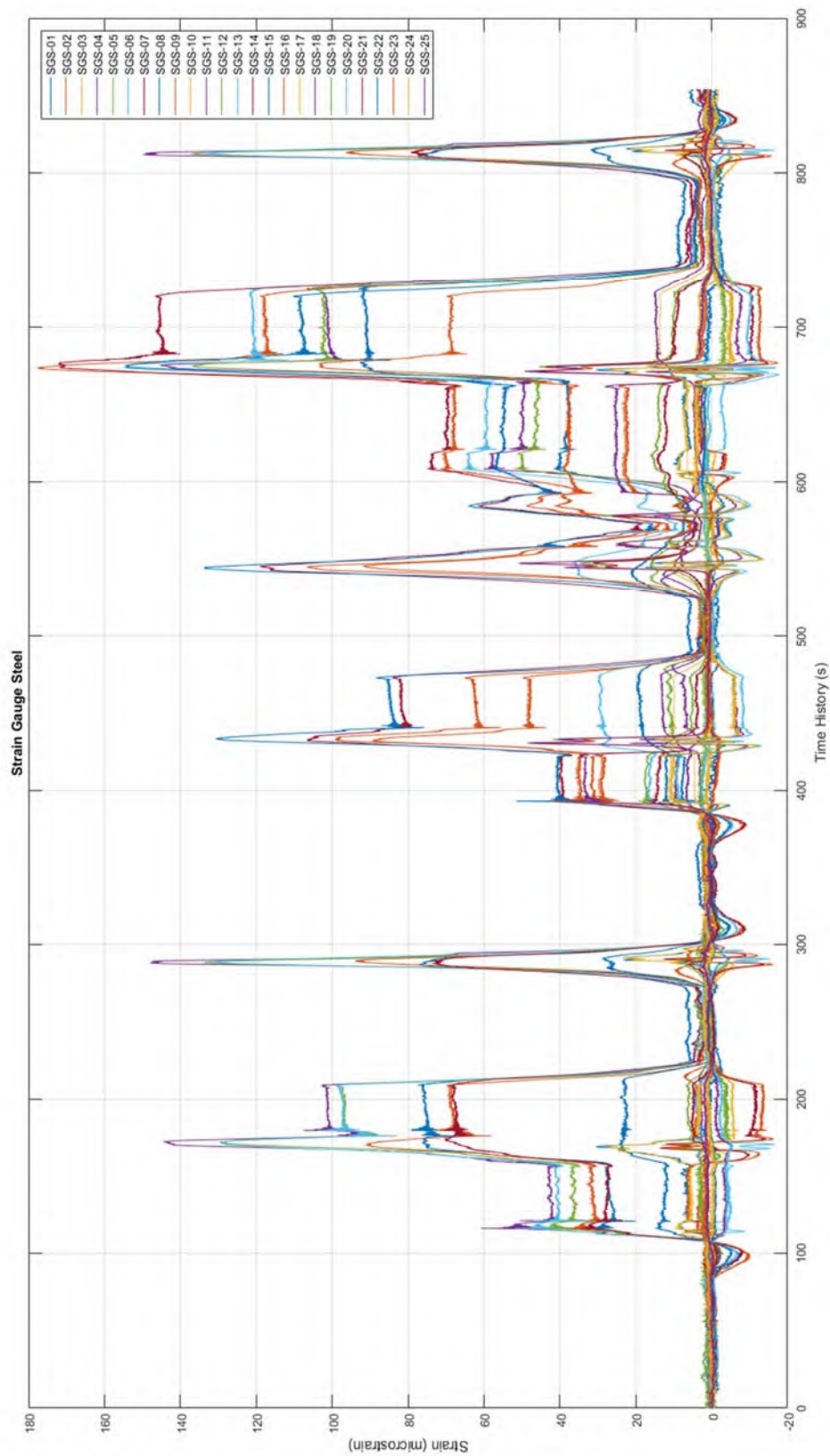




รูปที่ 7-27 สัญญาณการตรวจวัด Displacement Transducer (Span 3)



รูปที่ 7-28 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (Span 3)



รูปที่ 7-29 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Steel (Span 3)

[7.6.5] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิต

ตารางที่ 7-12 ผลการตรวจวัด Displacement Transducer (หน่วย : mm) (Span 3)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S3)	L/2(S3)	3L/4(S3)	L/4(S3)	L/2(S3)	3L/4(S3)	L/4(S3)	L/2(S3)	3L/4(S3)
DT-01	0.002	-0.019	0.008	-0.012	0.037	0.033	-0.213	0.021	0.040
DT-02	0.001	0.014	0.019	-0.203	-0.014	0.005	-0.206	0.013	0.027
DT-03	0.003	0.398	0.104	0.136	0.205	0.089	0.344	0.606	0.169
DT-04	0.001	0.129	0.051	0.144	0.317	0.094	0.277	0.520	0.146

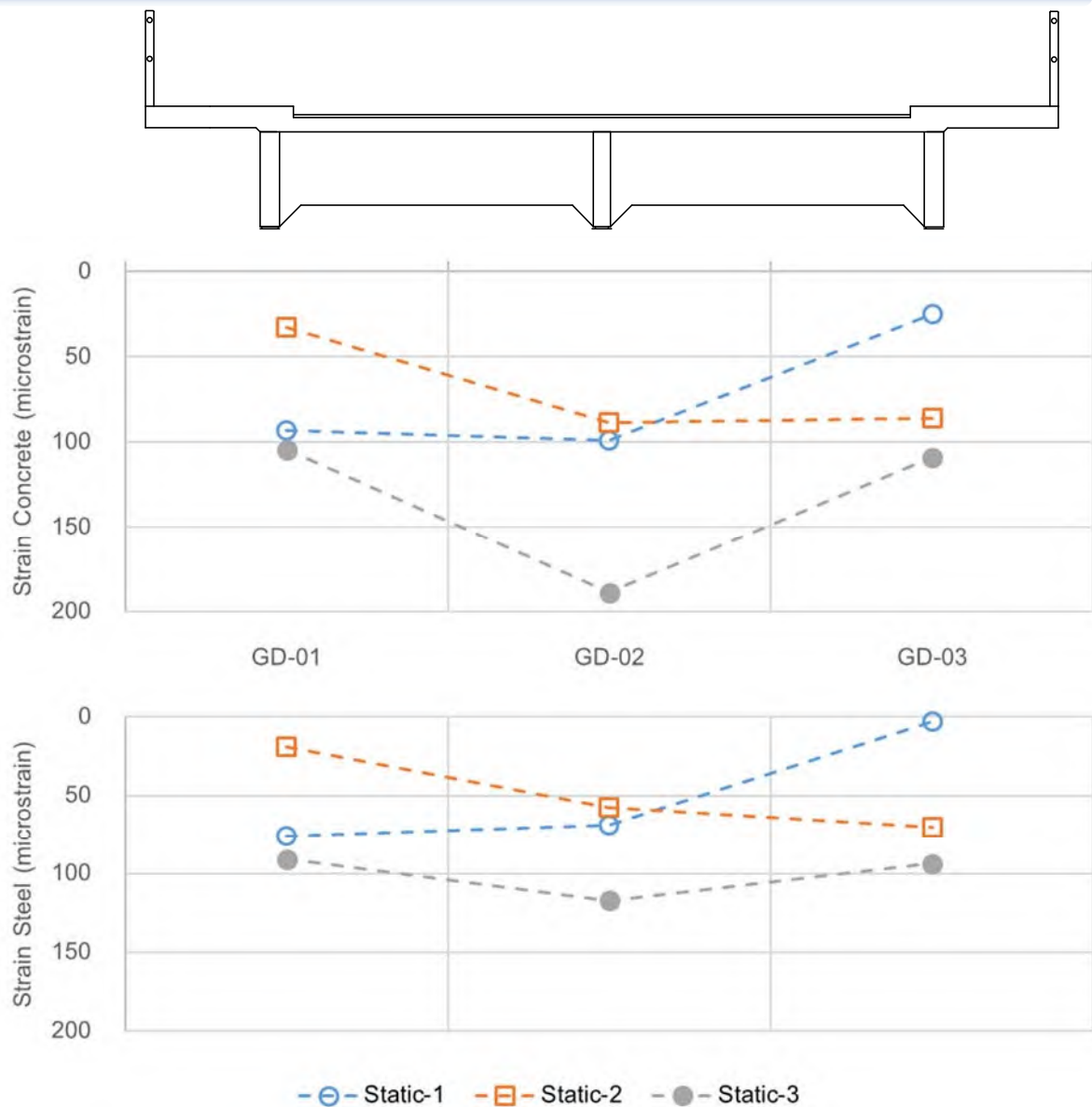
ตารางที่ 7-13 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (หน่วย : microstarin) (Span 3)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S3)	L/2(S3)	3L/4(S3)	L/4(S3)	L/2(S3)	3L/4(S3)	L/4(S3)	L/2(S3)	3L/4(S3)
SGC-01	-0.535	-3.331	0.352	0.533	-1.438	0.142	-0.190	-4.685	0.252
SGC-02	-0.342	-1.379	0.104	0.598	-0.317	-0.173	0.615	-1.792	0.142
SGC-03	0.090	-0.315	0.575	1.454	0.200	0.658	2.158	-1.029	0.921
SGC-04	0.044	2.123	0.279	1.323	0.706	0.271	3.200	3.067	0.915
SGC-05	-0.040	93.120	-9.900	19.800	32.680	-1.725	46.290	104.170	-6.683
SGC-06	-0.531	-1.473	0.081	-0.150	-1.517	-0.671	-1.063	-2.460	-0.050
SGC-07	-2.502	2.494	2.002	-8.913	-2.302	-2.933	-0.500	-4.117	-0.944
SGC-08	-0.531	1.902	-0.138	3.121	2.508	-0.319	4.119	4.825	-0.171
SGC-09	0.131	86.050	2.954	53.150	69.280	4.256	93.230	155.520	6.225
SGC-10	0.052	99.170	3.456	59.130	88.320	6.496	111.080	188.700	10.110
SGC-11	0.742	0.115	1.571	-0.817	5.246	0.750	-1.360	5.058	3.273
SGC-12	0.535	0.302	1.508	0.192	5.667	0.402	0.354	5.540	2.760
SGC-13	1.052	2.821	1.688	3.300	13.310	1.421	4.379	15.170	2.717
SGC-14	0.260	1.531	0.779	2.235	5.104	0.392	2.475	5.242	1.144
SGC-15	-0.215	4.688	0.510	6.492	15.860	0.804	8.217	18.640	1.033
SGC-16	0.452	91.200	2.888	3.265	-1.438	2.158	36.640	82.130	4.808
SGC-17	-0.071	13.280	0.442	2.442	1.854	-0.083	6.427	14.610	0.638
SGC-18	-0.110	19.890	-0.546	4.260	7.758	-0.671	10.470	25.480	-0.302
SGC-19	-0.569	48.180	0.383	29.940	66.940	1.685	52.250	114.220	3.835
SGC-20	-0.206	14.270	0.200	20.970	42.930	1.413	28.100	55.350	2.490
SGC-21	-0.738	-0.260	0.402	3.160	5.035	0.213	2.942	5.083	-0.160

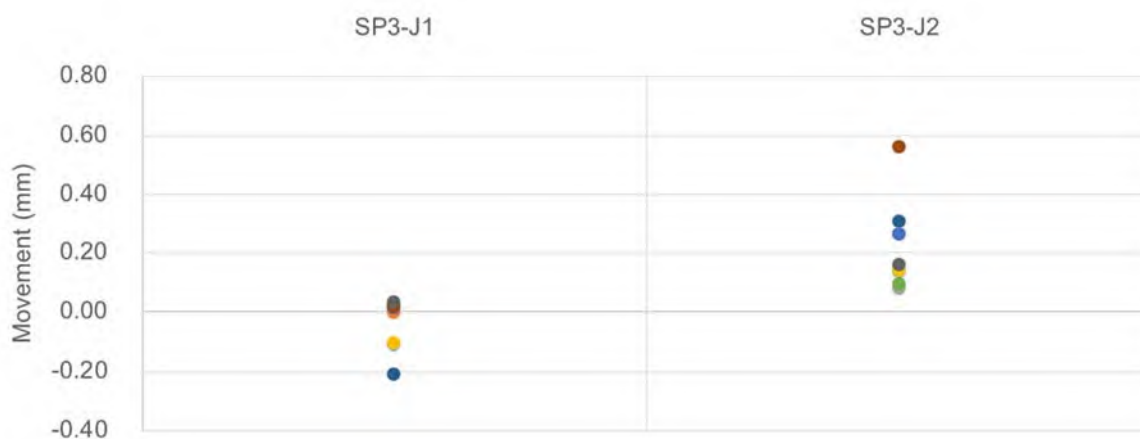


ตารางที่ 7-14 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel (หน่วย : microstarin) (Span 3)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S3)	L/2(S3)	3L/4(S3)	L/4(S3)	L/2(S3)	3L/4(S3)	L/4(S3)	L/2(S3)	3L/4(S3)
SGS-01	1.023	75.800	5.785	11.930	18.680	6.031	37.690	90.800	9.160
SGS-02	-0.023	68.680	1.406	34.870	47.540	3.067	68.250	117.160	5.217
SGS-03	-0.113	2.967	0.223	4.375	9.935	0.483	6.350	13.660	0.477
SGS-04	0.600	101.210	2.642	6.358	6.754	2.777	49.710	100.960	5.765
SGS-05	1.423	97.100	2.425	9.233	11.330	1.260	46.320	103.140	4.723
SGS-06	0.850	97.240	2.054	16.430	29.450	1.340	59.380	120.790	4.788
SGS-07	0.498	67.960	2.146	40.050	82.000	2.808	69.480	145.670	6.873
SGS-08	-0.319	23.100	0.556	40.740	84.560	2.373	54.780	107.680	4.848
SGS-09	-0.419	4.100	1.013	31.510	62.310	2.100	38.060	68.760	3.238
SGS-10	-0.256	-5.365	-0.069	1.354	1.075	-0.254	1.856	-4.956	-2.069
SGS-11	1.031	2.765	1.654	3.234	13.044	1.393	4.291	14.867	2.663
SGS-12	0.365	-3.206	1.219	2.156	1.719	0.515	2.473	-3.517	0.381
SGS-13	0.219	4.146	2.085	2.250	-0.017	0.938	-3.156	1.044	0.729
SGS-14	-0.308	-11.270	0.885	-1.123	0.885	0.794	3.615	-10.420	0.379
SGS-15	-0.821	0.294	-0.908	-0.210	0.546	0.031	6.619	0.873	-1.981
SGS-16	-0.625	-13.230	1.025	-1.619	0.356	0.865	3.660	-12.430	-0.071
SGS-17	-0.273	3.550	0.385	0.617	1.152	-0.035	7.165	3.513	-0.817
SGS-18	-0.977	-1.208	-0.610	9.598	-6.169	0.858	2.690	-6.790	-0.027
SGS-19	-1.254	6.469	-0.342	17.380	5.146	1.971	14.120	10.020	0.081
SGS-20	-1.398	-2.825	-1.135	9.240	-8.098	-0.525	0.933	-9.763	-1.752
SGS-21	-1.190	4.767	-0.550	14.210	4.181	1.079	12.140	9.429	-0.083
SGS-22	-0.475	0.402	0.817	7.815	-5.846	0.242	1.856	-5.000	-0.200
SGS-23	0.071	0.631	1.523	28.560	0.852	0.388	22.390	1.646	0.373
SGS-24	-0.202	0.585	1.646	10.200	-6.056	0.319	3.592	-5.235	0.275
SGS-25	-0.410	1.796	0.977	33.280	1.017	0.640	25.060	2.735	0.090



รูปที่ 7-30 การพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน (Span 3)



รูปที่ 7-31 การพฤติกรรมการขยับตัวของรอยต่อสะพาน (Span 3)

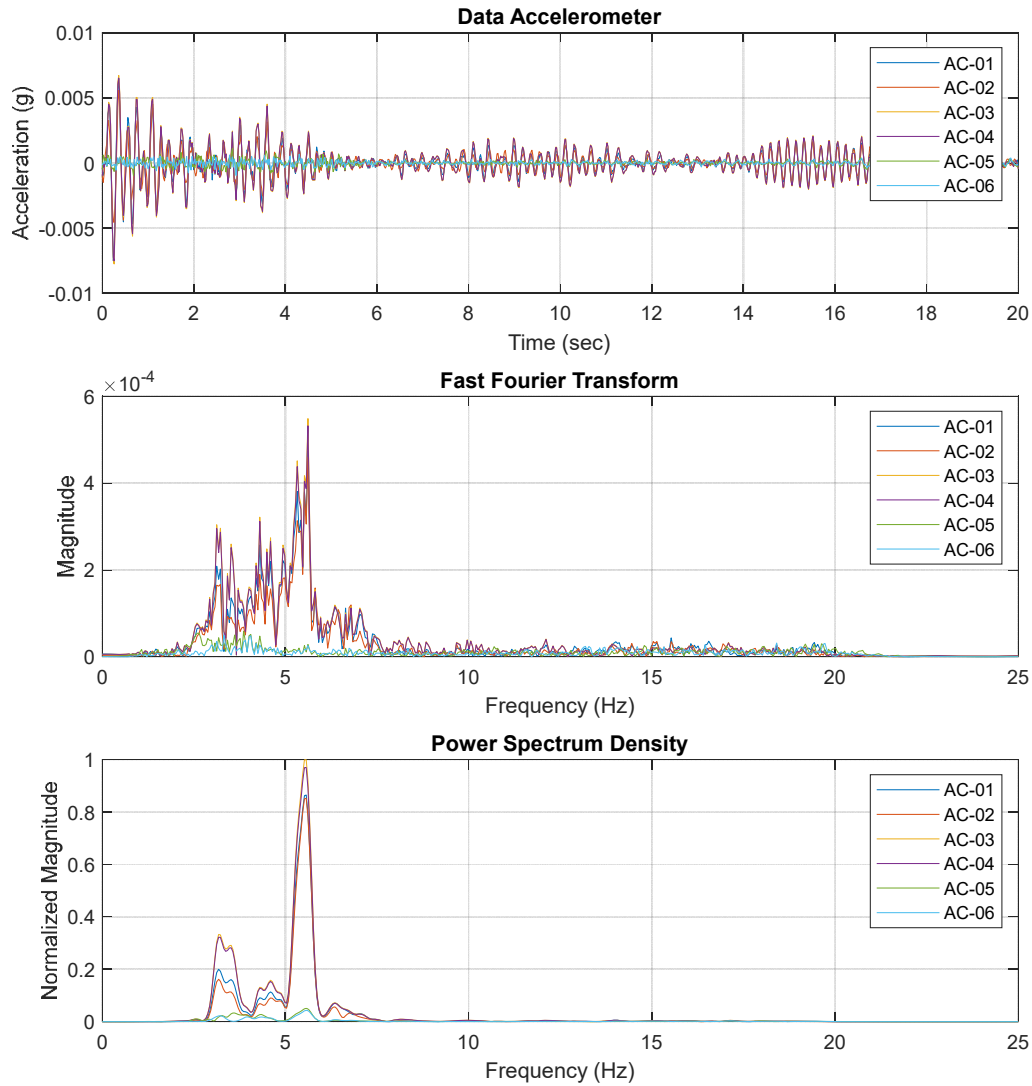
[7.6.6] รูปแบบการทดสอบแบบพลวัต

การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) เป็นการทดสอบโดยใช้รถบรรทุกวิ่งผ่านช่วงสะพานทดสอบหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

- Dynamic 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 20 กม./ชม. กึ่งกลางสะพาน
- Dynamic 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 30 กม./ชม. กึ่งกลางสะพาน
- Dynamic 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. กึ่งกลางสะพาน

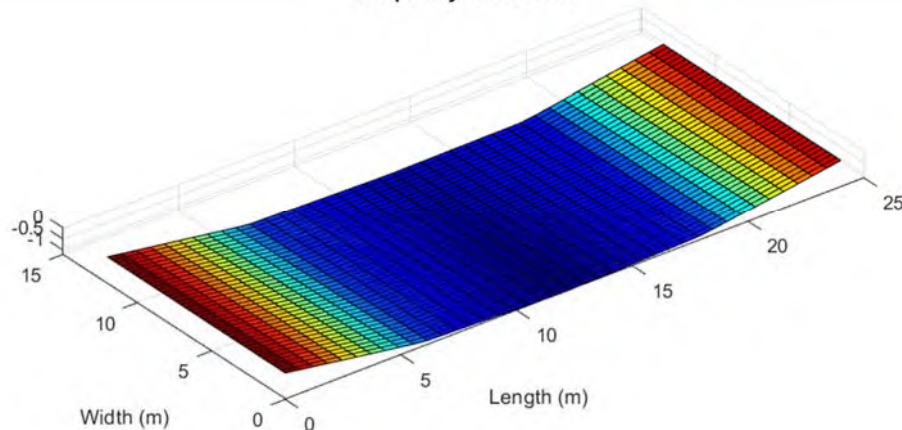
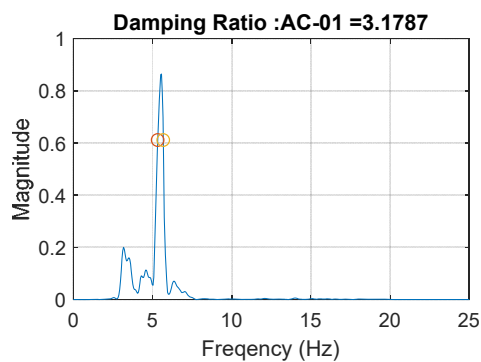
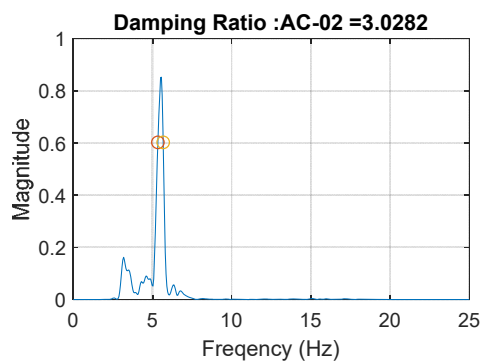
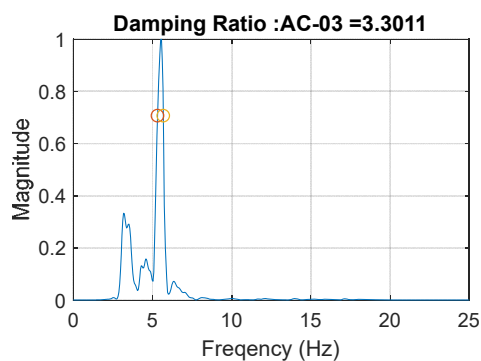
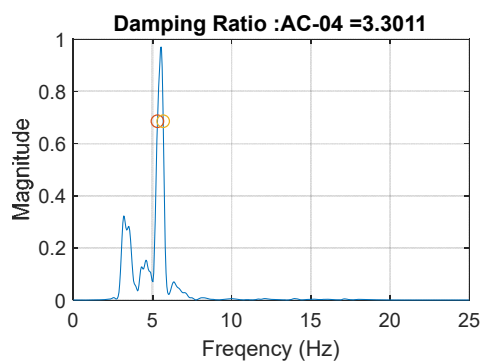
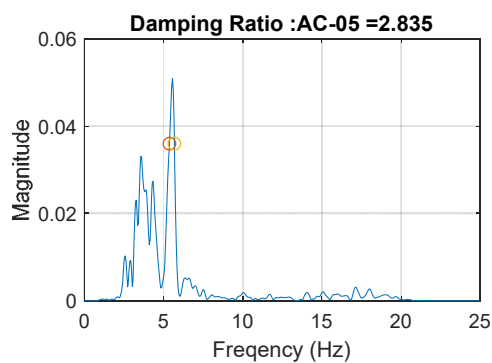
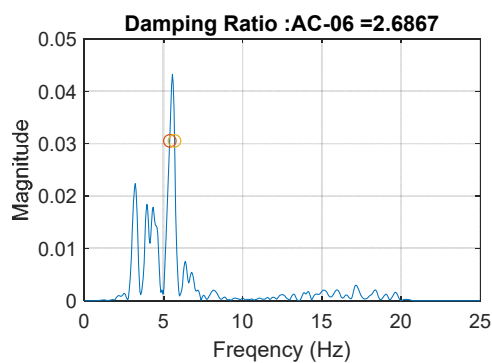
[7.6.7] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต

Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 3)

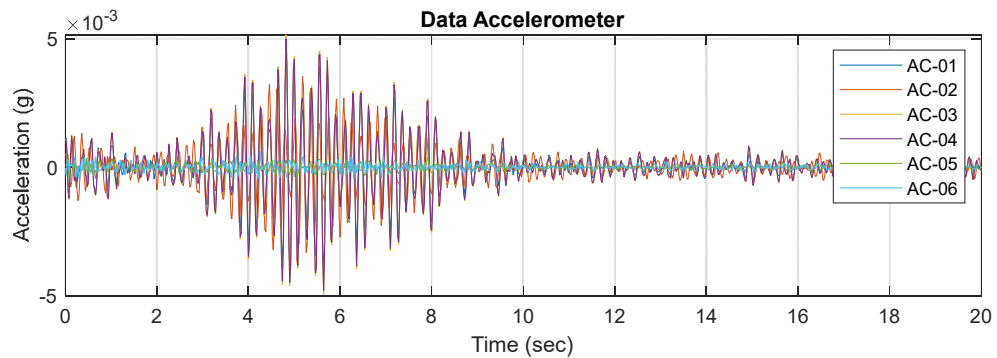
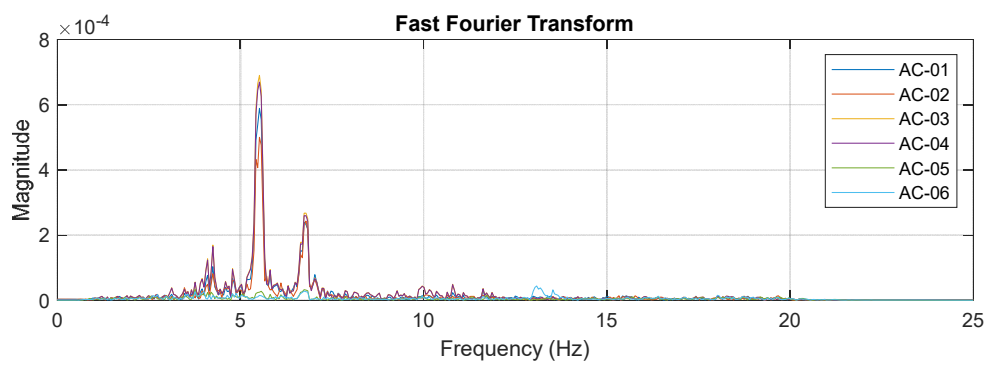
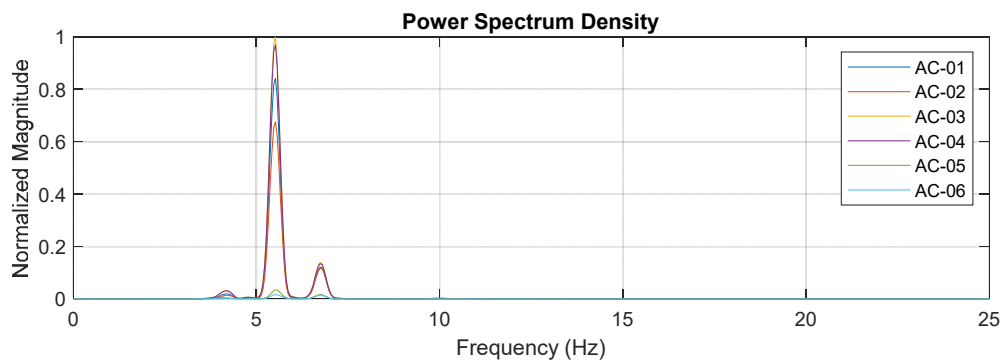
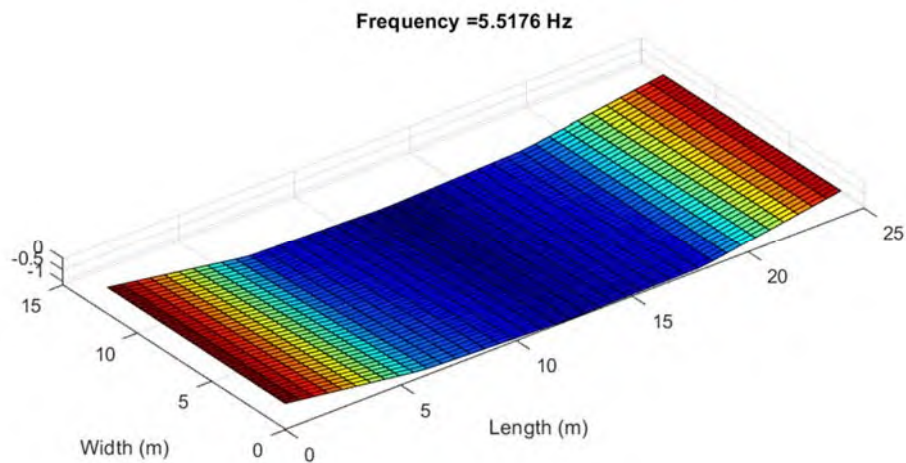


Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 3)

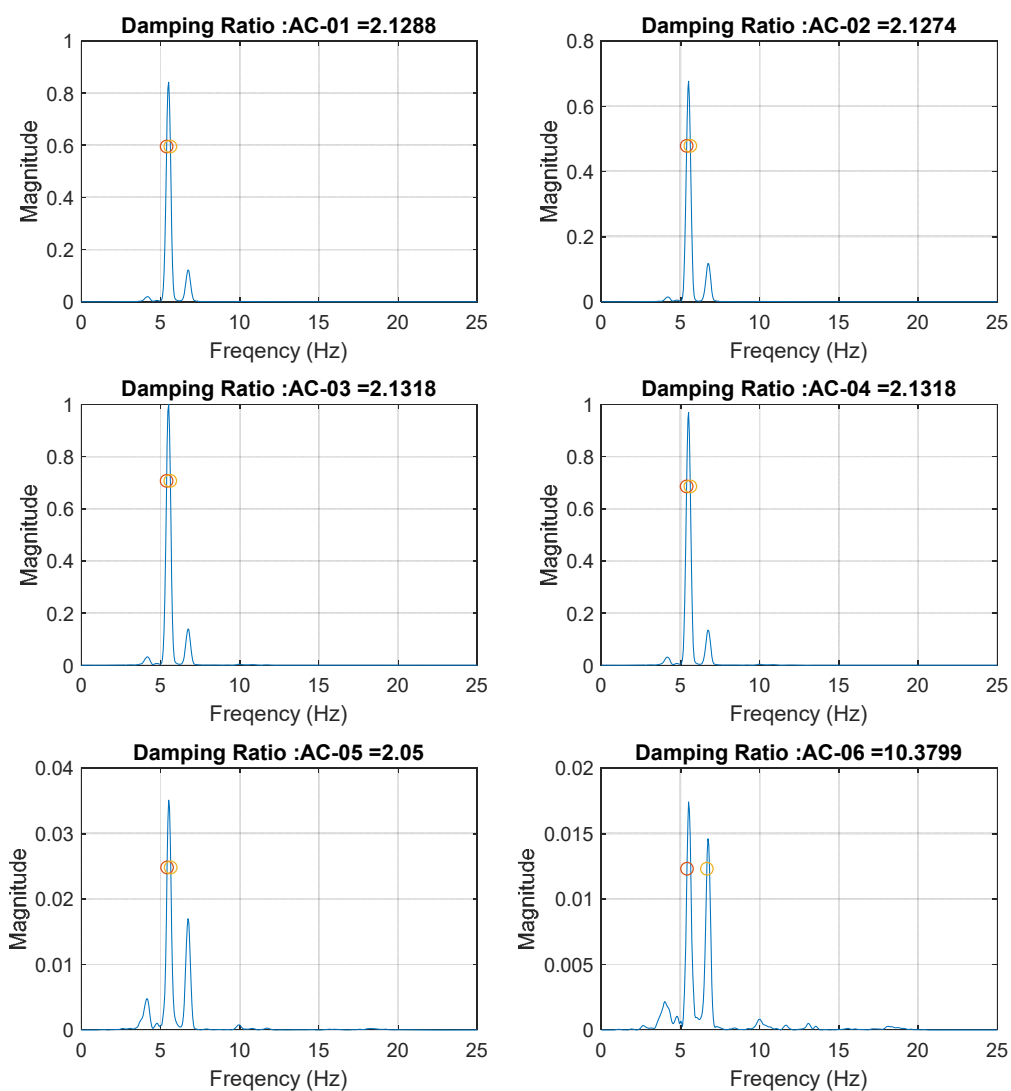
Frequency = 5.5664 Hz



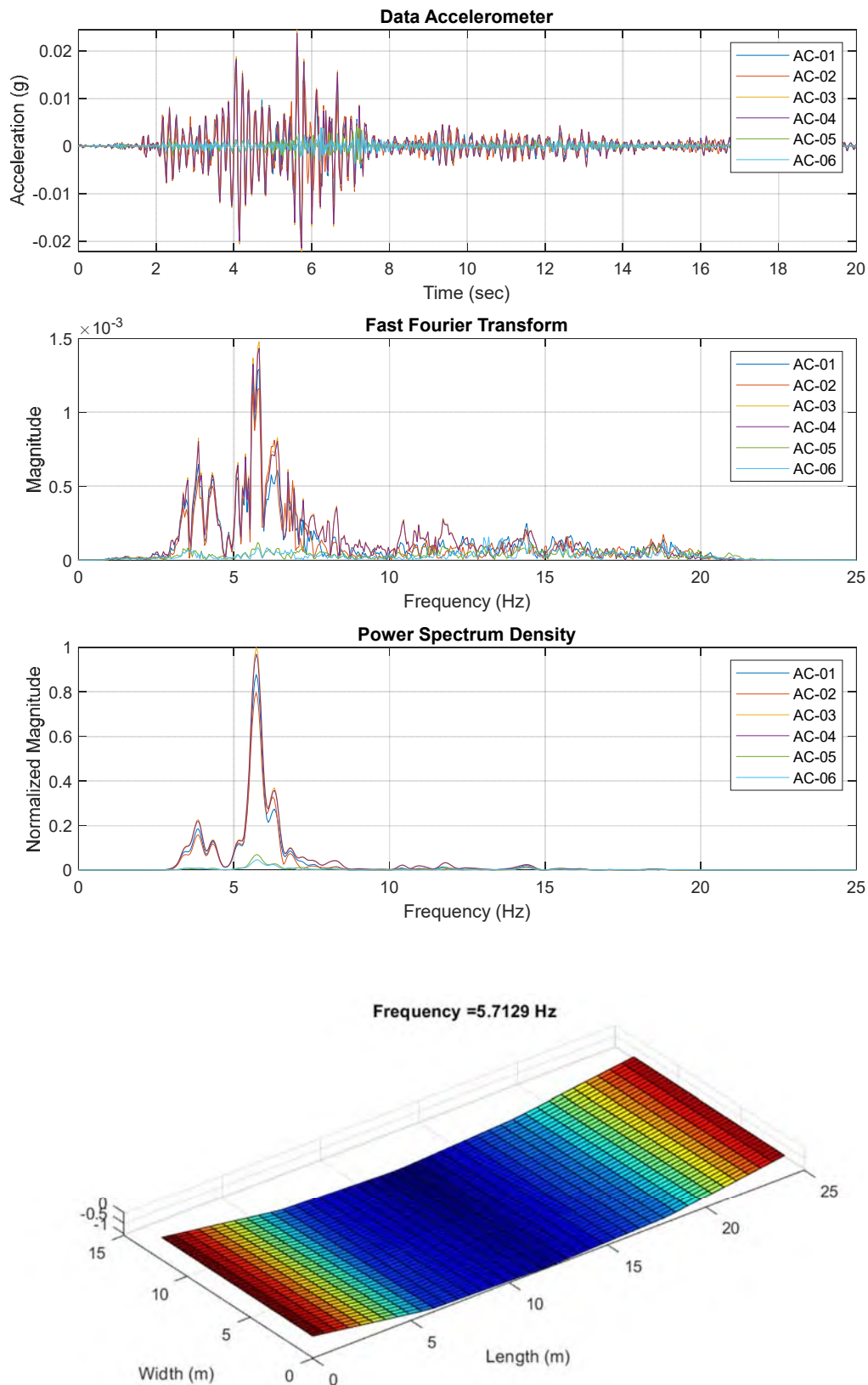
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 3)



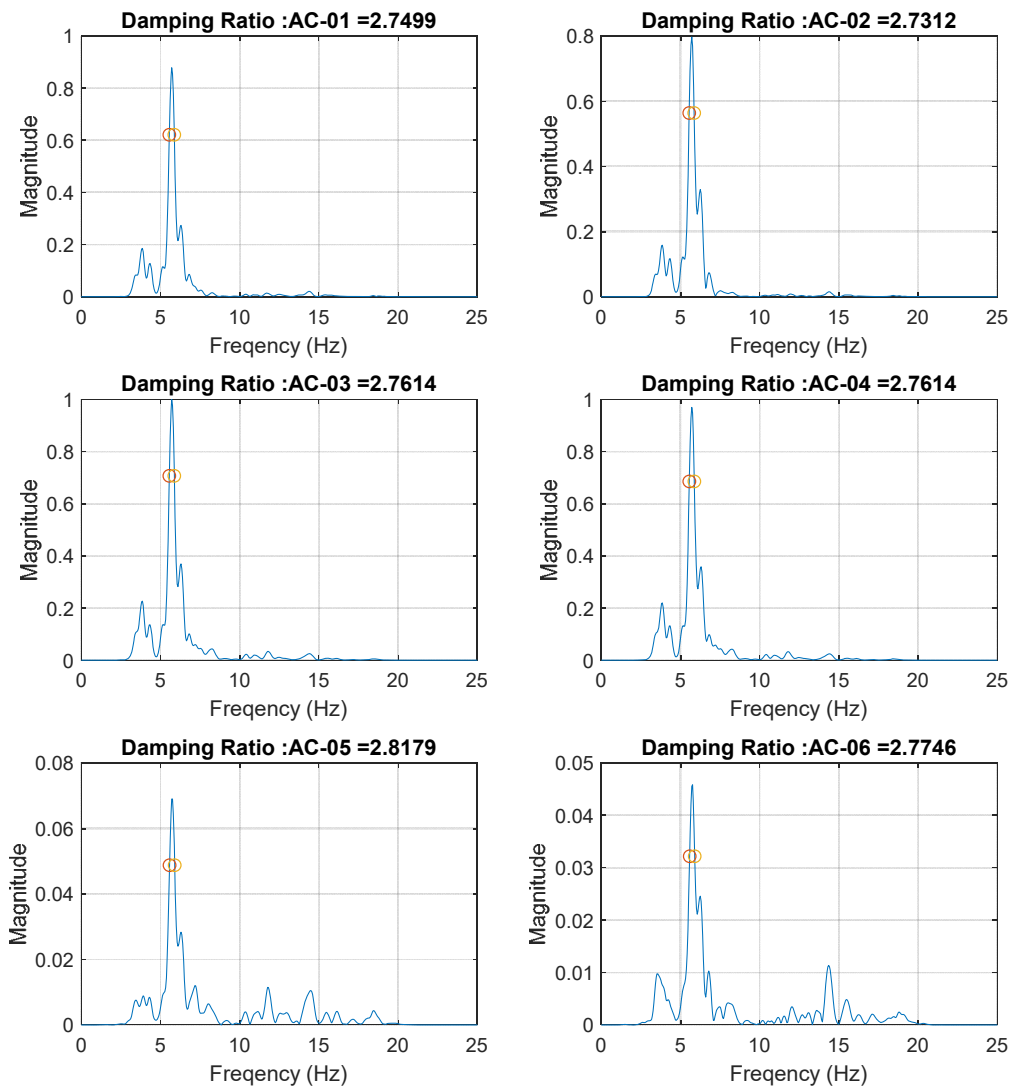
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 3)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 3)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 3)



ตารางที่ 7-15 ผลการวิเคราะห์ Natural Frequency, Mode Shape และ Damping Ratio (Span 3)

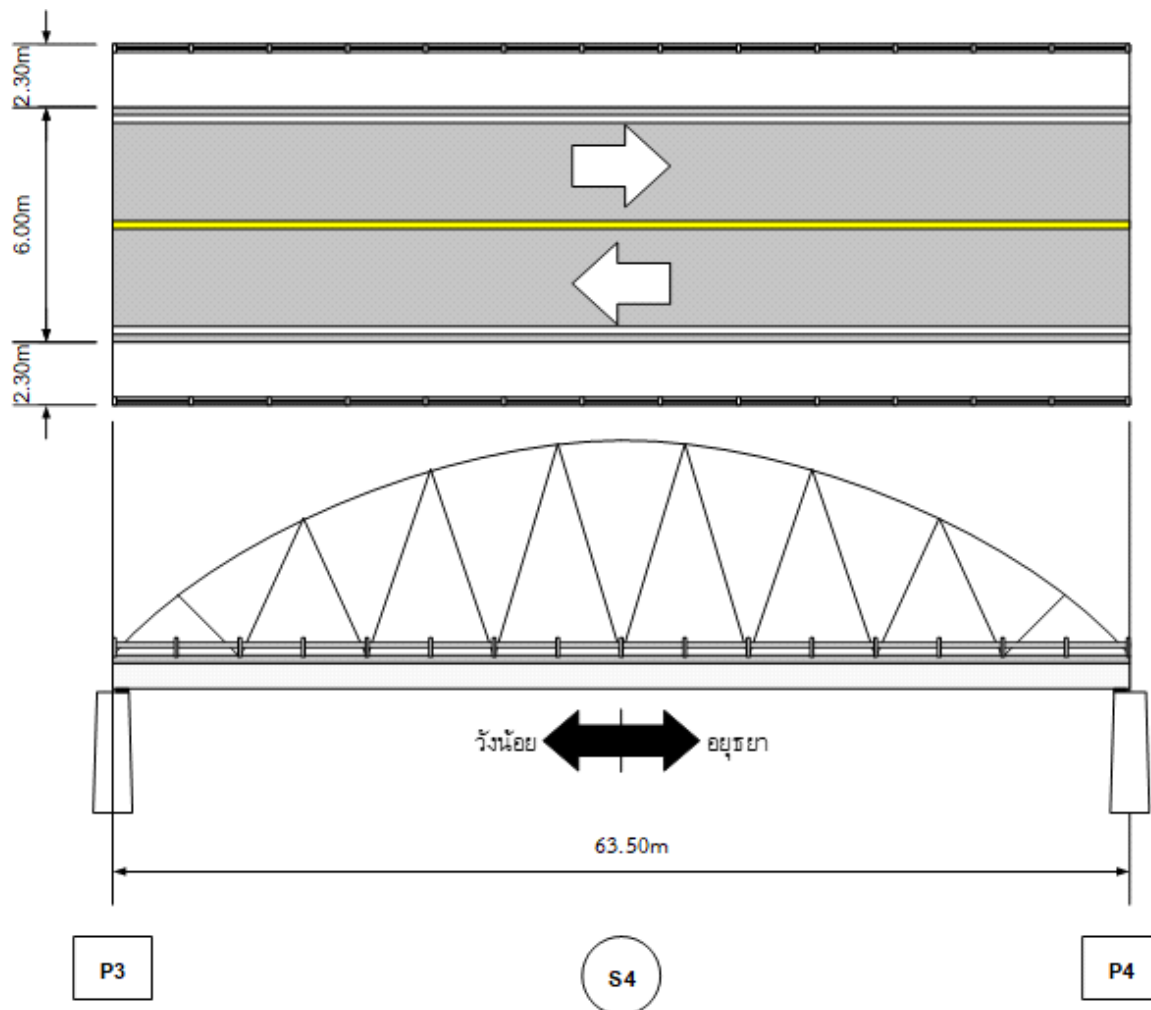
Dynamic Case	Speed (km/h)	Frequency (Hz)	Mode Shape (1st Mode)	Damping Ratio (%)
Dynamic1	20	5.56	Bending	2.68 - 3.30
Dynamic2	30	5.52	Bending	2.05 - 2.13
Dynamic3	50	5.71	Bending	2.73 - 2.82



[7.7] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานช่วงที่ 4 (Span 4)

โครงการนี้ได้ดำเนินการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานช่วงที่ 4 (Span 4) ความยาวช่วงสะพานเท่ากับ 63.5 เมตร โดยทำการทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต และแบบพลวัต เมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม 2564 ซึ่งมีรายละเอียดการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน ดังนี้

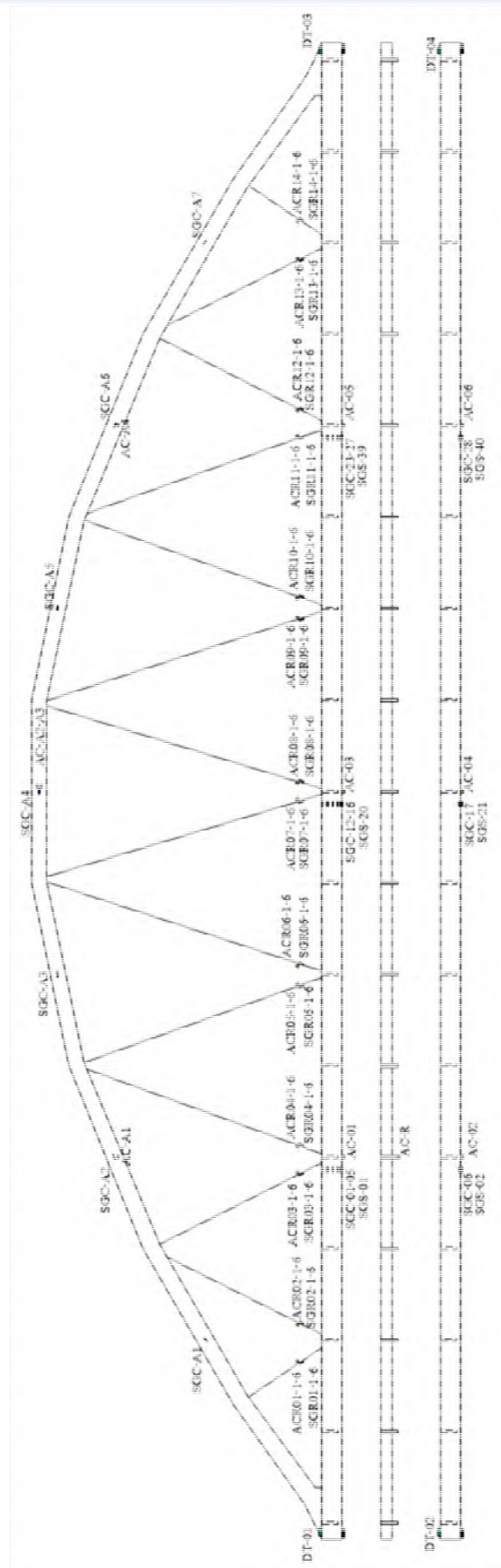
[7.7.1] ช่วงสะพานทดสอบ



รูปที่ 7-32 ช่วงสะพานทดสอบ (Span 4)

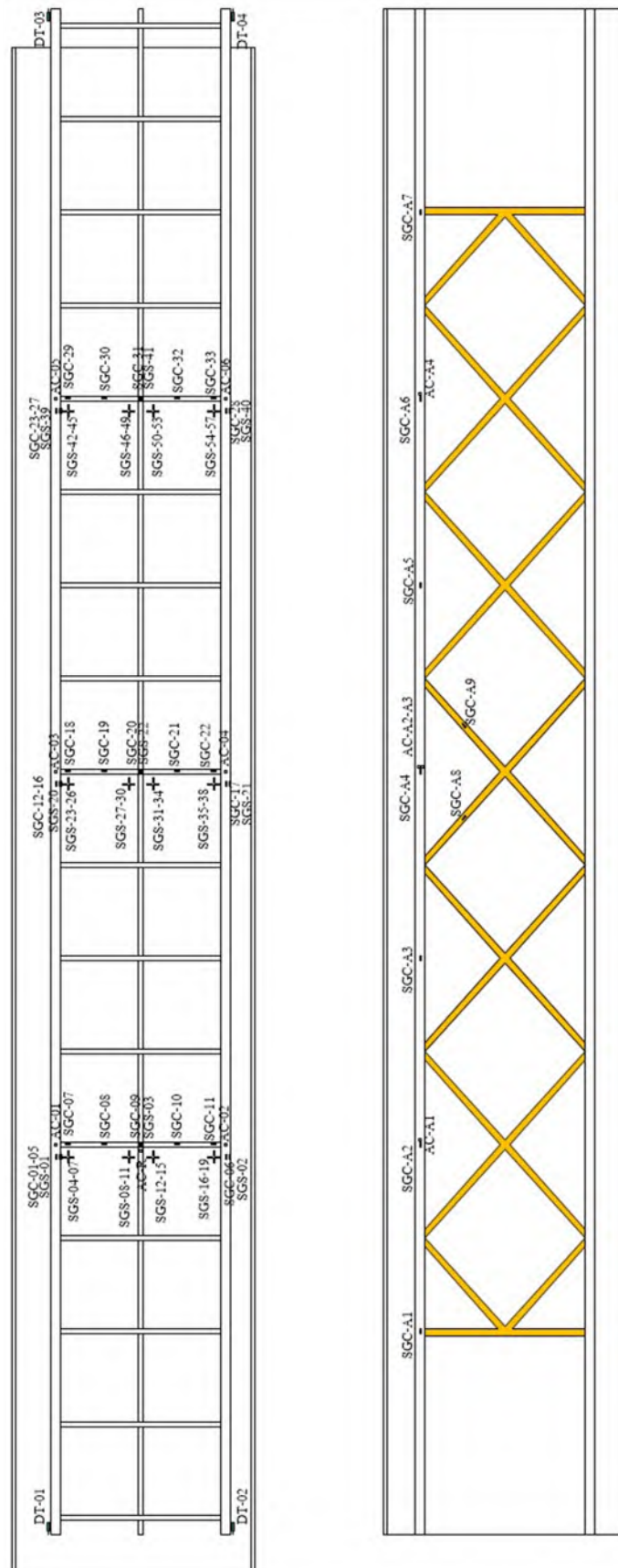
[7.7.2] ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

ในช่วงสะพานนี้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับคอนกรีต (Strain Gauge Concrete) จำนวน 42 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับเหล็ก (Strain Gauge Steel) จำนวน 141 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) จำนวน 4 ตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) จำนวน 95 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

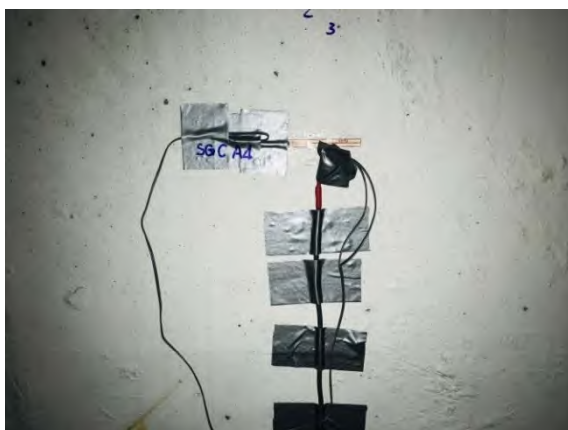
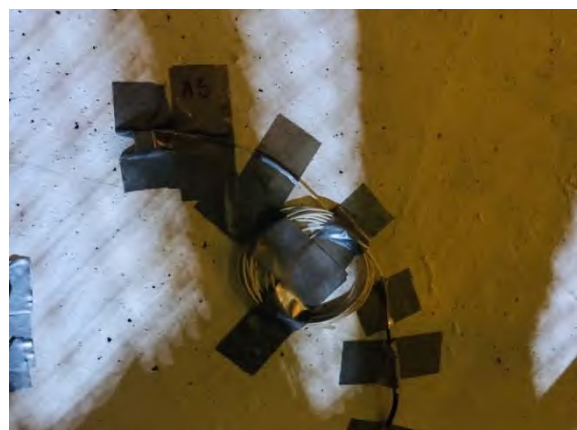


รูปที่ 7-33 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดด้านบน (Span 4)





รูปที่ 7-33 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดด้านบน (Span 4)(ต่อ)



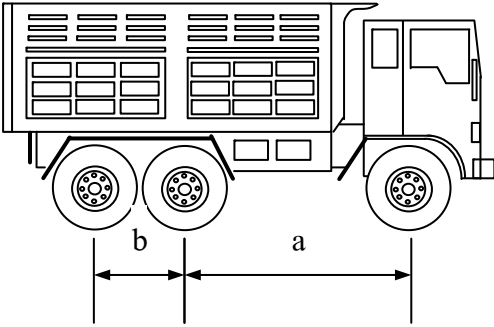
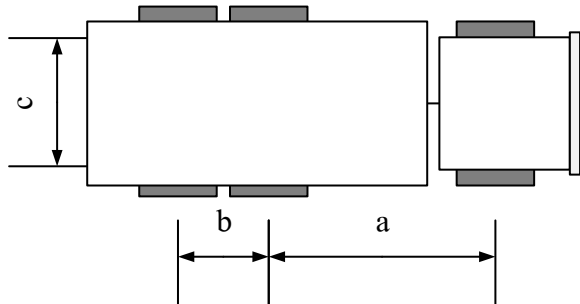
รูปที่ 7-34 ตัวอย่างภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน (Span 4)

[7.7.3] น้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ในช่วงสะพานนี้ได้ใช้รถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวมประมาณ 18 ตัน จำนวน 2 คัน ทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุม โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 7-16 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (Span 4)

คันที่	1	2
ประเภท	รถบรรทุก (80-7169)	รถบรรทุก (81-1459)
น้ำหนักรถบรรทุก (ตัน)	18.520	18.530
ระยะเพลที่ 1 ถึง 2 (a, เมตร)	4.00	4.10
ระยะเพลที่ 2 ถึง 3 (b, เมตร)	1.35	1.35
ความกว้างฐานล้อ (c, เมตร)	1.90	2.00

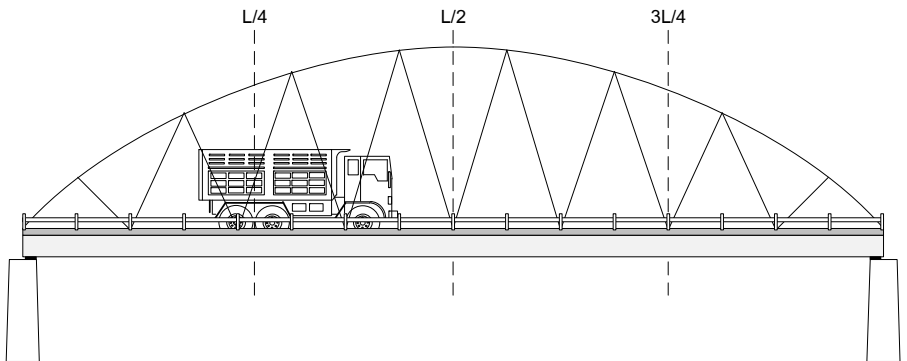
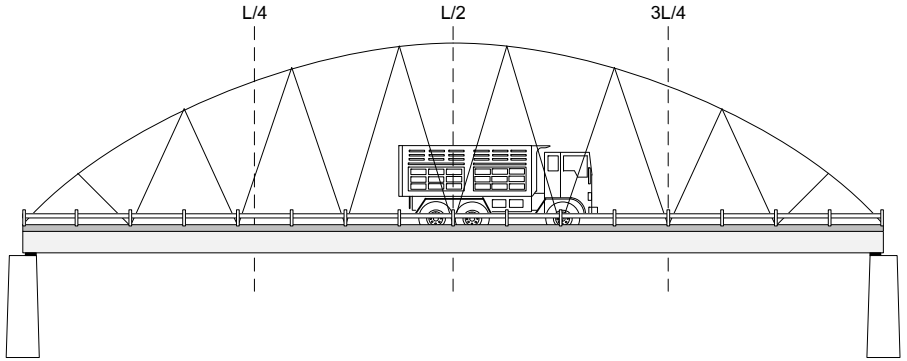
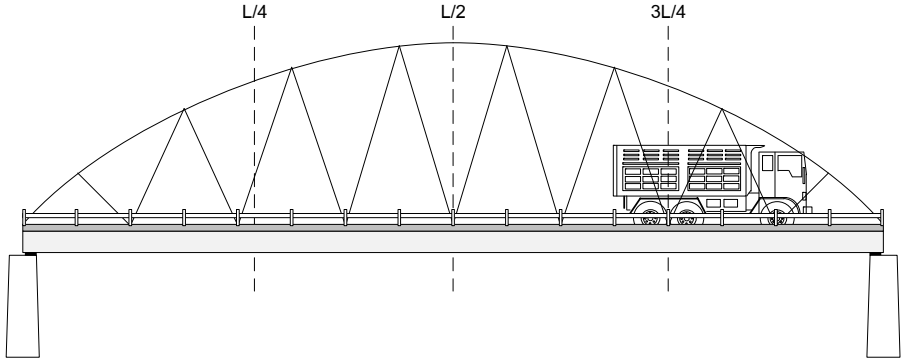



[7.7.4] รูปแบบการทดสอบแบบสถิต

การทดสอบแบบสถิต (Static Test) เป็นการนำรถบรรทุกทดสอบจอดตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนดหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

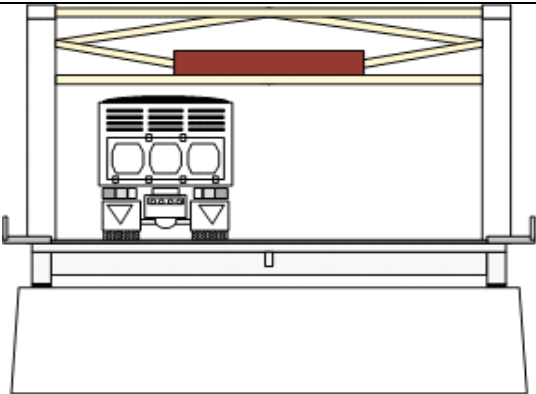
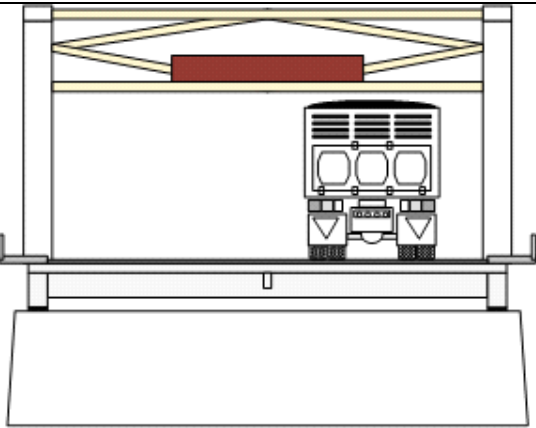
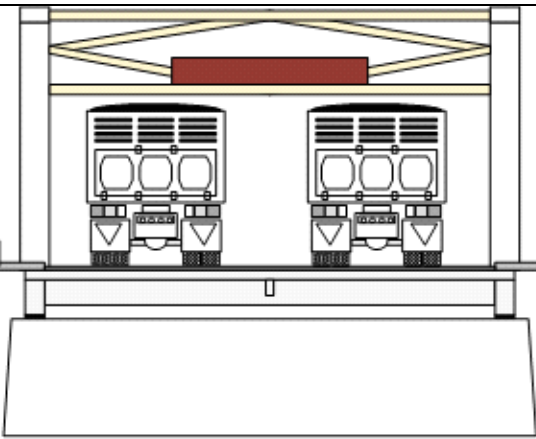
- Static 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ ในช่องจราจรทางซ้าย
- Static 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ ในช่องจราจรทางขวา
- Static 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ ทั้งสองช่องจราจร

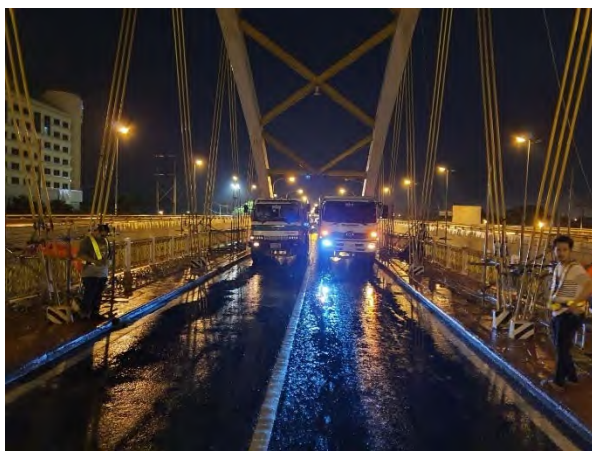
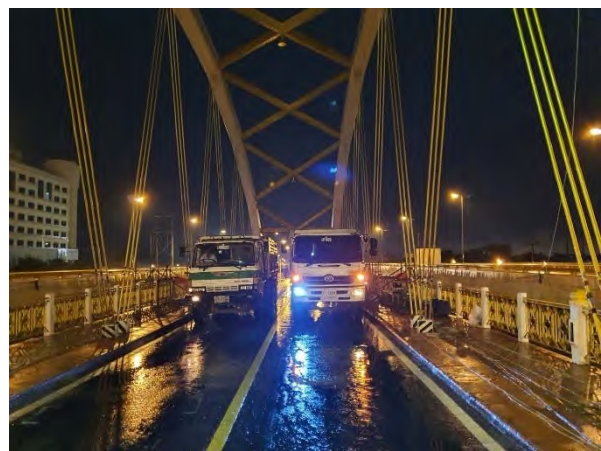
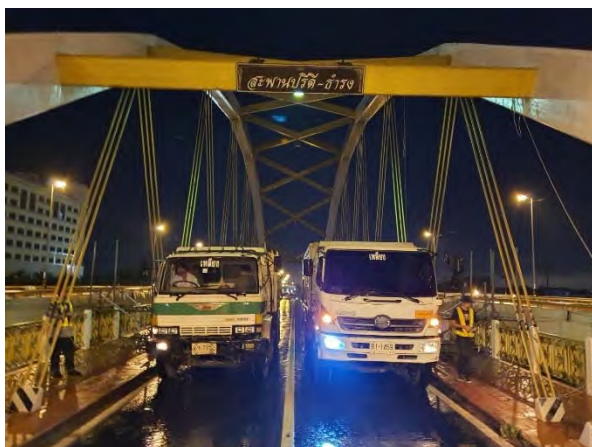
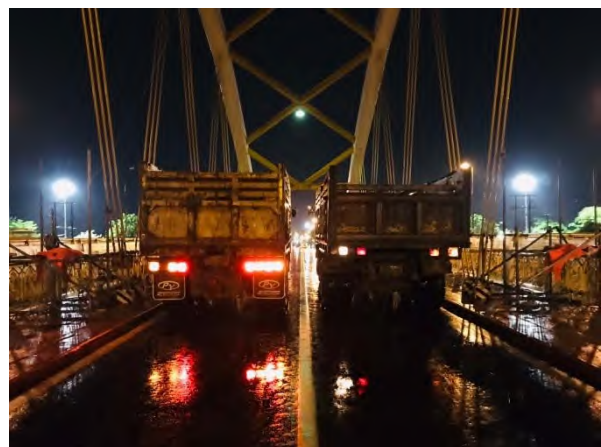
ตารางที่ 7-17 ระยะจอตรถบรรทุกตามตำแหน่ง L/4, L/2 และ 3L/4 (Span 4)

ระยะ	ตำแหน่งจอตรถบรรทุก
L/4	
L/2	
3L/4	



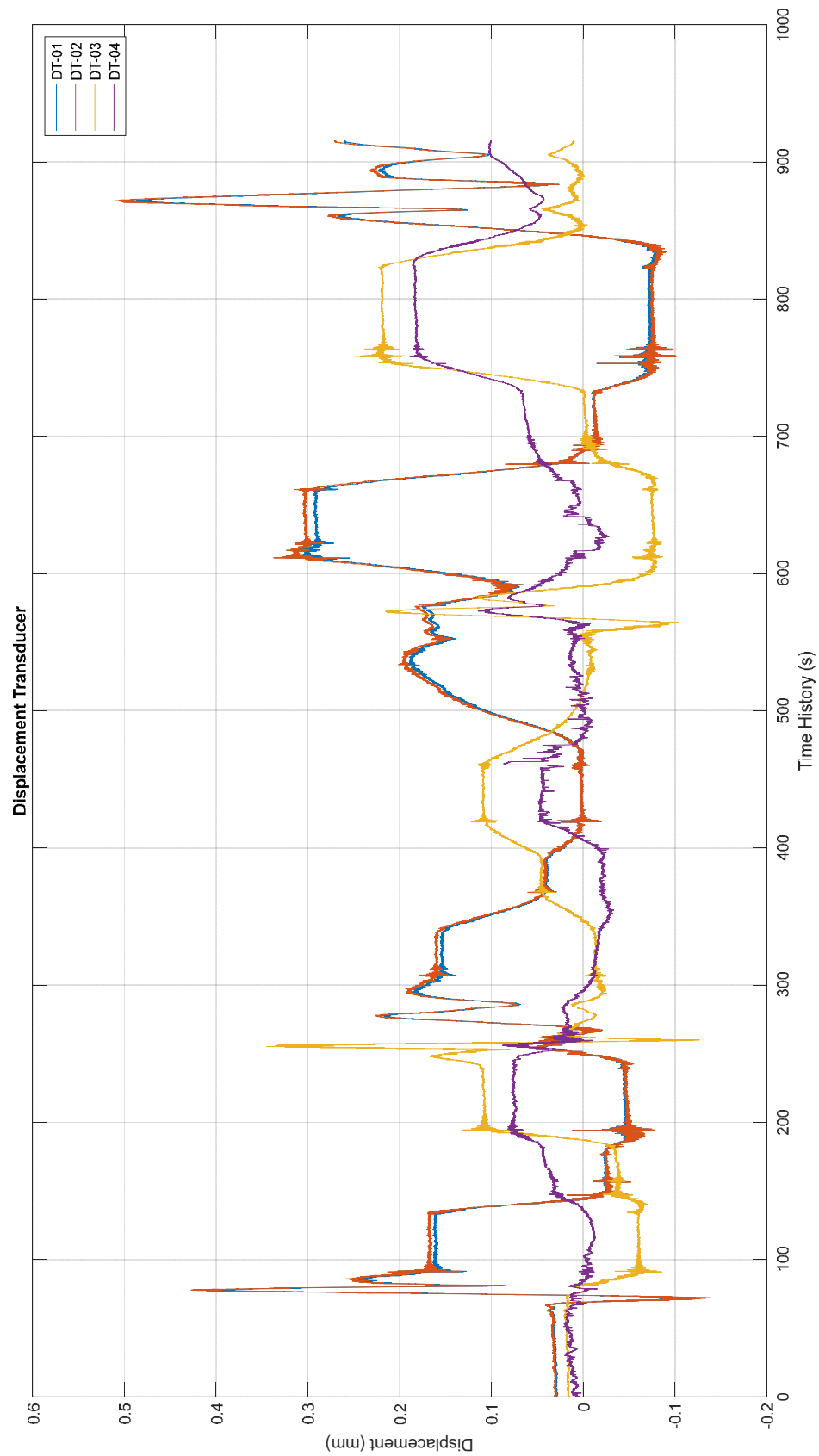
ตารางที่ 7-18 รูปแบบการทดสอบแบบสถิต ด้วยรถบรรทุก (Span 4)

Case	Pattern
Static 1	
Static 2	
Static 3	

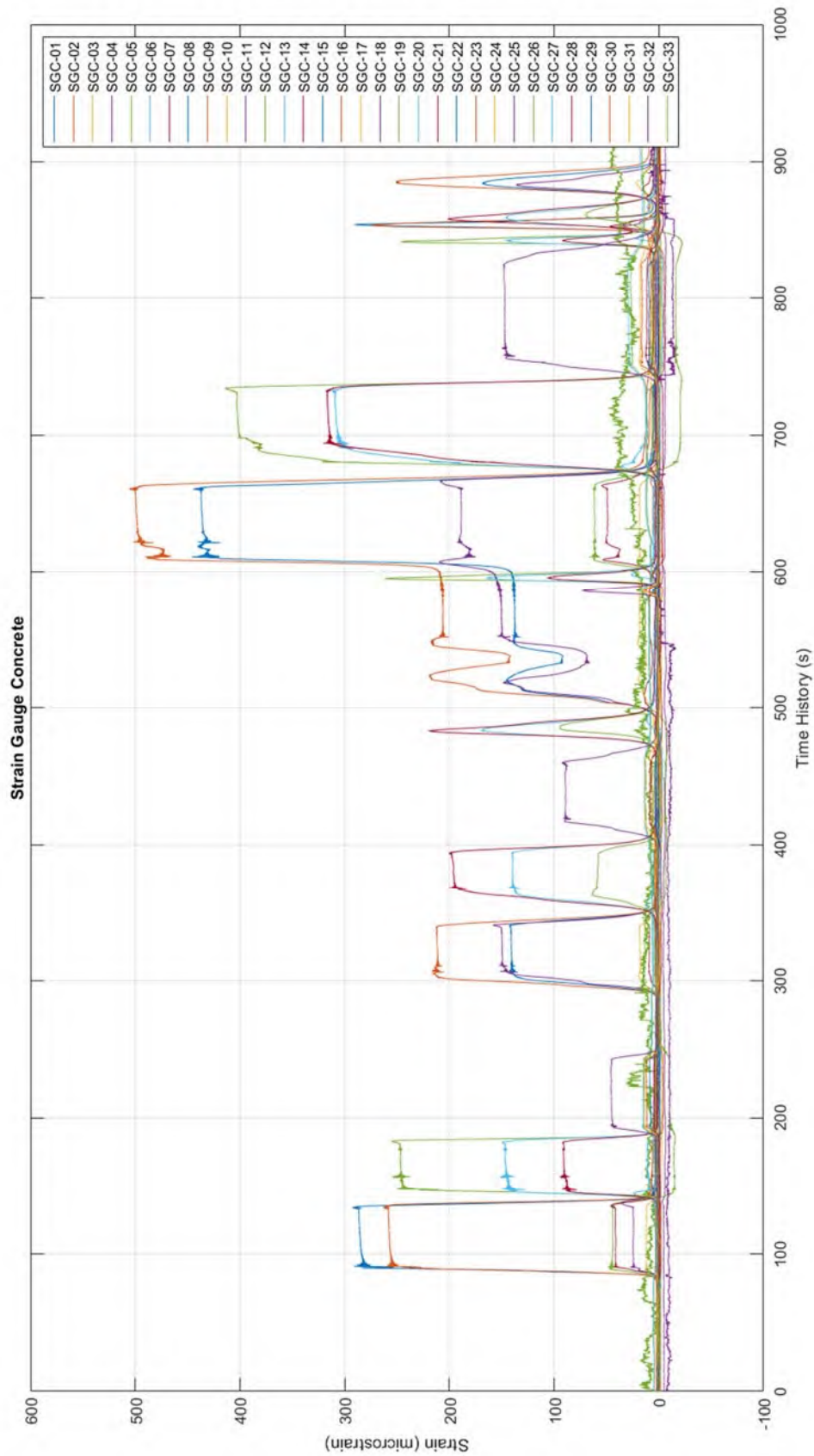


รูปที่ 7-35 ตัวอย่างภาพการทดสอบแบบสถิต (Span 4)



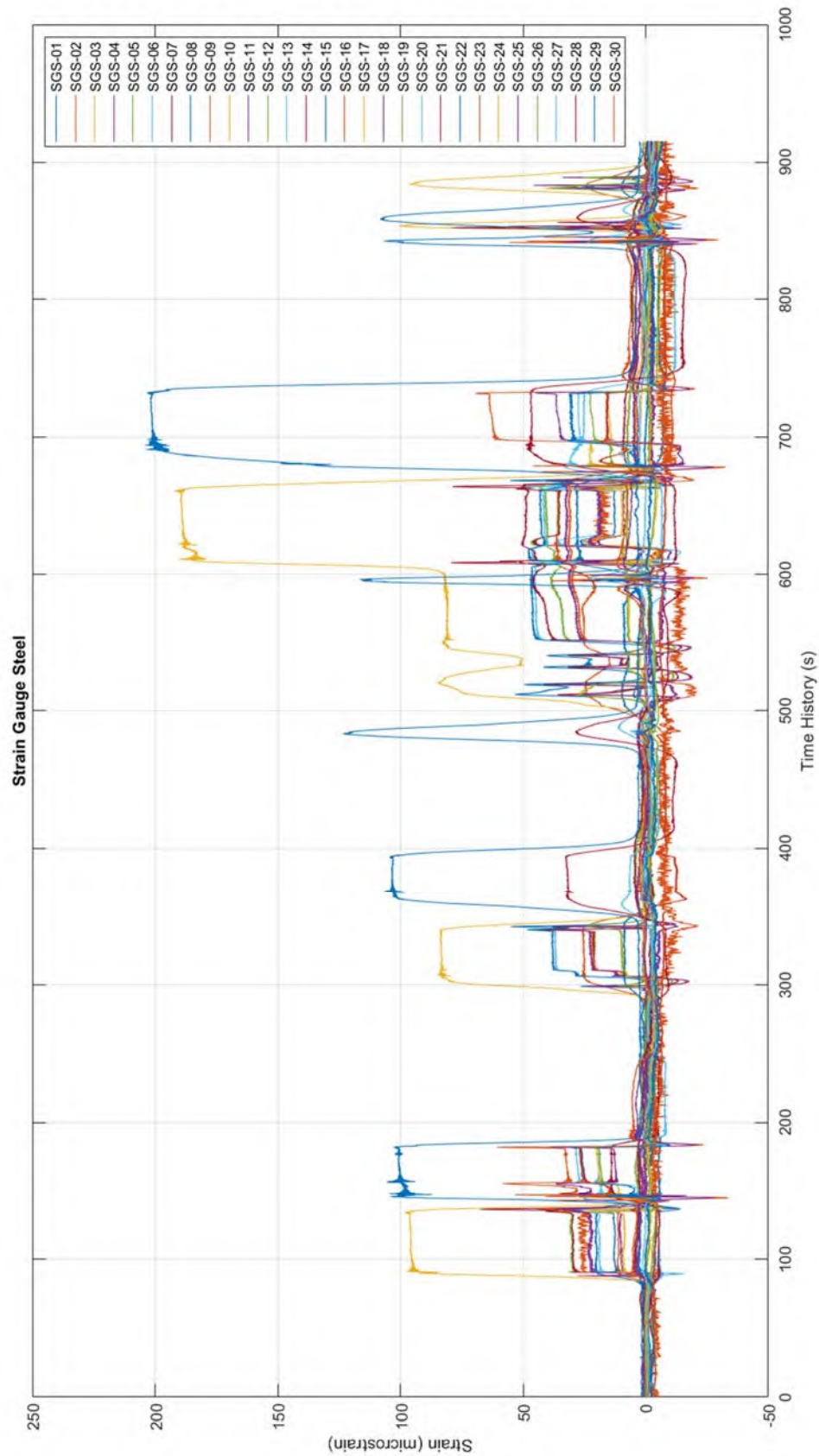


รูปที่ 7-36 สัญญาณการตรวจวัด Displacement Transducer (Span 4)

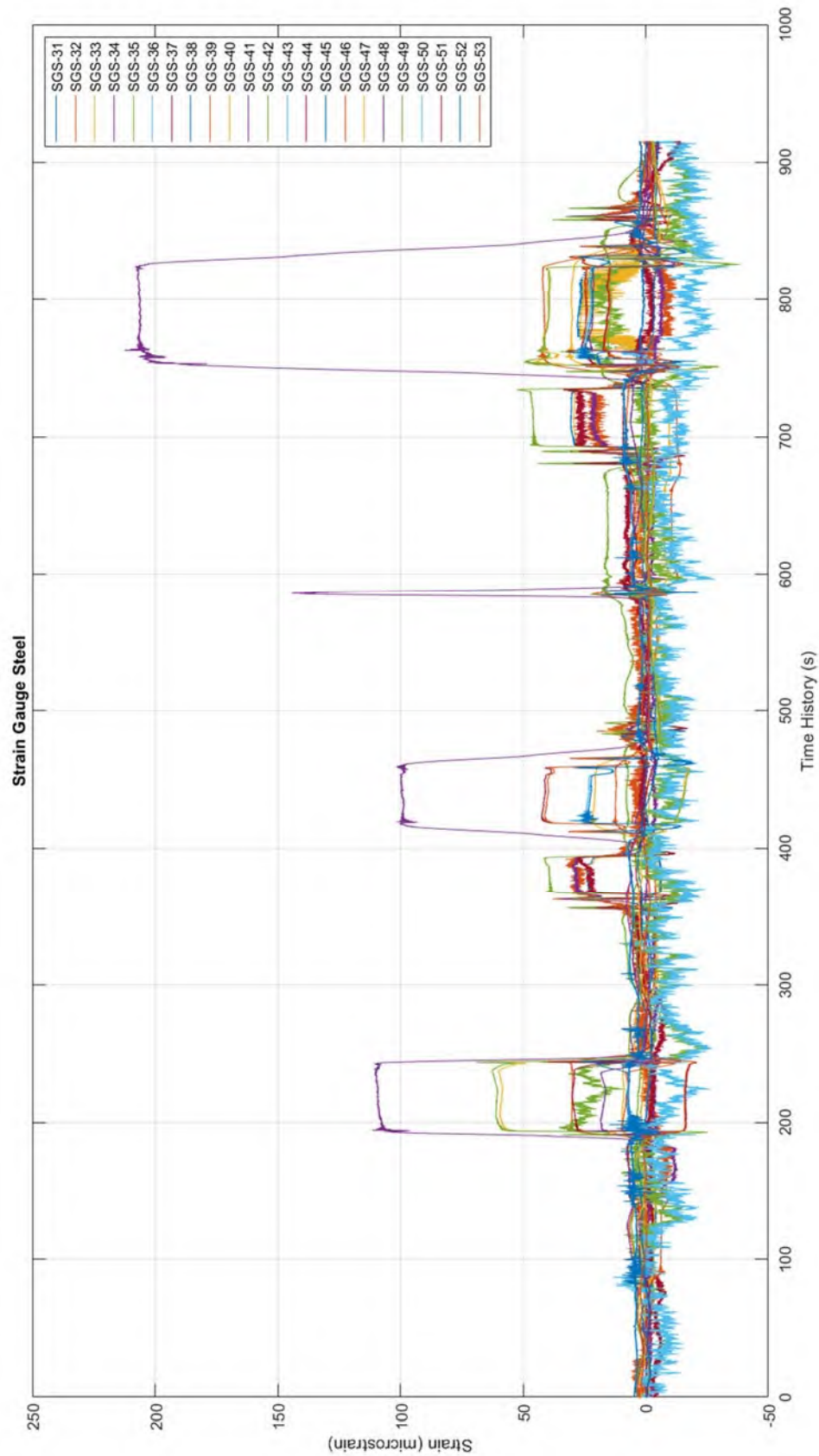


รูปที่ 7-37 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (Span 4)





รูปที่ 7-38 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Steel (Span 4)



รูปที่ 7-38 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Steel (Span 4) (ต่อ)



[7.7.5] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิต

ตารางที่ 7-19 ผลการตรวจวัด Displacement Transducer (หน่วย : mm) (Span 4)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
DT-01	0.162	-0.026	-0.047	0.153	0.040	0.002	0.291	-0.013	-0.073
DT-02	0.169	-0.027	-0.049	0.159	0.041	0.002	0.302	-0.013	-0.076
DT-03	-0.060	-0.040	0.108	-0.012	0.046	0.108	-0.076	-0.002	0.219
DT-04	-0.009	0.035	0.072	-0.014	-0.023	0.045	-0.004	0.062	0.182

ตารางที่ 7-20 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (หน่วย : microstarin) (Span 4)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
SGC-01	1.896	-0.243	-0.546	0.951	0.552	-0.149	3.227	1.136	0.796
SGC-02	3.160	-0.404	-0.910	1.585	0.921	-0.248	5.379	1.894	1.327
SGC-03	-0.629	-2.599	-2.593	-1.091	-1.372	-2.460	0.123	-1.568	-1.752
SGC-04	-4.733	-6.094	-5.571	-4.313	-4.350	-5.902	-5.071	-5.813	-5.708
SGC-05	44.130	-14.790	-10.720	13.610	-6.727	-6.471	60.990	-20.620	-16.350
SGC-06	1.525	-1.327	-0.604	3.165	-1.388	-1.367	4.531	-1.142	-0.238
SGC-07	41.130	-0.167	0.192	9.260	2.008	0.760	48.680	1.429	0.990
SGC-08	285.130	3.096	1.504	140.840	1.944	1.421	435.950	5.371	3.075
SGC-09	257.010	5.660	2.133	211.200	3.404	3.048	498.560	12.240	7.913
SGC-10	12.100	2.144	2.733	17.660	4.075	4.015	18.490	7.083	7.319
SGC-11	24.340	3.583	1.660	149.840	-0.158	1.279	188.540	3.325	1.979
SGC-12	8.796	9.756	8.831	11.260	7.908	8.354	23.680	37.880	33.890
SGC-13	0.431	11.330	-1.052	1.279	1.169	-3.294	3.173	10.740	-3.692
SGC-14	-0.371	3.096	-0.525	0.400	1.835	-0.290	0.085	2.850	-0.794
SGC-15	-0.445	3.715	-0.630	0.480	2.202	-0.348	0.103	3.420	-0.953
SGC-16	-2.256	6.798	-4.038	-1.138	2.431	-2.494	-3.315	8.885	-4.717
SGC-17	-0.794	2.848	-0.092	-0.898	3.998	-1.177	-1.140	4.694	-1.127
SGC-18	-8.840	-8.210	-10.330	-9.554	-8.469	-9.971	0.327	1.656	-13.650
SGC-19	0.831	247.370	3.002	3.427	58.480	1.421	3.302	401.610	4.477
SGC-20	2.429	146.790	2.923	3.754	139.500	3.700	4.035	307.750	5.350

ตารางที่ 7-20 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (หน่วย : microstarin) (Span 4) (ต่อ)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
SGC-21	1.725	91.240	2.248	2.194	196.230	2.700	2.696	315.240	4.663
SGC-22	0.117	0.831	-0.133	0.535	5.133	0.040	-0.323	5.498	0.352
SGC-23	1.181	1.894	3.429	2.427	2.690	1.685	1.325	2.148	3.908
SGC-24	0.667	1.019	2.998	2.254	2.200	1.913	1.031	0.933	3.804
SGC-25	0.271	0.177	4.200	0.471	0.971	3.063	-0.344	-0.231	6.152
SGC-26	3.048	3.785	13.680	5.548	6.842	12.210	10.890	11.020	26.230
SGC-27	3.353	4.164	15.048	6.103	7.526	13.431	11.979	12.122	28.853
SGC-28	-1.050	-0.567	5.079	-2.415	-1.827	8.263	-2.552	-3.667	11.430
SGC-29	1.369	1.550	7.590	0.760	0.325	2.475	0.123	1.652	9.471
SGC-30	1.858	1.554	11.58	2.102	2.115	6.373	1.331	2.171	15.95
SGC-31	0.9958	1.331	14.03	1.165	1.185	12.84	1.227	1.569	17.66
SGC-32	0.6208	1.675	45.41	0.4083	1.002	88.95	1.494	1.89	147.36
SGC-33	0.2771	0.9667	2.844	-0.2729	0.9125	4.629	1.275	1.138	6.073



ตารางที่ 7-21 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel (หน่วย : microstarin) (Span 4)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
SGS-01	20.160	-5.202	-3.373	8.406	-1.565	-1.475	27.890	-6.779	-5.290
SGS-02	11.090	-3.510	-3.675	25.090	-7.850	-5.856	35.640	-10.840	-8.392
SGS-03	95.780	1.223	0.025	82.750	0.123	-0.548	188.730	2.152	0.194
SGS-04	10.020	2.142	-0.444	0.808	0.777	0.454	8.958	3.346	1.031
SGS-05	30.020	-2.133	-3.648	-2.358	-2.138	-1.925	36.030	-1.469	-1.996
SGS-06	18.970	1.588	-1.281	0.529	0.250	-0.569	19.280	2.333	-0.431
SGS-07	29.670	-1.398	-3.269	-1.819	-2.258	-1.863	35.210	-2.398	-2.875
SGS-08	12.560	2.958	-0.231	0.633	1.306	0.767	12.700	4.196	1.477
SGS-09	22.700	-3.681	-4.448	-10.390	-9.448	-6.448	16.520	-6.950	-6.819
SGS-10	8.640	3.131	0.169	0.342	1.298	1.367	9.529	4.008	1.617
SGS-11	22.400	0.433	-1.183	-5.573	-2.769	-0.765	19.690	-2.554	-2.140
SGS-12	3.683	3.935	1.454	20.920	3.923	1.721	40.910	7.167	4.658
SGS-13	-3.947	-1.500	-2.651	36.792	-0.766	-1.552	42.059	-0.261	-0.135
SGS-14	4.108	3.094	0.758	21.040	4.204	1.458	49.140	8.798	5.308
SGS-15	-4.069	-1.546	-2.733	37.930	-0.790	-1.600	43.360	-0.269	-0.140
SGS-16	2.132	1.564	0.504	20.870	2.656	0.918	31.334	4.312	2.292
SGS-17	-2.046	-1.619	-2.019	9.098	-0.944	-1.777	7.608	-1.927	-1.098
SGS-18	2.221	1.629	0.525	21.740	2.767	0.956	32.640	4.492	2.388
SGS-19	-1.554	-1.125	-1.542	9.869	-0.773	-1.300	7.735	-1.752	-0.642
SGS-20	-5.450	18.690	-8.242	-2.575	6.785	-5.042	-6.556	24.880	-11.730
SGS-21	-5.046	13.940	-5.033	-8.331	31.950	-11.260	-11.910	46.240	-15.110
SGS-22	2.363	100.270	1.904	2.710	103.220	2.738	3.467	201.040	4.442
SGS-23	5.125	31.890	5.369	0.950	2.269	0.006	8.248	62.510	5.898
SGS-24	-2.685	18.980	-1.227	-3.190	-1.179	-3.994	-3.992	14.330	-5.946
SGS-25	3.446	12.210	3.865	0.490	0.844	-0.915	6.225	35.270	3.592
SGS-26	-2.854	18.100	-1.144	-3.540	-2.269	-4.469	-3.327	21.450	-5.042
SGS-27	0.685	27.530	-0.688	-3.050	0.713	-2.258	0.221	27.100	1.246
SGS-28	-3.900	25.330	-5.002	-7.123	-12.330	-8.213	-7.740	15.370	-7.152
SGS-29	-0.169	25.790	-2.060	-3.938	-0.738	-3.448	-1.765	30.610	-2.869
SGS-30	-4.017	26.090	-5.152	-7.337	-12.700	-8.459	-7.972	15.831	-7.367

ตารางที่ 7-21 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel (หน่วย : microstarin) (Span 4) (ต่อ)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
SGS-31	0.559	3.710	1.720	-0.167	24.180	-0.813	2.512	30.618	23.826
SGS-32	1.719	-6.929	-0.390	2.110	29.480	3.504	2.046	21.180	-9.738
SGS-33	0.538	3.567	1.654	-0.160	23.250	-0.781	2.415	29.440	22.910
SGS-34	-2.127	-11.650	-2.900	-3.465	29.030	-3.744	-3.010	21.930	-6.542
SGS-35	1.750	2.669	3.479	7.308	39.130	7.946	15.530	45.880	14.520
SGS-36	-2.535	-3.160	-0.306	-2.290	-5.965	0.558	-0.992	-0.402	0.977
SGS-37	-1.117	-2.027	-1.946	3.008	23.710	1.513	6.817	27.080	-3.108
SGS-38	-2.611	-3.255	-0.315	-2.359	-6.144	0.575	-1.021	-0.414	1.006
SGS-39	-6.469	-8.083	29.710	-3.929	-3.856	12.390	-10.710	-12.510	41.340
SGS-40	-3.685	-2.996	9.240	-4.983	-5.015	20.500	-7.367	-9.596	30.130
SGS-41	-0.890	0.333	108.420	-1.369	-0.194	99.250	-1.073	0.377	206.600
SGS-42	-2.820	2.370	20.120	-11.860	-0.620	-8.180	-1.110	2.800	18.350
SGS-43	-6.360	-5.750	-14.060	-15.980	-4.400	-11.120	-7.180	-8.580	-16.520
SGS-44	2.442	7.090	28.930	2.769	3.946	-0.210	4.915	9.317	24.090
SGS-45	1.190	2.481	7.223	2.031	2.733	-1.796	1.010	1.415	-3.396
SGS-46	5.156	6.460	8.300	5.181	6.171	2.804	4.427	8.004	23.920
SGS-47	2.144	1.700	59.150	2.013	1.600	-15.400	-1.956	-1.804	39.880
SGS-48	6.202	6.658	17.280	5.119	5.756	0.542	3.185	6.183	21.550
SGS-49	4.667	3.485	61.030	3.738	2.702	-15.980	-1.542	-0.406	39.620
SGS-50	3.698	5.362	6.934	6.626	6.250	23.171	5.638	8.602	22.662
SGS-51	-0.333	0.043	-16.253	1.111	-1.056	40.870	-0.972	-1.021	15.543
SGS-52	3.556	5.156	6.667	6.371	6.010	22.280	5.421	8.271	21.790
SGS-53	-0.323	0.042	-15.780	1.079	-1.025	39.680	-0.944	-0.992	15.090
SGS-54	3.027	5.065	6.898	5.54	9.602	20.33	7.117	10.3	24.69
SGS-55	-0.9604	0.3854	1.36	0.4229	1.785	-8.073	-0.7438	-0.7146	-4.223
SGS-56	0.3292	1.852	3.013	1.1	4.752	13.48	0.7833	3.675	16.39
SGS-57	-0.5125	0.4375	0.4292	-0.9083	0.9354	-9.148	-1.019	-1.785	-7.235



ตารางที่ 7-22 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Concrete บริเวณ Arch (หน่วย : microstarin)
(Span 4)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
SGA-01	0.392	0.217	-0.426	2.012	0.886	0.304	0.552	1.269	1.327
SGA-02	0.647	0.391	-0.225	2.016	1.161	0.859	1.775	3.010	2.010
SGA-03	0.054	-0.073	-0.331	0.273	-0.144	-0.183	0.350	0.591	0.561
SGA-04	0.004	-0.193	-0.515	0.465	-0.010	-0.151	0.189	0.512	0.555
SGA-05	-0.046	-0.325	-0.730	0.685	0.122	-0.127	0.040	0.465	0.583
SGA-06	-0.330	-0.507	-0.729	-0.198	-0.381	-0.446	-0.266	-0.092	0.042
SGA-07	-0.005	-0.090	-0.179	0.038	-0.039	-0.046	-0.054	-0.033	0.004
SGA-08	-0.025	-0.015	-0.045	0.025	-0.034	-0.074	-0.063	-0.017	0.013
SGA-09	-0.024	-0.015	-0.043	0.025	-0.033	-0.071	-0.061	-0.016	0.013

ตารางที่ 7-23 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel Hanger Left (หน่วย : microstarin) (Span 4)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
SGL-01	32.881	16.077	1.471	3.845	3.968	1.022	40.828	22.817	4.584
SGL-02	31.895	15.595	1.427	3.729	3.849	0.991	39.603	22.132	4.446
SGL-03	33.539	16.399	1.500	3.921	4.048	1.042	41.644	23.273	4.675
SGL-04	17.005	-15.548	-5.399	11.091	-2.452	0.553	31.087	-15.954	-4.396
SGL-05	17.345	-15.859	-5.507	11.313	-2.501	0.564	31.708	-16.273	-4.484
SGL-06	16.665	-15.237	-5.291	10.869	-2.403	0.542	30.465	-15.635	-4.308
SGL-07	34.033	33.285	8.604	-2.552	7.722	2.745	33.343	43.720	13.120
SGL-08	41.315	33.039	6.038	-1.497	7.288	-0.845	50.905	52.118	14.491
SGL-09	46.190	30.869	3.119	-0.354	6.430	-4.386	65.501	57.480	15.019
SGL-10	71.207	-87.331	-82.402	-42.618	-89.762	-84.246	130.616	-56.380	-29.062
SGL-11	91.179	-27.193	-17.591	37.118	-6.518	-3.996	135.426	-27.338	-17.570
SGL-12	124.791	-7.572	12.750	73.299	17.762	17.014	179.978	-19.816	-13.088
SGL-13	-19.893	29.006	-3.252	-58.631	-33.218	-37.535	-57.580	21.847	10.415
SGL-14	-22.080	44.684	22.010	-22.762	7.008	0.380	-41.534	56.500	27.822
SGL-15	-21.616	37.950	9.660	-41.918	-13.498	-19.135	-51.044	40.349	19.692
SGL-16	87.553	30.999	23.851	64.049	35.363	29.471	123.603	-5.498	-25.365
SGL-17	76.994	-15.034	-27.950	32.192	-4.507	-14.146	110.490	-19.551	-40.004
SGL-18	93.013	75.226	74.263	92.175	73.173	71.372	129.516	8.876	-9.249
SGL-19	-43.601	48.356	42.007	-25.787	12.286	14.739	-63.853	64.793	61.344
SGL-20	-45.743	59.010	46.732	-28.926	14.798	14.451	-72.539	75.186	64.251
SGL-21	-28.663	41.302	31.951	-19.361	10.639	9.014	-44.640	53.532	42.890
SGL-22	46.860	39.461	-37.686	15.573	2.440	-28.352	60.516	40.837	-72.446
SGL-23	48.734	41.039	-39.193	16.196	2.538	-29.487	62.937	42.470	-75.344
SGL-24	45.454	38.277	-36.555	15.106	2.367	-27.502	58.700	39.612	-70.272
SGL-25	-29.727	-6.146	45.291	-27.590	-6.497	17.336	-35.725	10.911	72.580
SGL-26	-33.544	-3.996	56.878	-26.856	-3.987	23.312	-40.508	12.785	89.552
SGL-27	-28.388	-8.808	37.477	-30.623	-9.548	12.804	-33.918	9.947	61.657
SGL-28	12.666	23.956	-32.131	-8.873	-4.601	-24.963	17.292	37.602	-52.712
SGL-29	13.173	24.914	-33.416	-9.228	-4.786	-25.962	17.984	39.106	-54.820
SGL-30	12.286	23.237	-31.167	-8.6066	-4.4634	-24.214	16.7737	36.4739	-51.131



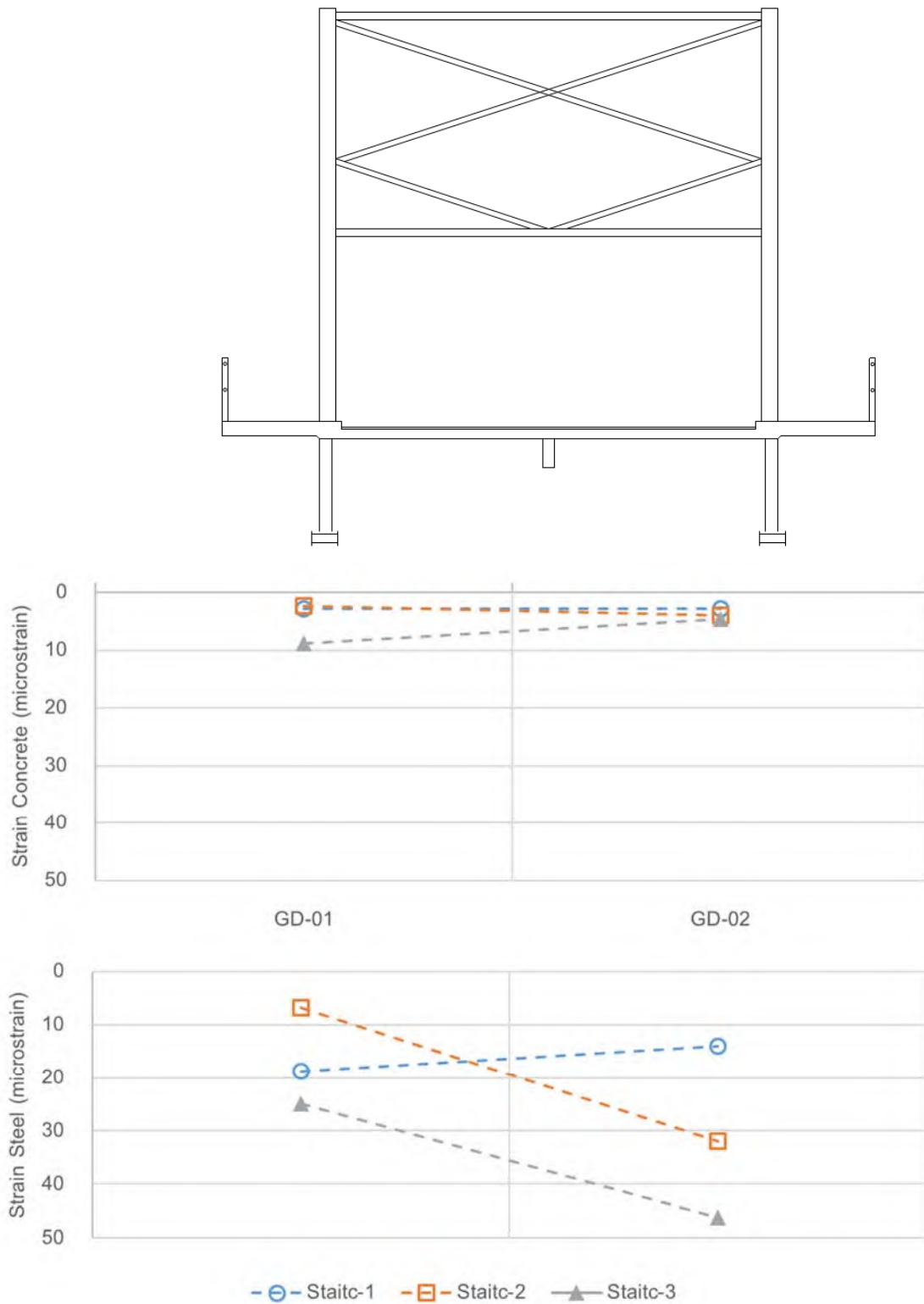
Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
SGL-31	-22.818	-31.712	60.705	-28.680	-18.845	18.716	-23.062	-18.628	90.605
SGL-32	-23.502	-32.663	62.526	-29.540	-19.410	19.278	-23.754	-19.187	93.323
SGL-33	-21.905	-30.443	58.277	-27.533	-18.091	17.967	-22.140	-17.883	86.981
SGL-34	6.582	8.689	-5.847	-0.930	16.428	1.077	-14.579	7.554	-19.363
SGL-35	6.319	8.342	-5.613	-0.892	15.770	1.034	-13.996	7.252	-18.589
SGL-36	6.779	8.950	-6.023	-0.958	16.920	1.109	-15.017	7.780	-19.944
SGL-37	6.483	-4.770	6.951	-22.617	-23.381	8.387	-89.381	-97.636	-39.390
SGL-38	-0.648	-6.551	9.179	-11.594	-14.334	20.036	-63.720	-71.227	-11.703
SGL-39	-7.741	-7.950	10.873	0.104	-4.452	30.518	-34.348	-40.669	16.665
SGL-40	1.721	5.254	5.802	-1.631	10.557	21.312	-9.464	3.268	18.134
SGL-41	1.810	5.525	6.101	-1.715	11.102	22.411	-9.951	3.437	19.068
SGL-42	1.774	5.416	5.981	-1.681	10.884	21.971	-9.756	3.369	18.695

ตารางที่ 7-24 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel Hanger Right (หน่วย: microstarin) (Span 4)

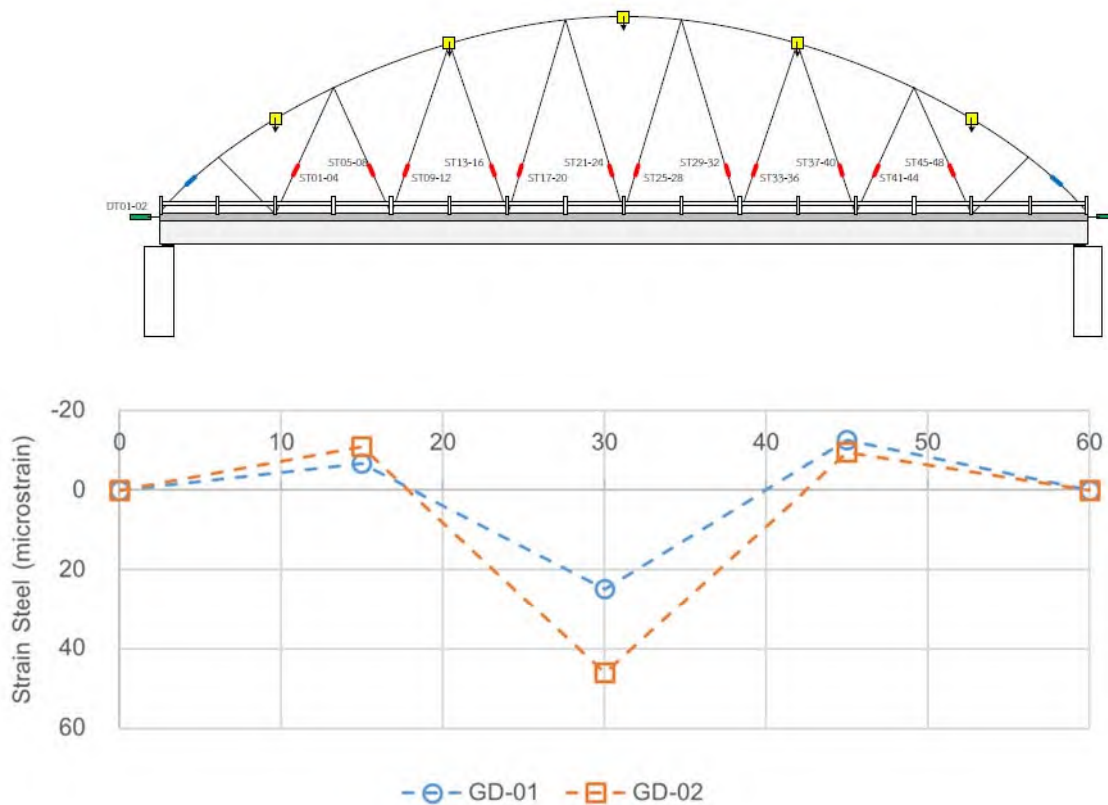
Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
SGR-01	8.339	5.696	3.450	21.381	11.881	1.650	26.813	13.298	-2.774
SGR-02	8.089	5.525	3.346	20.740	11.524	1.601	26.008	12.899	-2.691
SGR-03	8.506	5.810	3.519	21.809	12.118	1.683	27.349	13.564	-2.830
SGR-04	18.926	0.854	2.389	23.858	2.684	8.292	35.779	-1.538	5.269
SGR-05	20.011	1.922	4.146	26.223	1.409	9.266	37.866	-3.604	4.998
SGR-06	9.227	-5.073	-3.177	13.070	-6.387	0.958	25.840	-9.175	-0.608
SGR-07	59.655	76.017	66.486	77.280	71.941	42.514	52.360	46.497	6.346
SGR-08	13.230	27.723	19.637	21.512	32.254	14.616	27.224	29.163	-4.268
SGR-09	37.172	52.907	43.923	50.384	53.139	29.136	40.588	38.587	1.060
SGR-10	12.485	10.572	8.354	1.751	-10.058	-19.447	-16.713	-28.433	-15.158
SGR-11	125.885	110.356	117.404	182.422	88.527	85.982	151.089	0.591	-1.033
SGR-12	120.850	105.942	112.708	175.125	84.986	82.543	145.046	0.568	-0.992
SGR-13	-17.446	20.693	10.652	-34.328	24.955	-1.091	-65.321	33.239	-0.241
SGR-14	-17.802	21.116	10.869	-35.028	25.464	-1.113	-66.655	33.917	-0.246
SGR-15	-18.514	21.960	11.304	-36.430	26.483	-1.158	-69.321	35.274	-0.256
SGR-16	133.309	150.014	153.847	229.665	170.993	145.511	151.050	67.214	13.220
SGR-17	-90.758	-210.771	-265.637	-181.025	-217.645	-214.275	-18.862	-59.306	-81.378
SGR-18	20.211	-28.860	-53.100	23.104	-22.160	-32.663	62.790	3.756	-32.375
SGR-19	-5.843	7.153	-21.273	-117.282	-55.165	-63.399	-78.351	13.917	18.447
SGR-20	-33.631	-1.689	-8.222	-64.293	7.395	1.603	-71.394	41.875	33.299
SGR-21	-19.145	2.650	-14.305	-88.064	-23.169	-29.971	-72.626	27.059	25.097
SGR-22	84.865	94.592	90.571	123.164	140.379	28.924	55.503	82.433	-37.998
SGR-23	53.686	82.058	76.592	136.849	139.401	49.465	81.405	80.260	-42.505
SGR-24	19.380	64.744	58.150	142.562	130.304	67.125	102.565	73.411	-44.535
SGR-25	-16.347	8.144	43.894	-16.013	16.403	69.733	-31.509	22.502	113.039
SGR-26	-17.001	8.469	45.650	-16.653	17.059	72.523	-32.769	23.402	117.561
SGR-27	40.253	64.570	96.026	33.211	55.300	101.338	-6.210	29.180	107.782
SGR-28	7.555	9.959	-15.416	3.780	14.092	-28.256	6.235	21.042	-47.943
SGR-29	7.253	9.561	-14.800	3.629	13.528	-27.126	5.986	20.201	-46.026
SGR-30	7.782	10.258	-15.879	3.894	14.515	-29.103	6.422	21.674	-49.382



Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)	L/4(S4)	L/2(S4)	3L/4(S4)
SGR-31	-11.415	-12.025	29.754	-11.650	-9.968	66.773	-54.745	-49.981	76.576
SGR-32	33.671	48.406	100.211	42.328	39.268	83.488	-59.817	-44.973	81.688
SGR-33	-17.407	-20.639	15.225	-19.191	-15.908	63.955	-97.565	-88.403	31.255
SGR-34	7.077	9.343	-6.287	-1.000	17.664	1.158	-15.677	8.122	-20.821
SGR-35	6.865	9.063	-6.099	-0.970	17.134	1.123	-15.206	7.879	-20.196
SGR-36	7.360	9.717	-6.539	-1.040	18.371	1.204	-16.304	8.447	-21.654
SGR-37	6.971	-5.129	7.474	-24.320	-25.141	9.018	-96.108	-104.985	-42.355
SGR-38	-0.697	-7.044	9.870	-12.467	-15.413	21.544	-68.516	-76.588	-12.584
SGR-39	-8.323	-8.548	11.692	0.112	-4.787	32.815	-36.933	-43.730	17.919
SGR-40	1.965	5.999	6.624	-1.862	12.054	24.334	-10.805	3.732	20.705
SGR-41	1.851	5.649	6.238	-1.754	11.352	22.916	-10.176	3.514	19.499
SGR-42	1.908	5.824	6.431	-1.808	11.703	23.625	-10.491	3.623	20.102



รูปที่ 7-39 พฤติกรรมความเครียดที่กึ่งสะพาน (Span 4)



รูปที่ 7-40 พฤติกรรมความเครียดตามแนวยาวของสะพาน Staitc-3 (Span 4)

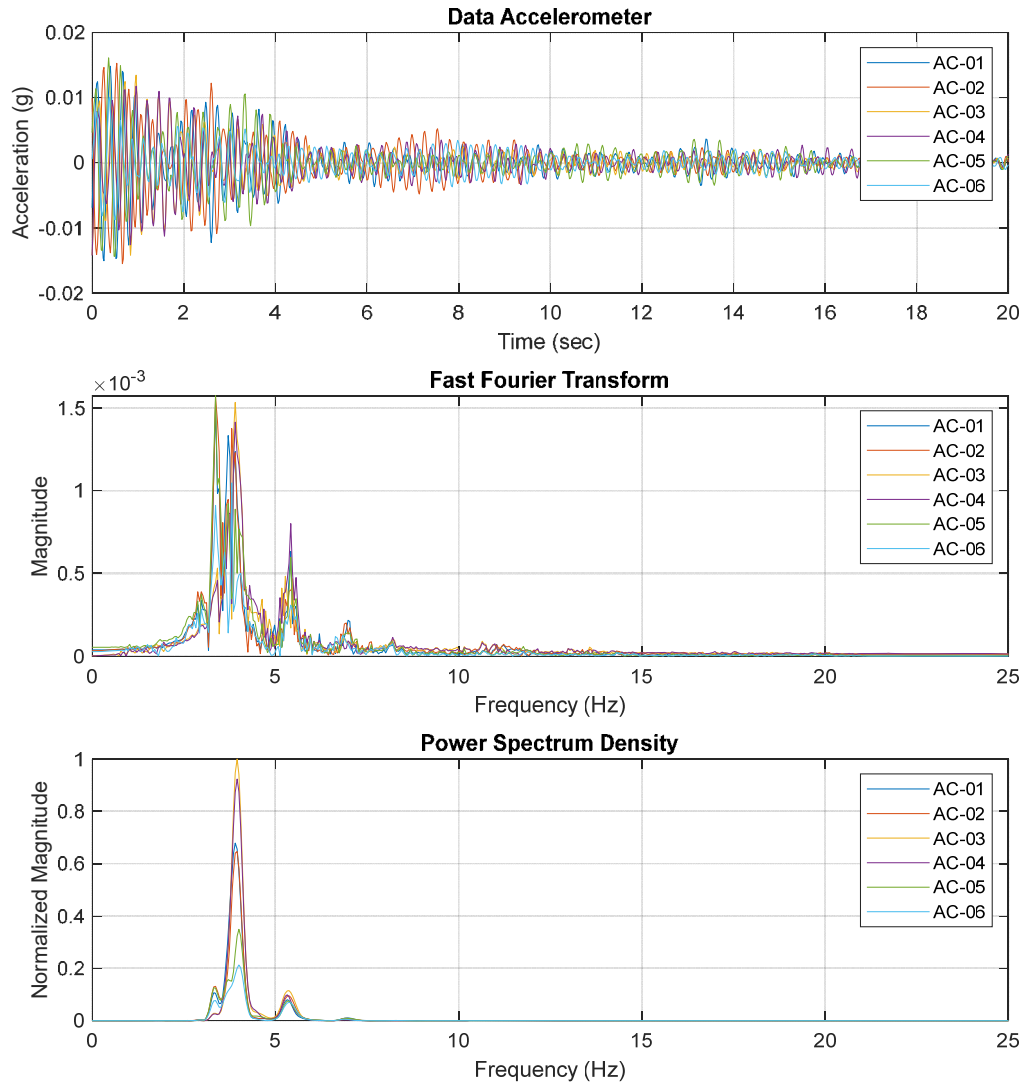
[7.7.6] รูปแบบการทดสอบแบบพลวัต

การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) เป็นการทดสอบโดยใช้รถบรรทุกวิ่งผ่านช่วงสะพาน ทดสอบหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

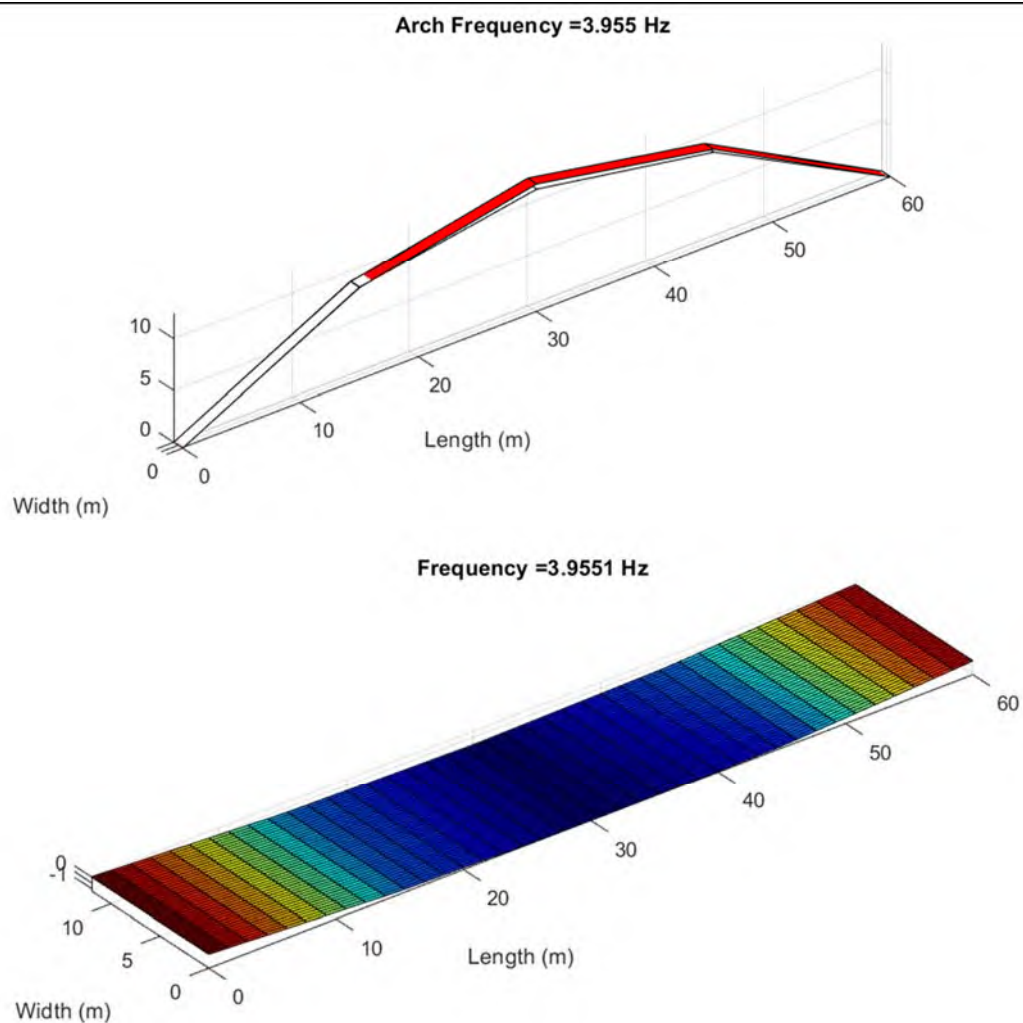
- Dynamic 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 20 กม./ชม. ที่กลางสะพาน
- Dynamic 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 30 กม./ชม. ที่กลางสะพาน
- Dynamic 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. ที่กลางสะพาน

[7.7.7] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต

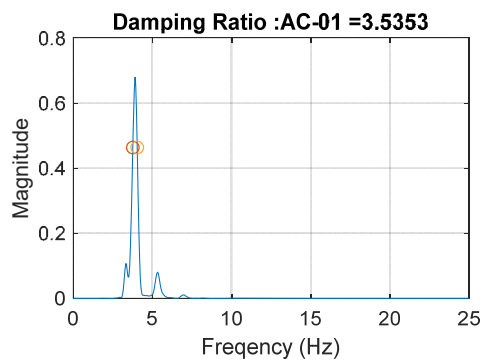
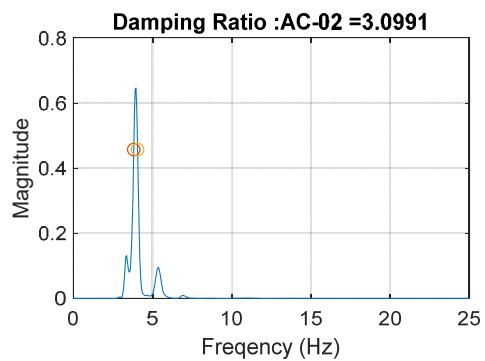
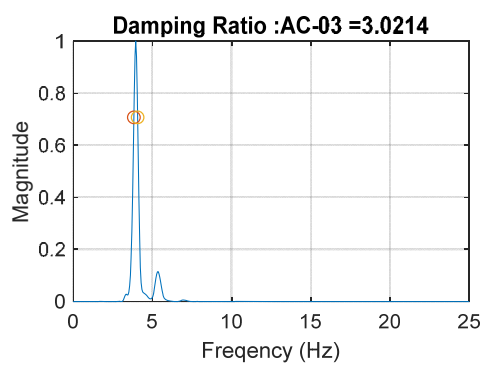
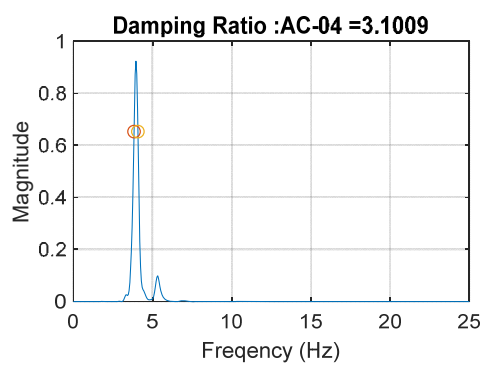
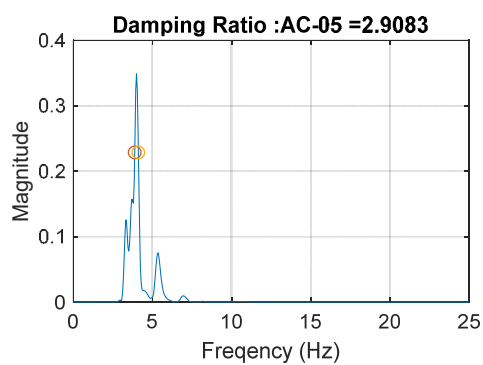
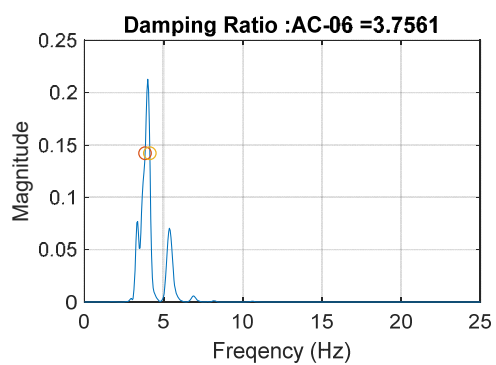
Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 4)



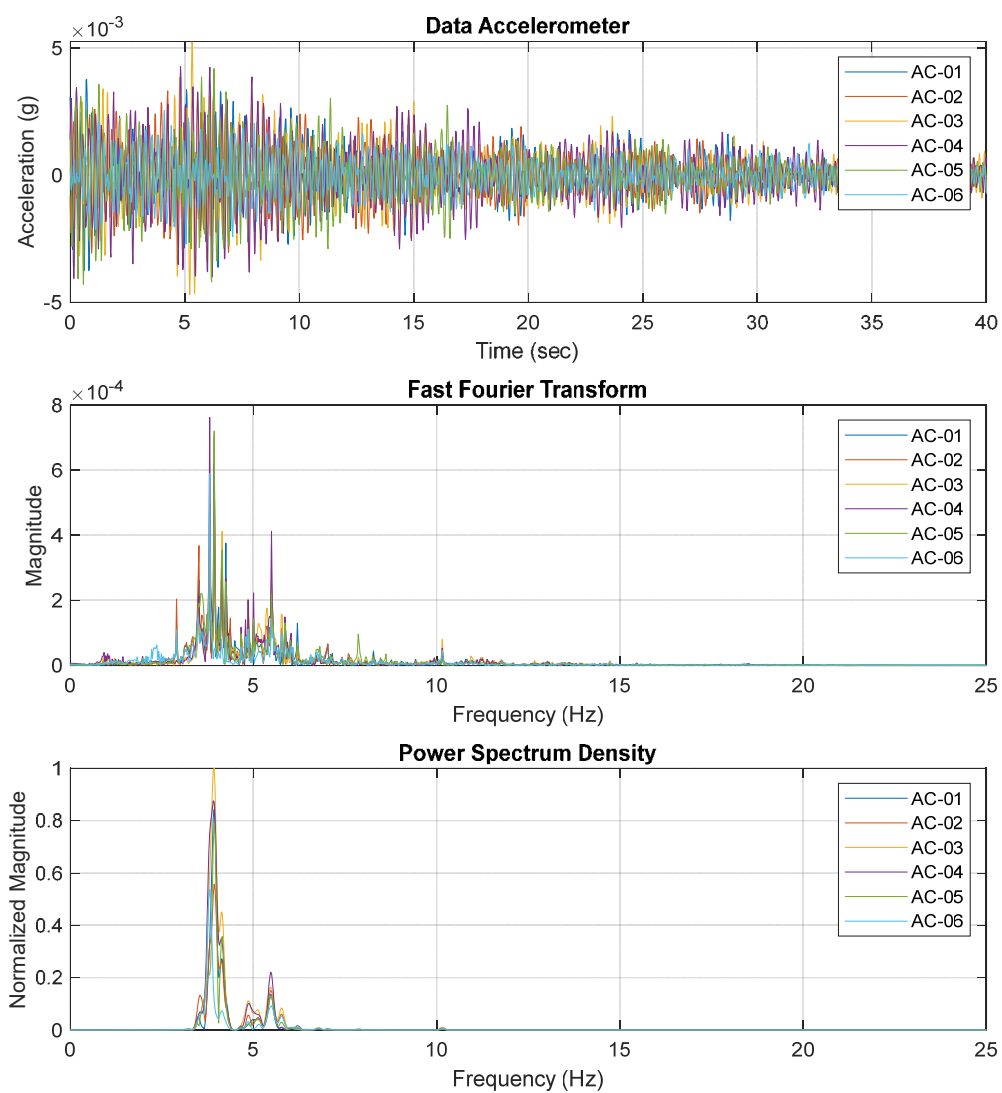
Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 4)



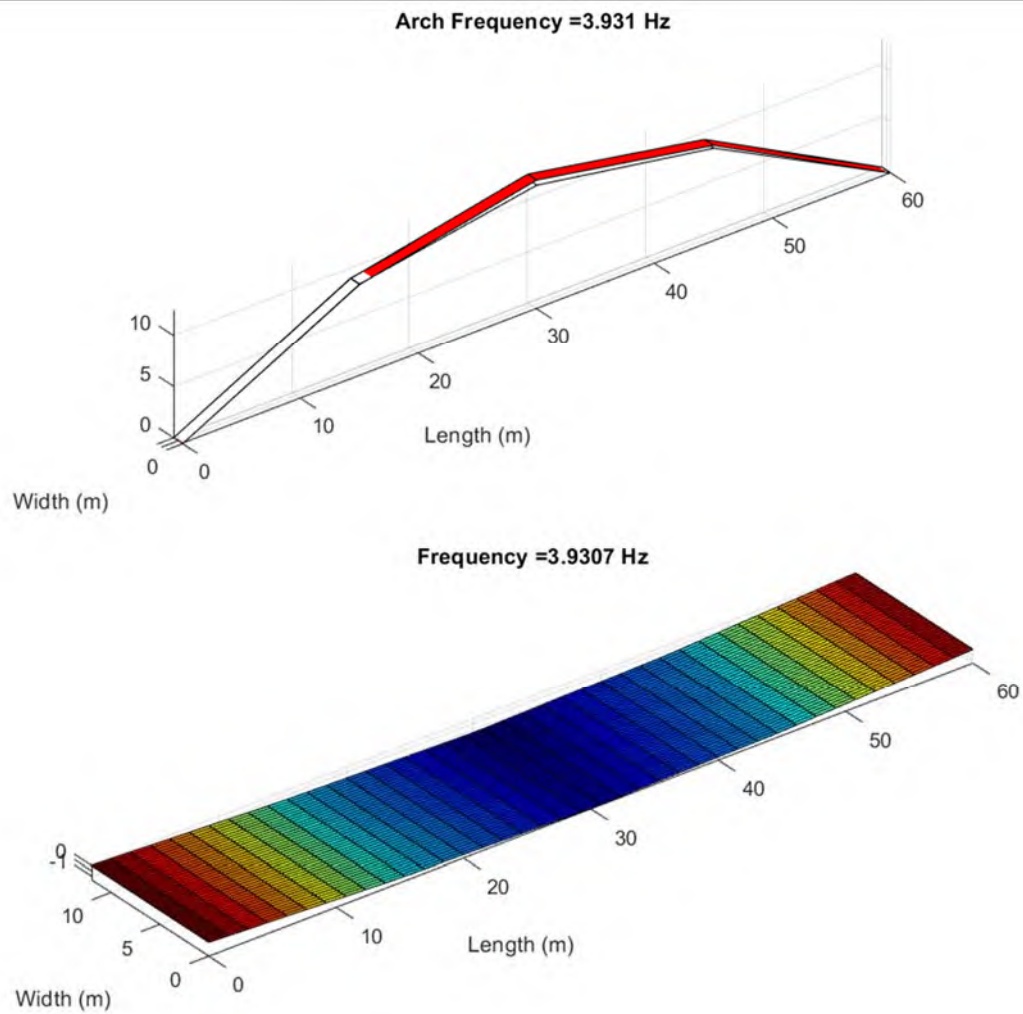
Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 4)



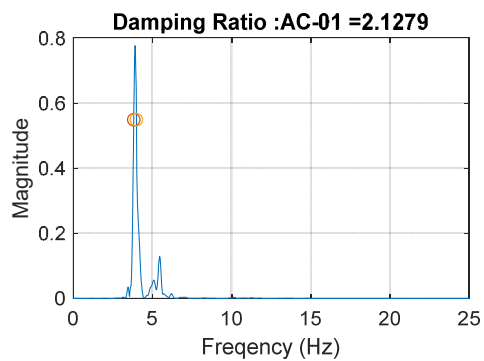
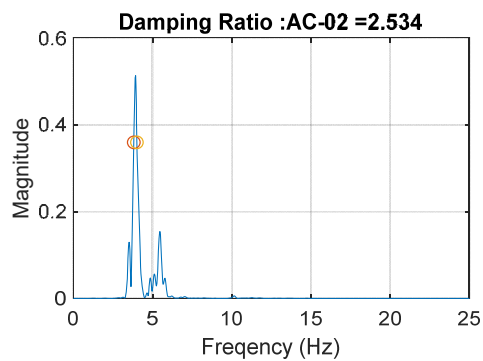
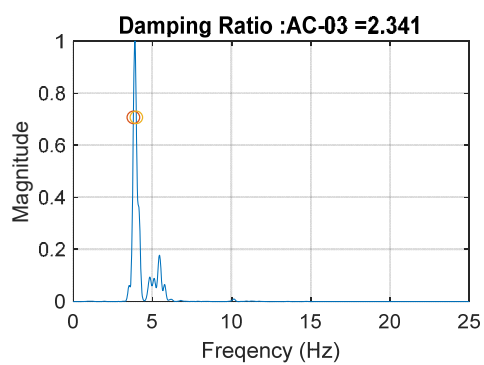
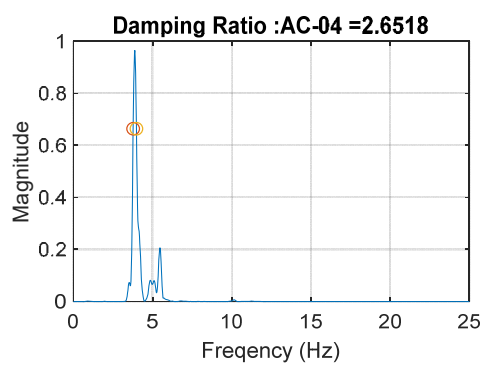
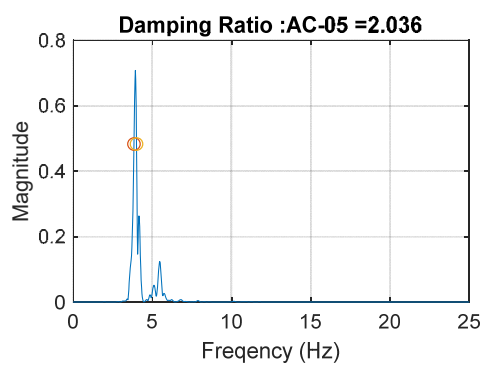
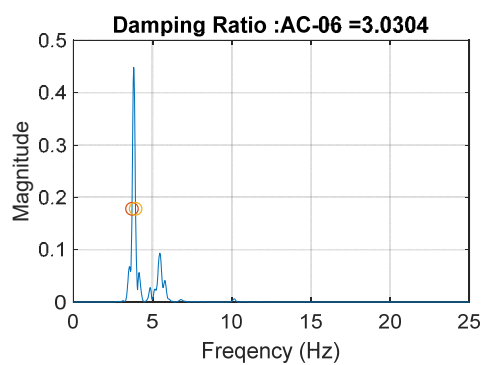
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 4)



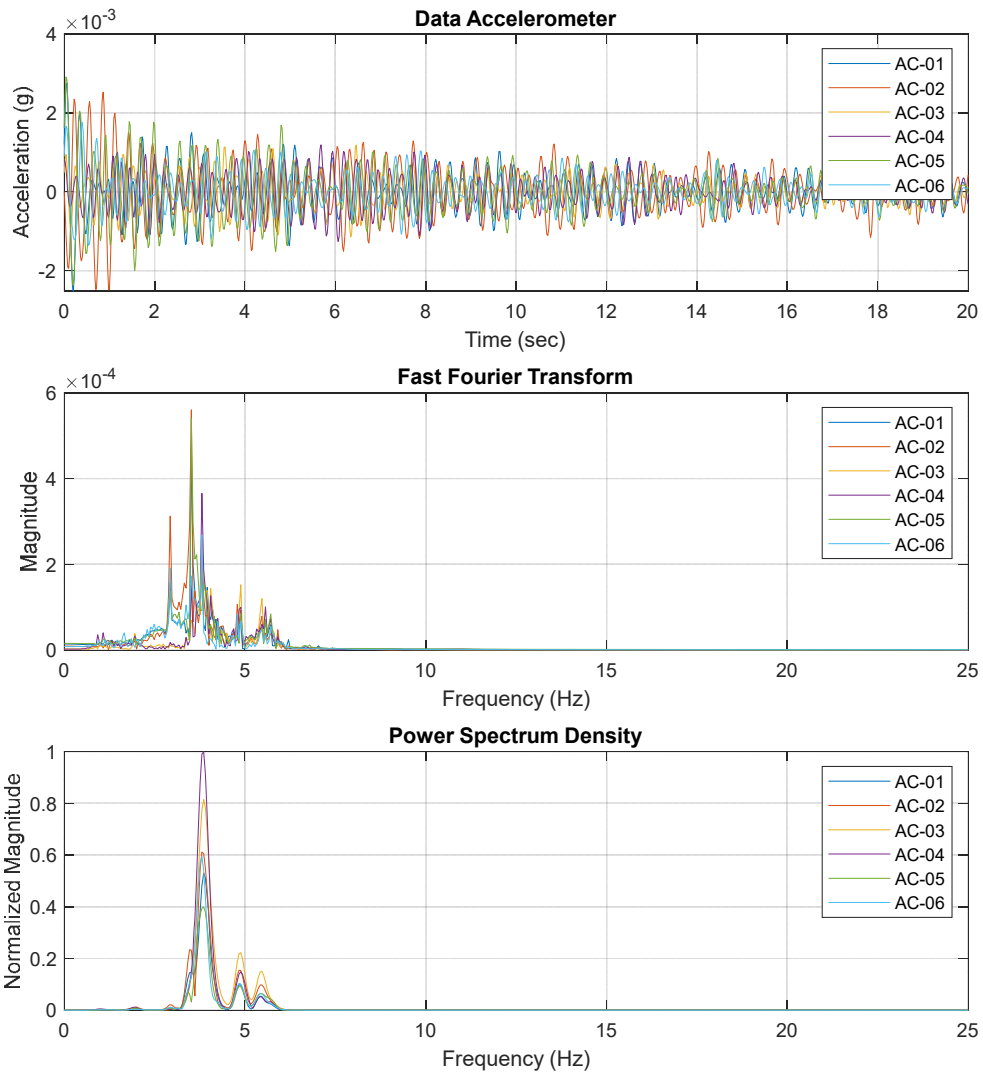
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 4)



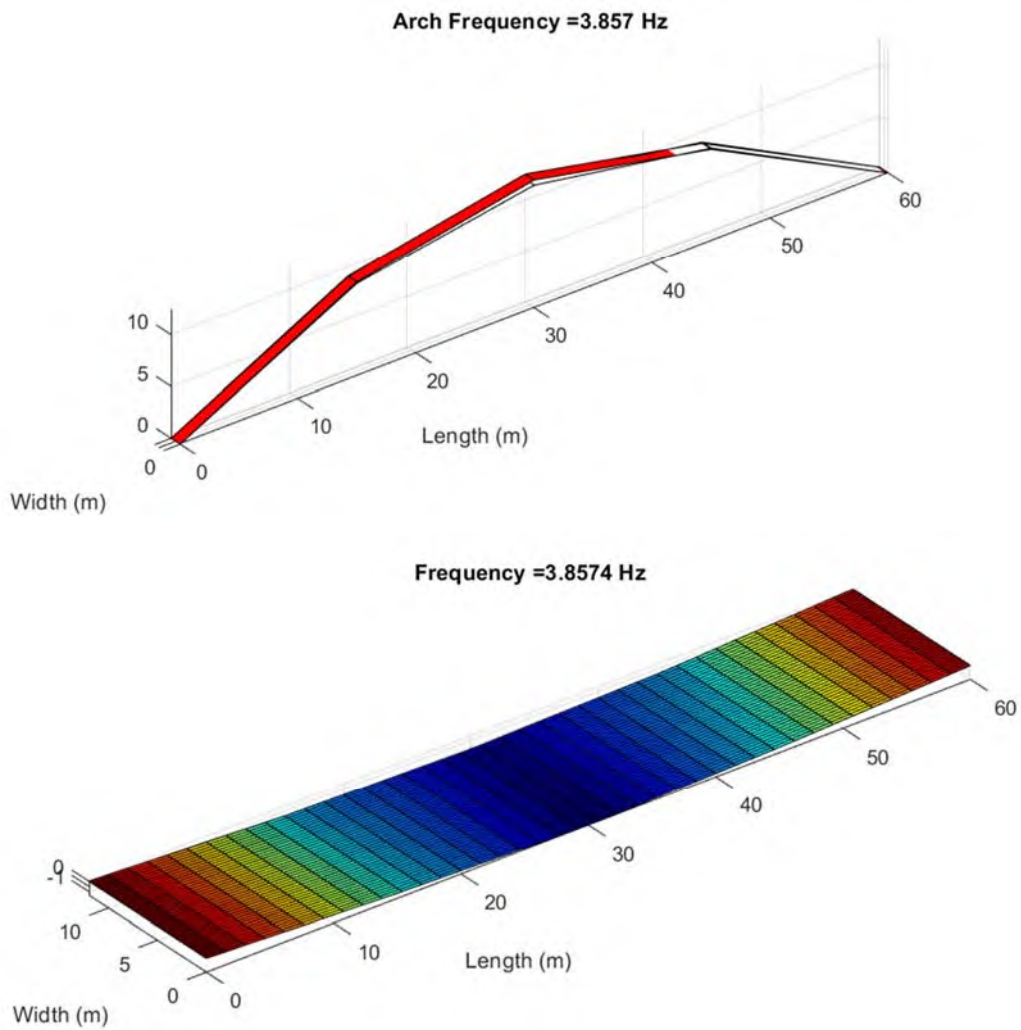
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 4)



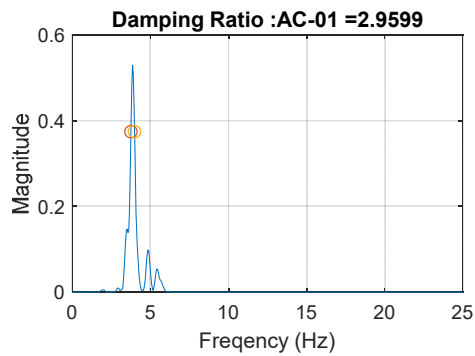
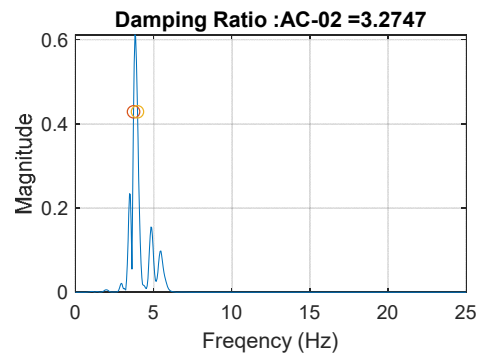
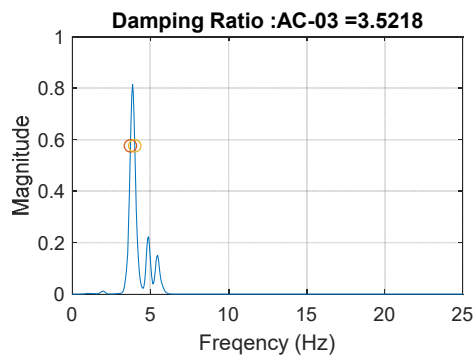
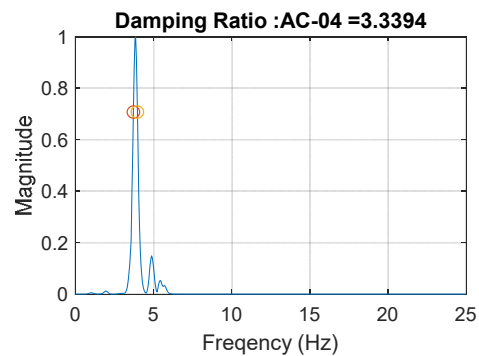
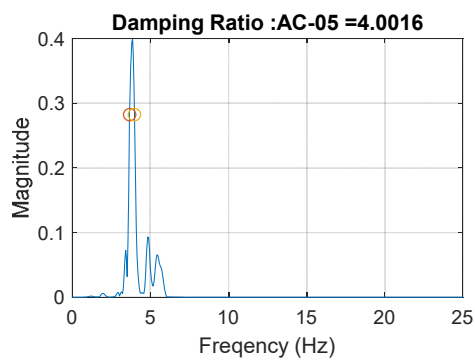
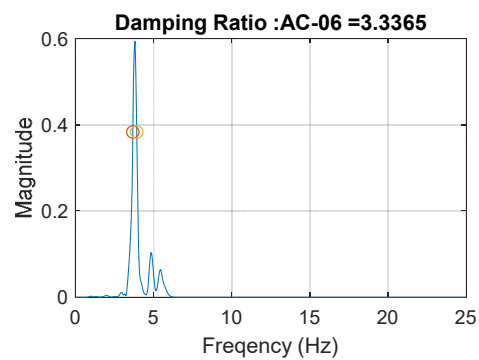
Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 4)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 4)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 4)



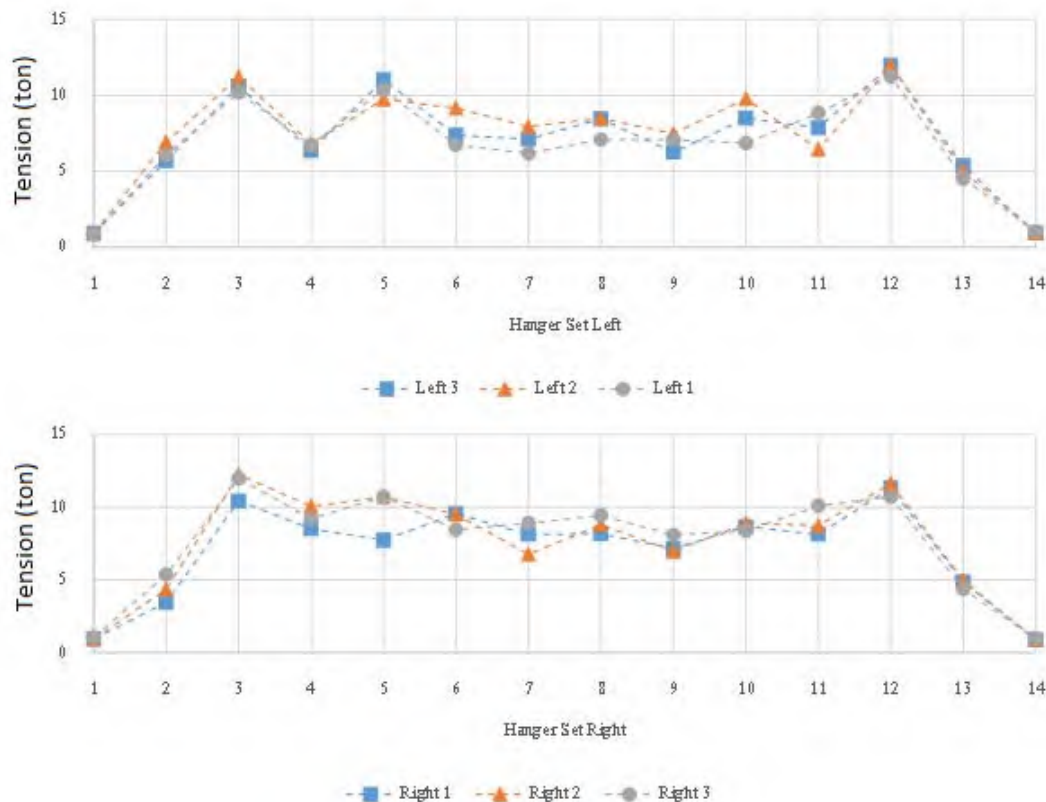
ตารางที่ 7-25 ผลการวิเคราะห์ Natural Frequency, Mode Shape และ Damping Ratio (Span 4)

Dynamic Case	Speed (km/h)	Frequency (Hz)	Mode Shape (1st Mode)	Damping Ratio (%)
Dynamic1	20	3.95	Bending	2.91 - 3.76
Dynamic2	30	3.93	Bending	2.04 - 3.03
Dynamic3	50	3.86	Bending	2.96 - 4.00

[7.7.8] ผลการตรวจวัดแรงดึงในเหล็ก Hanger (Span 4)

ตารางที่ 7-26 ผลการวิเคราะห์ Frequency และแรงดึงในเหล็ก Hanger (Span 4)

Group Section	Fundamental Frequency (Hz)						ρ (kg/m ³)	Diameter (mm)	Length (m)	Tension (Tons)					
	Left Side			Right Side						Left Side			Right Side		
	L3	L2	L1	R1	R2	R3				L3	L2	L1	R1	R2	R3
Sec 1	5.27	5.23	5.12	5.34	5.32	5.63	7,850	34	3.40	0.91	0.90	0.86	0.93	0.93	1.04
Sec 2	6.15	6.78	6.34	4.78	5.37	5.96	7,850	34	7.30	5.71	6.94	6.07	3.45	4.35	5.36
Sec 3	8.27	8.51	8.11	8.20	8.88	8.79	7,850	34	7.40	10.61	11.23	10.20	10.43	12.23	11.99
Sec 4	4.56	4.72	4.69	5.27	5.73	5.48	7,850	34	10.40	6.37	6.83	6.74	8.51	10.06	9.20
Sec 5	6.06	5.70	5.88	5.07	5.97	5.97	7,850	34	10.30	11.04	9.76	10.39	7.72	10.71	10.71
Sec 6	4.29	4.78	4.10	4.88	4.87	4.59	7,850	34	11.90	7.38	9.17	6.74	9.55	9.51	8.45
Sec 7	4.25	4.49	3.96	4.54	4.14	4.75	7,850	34	11.80	7.12	7.95	6.19	8.13	6.76	8.90
Sec 8	4.63	4.64	4.24	4.55	4.72	4.89	7,850	34	11.80	8.46	8.49	7.09	8.17	8.79	9.43
Sec 9	3.95	4.32	4.20	4.22	4.17	4.49	7,850	34	11.90	6.26	7.49	7.08	7.14	6.98	8.09
Sec 10	5.32	5.71	4.78	5.37	5.44	5.28	7,850	34	10.30	8.51	9.80	6.87	8.67	8.89	8.38
Sec 11	5.07	4.59	5.37	5.15	5.34	5.74	7,850	34	10.40	7.88	6.45	8.84	8.13	8.74	10.09
Sec 12	8.79	8.79	8.52	8.54	8.66	8.31	7,850	34	7.40	11.99	11.99	11.26	11.31	11.63	10.71
Sec 13	5.96	5.76	5.47	5.67	5.73	5.38	7,850	34	7.30	5.36	5.01	4.52	4.85	4.96	4.37
Sec 14	5.32	5.36	5.64	5.21	5.17	5.34	7,850	34	3.40	0.93	0.94	1.04	0.89	0.88	0.93



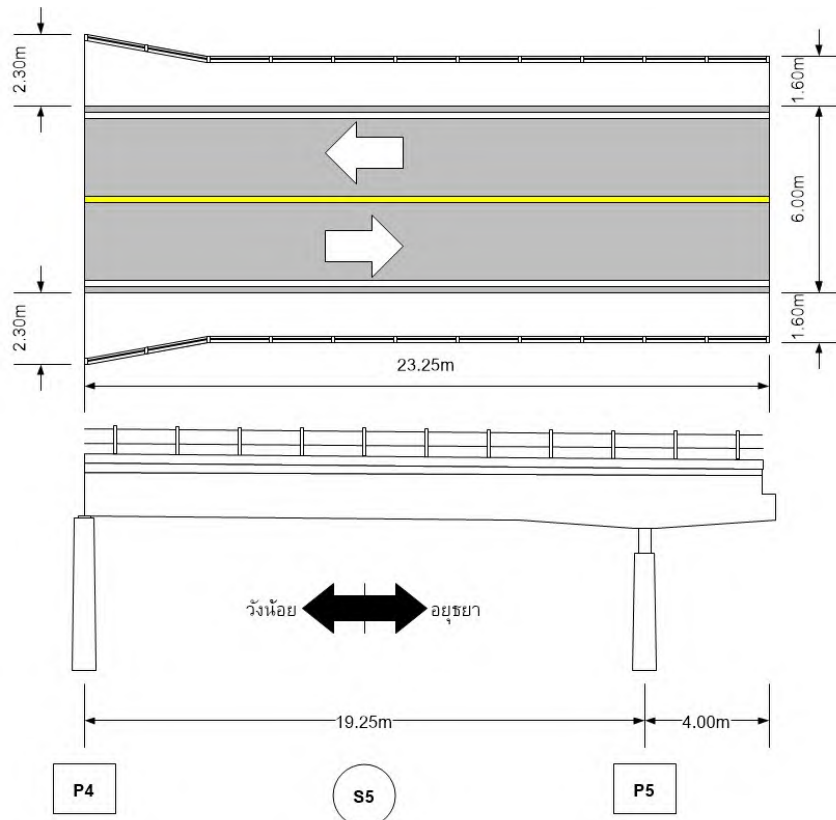
รูปที่ 7-41 แรงดึงในเหล็ก Hanger ของสะพาน (Span 4)



[7.8] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานช่วงที่ 5 (Span 5)

โครงการนี้ได้ดำเนินการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานช่วงที่ 5 (Span 5) ความยาวช่วงระหว่างรอยต่อสะพานเท่ากับ 23.25 เมตร ความยาวช่วงระหว่างตอม่อเท่ากับ 19.25 เมตร โดยทำการทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต และแบบพลวัต เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2564 ซึ่งมีรายละเอียดการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน ดังนี้

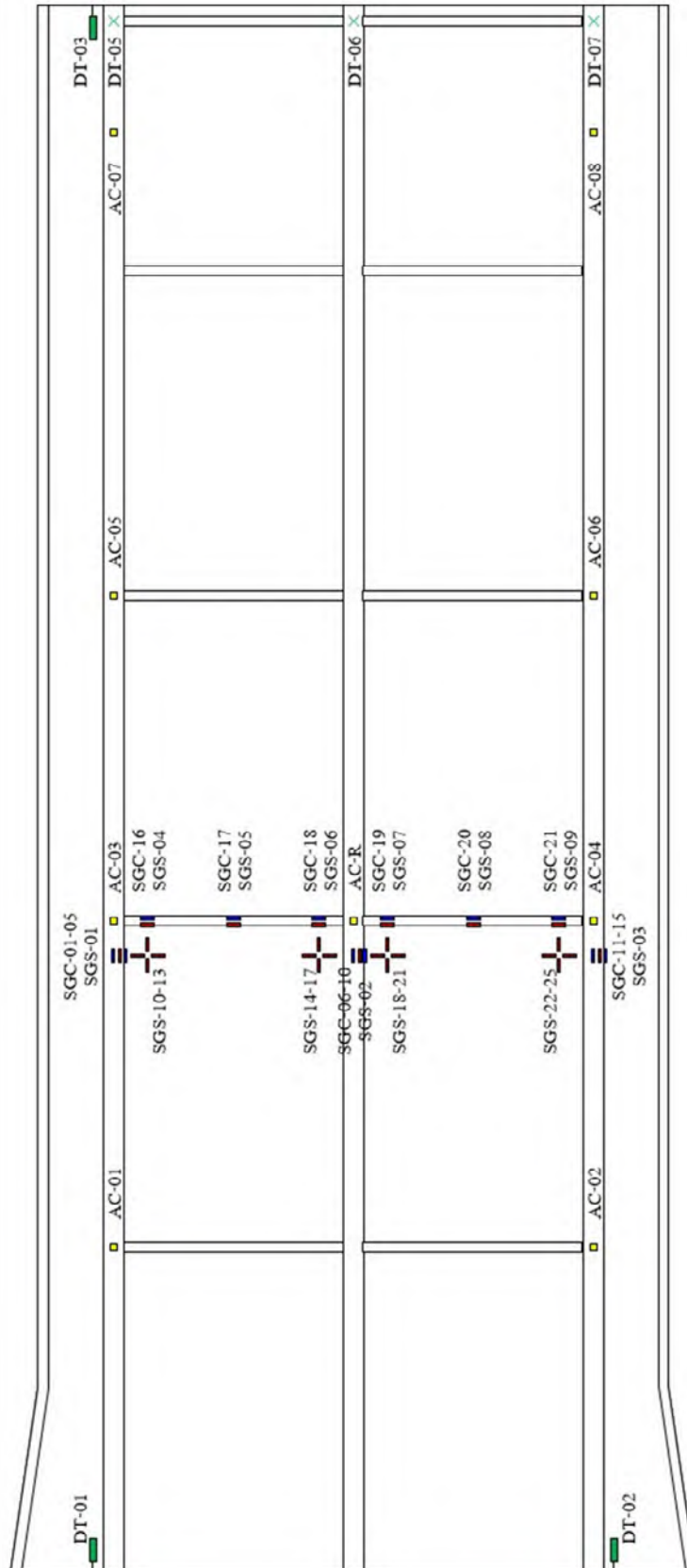
[7.8.1] ช่วงสะพานทดสอบ (Span 5)



รูปที่ 7-42 ช่วงสะพานทดสอบ (Span 5)

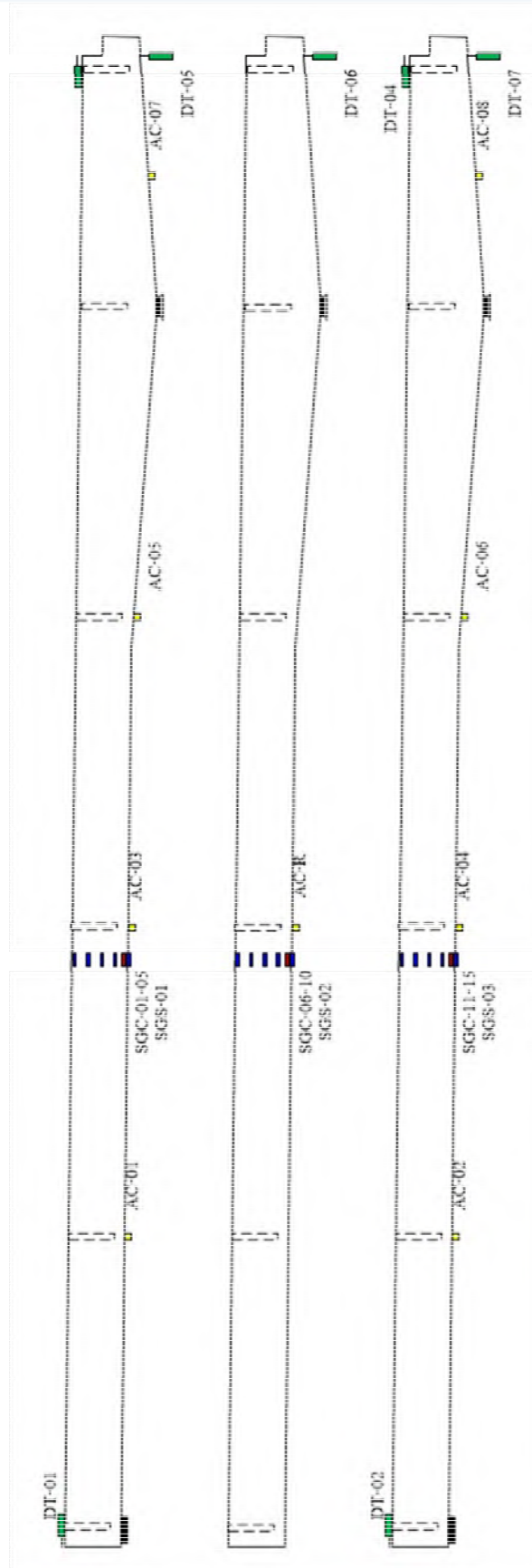
[7.8.2] ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

ในช่วงสะพานนี้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับคอนกรีต (Strain Gauge Concrete) จำนวน 21 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับเหล็ก (Strain Gauge Steel) จำนวน 25 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) จำนวน 7 ตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) จำนวน 9 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

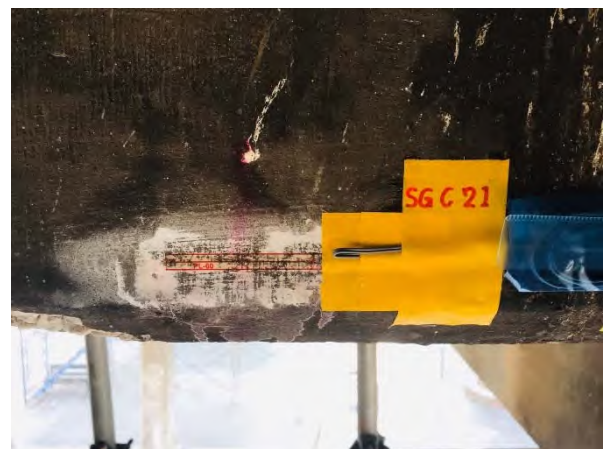


รูปที่ 7-43 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 5)





รูปที่ 7-43 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 5) (ต่อ)



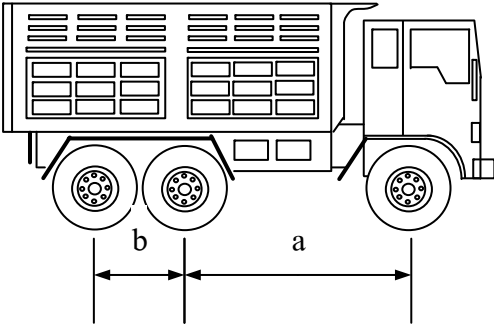
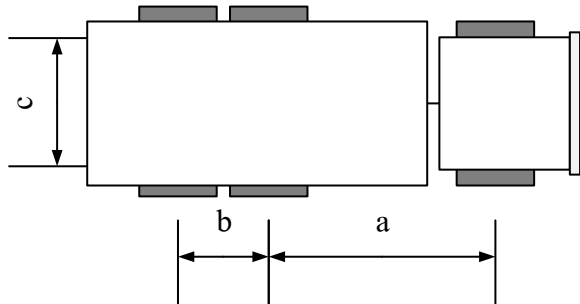
รูปที่ 7-44 ตัวอย่างภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน (Span 5)

[7.8.3] น้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ในช่วงสะพานนี้ได้ใช้รถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวมประมาณ 18 ตัน จำนวน 2 คัน ทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุม โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 7-27 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (Span 5)

คันที่	1	2
ประเภท	รถบรรทุก (80-7169)	รถบรรทุก (81-1459)
น้ำหนักรถบรรทุก (ตัน)	18.060	18.530
ระยะเพลที่ 1 ถึง 2 (a, เมตร)	4.00	4.10
ระยะเพลที่ 2 ถึง 3 (b, เมตร)	1.35	1.35
ความกว้างฐานล้อ (c, เมตร)	1.90	2.00

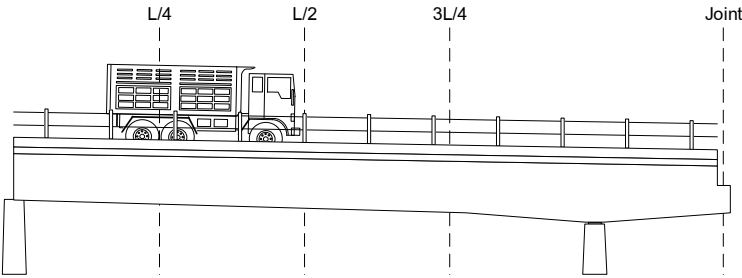
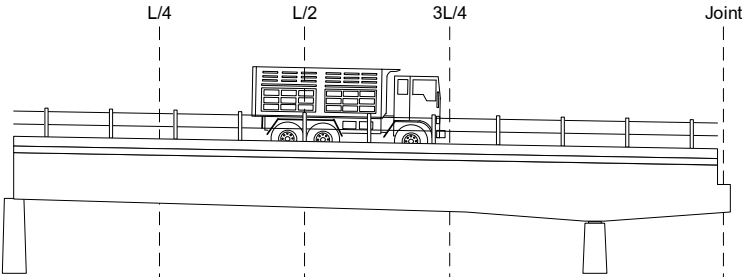
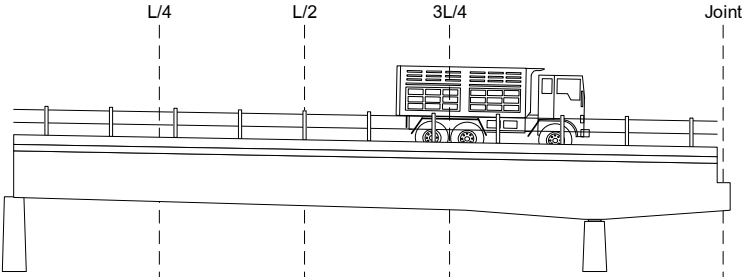
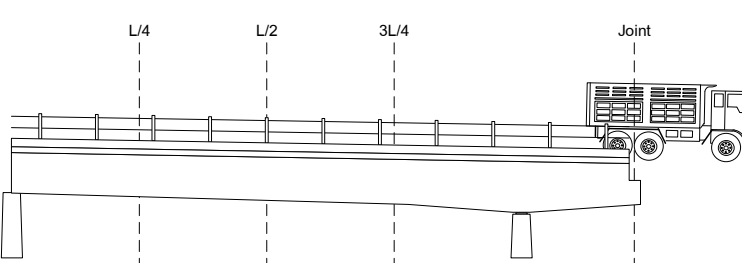



[7.8.4] รูปแบบการทดสอบแบบสถิต

การทดสอบแบบสถิต (Static Test) เป็นการนำรถบรรทุกทดสอบจอดตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนดหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

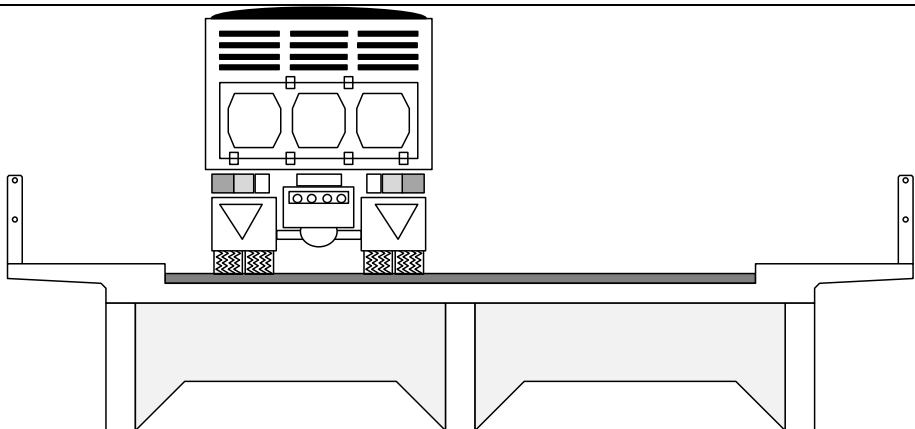
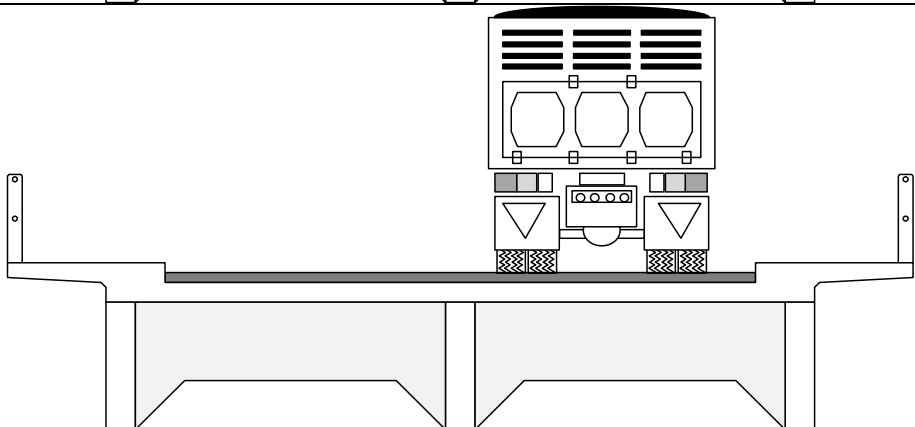
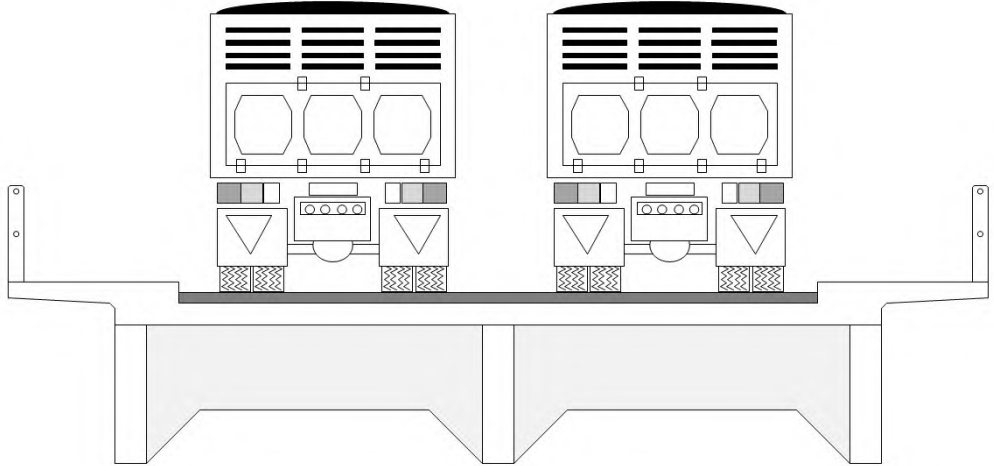
- Static 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$, $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ และ Joint ในช่องจราจรทางซ้าย
- Static 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$, $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ และ Joint ในช่องจราจรทางขวา
- Static 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$, $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ และ Joint ทั้งสองช่องจราจร

ตารางที่ 7-28 ระยะจอตกรบรรทุกตามตำแหน่ง L/4, L/2, 3L/4 และ Joint (Span 5)

ระยะ	ตำแหน่งจอตกรบรรทุก
L/4	
L/2	
3L/4	
Joint	



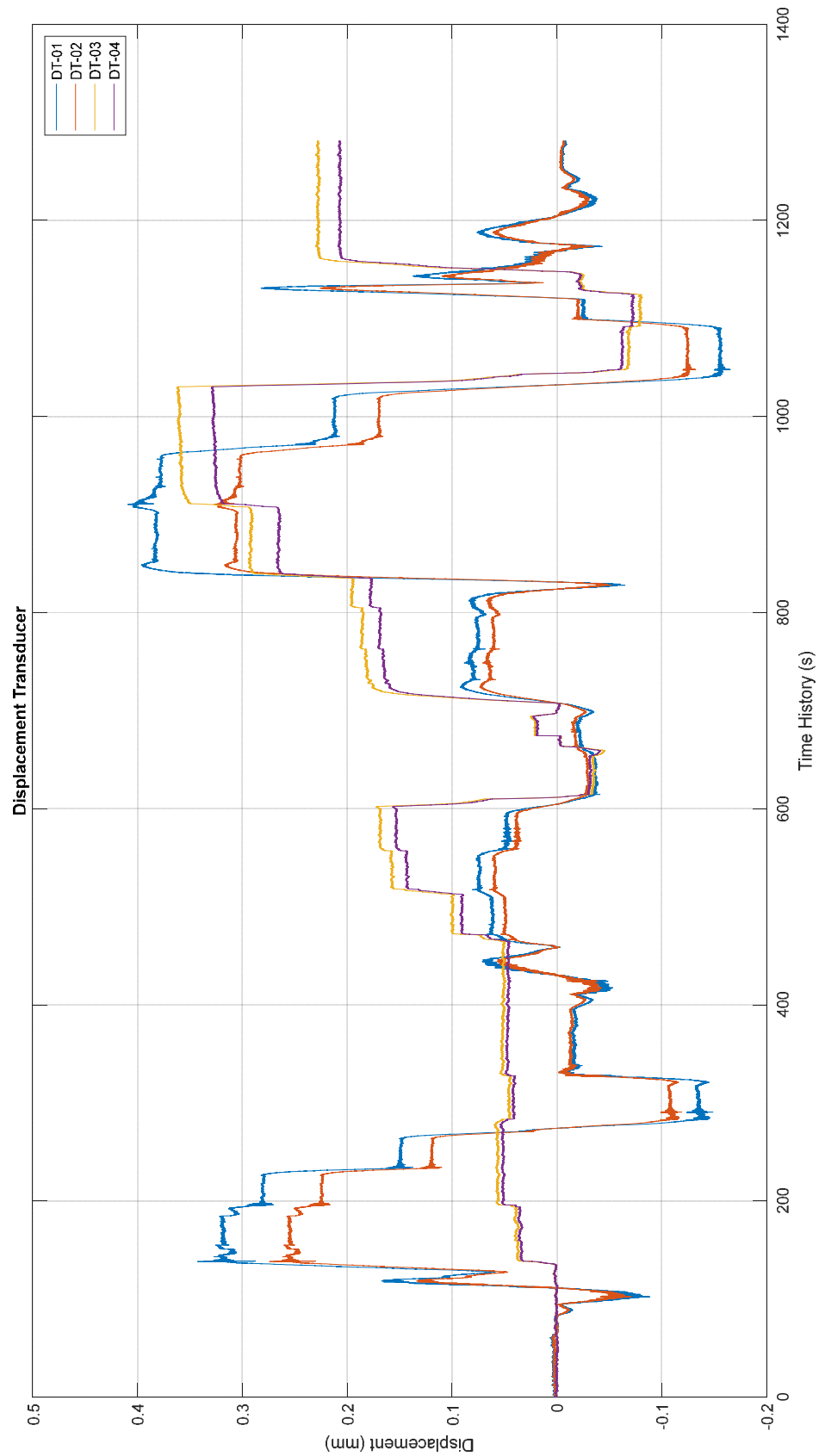
ตารางที่ 7-29 รูปแบบการทดสอบแบบสถิต ด้วยรถบรรทุกน้ำหนัก (Span 5)

Case	Pattern
Static 1	
Static 2	
Static 3	

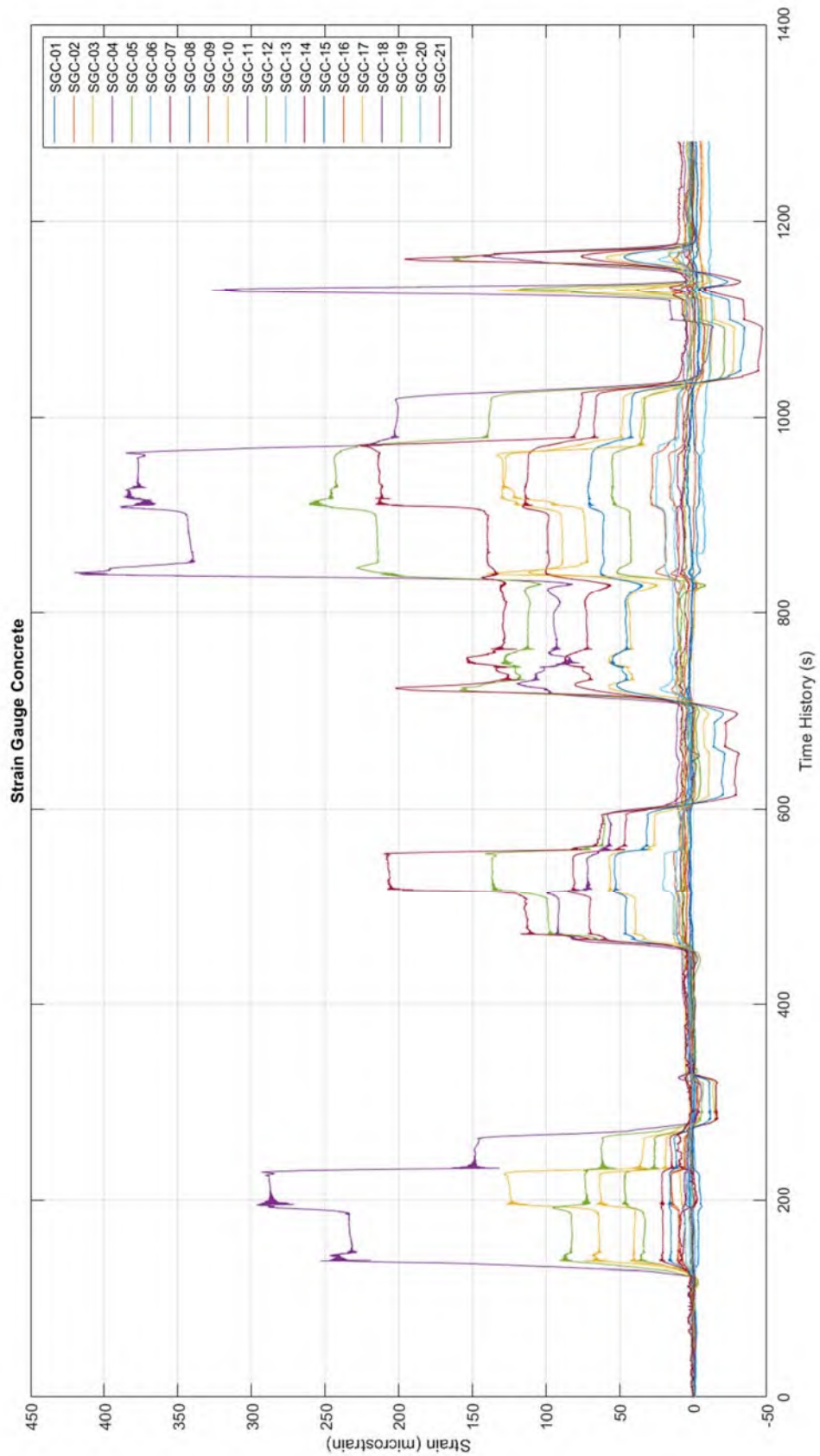


รูปที่ 7-45 ตัวอย่างภาพการทดสอบแบบสถิต (Span 5)



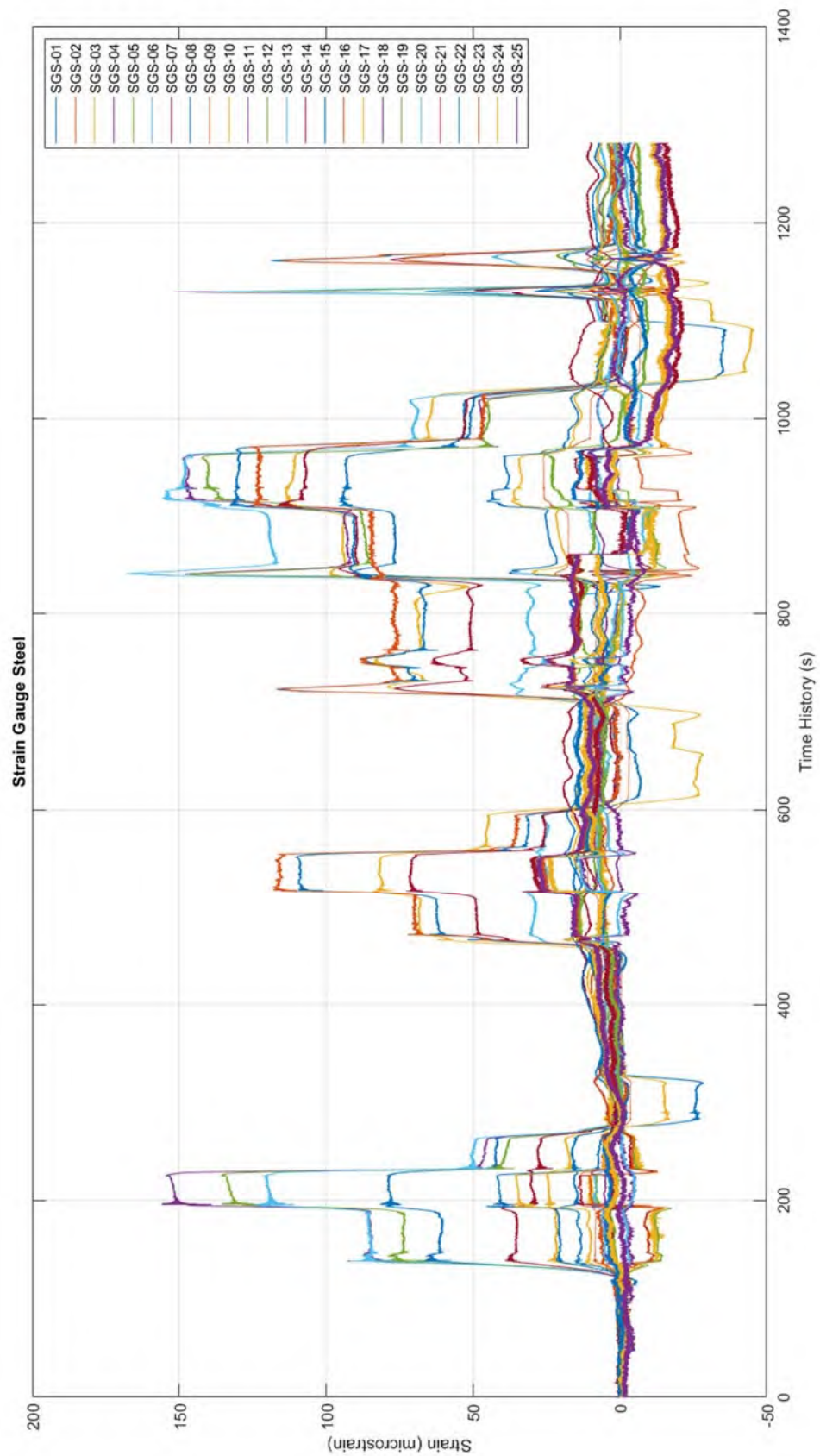


รูปที่ 7-46 สัญญาณการตรวจวัด Displacement Transducer (Span 5)



รูปที่ 7-47 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (Span 5)





รูปที่ 7-48 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Steel (Span 5)

[7.8.5] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิต

ตารางที่ 7-30 ผลการตรวจวัด Displacement Transducer (หน่วย : mm) (Span 5)

Sensor	Static-1				Static-2				Static-3			
	L/4(S5)	L/2(S5)	3L/4(S5)	Joint	L/4(S5)	L/2(S5)	3L/4(S5)	Joint	L/4(S5)	L/2(S5)	3L/4(S5)	Joint
DT-01	0.318	0.281	0.150	-0.134	0.061	0.073	0.051	-0.037	0.381	0.377	0.213	-0.156
DT-02	0.254	0.225	0.120	-0.107	0.049	0.058	0.041	-0.029	0.305	0.301	0.170	-0.125
DT-03	0.039	0.057	0.056	0.046	0.099	0.157	0.169	-0.036	0.292	0.358	0.359	-0.069
DT-04	0.035	0.051	0.051	0.041	0.090	0.143	0.154	-0.032	0.266	0.326	0.327	-0.063
DT-05	0.346	0.560	0.214	-1.098	0.274	0.332	0.191	-0.261	0.979	1.250	0.712	-1.364
DT-06	0.311	0.413	0.234	-0.825	0.341	0.640	0.207	-0.845	0.981	1.276	0.824	-1.365
DT-07	0.294	0.265	0.209	-0.386	0.416	0.854	0.224	-1.240	0.921	1.239	0.743	-1.363

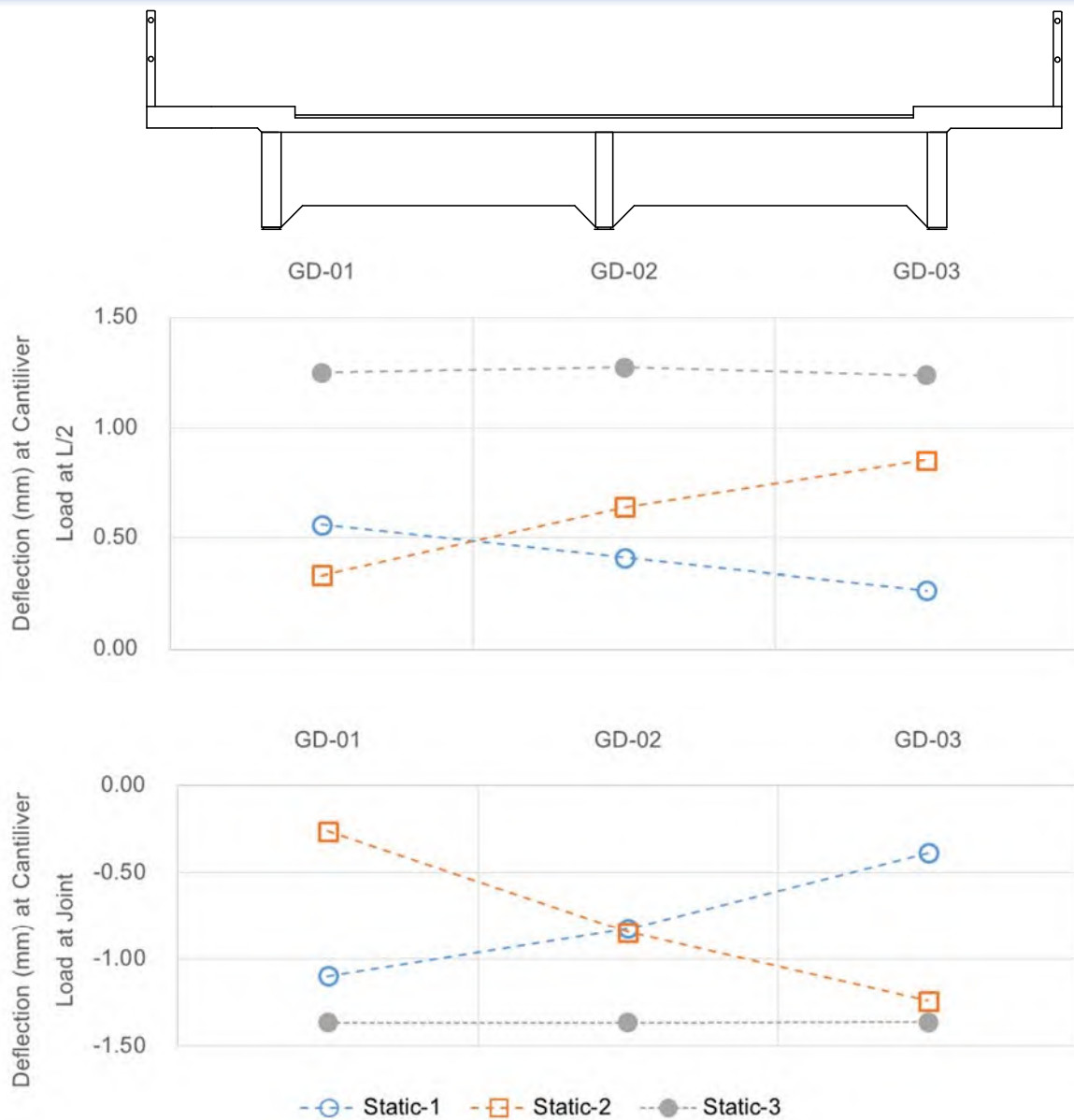
ตารางที่ 7-31 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (หน่วย : microstarin) (Span 5)

Sensor	Static-1				Static-2				Static-3			
	L/4(S5)	L/2(S5)	3L/4(S5)	Joint	L/4(S5)	L/2(S5)	3L/4(S5)	Joint	L/4(S5)	L/2(S5)	3L/4(S5)	Joint
SGC-01	-3.840	-4.406	0.140	0.854	2.735	3.529	3.460	3.900	-2.935	-3.756	0.056	1.404
SGC-02	-0.517	0.625	1.600	-0.525	4.706	4.710	3.108	1.869	-0.860	-1.588	-1.481	-6.642
SGC-03	5.071	8.483	5.942	-3.469	4.854	5.363	2.917	0.069	5.633	7.050	2.708	-12.260
SGC-04	5.748	5.929	3.706	-2.540	2.271	3.117	1.975	1.542	6.306	6.083	3.056	-3.938
SGC-05	32.630	46.440	26.400	-15.520	7.425	8.069	6.554	-4.969	42.460	54.800	32.800	-20.990
SGC-06	-1.581	1.213	-1.135	-1.271	2.206	0.990	2.442	3.240	-8.442	-5.479	-8.031	-11.260
SGC-07	1.310	4.538	2.602	1.363	7.077	5.794	5.442	4.708	5.829	10.540	4.025	-0.648
SGC-08	-0.079	2.806	0.502	-0.913	1.554	1.729	1.521	0.229	1.263	3.815	1.458	-3.569
SGC-09	9.365	14.890	5.202	-2.071	9.525	12.000	7.388	-1.417	19.100	27.750	11.100	-7.115
SGC-10	39.790	63.790	18.610	-13.410	39.290	56.220	26.160	-10.700	88.890	127.360	47.530	-27.500
SGC-11	0.052	-0.946	0.917	1.583	11.280	8.479	8.919	10.280	10.740	6.238	5.944	5.077
SGC-12	0.873	0.125	1.617	1.885	6.950	6.869	6.806	6.619	4.946	3.279	4.340	1.344
SGC-13	2.631	1.906	2.523	-0.106	11.190	12.010	9.675	1.013	12.910	12.580	9.910	-4.467
SGC-14	20.530	21.180	14.740	-15.880	70.630	81.550	46.080	-28.780	98.900	112.460	66.560	-45.660
SGC-15	15.030	15.670	11.690	-11.180	46.130	53.460	31.390	-20.390	61.320	69.110	42.330	-33.900
SGC-16	9.344	14.790	5.869	1.098	4.754	4.858	5.023	5.748	9.271	15.970	6.546	2.596
SGC-17	63.880	124.960	34.060	2.460	12.390	6.679	8.117	3.579	73.200	129.200	34.540	-0.042
SGC-18	233.350	287.540	147.750	-5.140	91.680	71.470	56.330	-1.842	342.430	376.830	200.790	-10.500
SGC-19	82.220	73.220	62.370	-6.223	98.930	136.160	60.180	-2.115	214.480	243.250	138.520	-8.721
SGC-20	5.110	4.042	4.208	-0.379	13.640	19.430	7.079	2.946	18.160	24.610	10.580	4.277
SGC-21	10.010	-1.202	8.608	2.581	113.140	206.240	62.840	7.546	139.840	214.030	76.710	5.310

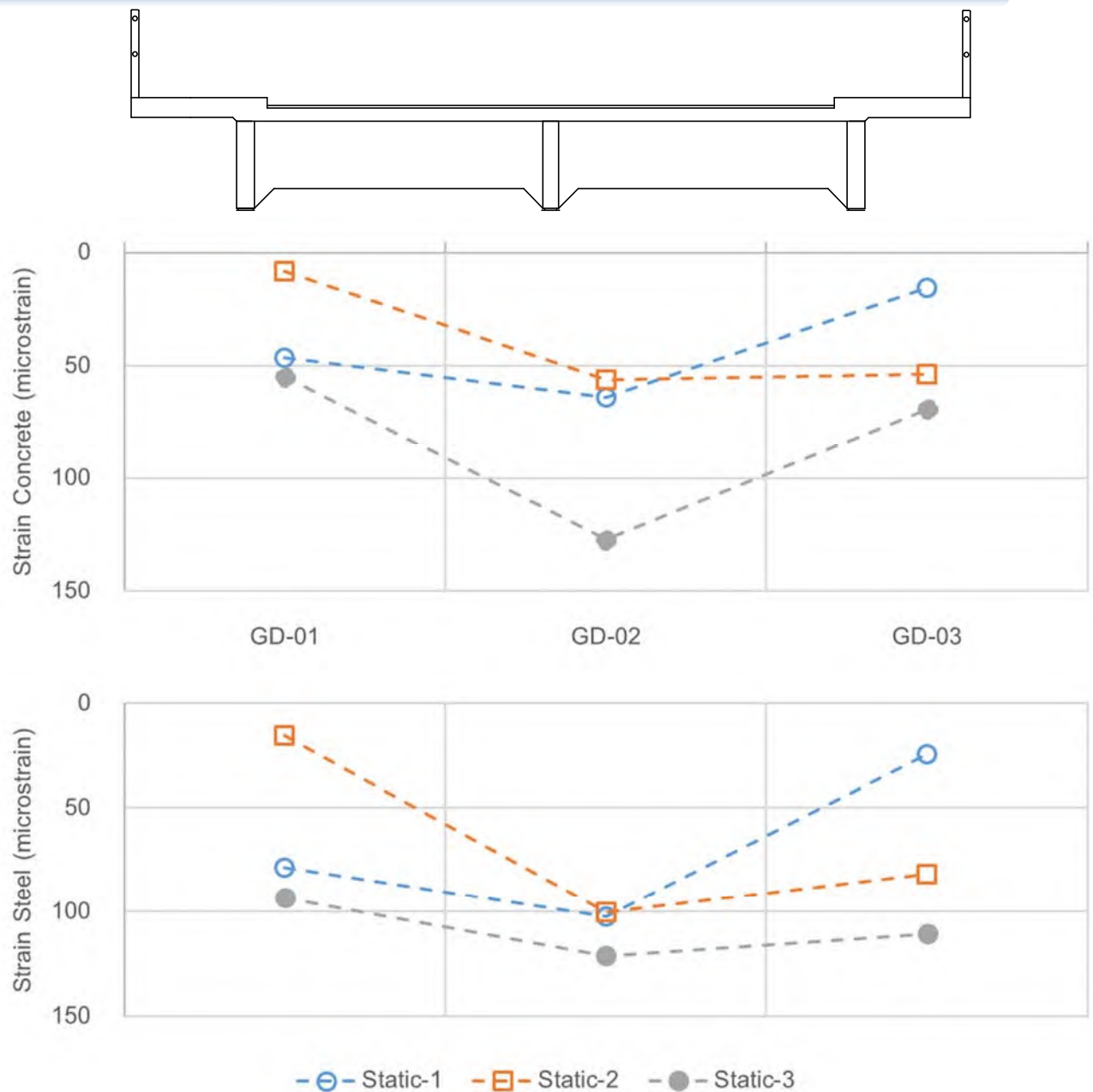


ตารางที่ 7-32 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel (หน่วย : microstarin) (Span 5)

Sensor	Static-1				Static-2				Static-3			
	L/4(S5)	L/2(S5)	3L/4(S5)	Joint	L/4(S5)	L/2(S5)	3L/4(S5)	Joint	L/4(S5)	L/2(S5)	3L/4(S5)	Joint
SGS-01	60.410	78.550	42.250	-26.070	13.850	15.470	10.670	-6.004	76.510	93.230	52.830	-35.230
SGS-02	78.533	102.115	54.925	-33.891	18.005	100.111	13.871	-7.8052	99.463	121.199	68.679	-45.799
SGS-03	21.300	23.990	17.310	-15.380	68.300	81.770	45.220	-26.120	94.210	110.640	64.660	-44.500
SGS-04	84.840	151.890	45.990	-2.446	6.594	0.658	5.408	7.860	92.820	147.370	46.930	0.073
SGS-05	73.810	132.740	38.460	-1.029	14.480	7.931	10.830	4.063	86.920	140.130	44.660	-1.323
SGS-06	85.060	119.910	49.770	0.927	28.950	24.650	24.380	4.306	119.080	148.100	69.030	0.763
SGS-07	34.870	29.950	27.860	-1.567	48.810	70.950	25.400	0.898	89.560	106.890	52.790	-2.221
SGS-08	20.960	15.190	16.390	-2.802	62.210	108.570	31.280	0.610	90.260	129.840	50.880	-1.406
SGS-09	6.744	2.069	4.485	-1.892	69.760	115.670	35.320	0.606	84.520	122.940	46.850	2.002
SGS-10	-12.320	9.629	-5.196	4.250	6.010	5.794	7.371	8.177	-11.030	11.240	-2.583	6.340
SGS-11	4.704	4.835	4.360	0.717	6.873	7.923	8.504	7.617	6.465	1.435	7.444	1.433
SGS-12	-12.470	8.125	-4.671	2.000	5.625	6.544	6.760	7.558	-11.530	8.646	-1.715	5.248
SGS-13	5.575	8.285	3.008	-0.615	6.838	7.502	7.765	7.808	8.244	7.735	6.940	2.196
SGS-14	-9.313	14.130	-3.804	5.206	10.720	9.650	13.200	16.520	-3.144	15.130	2.515	14.430
SGS-15	13.530	41.150	7.092	2.585	15.180	14.610	15.430	12.200	24.200	38.940	14.130	4.913
SGS-16	-9.285	9.990	-4.240	5.381	4.842	3.229	4.808	6.521	-21.230	-6.458	-14.390	-1.669
SGS-17	10.420	34.780	5.004	0.985	13.450	13.250	13.810	11.090	20.860	34.050	13.180	4.758
SGS-18	-3.242	-4.448	-1.494	1.815	-1.279	13.120	0.363	5.944	-5.044	8.463	-2.827	1.485
SGS-19	1.471	0.625	2.798	-0.894	14.530	28.350	6.446	5.996	8.340	22.290	-0.073	-9.125
SGS-20	-2.869	-5.169	-1.015	1.542	1.231	12.610	3.488	10.460	-8.142	1.167	-6.465	-0.215
SGS-21	2.010	1.602	3.919	0.692	16.440	27.960	8.317	8.523	-1.438	8.646	-11.390	-20.400
SGS-22	3.613	2.733	4.756	0.613	6.458	26.260	10.410	14.120	-3.927	13.540	-2.800	-8.744
SGS-23	-1.766	-1.910	1.722	-0.304	15.773	25.258	11.222	9.878	-4.188	3.506	-10.550	-17.846
SGS-24	2.294	0.556	3.465	0.552	7.717	22.830	8.473	11.860	-11.010	1.285	-13.200	-15.740
SGS-25	-1.840	-1.990	1.794	-0.317	16.430	26.310	11.690	10.290	-4.363	3.652	-10.990	-18.590



รูปที่ 7-49 ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งสะพานและที่ปลายยื่น (Span 5)



รูปที่ 7-50 ค่าความเครียดที่กึ่งสะพาน (Span 5)

[7.8.6] รูปแบบการทดสอบแบบพลวัต

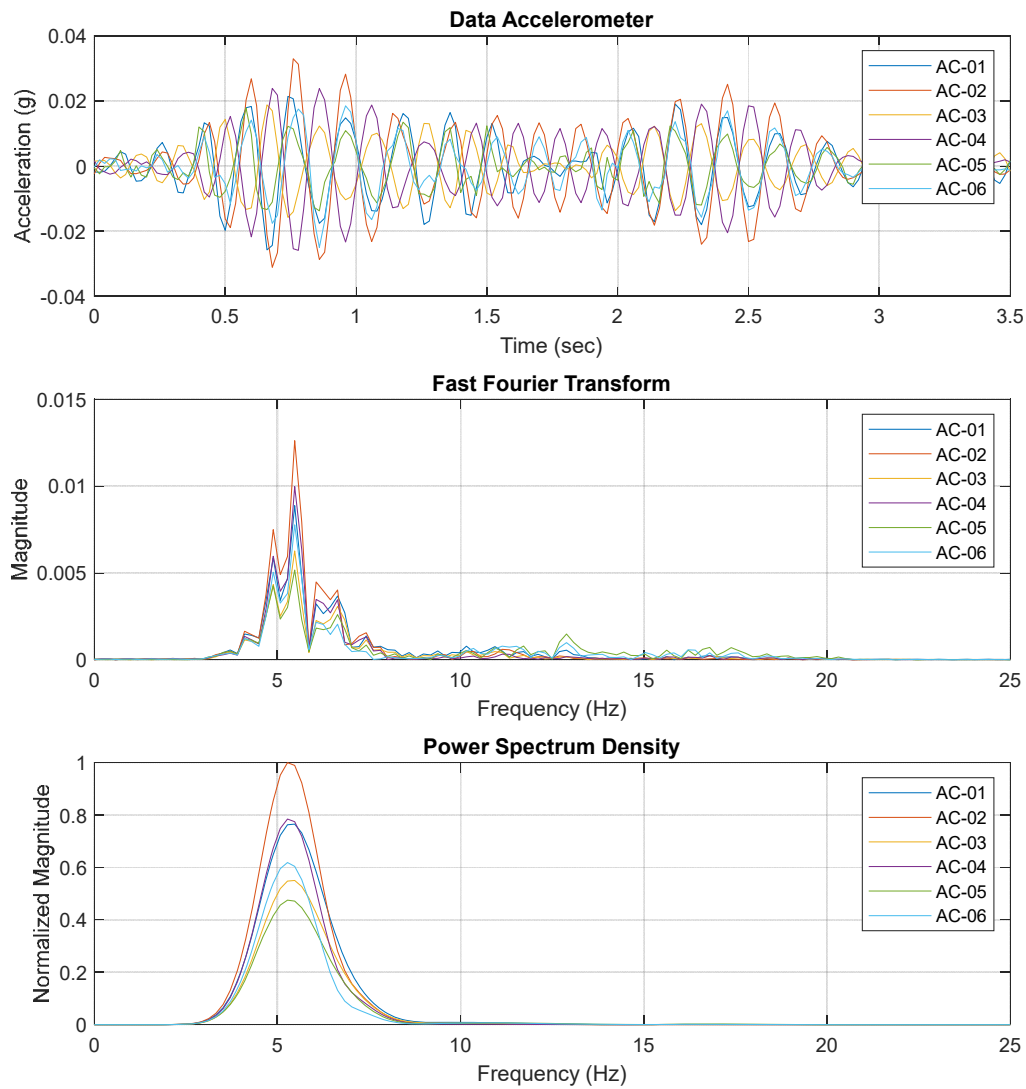
การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) เป็นการทดสอบโดยใช้รถบรรทุกวิ่งผ่านช่วงสะพานทดสอบหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

- Dynamic 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 20 กม./ชม. ที่กลางสะพาน
- Dynamic 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 30 กม./ชม. ที่กลางสะพาน
- Dynamic 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. ที่กลางสะพาน



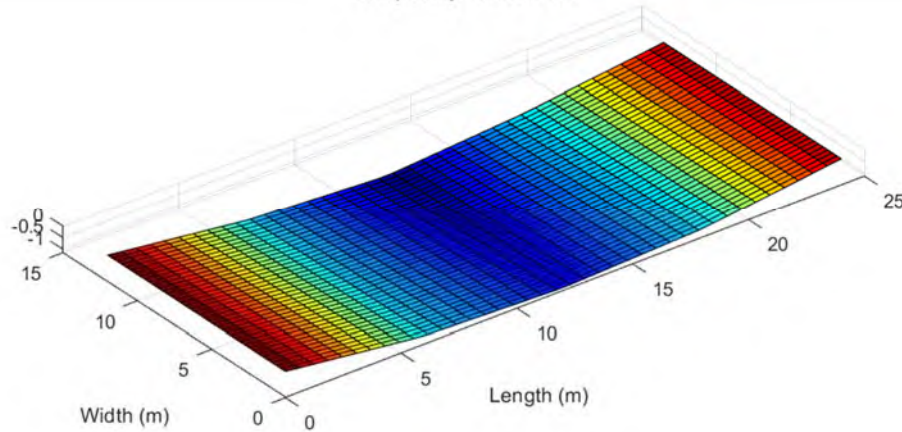
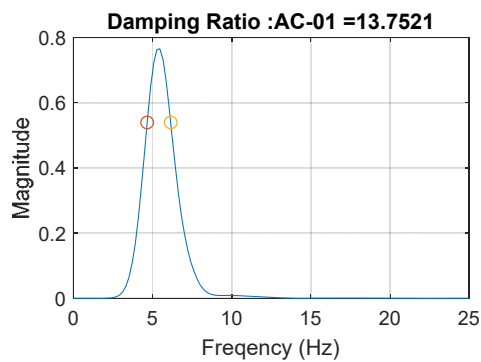
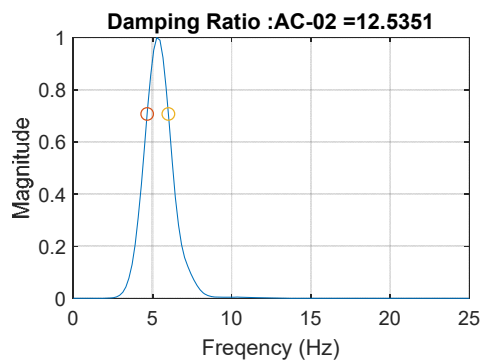
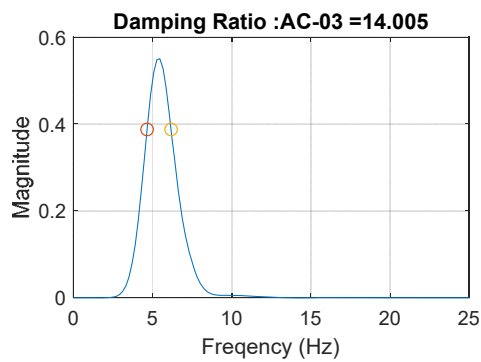
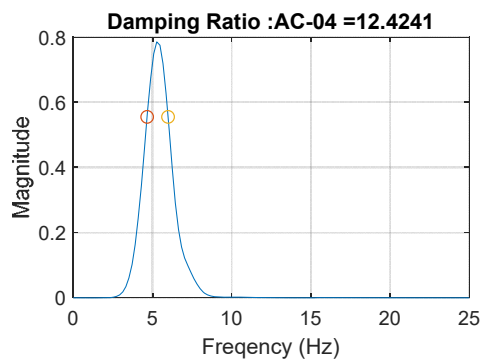
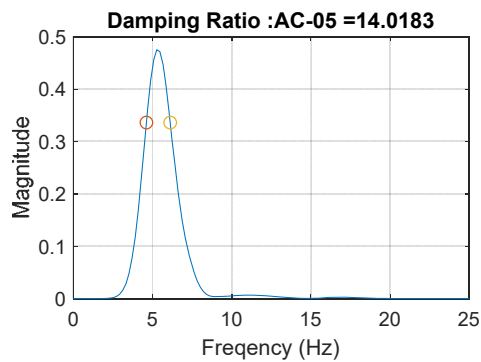
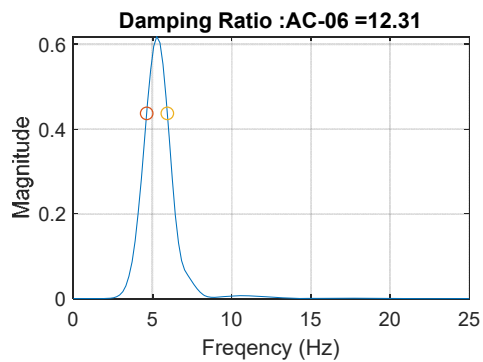
[7.8.7] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต

Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 5)

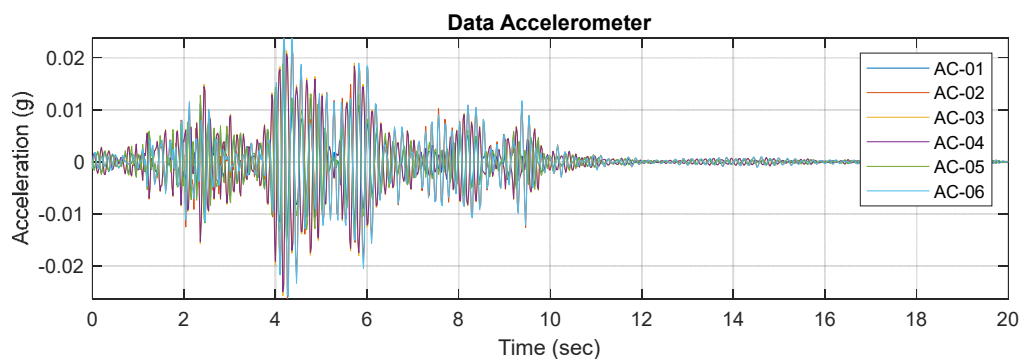
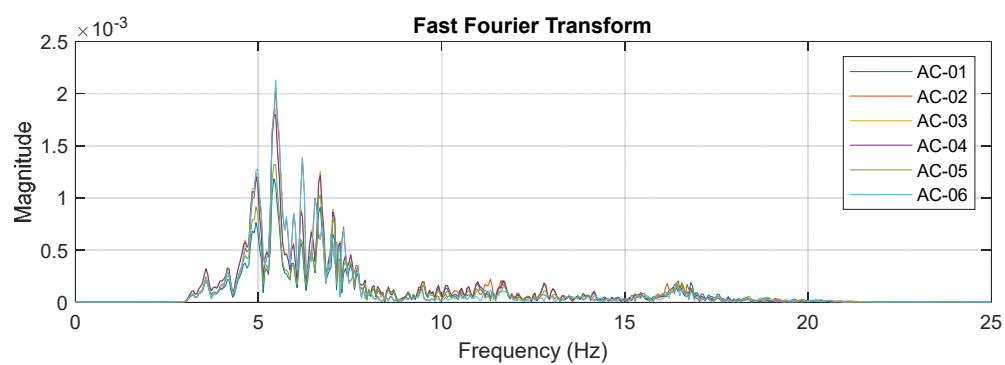
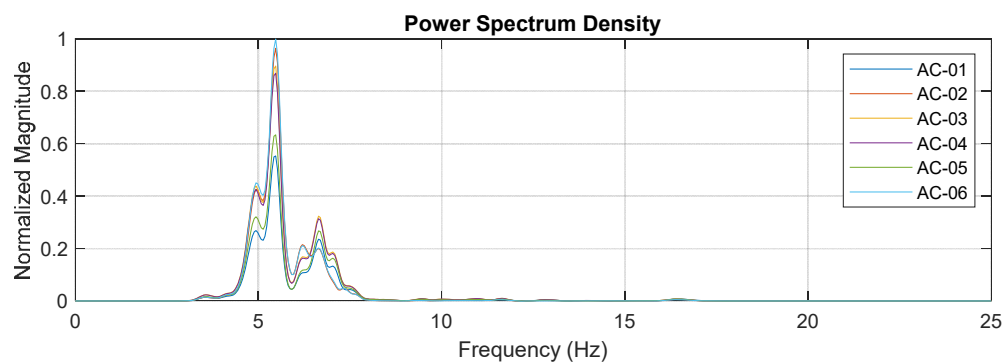
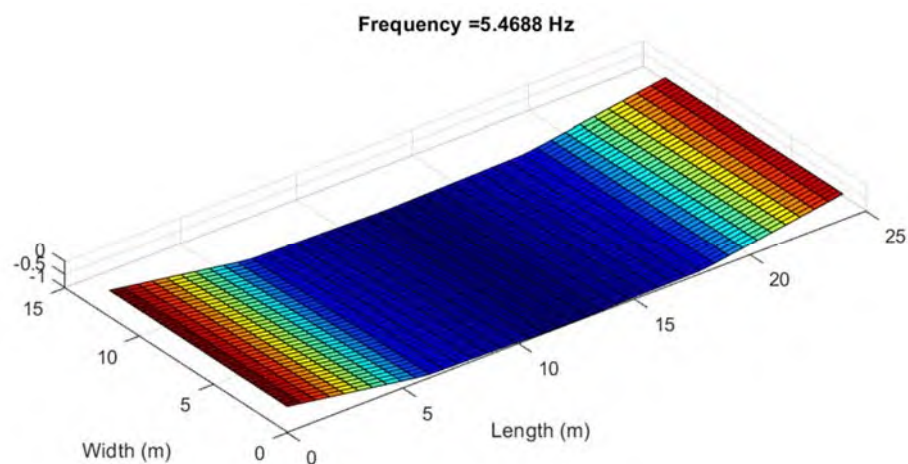


Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 5)

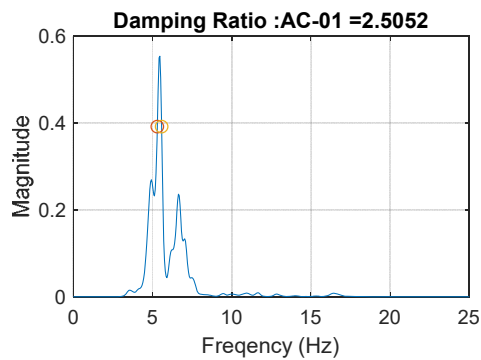
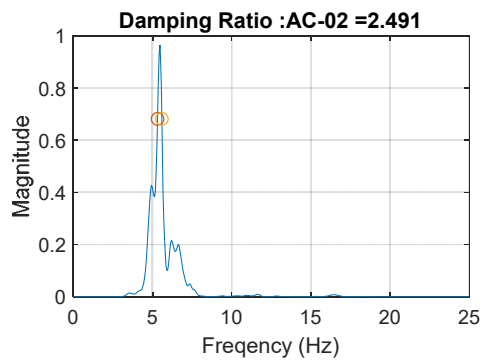
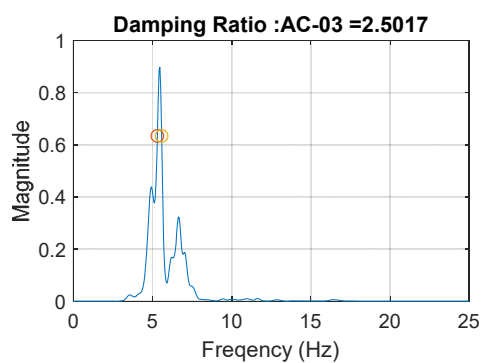
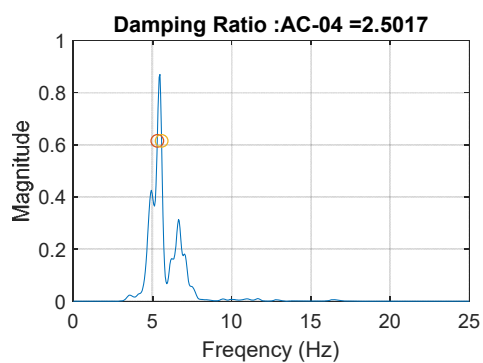
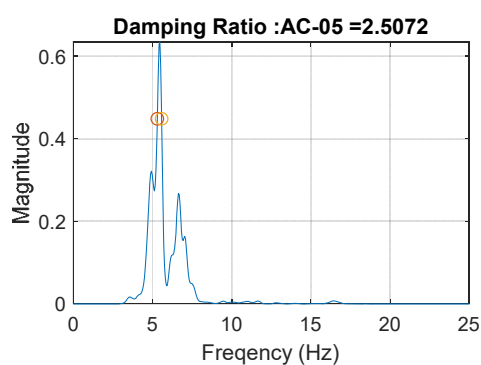
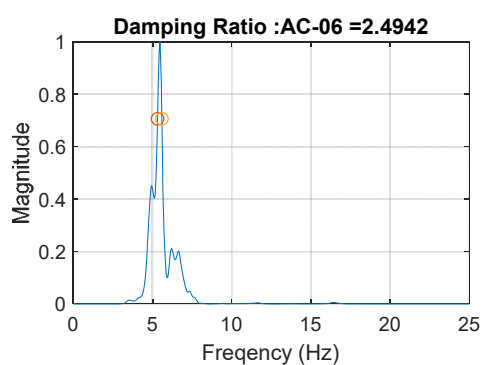
Frequency = 5.2734 Hz



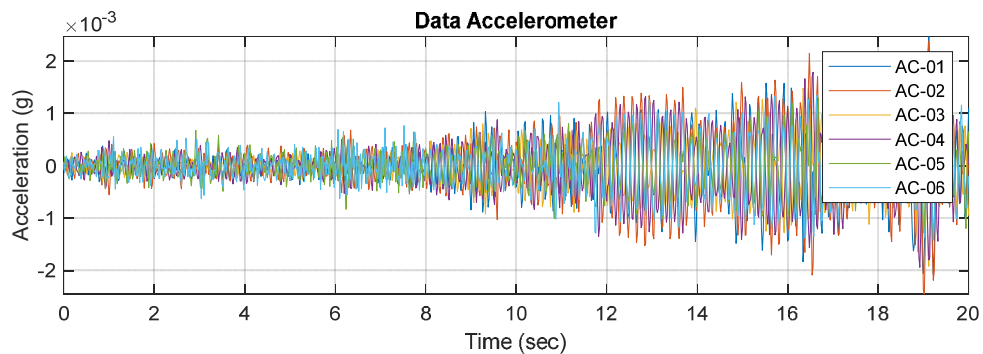
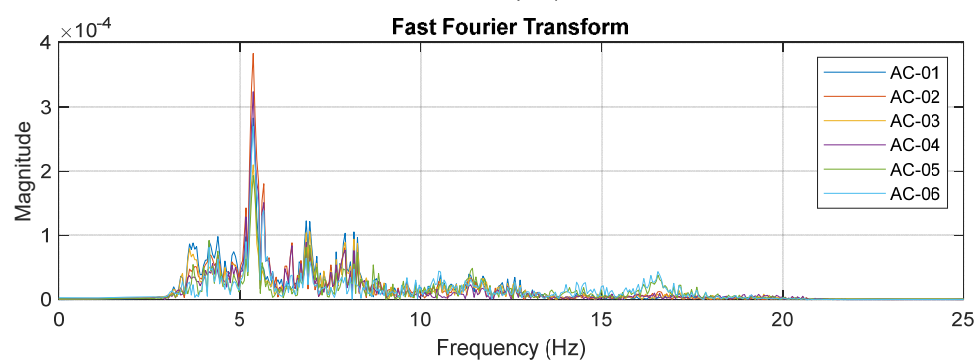
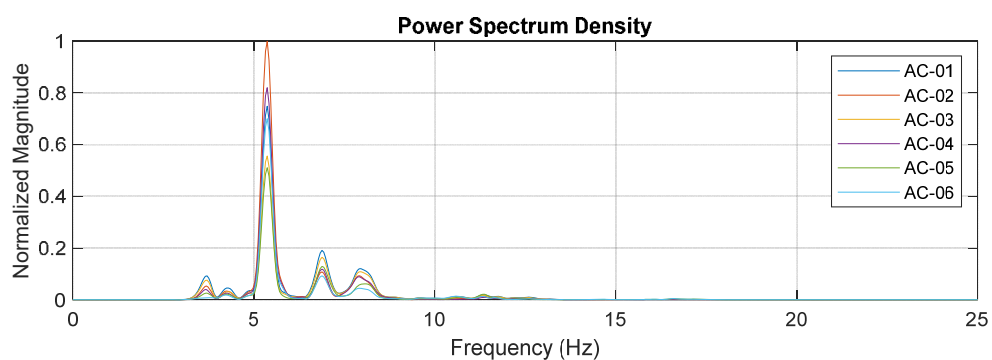
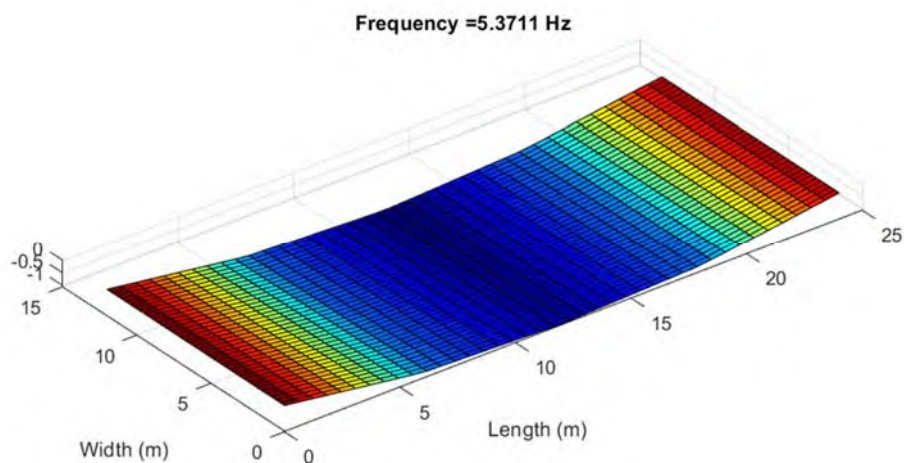
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 5)



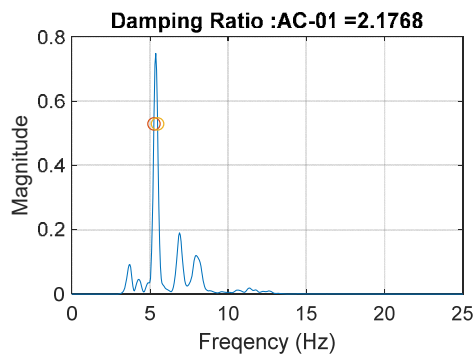
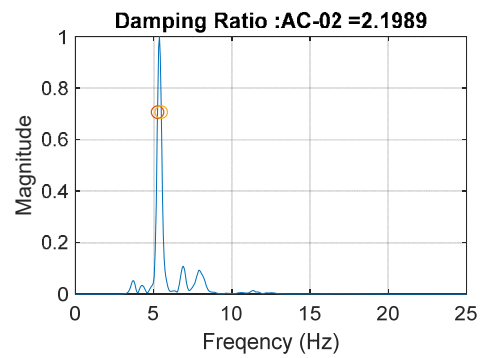
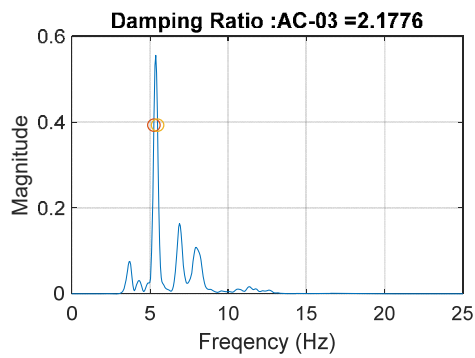
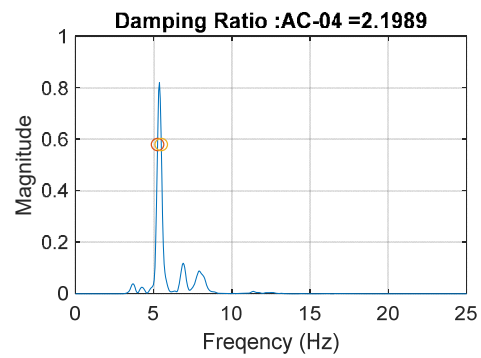
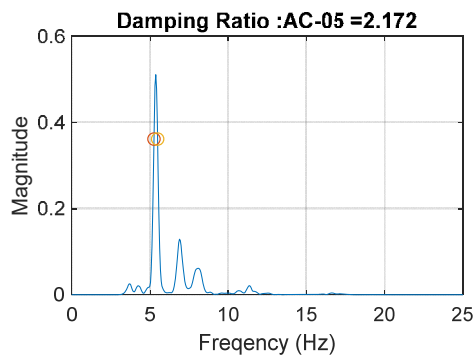
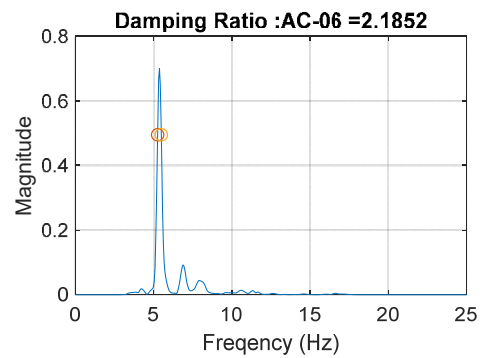
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 5)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 5)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 5)



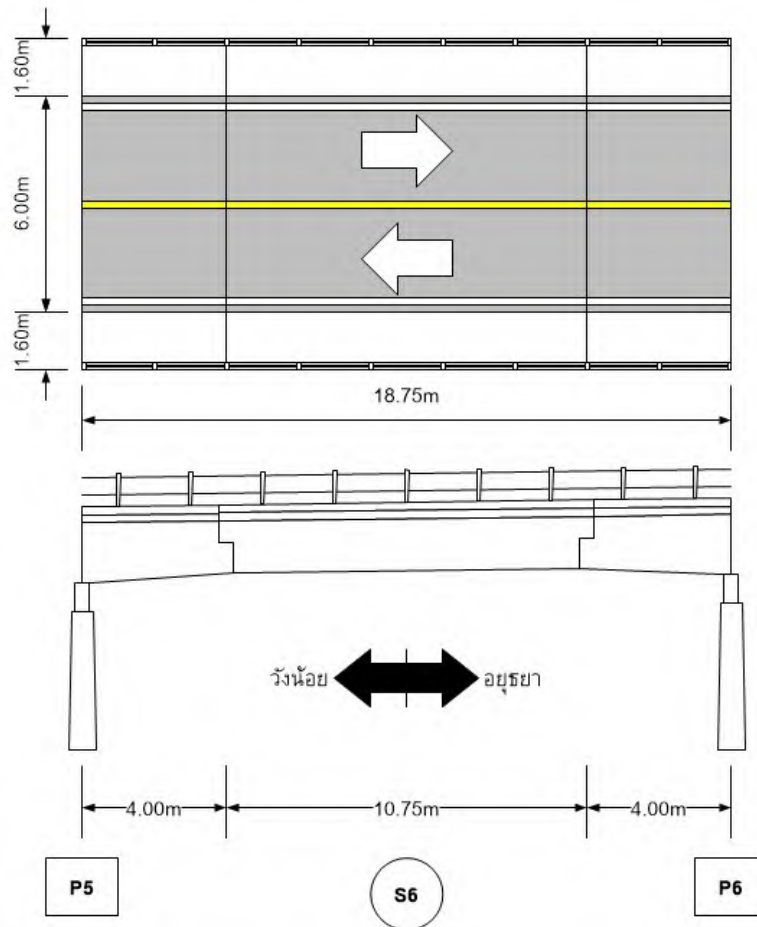
ตารางที่ 7-33 ผลการวิเคราะห์ Natural Frequency, Mode Shape และ Damping Ratio (Span 5)

Dynamic Case	Speed (km/h)	Frequency (Hz)	Mode Shape (1st Mode)	Damping Ratio (%)
Dynamic1	20	5.27	Bending	12.31 - 14.08
Dynamic2	30	5.47	Bending	2.49 - 2.51
Dynamic3	50	5.37	Bending	2.17 - 2.20

[7.9] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานช่วงที่ 6 (Span 6)

โครงการนี้ได้ดำเนินการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานช่วงที่ 6 (Span 6) ความยาวช่วงระหว่างรอยต่อสะพานเท่ากับ 10.75 เมตร ความยาวช่วงระหว่างตอม่อเท่ากับ 18.75 เมตร โดยทำการทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต และแบบพลวัต เมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2564 ซึ่งมีรายละเอียดการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน ดังนี้

[7.9.1] ช่วงสะพานทดสอบ

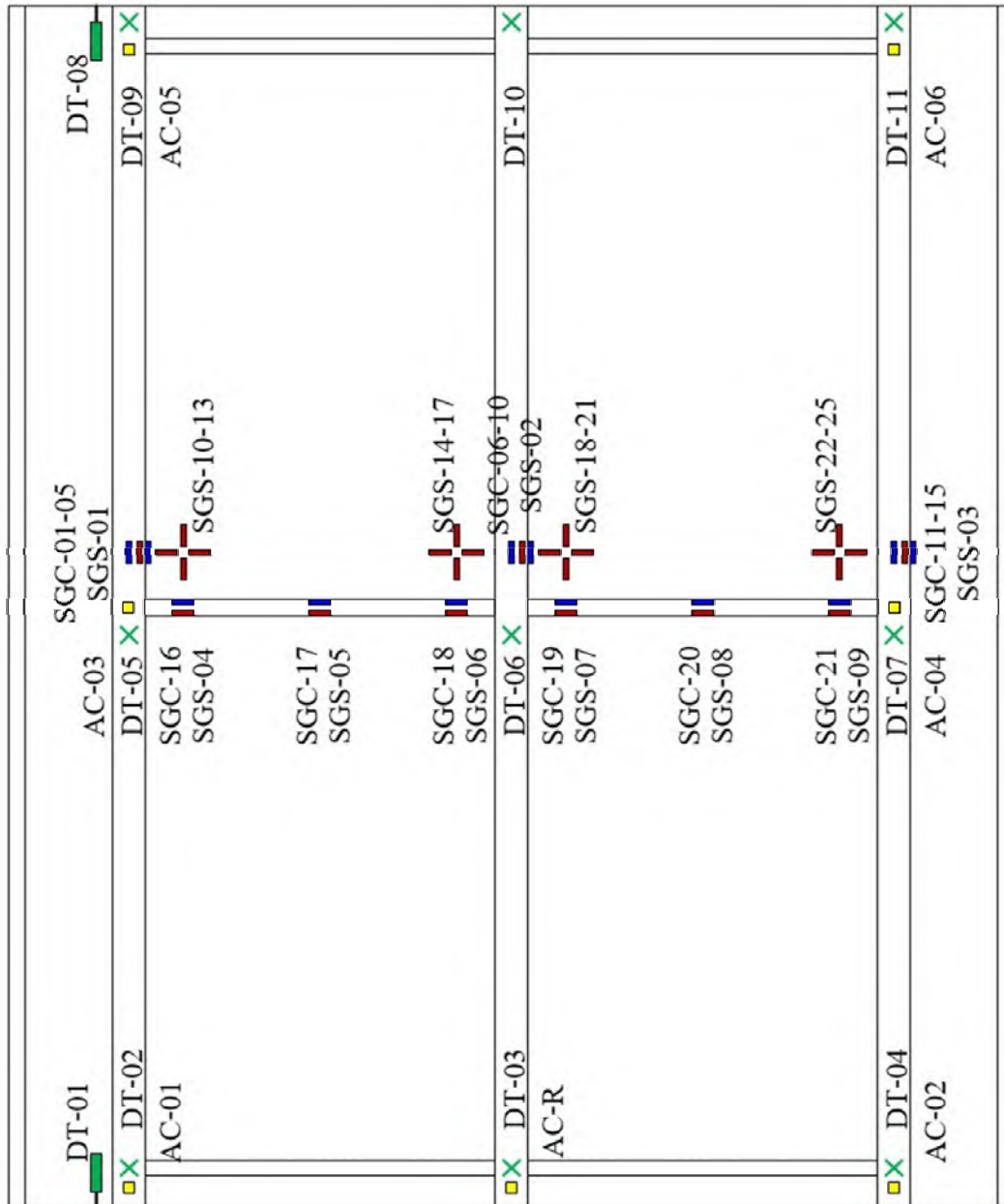


รูปที่ 7-51 ช่วงสะพานทดสอบ (Span 6)

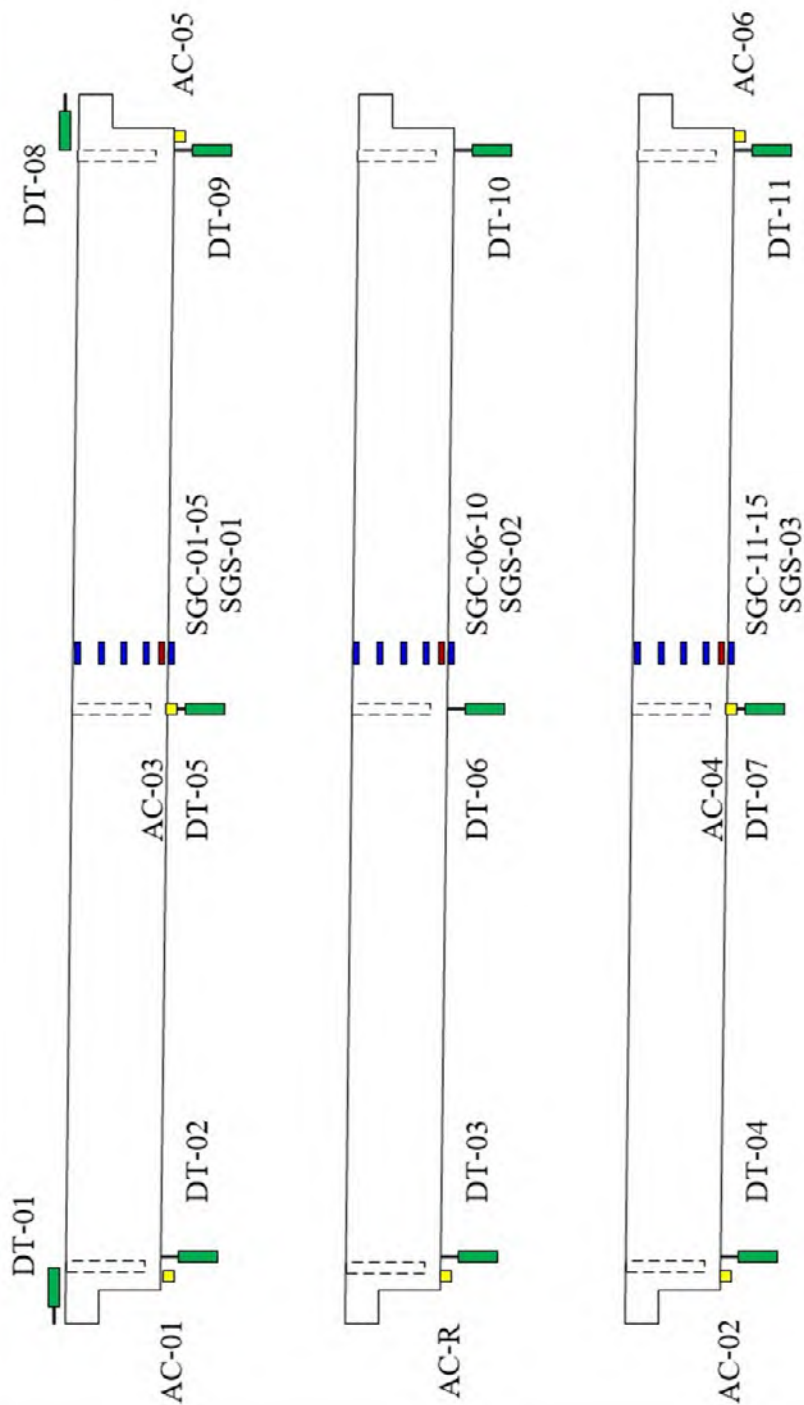
[7.9.2] ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

ในช่วงสะพานนี้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับคอนกรีต (Strain Gauge Concrete) จำนวน 21 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับเหล็ก (Strain Gauge Steel) จำนวน 25 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) จำนวน 11 ตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) จำนวน 7 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้



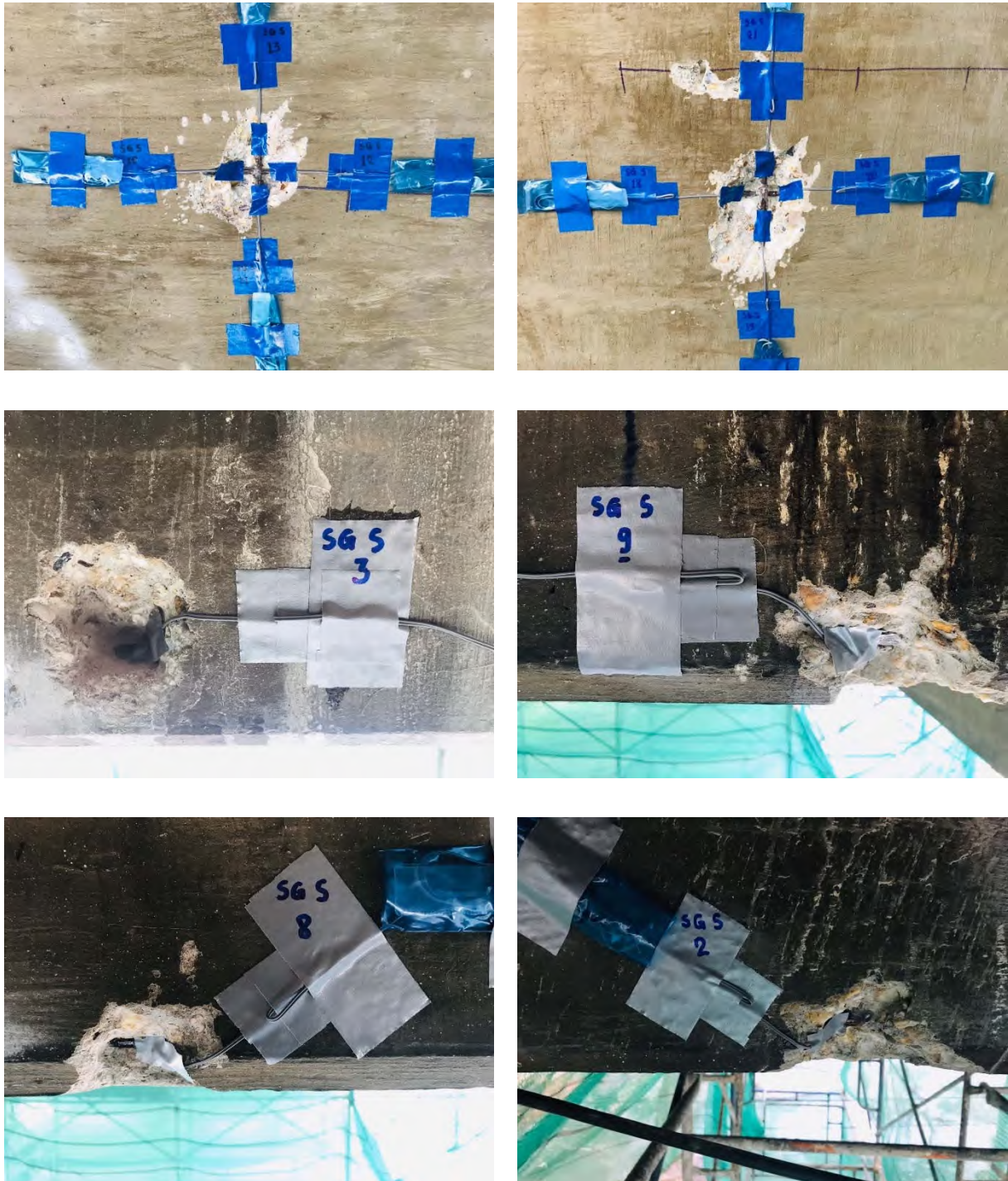


รูปที่ 7-52 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 6)



รูปที่ 7-52 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 6) (ต่อ)





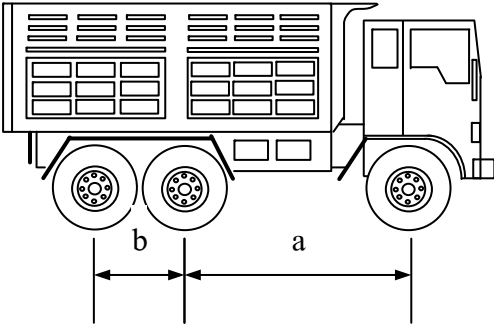
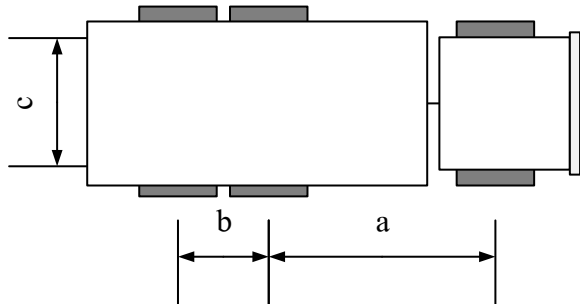
รูปที่ 7-53 ตัวอย่างภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน (Span 6)

[7.9.3] น้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ในช่วงสะพานนี้ได้ใช้รถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวมประมาณ 18 ตัน จำนวน 2 คัน ทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุม โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 7-34 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (Span 6)

คันที่	1	2
ประเภท	รถบรรทุก (80-7169)	รถบรรทุก (81-1459)
น้ำหนักรถบรรทุก (ตัน)	18.240	18.060
ระยะเพลที่ 1 ถึง 2 (a, เมตร)	4.00	4.10
ระยะเพลที่ 2 ถึง 3 (b, เมตร)	1.35	1.35
ความกว้างฐานล้อ (c, เมตร)	1.90	2.00

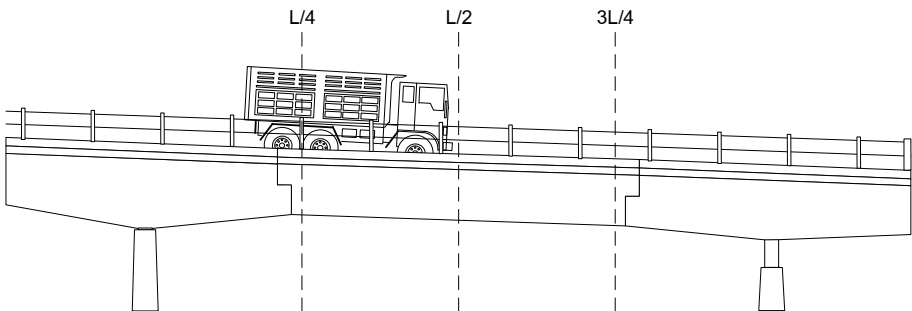
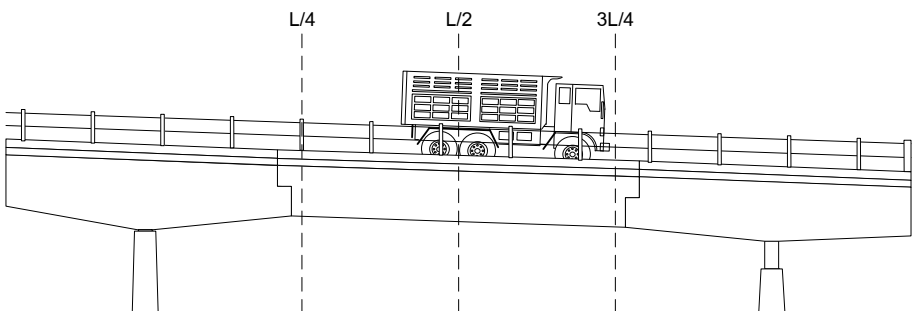
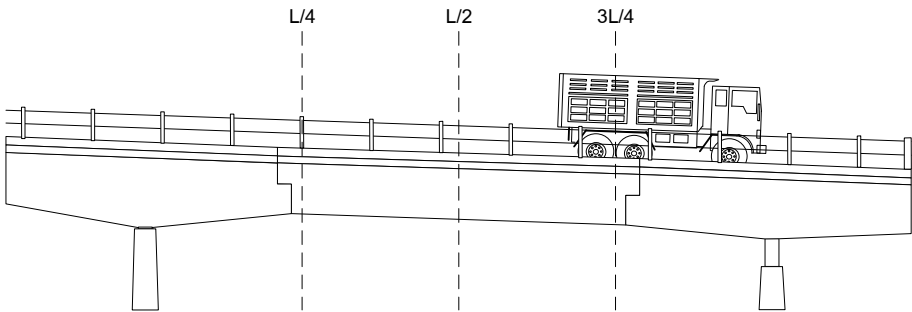
[7.9.4] รูปแบบการทดสอบแบบสถิต

การทดสอบแบบสถิต (Static Test) เป็นการนำรถบรรทุกทดสอบจอดตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนดหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

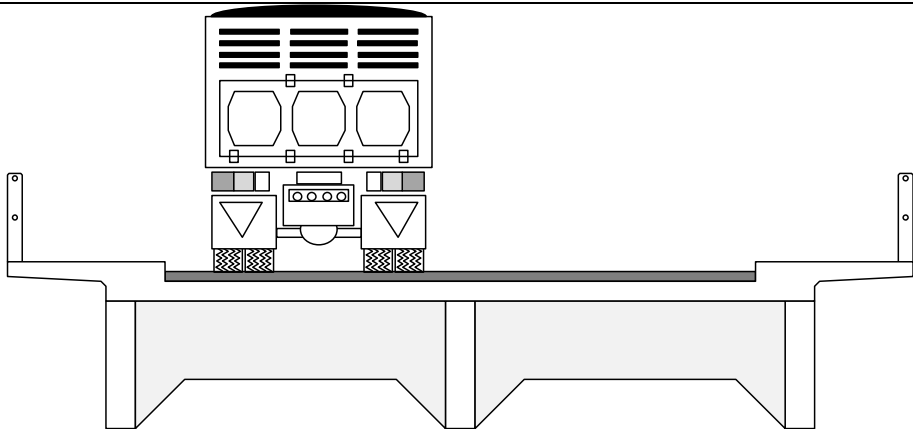
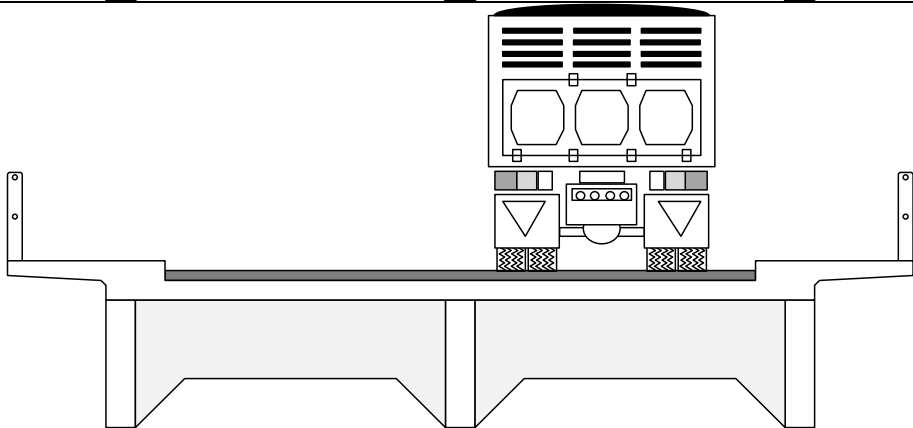
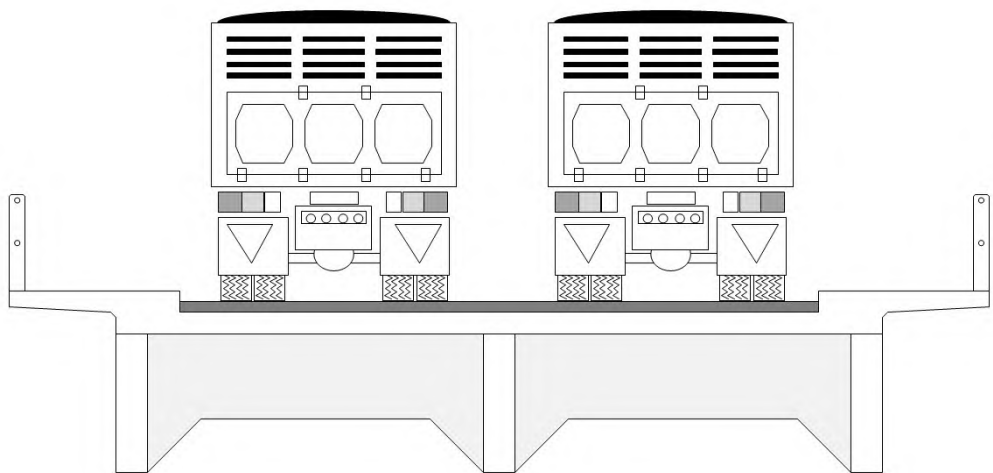
- Static 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ ในช่องจราจรทางซ้าย
- Static 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ ในช่องจราจรทางขวา
- Static 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/4$, $L/2$ และ $3L/4$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ ทั้งสองช่องจราจร



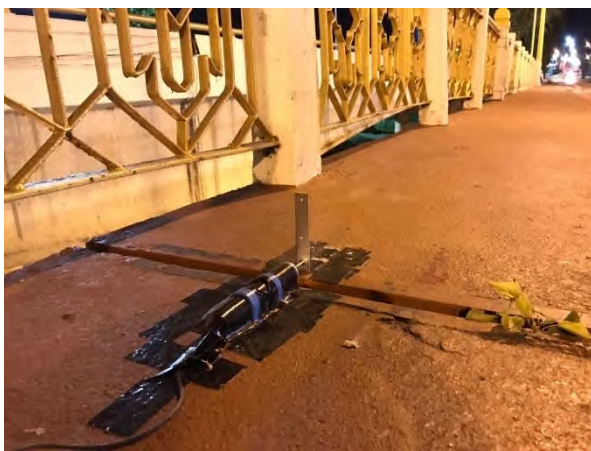
ตารางที่ 7-35 ระยะจอตกรบรรทุกตามตำแหน่ง L/4, L/2 และ 3L/4 (Span 6)

ระยะ	ตำแหน่งจอตกรบรรทุก
L/4	
L/2	
3L/4	

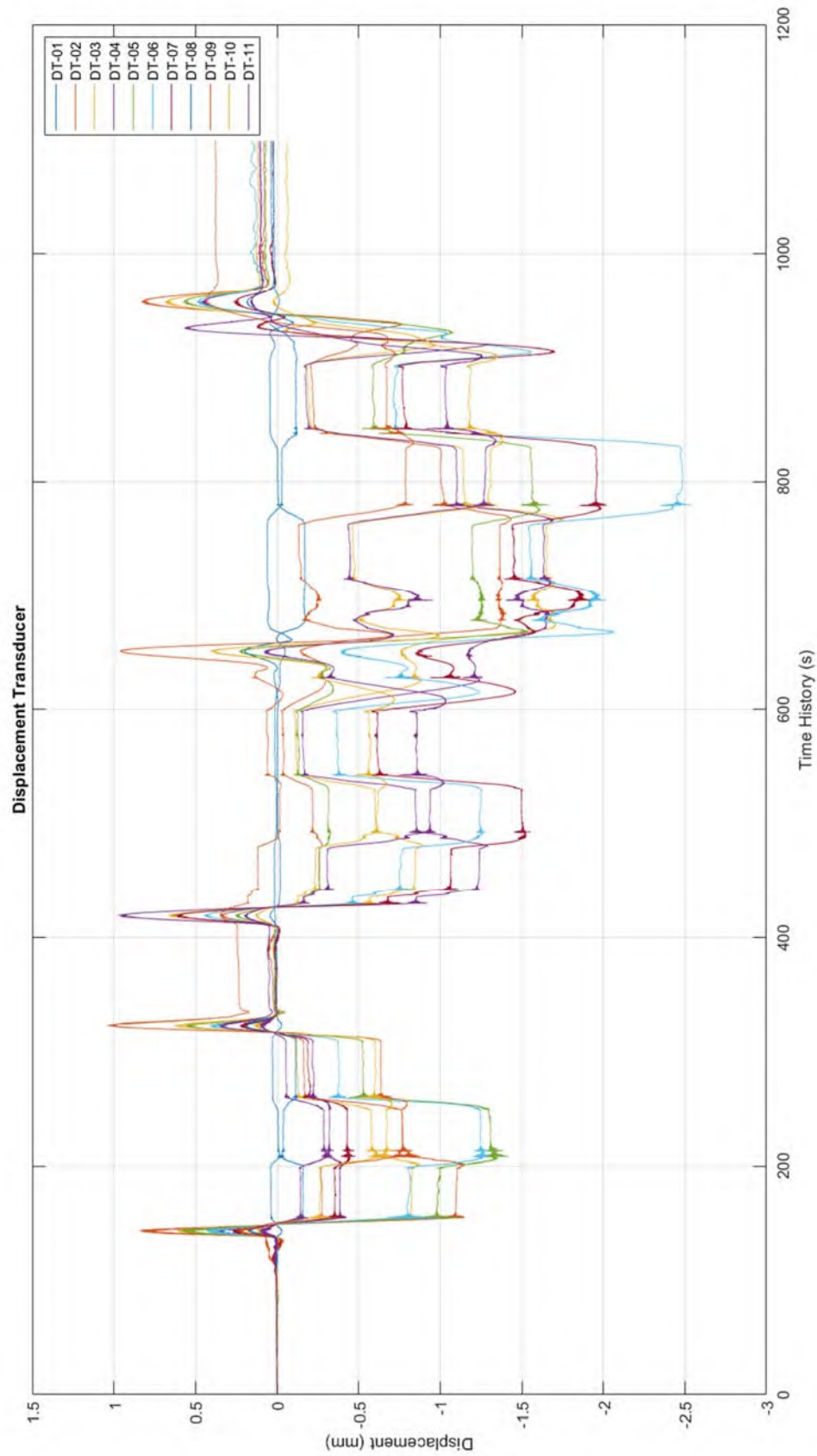
ตารางที่ 7-36 รูปแบบการทดสอบแบบสถิต ด้วยรถบรรทุกน้ำหนัก (Span 6)

Case	Pattern
Static 1	
Static 2	
Static 3	



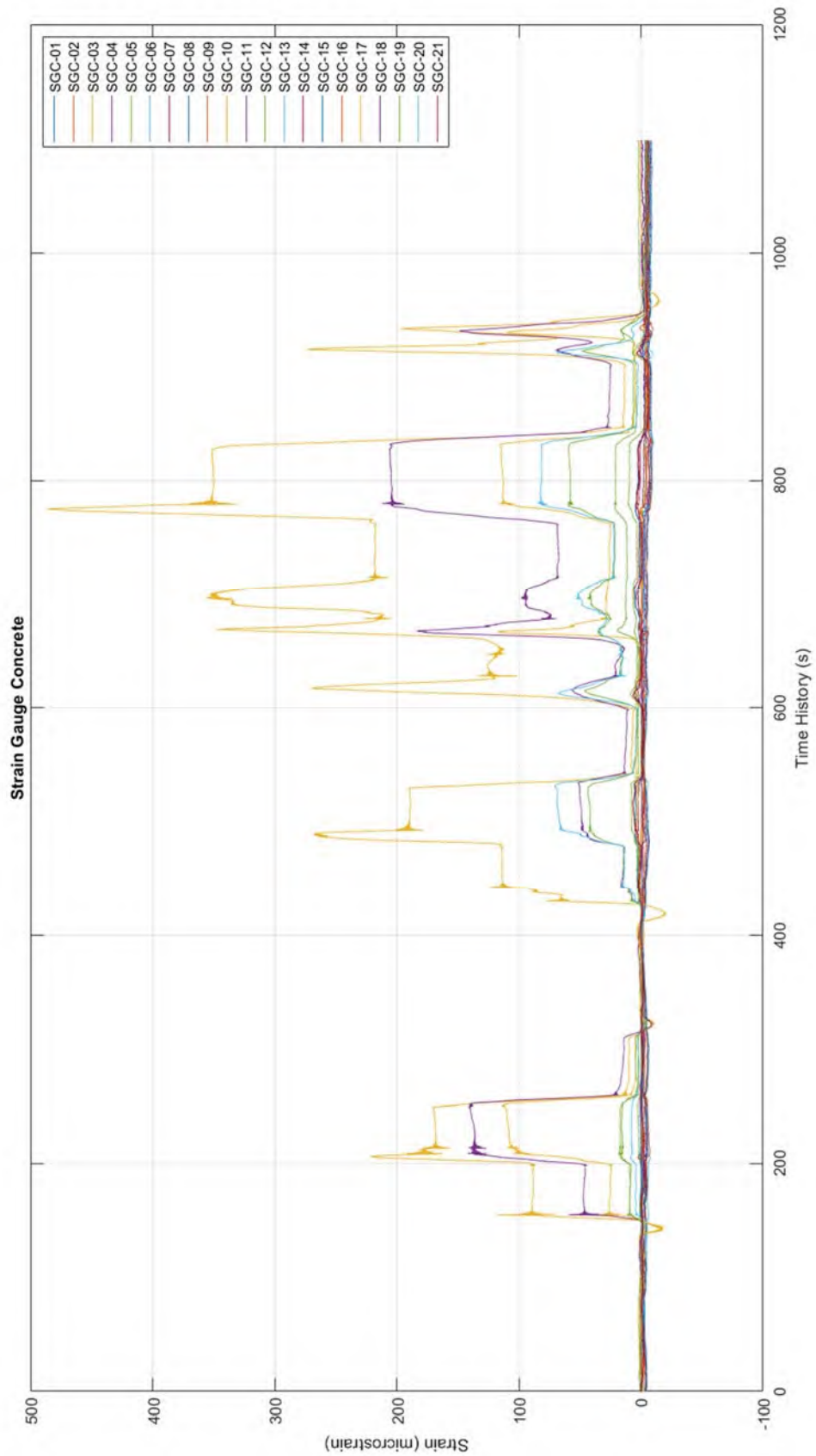


รูปที่ 7-54 ตัวอย่างภาพการทดสอบแบบสถิต (Span 6)

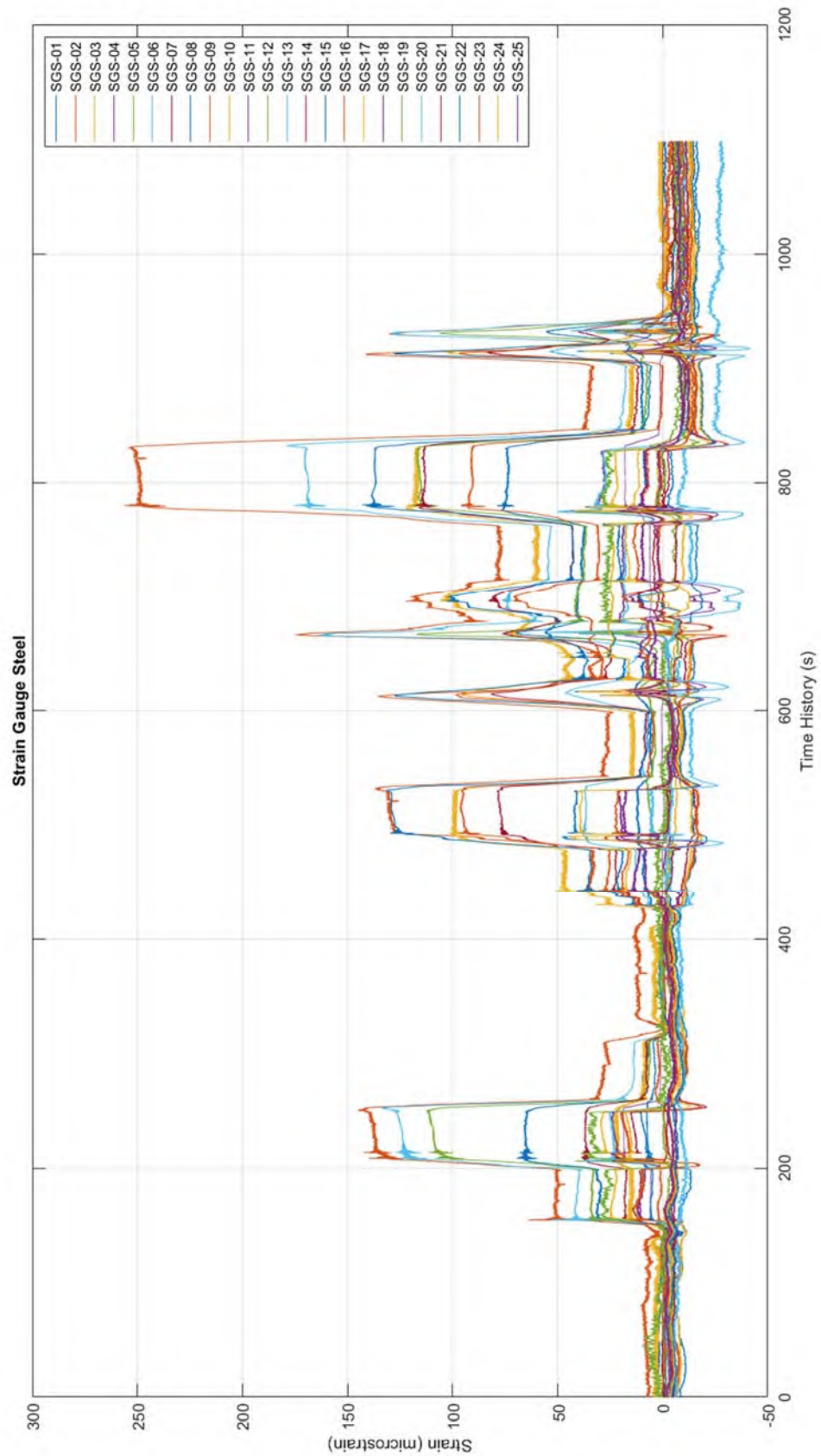


รูปที่ 7-55 สัญญาณการตรวจวัด Displacement Transducer (Span 6)





รูปที่ 7-56 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (Span 6)



รูปที่ 7-57 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Steel (Span 6)



[7.9.5] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิต

ตารางที่ 7-37 ผลการตรวจวัด Displacement Transducer (หน่วย : mm) (Span 6)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S6)	L/2(S6)	3L/4(S6)	L/4(S6)	L/2(S6)	3L/4(S6)	L/4(S6)	L/2(S6)	3L/4(S6)
DT-01	-0.160	-0.007	0.027	-0.018	-0.005	0.013	-0.171	-0.005	0.043
DT-02	-1.098	-0.770	-0.165	-0.261	-0.218	-0.039	-1.364	-1.005	-0.220
DT-03	-0.825	-0.579	-0.124	-0.845	-0.603	-0.114	-1.654	-1.144	-0.194
DT-04	-0.386	-0.286	-0.056	-1.240	-0.849	-0.158	-1.634	-1.103	-0.179
DT-05	-0.992	-1.308	-0.526	-0.257	-0.314	-0.132	-1.197	-1.562	-0.591
DT-06	-0.817	-1.246	-0.381	-0.755	-1.243	-0.370	-1.551	-2.484	-0.713
DT-07	-0.355	-0.430	-0.195	-1.065	-1.497	-0.613	-1.450	-1.960	-0.772
DT-08	0.038	-0.038	-0.113	0.017	0.003	-0.003	0.060	-0.029	-0.116
DT-09	-0.273	-0.767	-0.637	0.119	-0.016	0.055	-0.135	-0.788	-0.673
DT-10	-0.272	-0.671	-0.604	-0.236	-0.613	-0.572	-0.464	-1.311	-1.173
DT-11	-0.143	-0.320	-0.228	-0.308	-0.935	-0.853	-0.447	-1.275	-1.032

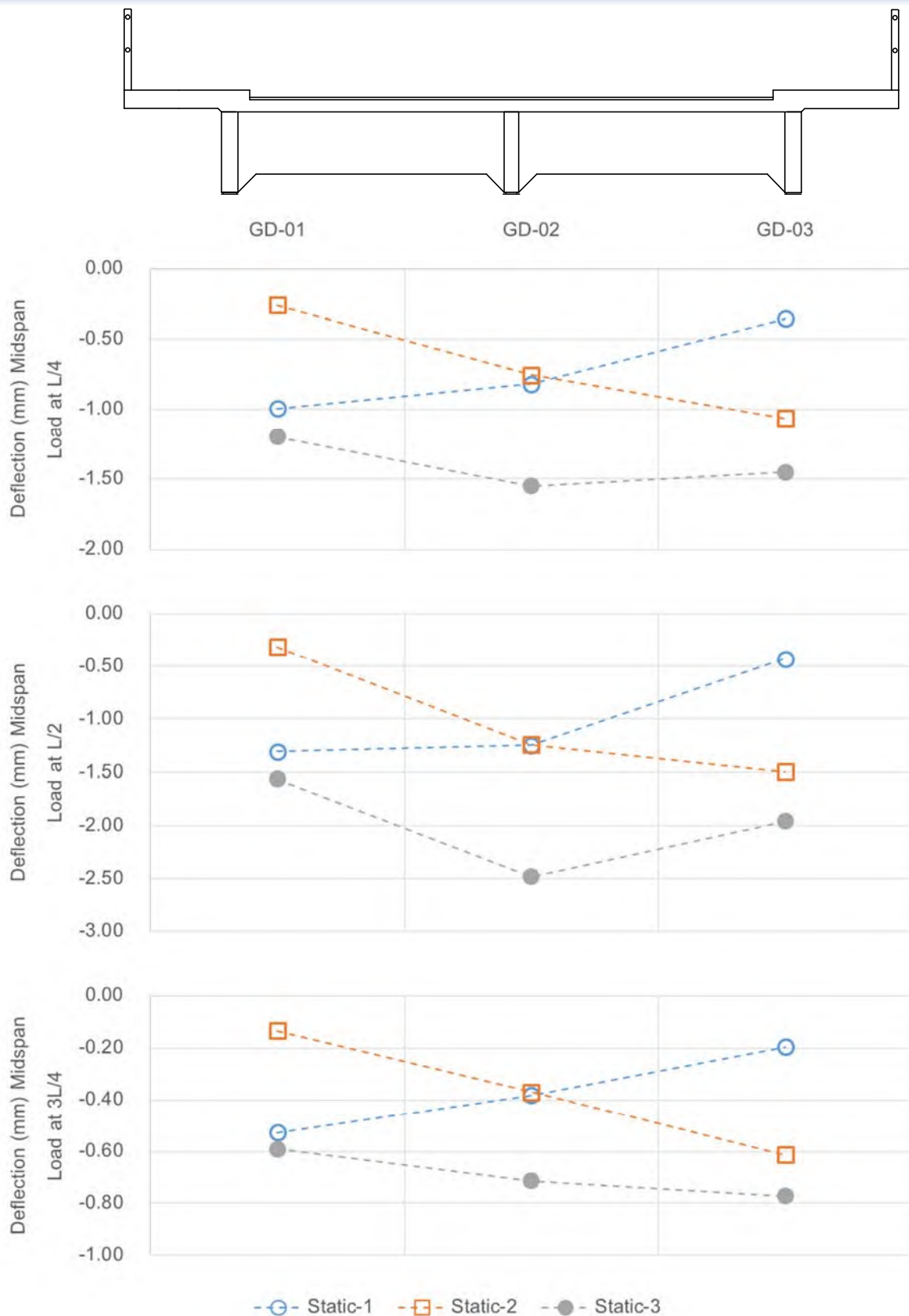
ตารางที่ 7-38 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (หน่วย : microstarin) (Span 6)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S6)	L/2(S6)	3L/4(S6)	L/4(S6)	L/2(S6)	3L/4(S6)	L/4(S6)	L/2(S6)	3L/4(S6)
SGC-01	-3.650	-5.213	-2.929	-0.402	-1.600	-2.404	-1.550	-8.298	-6.427
SGC-02	-1.913	-1.123	-0.471	1.333	-0.492	-0.908	0.142	-4.454	-4.560
SGC-03	-2.523	-0.925	-1.067	-0.844	-0.879	-1.829	-0.192	-3.665	-4.671
SGC-04	-4.785	-4.763	-1.510	-0.752	-1.975	-1.450	-2.023	-6.398	-2.892
SGC-05	36.576	67.240	9.568	13.540	17.516	10.484	46.760	83.440	18.276
SGC-06	-5.615	-5.071	-5.056	-4.246	-3.652	-1.854	-3.704	-4.131	-3.183
SGC-07	-3.754	-3.933	-5.177	-4.290	-4.573	-2.690	-4.973	-7.127	-7.044
SGC-08	-3.679	-5.419	-5.696	-5.206	-5.394	-3.217	-5.206	-8.915	-8.463
SGC-09	-0.423	-2.873	-5.027	-2.794	-3.217	-2.671	-1.410	-4.431	-6.283
SGC-10	44.150	84.165	5.080	56.865	94.575	3.497	108.775	175.045	6.605
SGC-11	-1.352	0.052	-1.100	-1.413	-1.304	-1.319	-2.956	-2.119	-5.573
SGC-12	0.058	1.990	-0.829	2.852	7.785	-0.173	3.600	9.621	-3.725
SGC-13	-0.904	-2.181	-1.856	-1.077	-4.927	-1.290	-2.142	-9.019	-5.946
SGC-14	-0.556	-1.665	-1.588	1.073	2.340	-1.008	1.698	0.738	-3.715
SGC-15	9.185	64.550	35.113	10.065	16.815	12.998	17.545	80.102	44.890
SGC-16	-5.071	-6.073	-2.898	-2.365	-2.988	-2.740	-4.535	-8.890	-5.988
SGC-17	25.410	108.400	4.123	0.321	2.531	2.315	26.340	112.560	4.669
SGC-18	46.840	136.570	15.480	13.990	48.700	12.130	67.770	204.460	26.120
SGC-19	8.806	15.730	4.275	14.020	41.530	4.096	21.620	57.860	6.156
SGC-20	4.079	7.827	1.196	13.510	67.730	3.194	22.190	81.490	2.798
SGC-21	-3.106	-1.615	-0.954	0.140	6.271	-1.690	-1.000	1.646	-5.773



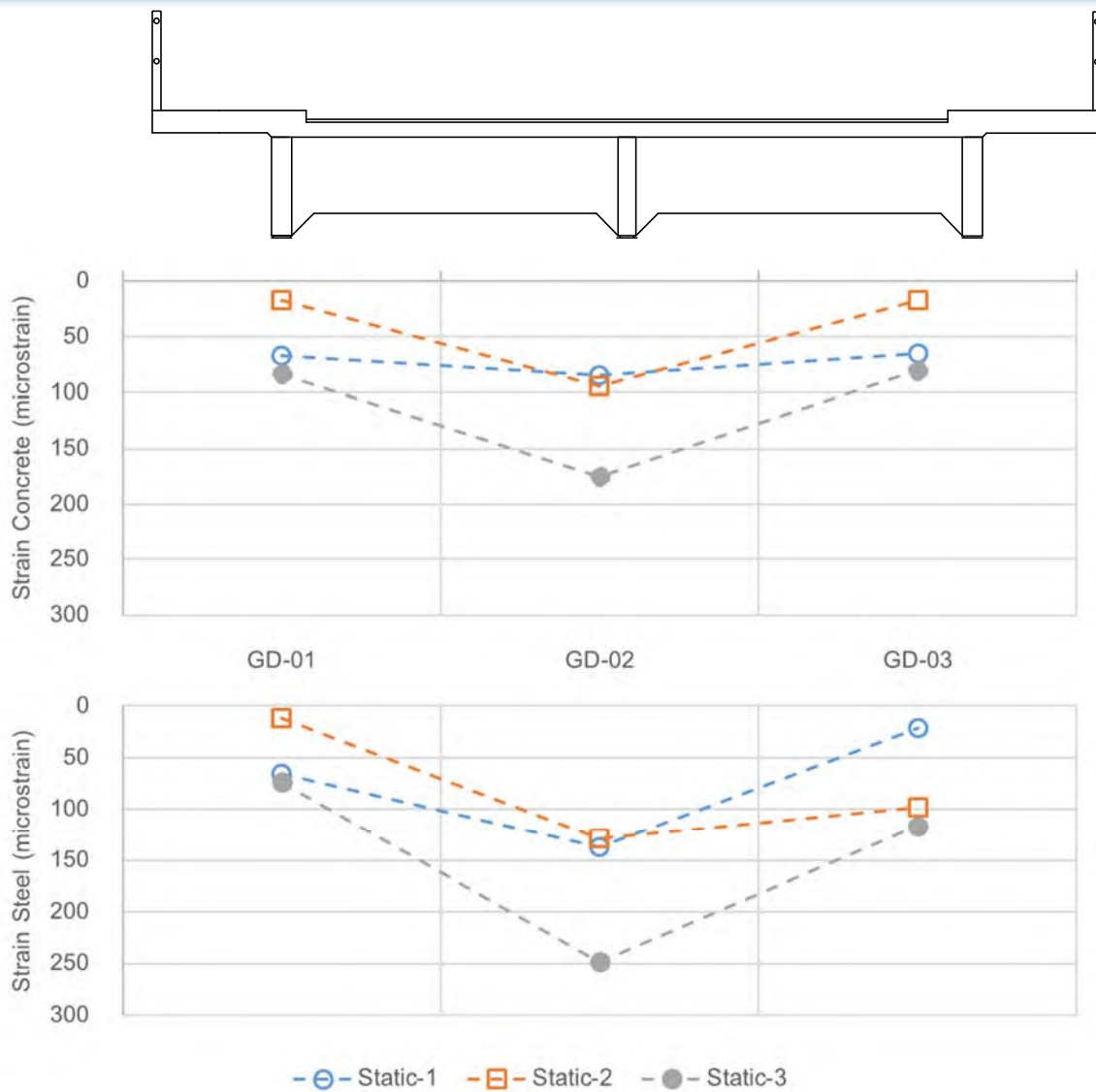
ตารางที่ 7-39 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel (หน่วย : microstarin) (Span 6)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/4(S6)	L/2(S6)	3L/4(S6)	L/4(S6)	L/2(S6)	3L/4(S6)	L/4(S6)	L/2(S6)	3L/4(S6)
SGS-01	29.630	65.100	9.421	9.152	11.470	6.615	38.160	73.350	10.200
SGS-02	50.23	136.6	28.14	32.89	128.91	27.8	76.71	248.31	35.72
SGS-03	13.870	21.350	7.702	45.830	98.270	15.460	59.400	116.490	14.960
SGS-04	5.652	18.410	1.046	0.127	-0.681	0.371	6.123	17.920	1.235
SGS-05	33.410	108.860	6.798	2.229	5.277	4.088	37.720	114.760	8.077
SGS-06	40.030	123.530	13.680	13.070	36.660	8.104	54.540	168.560	19.120
SGS-07	17.510	36.700	8.146	21.990	77.230	8.740	42.790	112.850	12.490
SGS-08	4.798	7.231	3.810	34.100	128.400	7.371	42.800	136.150	6.848
SGS-09	0.627	-1.613	1.798	25.280	95.340	4.998	30.090	90.150	0.783
SGS-10	22.840	28.510	-8.019	-2.769	-6.175	-8.206	23.080	21.450	-15.340
SGS-11	9.529	23.160	-6.350	-0.998	-2.804	-6.054	19.040	27.190	-10.040
SGS-12	26.520	33.160	-1.333	2.260	-1.998	-4.027	25.880	26.140	-8.573
SGS-13	10.440	23.340	-5.940	-1.677	-3.729	-7.767	17.950	26.740	-10.130
SGS-14	11.220	12.850	-9.435	-10.570	-15.530	-6.985	4.648	-1.375	-12.140
SGS-15	-12.710	8.552	-9.652	-12.970	-13.470	-9.971	-15.660	-5.198	-15.380
SGS-16	10.340	16.590	-10.910	-12.050	-16.400	-9.181	2.260	-0.025	-15.510
SGS-17	-6.421	15.700	-9.858	-12.310	-13.210	-8.698	-9.638	1.540	-12.500
SGS-18	-5.667	-5.696	-5.731	7.948	20.380	-5.446	2.031	1.308	-11.890
SGS-19	-2.815	-0.115	-3.915	-3.627	-2.085	-3.373	-4.460	-0.402	-7.477
SGS-20	-9.596	-9.079	-10.380	-4.969	4.948	-13.580	-13.980	-9.854	-25.320
SGS-21	-4.727	-2.058	-6.015	-4.067	-2.896	-4.908	-6.475	-2.550	-10.450
SGS-22	-7.183	-6.977	-9.717	20.640	41.900	-10.220	21.260	8.250	-19.190
SGS-23	-4.781	-4.679	-7.129	19.220	22.050	-4.983	12.740	6.521	-14.760
SGS-24	-6.000	-5.244	-8.185	17.640	39.220	-8.902	16.750	11.220	-18.250
SGS-25	-5.021	-4.306	-4.850	12.700	18.770	-3.954	9.621	7.958	-9.681



รูปที่ 7-58 ค่าการแอ่นตัวของสะพานเมื่อรถบรรทุกจอดที่ตำแหน่ง L/4, L/2 และ 3L/4 (Span 6)





รูปที่ 7-59 ค่าความเครียดที่กึ่งกลางสะพาน (Span 6)

[7.9.6] รูปแบบการทดสอบแบบพลวัต

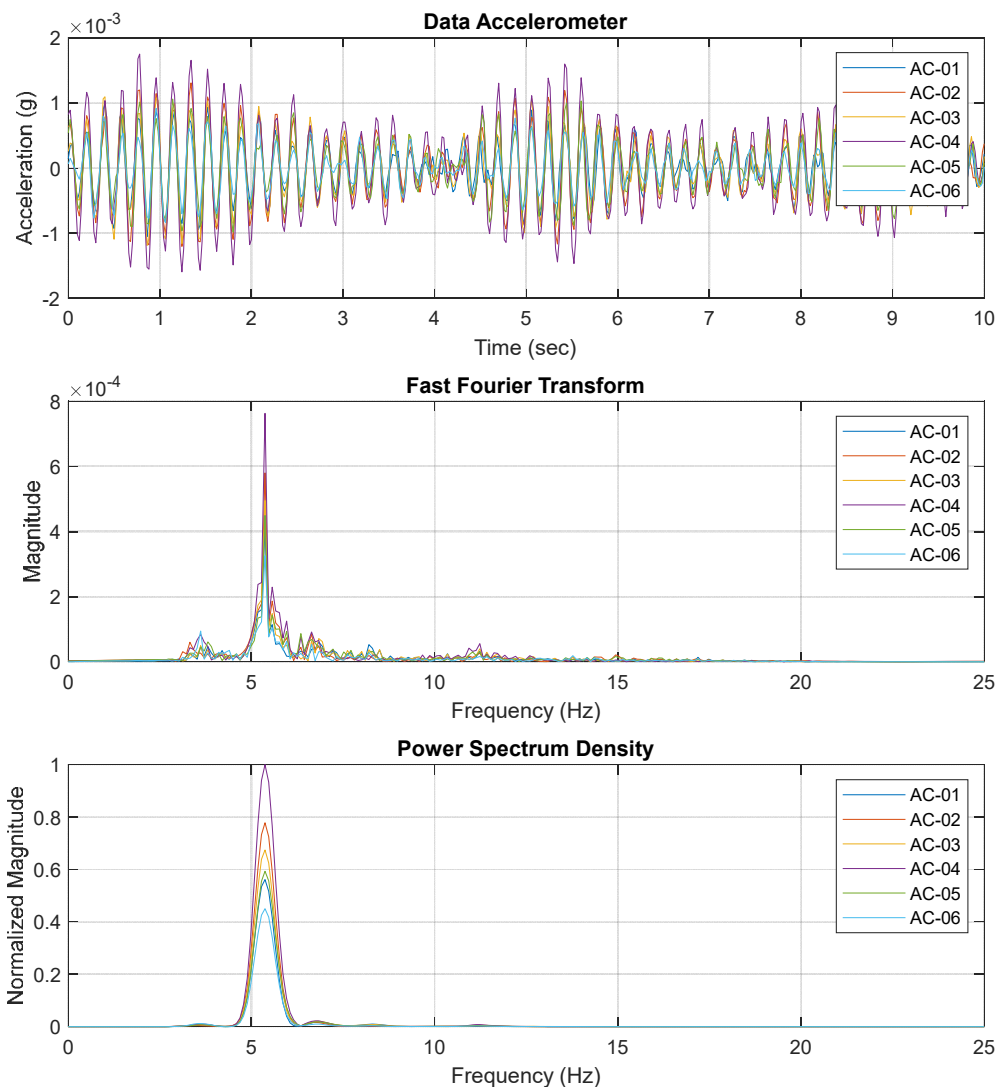
การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) เป็นการทดสอบโดยใช้รถบรรทุกวิ่งผ่านช่วงสะพานทดสอบหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

- Dynamic 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 20 กม./ชม. ที่กลางสะพาน
- Dynamic 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 30 กม./ชม. ที่กลางสะพาน
- Dynamic 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม. ที่กลางสะพาน



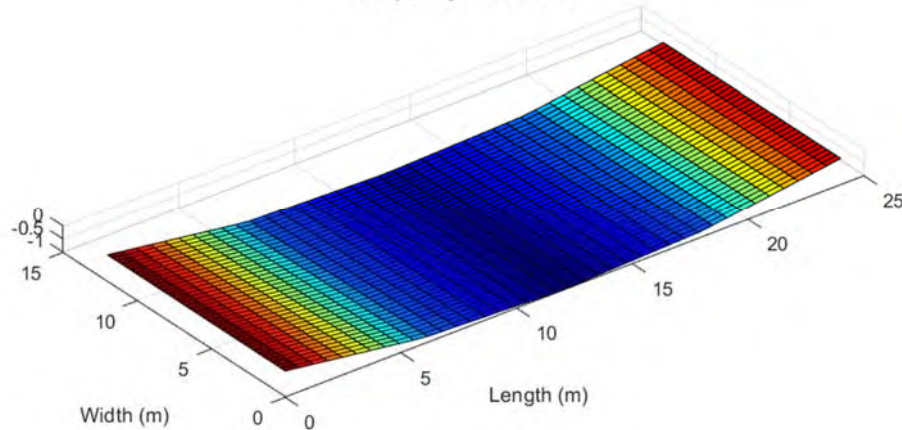
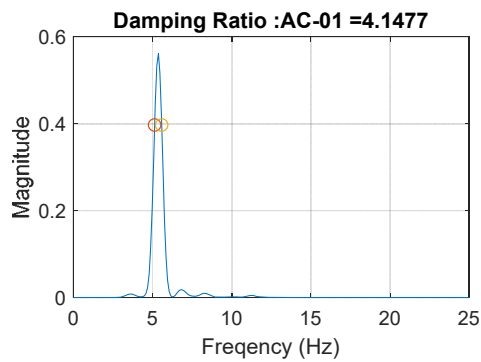
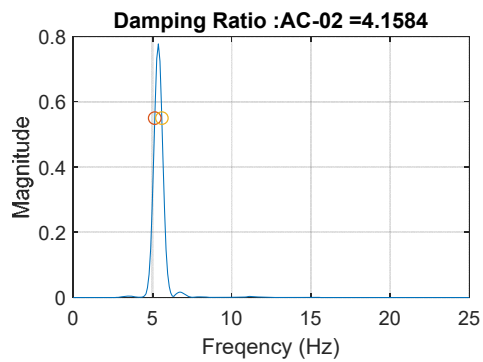
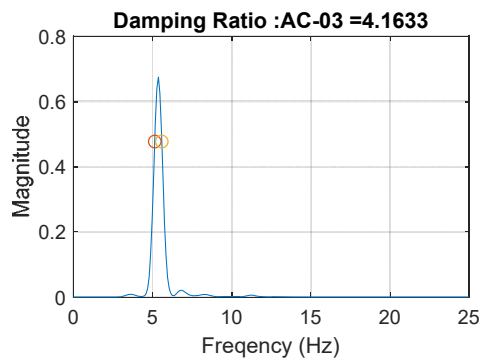
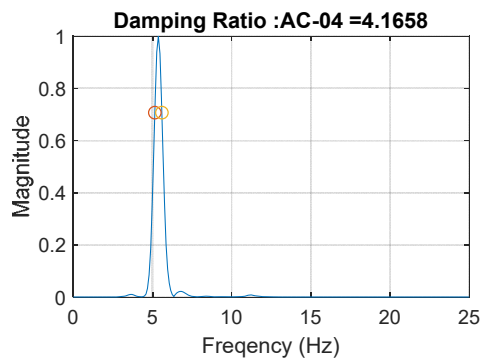
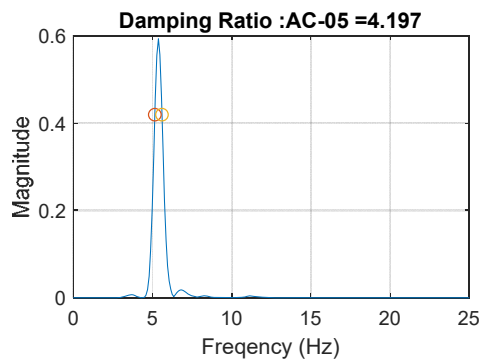
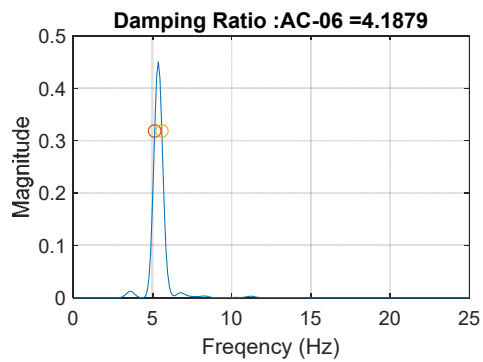
[7.9.7] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต

Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 6)

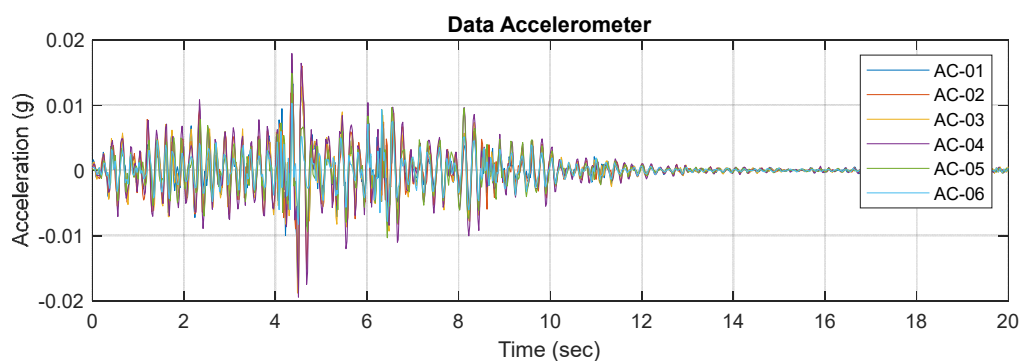
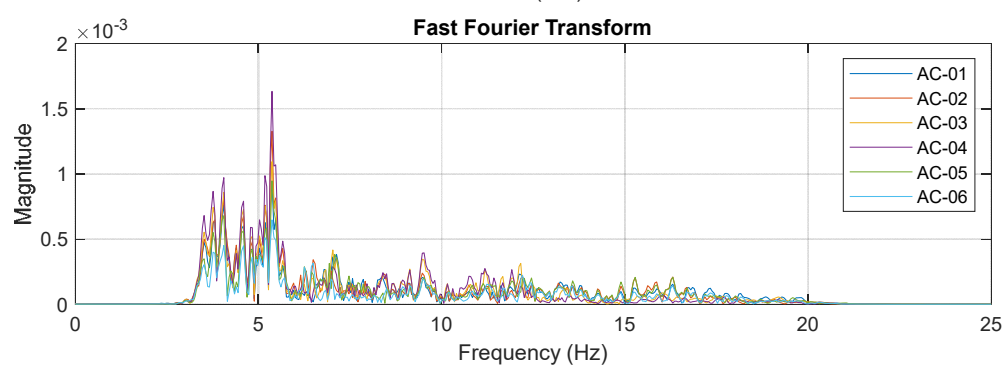
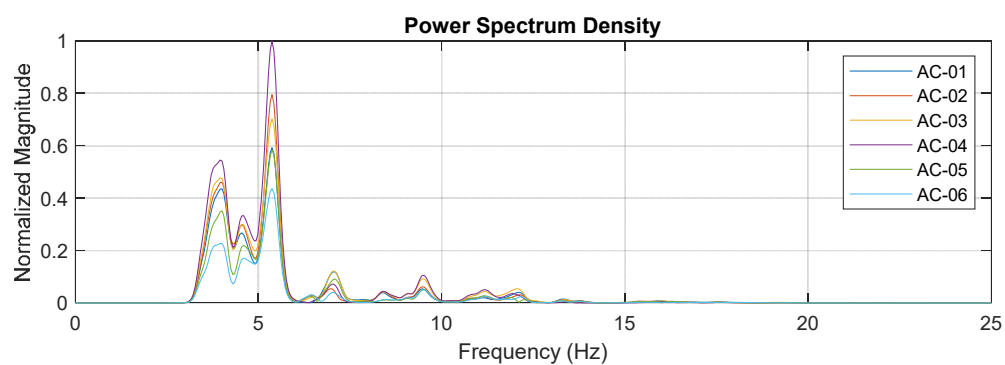
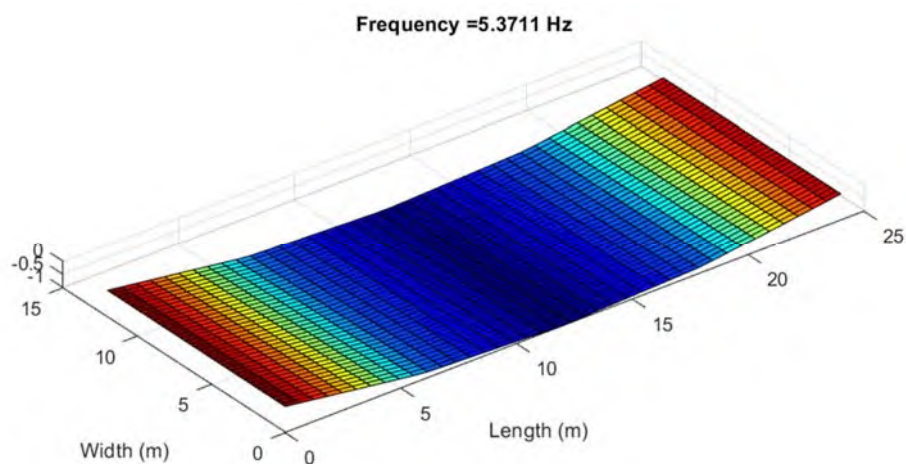


Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 6)

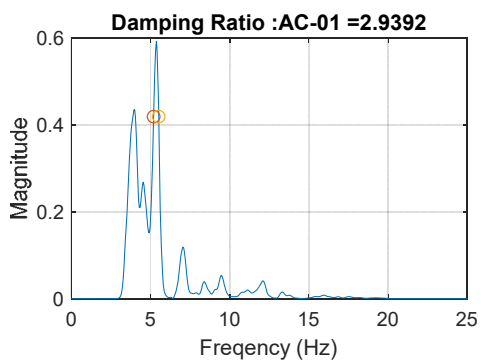
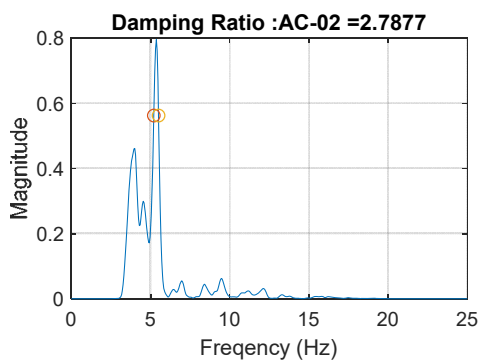
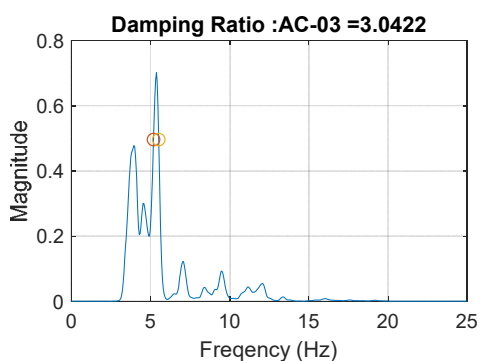
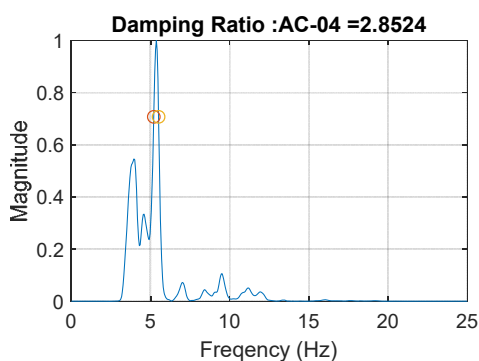
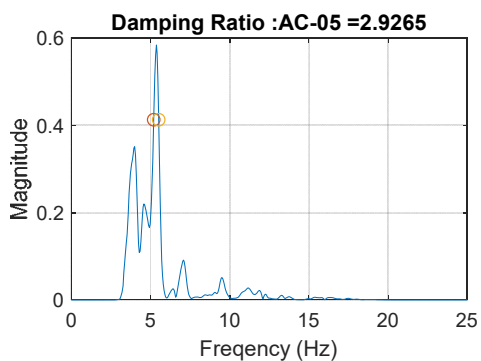
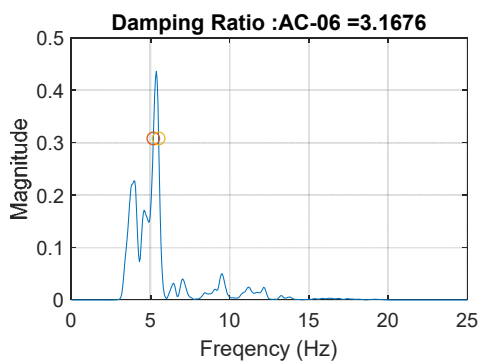
Frequency = 5.3711 Hz



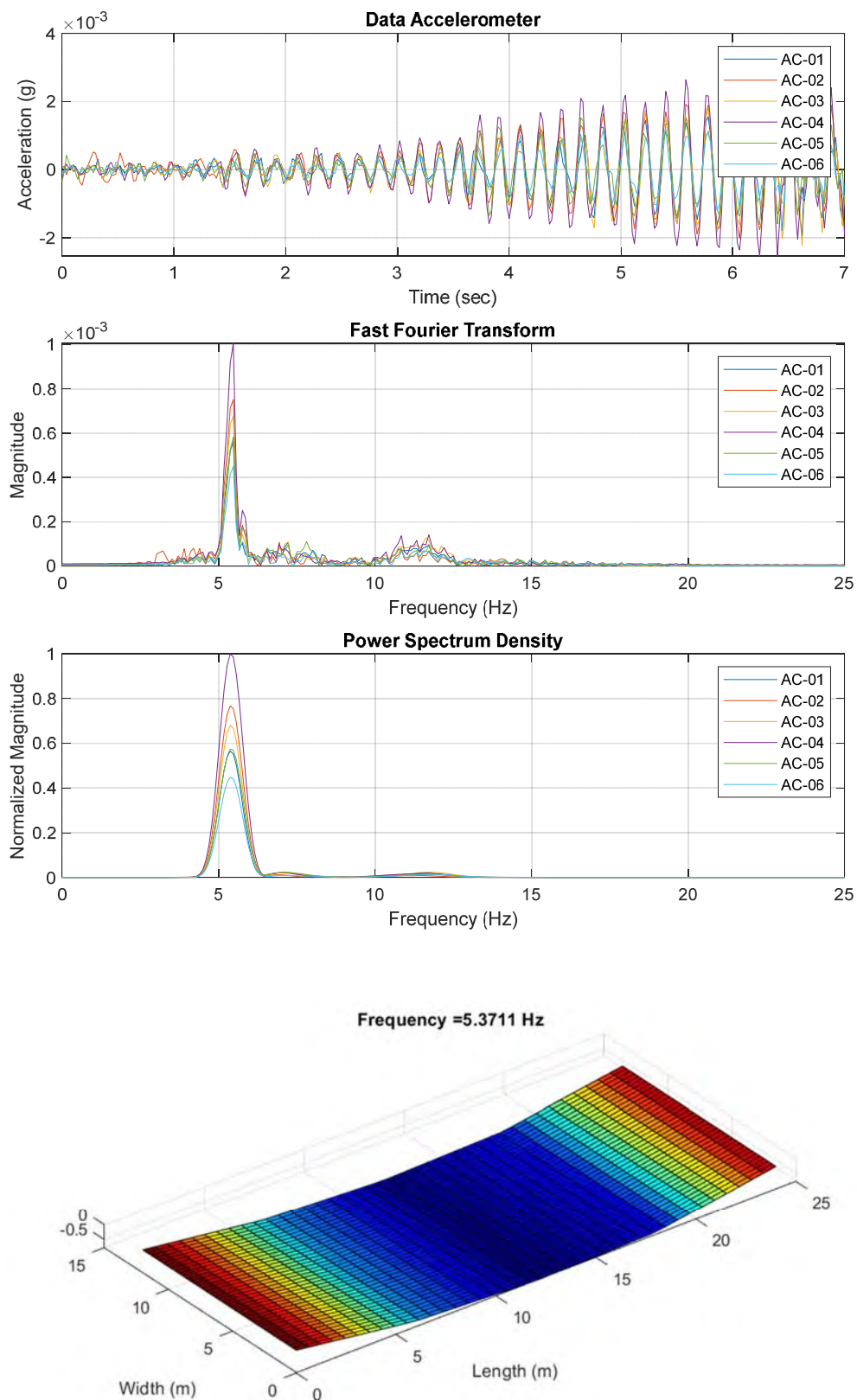
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 6)



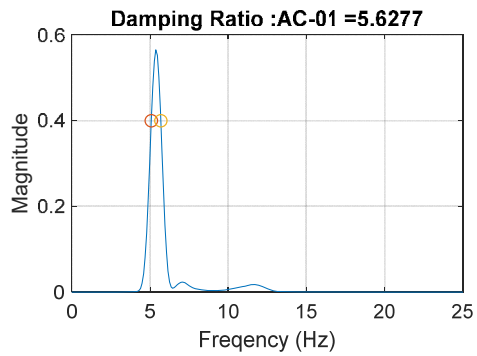
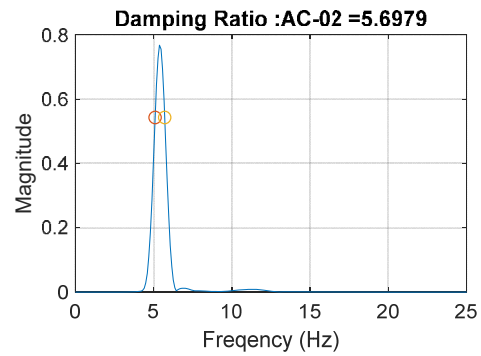
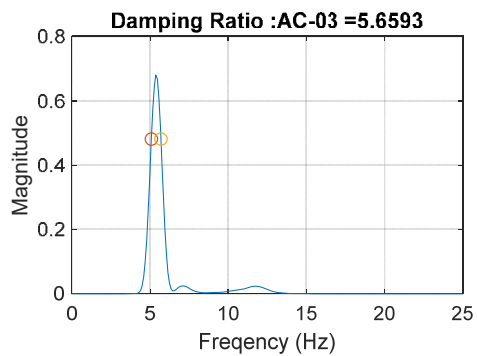
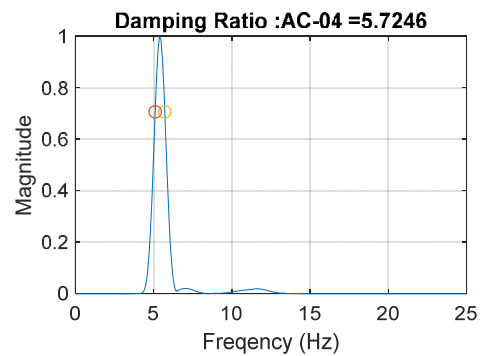
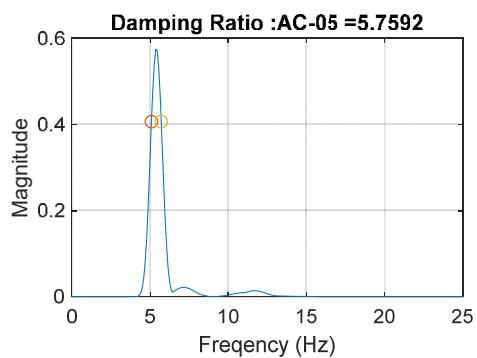
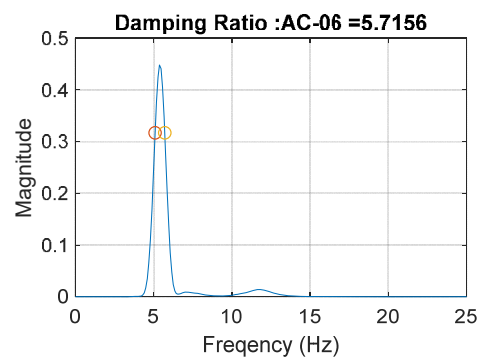
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 6)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 6)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 6)



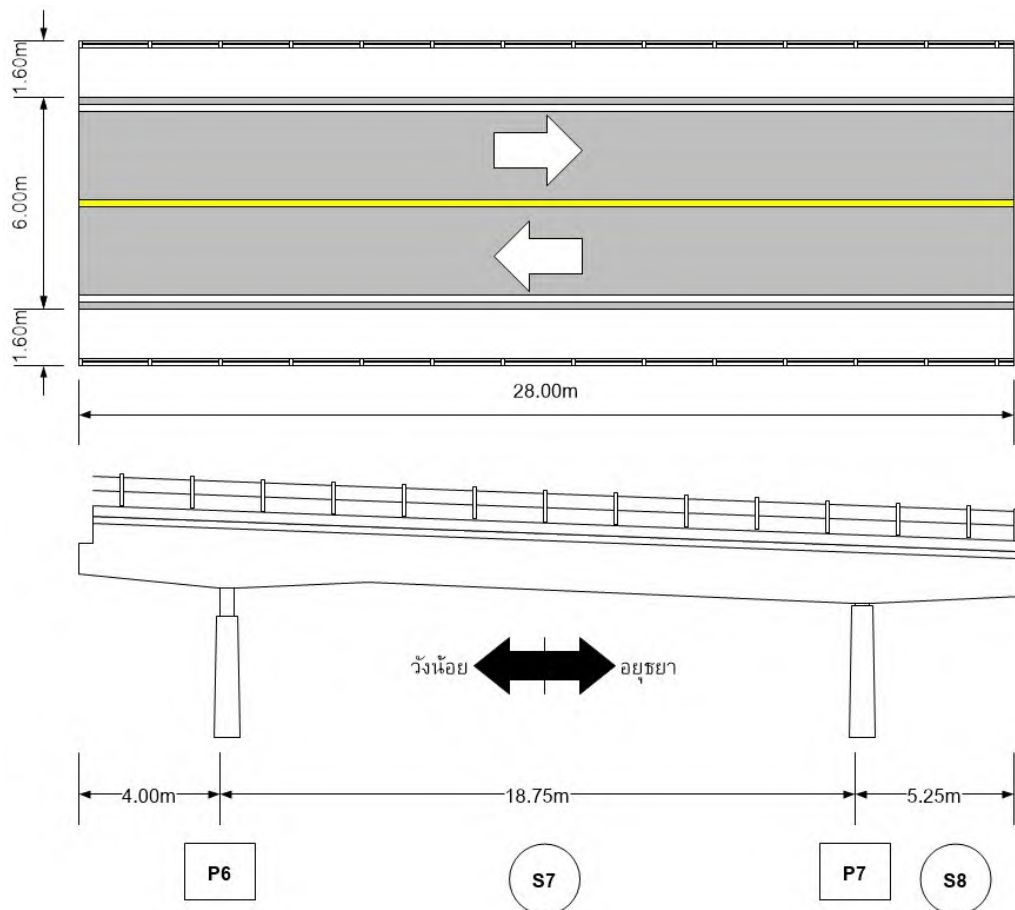
ตารางที่ 7-40 ผลการวิเคราะห์ Natural Frequency, Mode Shape และ Damping Ratio (Span 6)

Dynamic Case	Speed (km/h)	Frequency (Hz)	Mode Shape (1st Mode)	Damping Ratio (%)
Dynamic1	20	5.37	Bending	4.15 - 4.20
Dynamic2	30	5.37	Bending	2.79 - 3.17
Dynamic3	50	5.37	Bending	5.63 - 5.76

[7.10] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานช่วงที่ 7 และ 8 (Span 7 และ Span 8)

โครงการนี้ได้ดำเนินการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพานช่วงที่ 7 และ 8 (Span 7 และ Span 8) ความยาวช่วงระหว่างรอยต่อสะพานเท่ากับ 28.00 เมตร ความยาวช่วงระหว่างตอม่อเท่ากับ 18.75 เมตร โดยทำการทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุมแบบสถิต และแบบพลวัต เมื่อวันที่ 21 พฤษภาคม 2564 ซึ่งมีรายละเอียดการตรวจวัดพฤติกรรมโครงสร้างสะพาน ดังนี้

[7.10.1] ช่วงสะพานทดสอบ

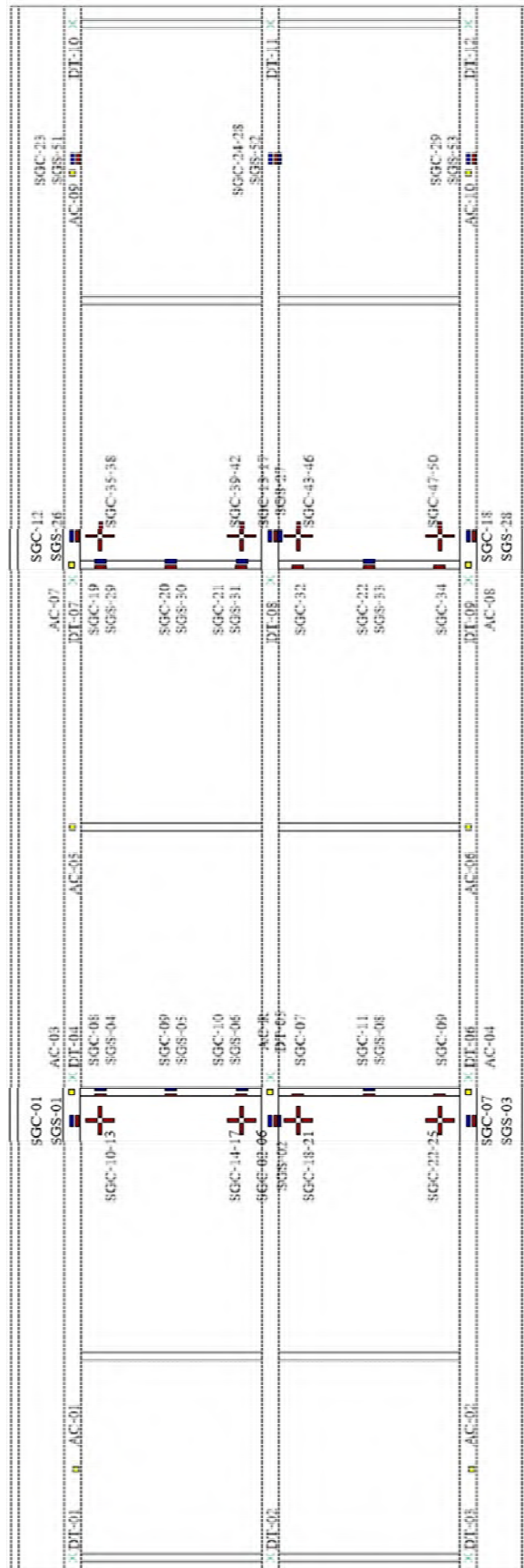


รูปที่ 7-60 ช่วงสะพานทดสอบ (Span 7&8)

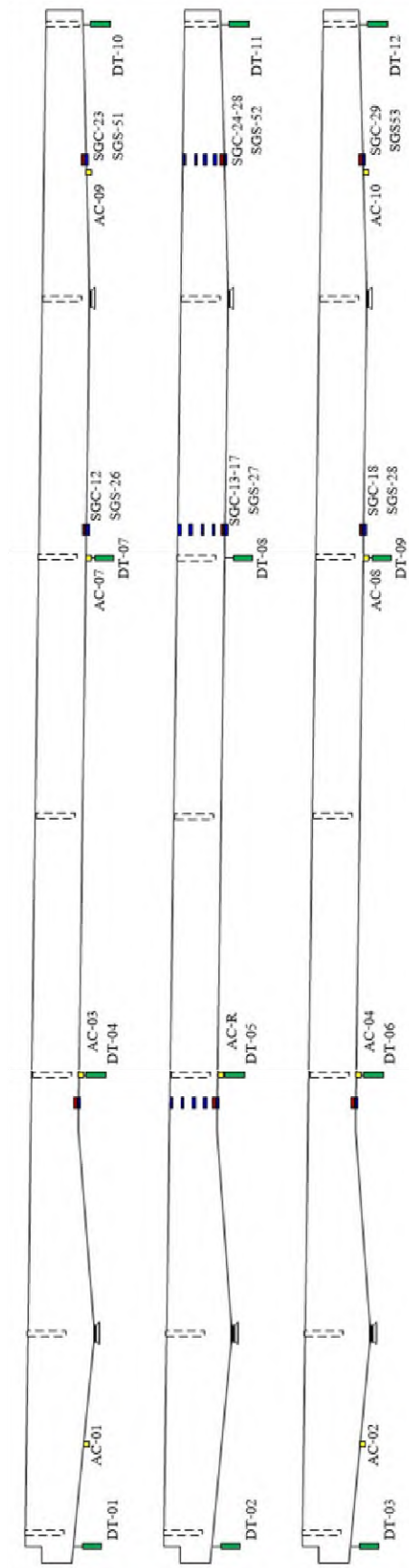
[7.10.2] ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

ในช่วงสะพานนี้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับคอนกรีต (Strain Gauge Concrete) จำนวน 29 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดสำหรับเหล็ก (Strain Gauge Steel) จำนวน 53 ตำแหน่ง อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Transducer) จำนวน 12 ตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) จำนวน 11 ตำแหน่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้





รูปที่ 7-61 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 7&8)



รูปที่ 7-61 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Span 7&8) (ต่อ)





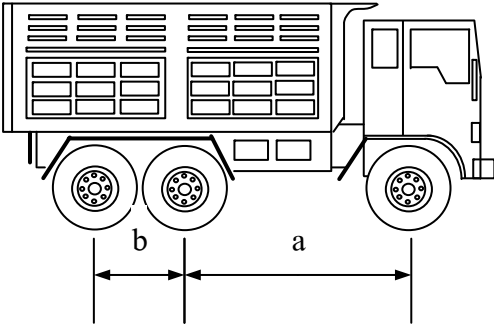
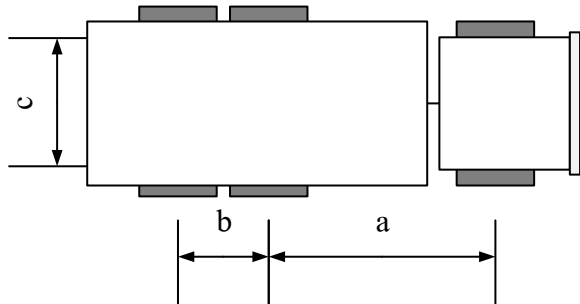
รูปที่ 7-62 ตัวอย่างภาพการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสะพาน (Span 7&8)

[7.10.3] น้ำหนักบรรทุกทดสอบ

ในช่วงสะพานนี้ได้ใช้รถบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักรวมประมาณ 18 ตัน จำนวน 2 คัน ทดสอบสะพานภายใต้สภาวะควบคุม โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 7-41 น้ำหนักบรรทุกทดสอบ (Span 7&8)

คันที่	1	2
ประเภท	รถบรรทุก (80-7169)	รถบรรทุก (81-1459)
น้ำหนักรถบรรทุก (ตัน)	18.120	18.140
ระยะเพลที่ 1 ถึง 2 (a, เมตร)	4.00	4.10
ระยะเพลที่ 2 ถึง 3 (b, เมตร)	1.35	1.35
ความกว้างฐานล้อ (c, เมตร)	1.90	2.00

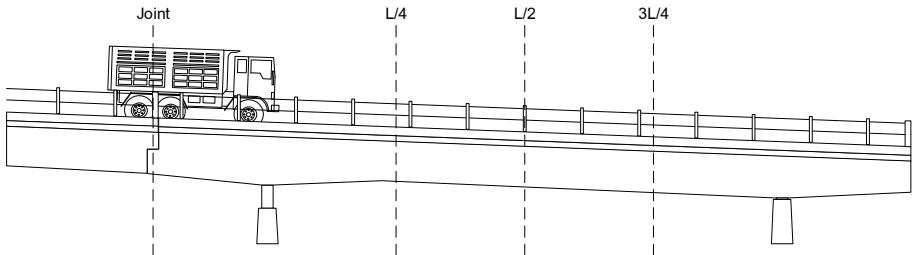
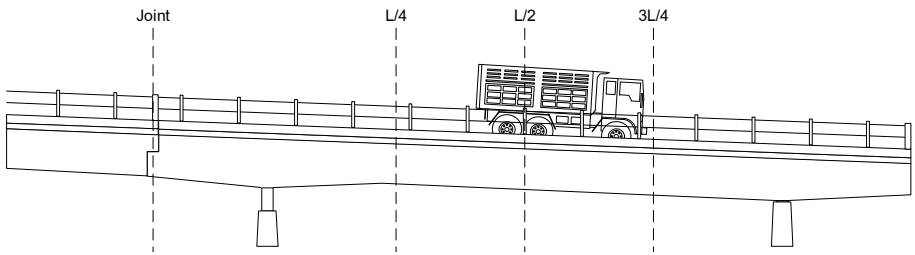
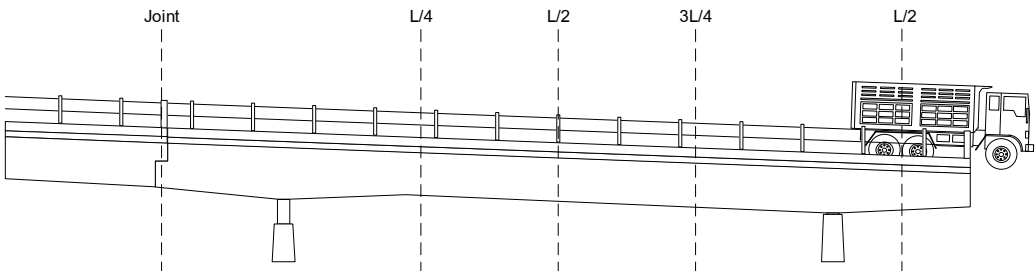
[7.10.4] รูปแบบการทดสอบแบบสถิต

การทดสอบแบบสถิต (Static Test) เป็นการนำรถบรรทุกทดสอบจอดตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนดหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

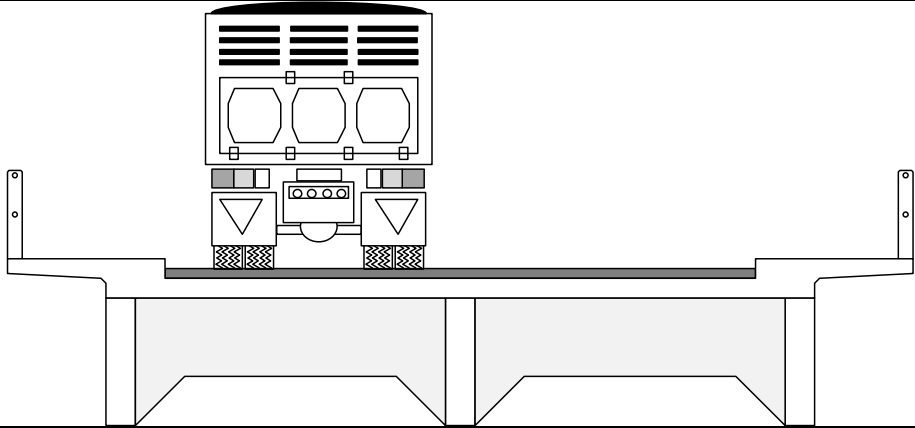
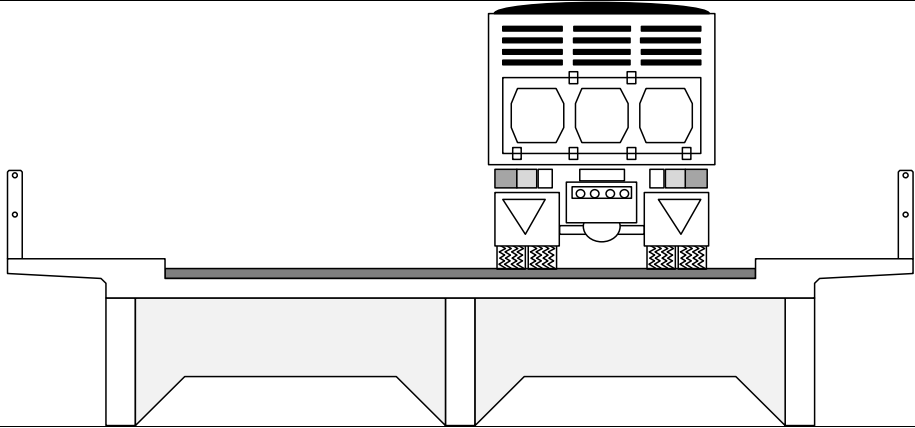
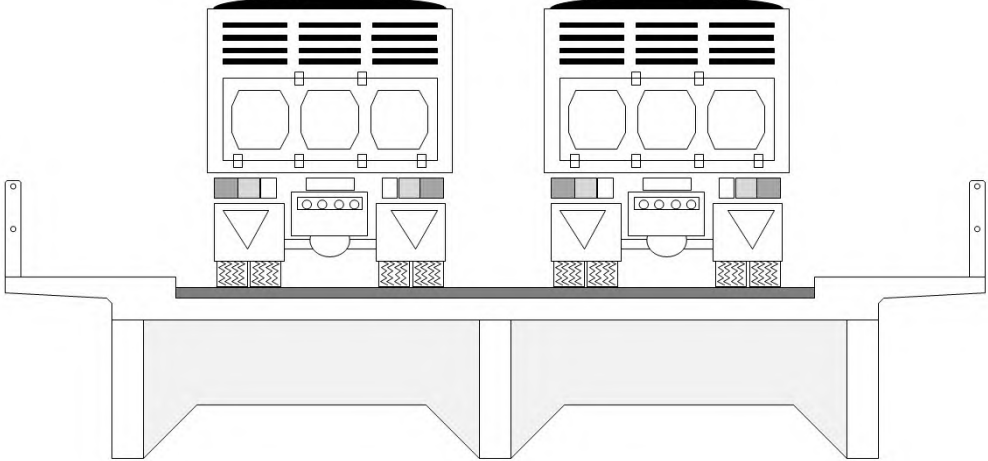
- Static 1-1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/2(S7)$, $L/2(S8)$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ และ Joint ในช่องจราจรทางซ้าย
- Static 1-2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/2(S7)$, $L/2(S8)$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ และ Joint ในช่องจราจรทางขวา
- Static 1-3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 2 คัน จอดตามตำแหน่ง $L/2(S7)$, $L/2(S8)$ ของความยาวช่วงระหว่างตอม่อ และ Joint ทั้งสองช่องจราจร



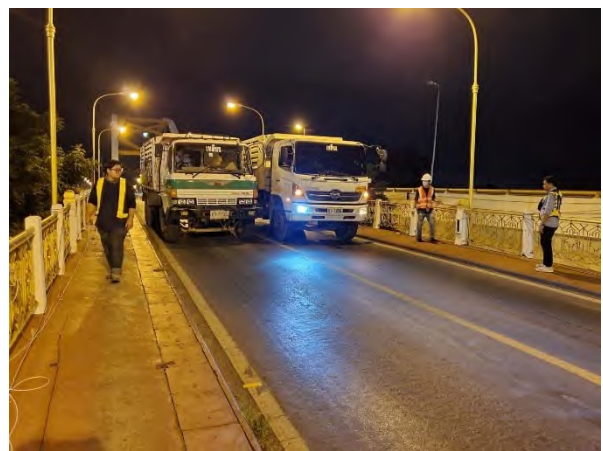
ตารางที่ 7-42 ระยะจอดรถบรรทุกตามตำแหน่ง L/2(S7), L/2(S8) และ Joint

ระยะ	ตำแหน่งจอดรถบรรทุก
Joint	
L/2(S7)	
L/2(S8)	

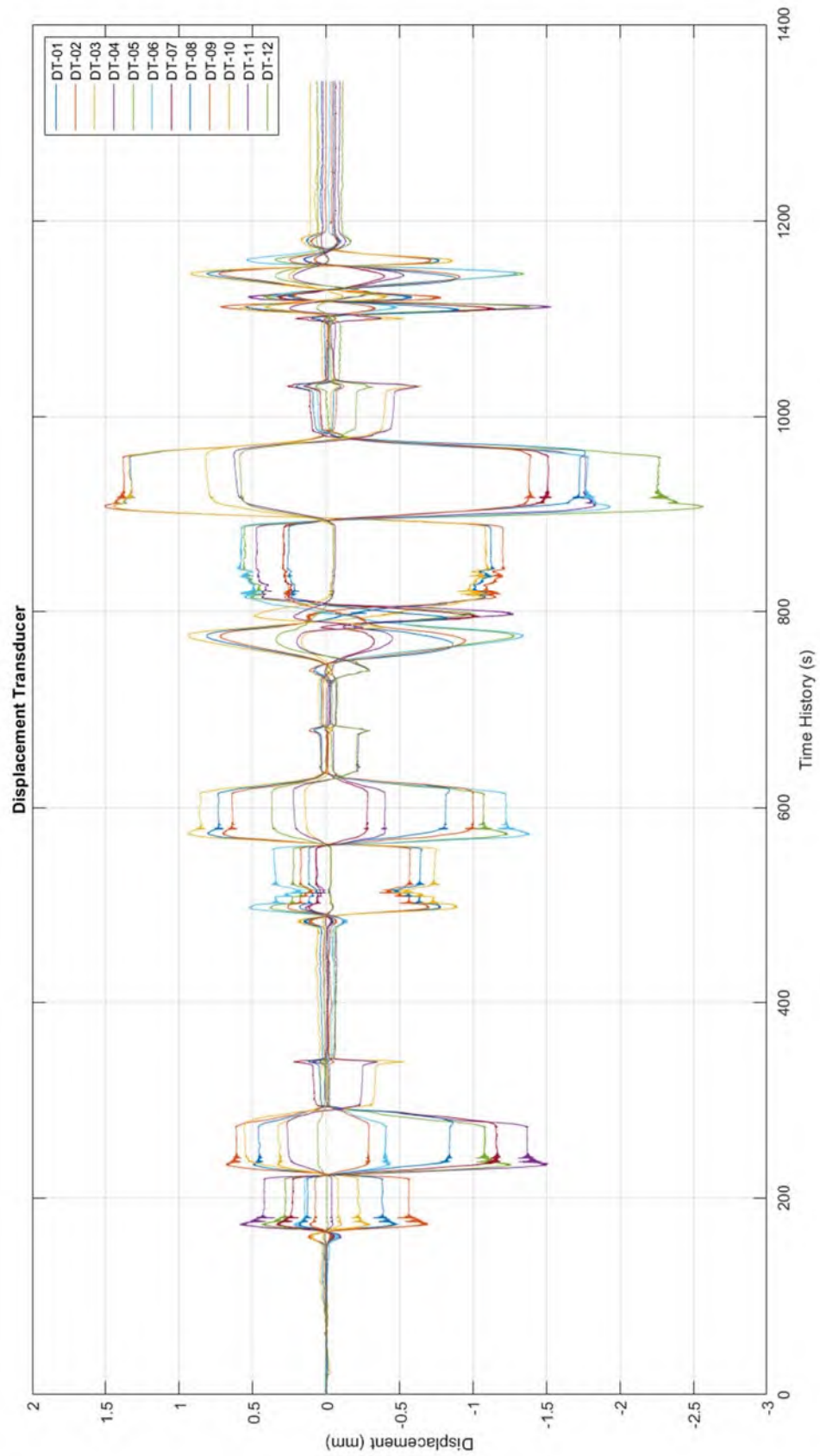
ตารางที่ 7-43 รูปแบบการทดสอบแบบสถิต ด้วยรถบรรทุกน้ำหนัก (Span 7&8)

Case	Pattern
Static 1	
Static 2	
Static 3	



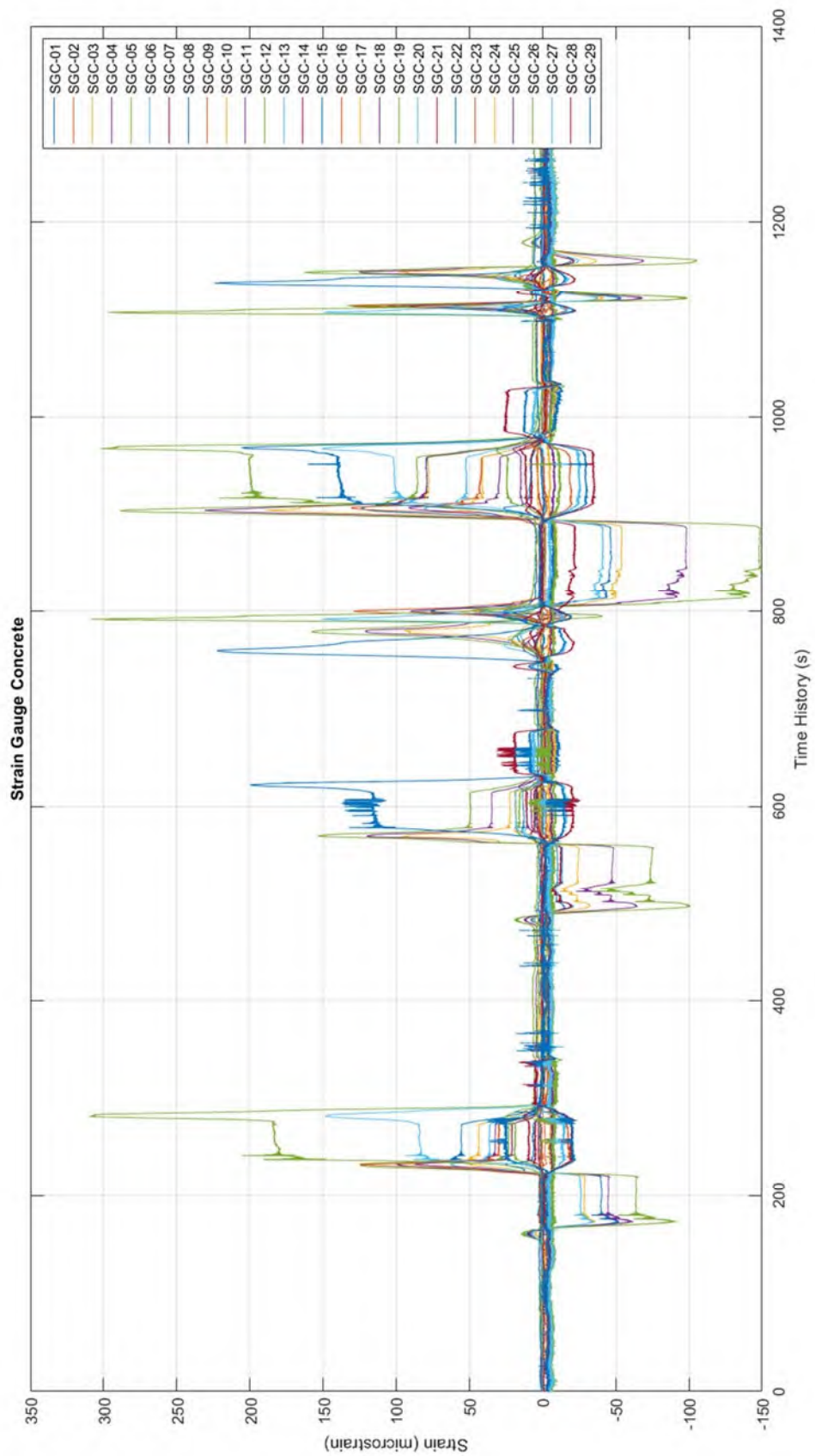


รูปที่ 7-63 ตัวอย่างภาพการทดสอบแบบสถิต (Span 7&8)

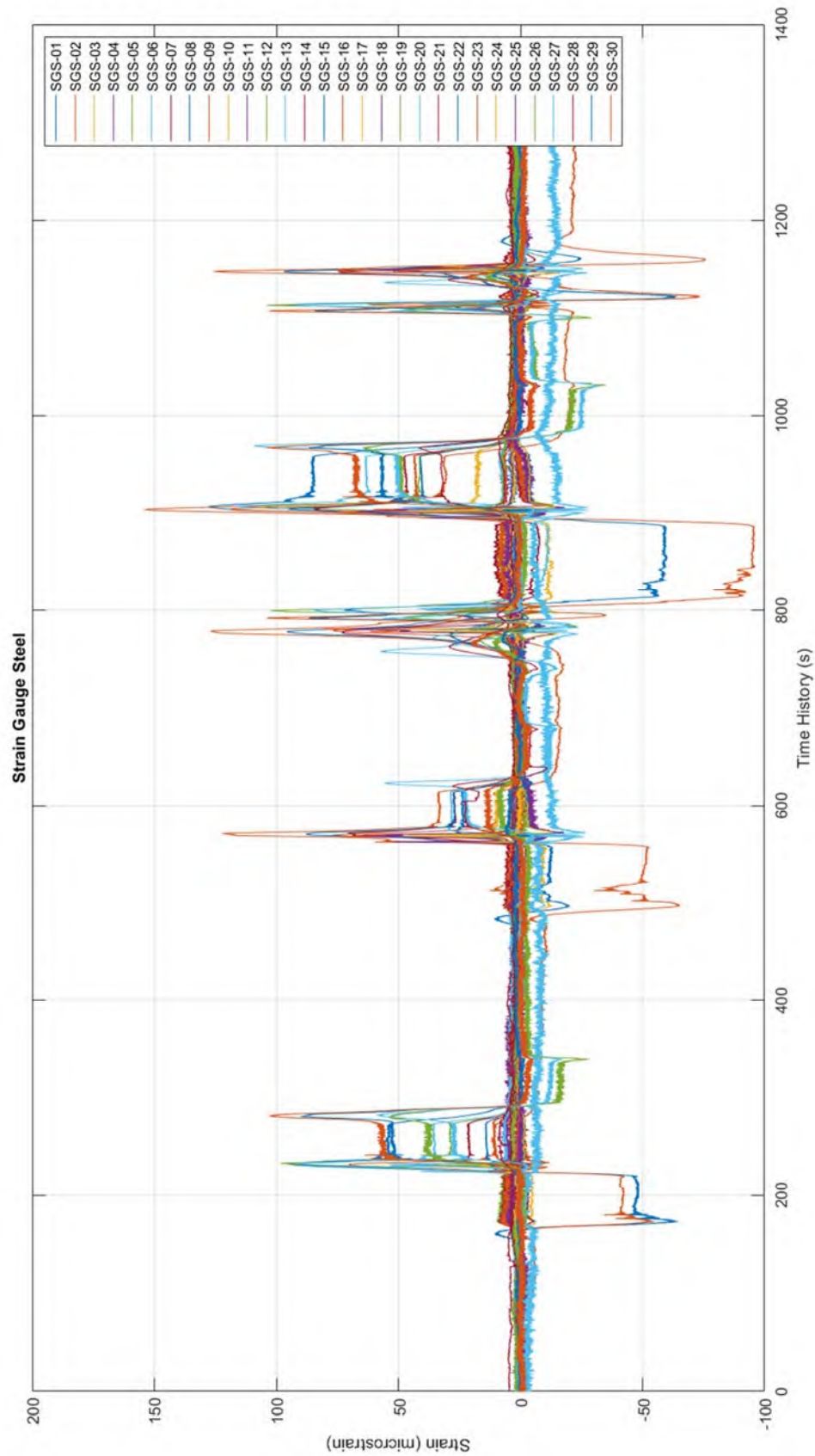


รูปที่ 7-64 สัญญาณการตรวจวัด Displacement Transducer (Span 7&8)



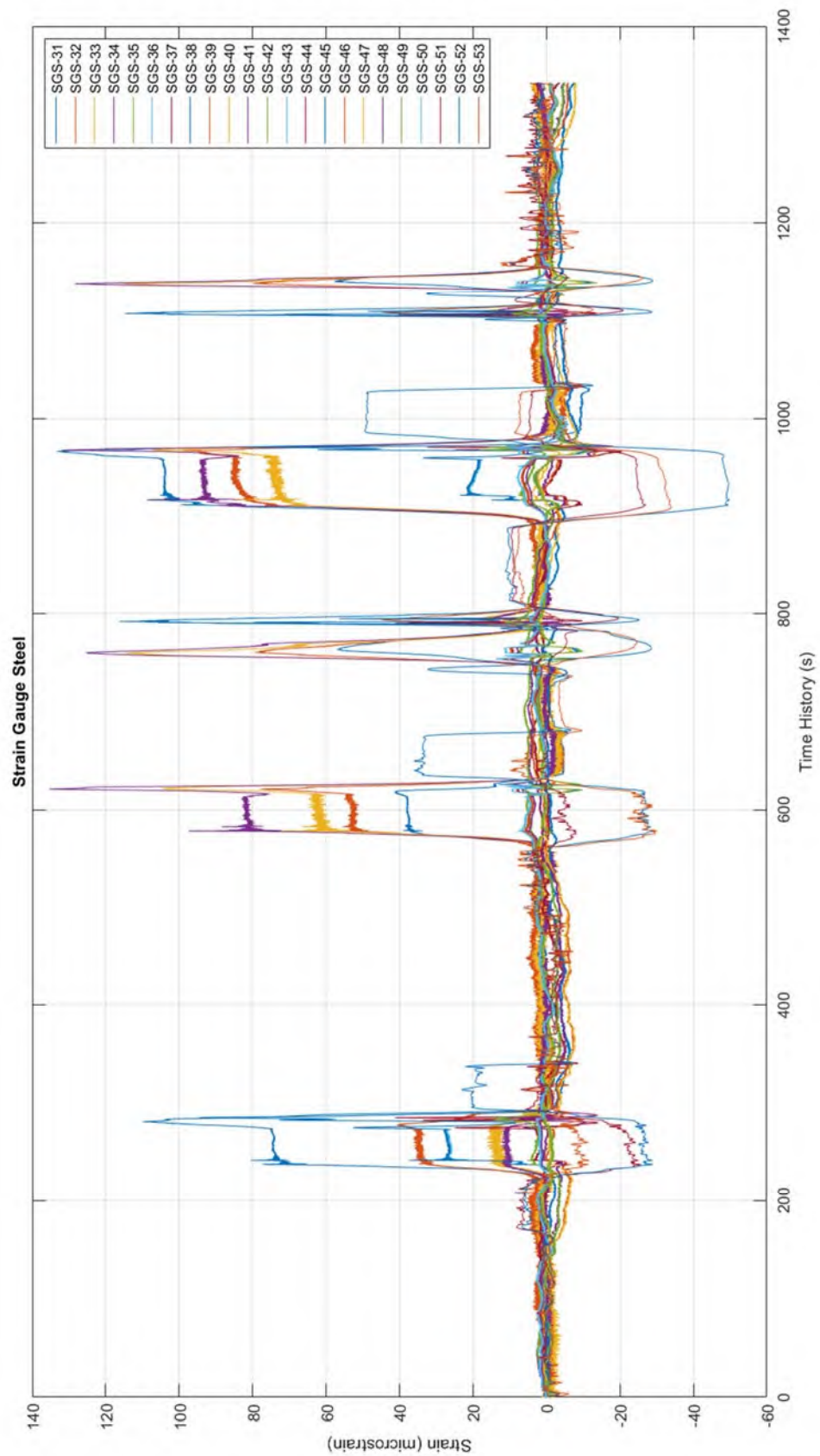


รูปที่ 7-65 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (Span 7&8)



รูปที่ 7-66 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Steel (Span 7&8)





รูปที่ 7-66 สัญญาณการตรวจวัด Strain Gauge Steel (Span 7&8) (ต่อ)

[7.10.5] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมสะพานแบบสถิต

ตารางที่ 7-44 ผลการตรวจวัด Displacement Transducer (หน่วย : mm) (Span 7&8)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	Joint	L/2(S7)	L/2(S8)	Joint	L/2(S7)	L/2(S8)	Joint	L/2(S7)	L/2(S8)
DT-01	-0.380	0.460	0.007	-0.642	0.732	-0.005	-1.123	1.330	-0.047
DT-02	-0.561	0.613	-0.022	-0.571	0.640	-0.007	-1.203	1.376	-0.063
DT-03	-0.215	0.327	0.036	-0.740	0.854	-0.004	-1.088	1.339	-0.033
DT-04	0.422	-1.368	0.006	0.068	-0.401	-0.051	0.473	-1.765	0.032
DT-05	0.275	-1.078	-0.004	0.217	-1.071	-0.035	0.552	-2.259	-0.015
DT-06	0.143	-0.405	-0.026	0.350	-1.224	0.036	0.579	-1.774	0.053
DT-07	0.227	-1.166	0.089	0.068	-0.282	-0.011	0.288	-1.511	0.101
DT-08	0.124	-0.841	0.043	0.120	-0.815	0.030	0.256	-1.725	0.080
DT-09	0.072	-0.291	-0.015	0.171	-0.998	0.039	0.289	-1.381	0.039
DT-10	-0.081	0.555	-0.336	-0.029	0.145	-0.017	-0.052	0.812	-0.392
DT-11	-0.038	0.262	-0.247	-0.033	0.221	-0.219	-0.062	0.615	-0.454
DT-12	-0.008	0.057	0.007	-0.032	0.368	-0.207	-0.049	0.582	-0.203



ตารางที่ 7-45 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Concrete (หน่วย : microstarin) (Span 7&8)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint
SGC-01	-40.500	55.470	-1.758	-10.360	13.630	1.015	-46.490	79.230	-3.356
SGC-02	0.848	-1.375	1.058	-1.610	0.667	-0.765	-1.896	-0.675	0.444
SGC-03	-28.430	43.280	1.229	-24.140	22.360	-0.163	-53.740	77.800	-0.525
SGC-04	-44.630	32.165	3.208	-47.685	34.799	1.323	-98.023	79.123	1.698
SGC-05	-63.590	23.040	5.385	-74.180	49.390	2.890	-148.370	85.340	4.025
SGC-06	-26.010	36.208	-1.100	-13.896	11.311	-0.422	-41.214	52.001	-3.428
SGC-07	-2.850	24.877	-0.075	-12.800	25.221	-1.719	-22.200	57.438	-2.358
SGC-08	2.304	6.029	0.256	2.067	3.990	2.944	4.556	8.177	2.656
SGC-09	1.069	29.540	-0.385	-2.379	11.100	-0.813	-1.850	41.790	-1.106
SGC-10	-1.860	21.530	-1.117	-6.350	18.230	-1.915	-9.456	41.500	-1.269
SGC-11	0.748	20.678	-0.270	-1.665	7.770	-0.569	-1.295	29.253	-0.774
SGC-12	-0.840	18.610	-7.802	-2.471	2.481	-0.717	-1.204	24.380	-8.721
SGC-13	1.690	1.235	0.633	1.238	-1.785	0.604	0.490	-0.825	-1.060
SGC-14	1.881	2.331	0.438	1.352	1.040	0.240	0.735	3.579	-0.167
SGC-15	2.492	0.677	0.385	1.148	-0.540	0.567	2.413	0.760	0.148
SGC-16	1.665	0.906	-3.396	0.958	-2.354	-3.563	2.692	-0.756	-7.763
SGC-17	1.281	12.552	0.094	0.123	1.556	-0.471	1.554	13.496	-0.446
SGC-18	0.488	8.194	0.731	0.623	10.470	-4.842	0.202	14.880	-5.925
SGC-19	0.360	182.830	-0.515	3.933	15.300	0.506	4.133	199.630	1.750
SGC-20	1.079	83.660	-3.038	-0.585	18.760	-2.635	0.456	101.310	-4.994
SGC-21	1.402	8.817	-0.656	-0.496	3.290	-1.781	0.542	11.740	-1.469
SGC-22	-1.921	25.140	-6.021	-5.217	115.090	-11.130	-8.646	139.360	-7.829
SGC-23	1.233	-17.250	-3.860	-2.546	-6.138	-3.933	1.642	-18.410	-2.835
SGC-24	-6.208	-5.519	-5.854	-6.896	-4.956	-8.675	-8.800	-4.738	-4.419
SGC-25	-5.802	-6.725	-8.032	-6.802	-6.778	-6.655	-8.638	-7.885	-4.452
SGC-26	-5.879	-8.492	-10.880	-7.275	-9.165	-5.190	-9.196	-11.690	-4.856
SGC-27	-3.371	-14.550	-6.746	-5.452	-15.920	5.417	-5.390	-24.630	6.998
SGC-28	-0.829	-20.190	3.250	-2.040	-21.040	18.640	0.550	-34.720	25.430
SGC-29	0.222	-20.592	-0.336	-2.522	-14.948	8.089	1.206	-29.222	12.427

ตารางที่ 7-46 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel (หน่วย : microstarin) (Span 7&8)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint
SGS-01	-47.910	53.480	0.571	-12.430	23.800	1.515	-59.260	84.380	-0.192
SGS-02	-41.890	40.100	-7.377	-51.470	39.527	-16.180	-95.240	50.280	-19.730
SGS-03	-4.942	33.092	-0.821	-9.079	49.738	-0.056	-10.960	57.580	2.494
SGS-04	0.488	2.810	0.356	0.469	0.206	0.052	0.842	2.850	0.504
SGS-05	1.892	28.570	1.910	-0.073	13.360	1.238	0.158	40.830	2.577
SGS-06	-0.146	35.390	1.640	-7.660	28.860	-1.713	-10.950	62.860	0.400
SGS-07	-2.935	21.060	-0.071	-1.708	27.190	-0.604	-7.735	46.630	0.102
SGS-08	0.469	14.020	0.846	0.504	27.350	0.400	-1.817	40.570	1.948
SGS-09	2.515	10.380	1.423	2.806	33.400	2.113	3.563	42.570	3.333
SGS-10	5.150	-1.875	1.171	0.938	-1.773	-1.373	6.023	-3.313	0.410
SGS-11	2.900	6.821	4.042	0.879	1.904	0.746	1.583	7.044	2.458
SGS-12	7.606	1.042	2.569	2.552	-1.398	0.023	8.767	-2.919	0.756
SGS-13	2.819	6.073	3.621	1.460	2.483	1.083	2.294	7.121	3.452
SGS-14	6.781	1.229	2.896	4.521	1.629	2.731	10.150	0.992	3.577
SGS-15	2.925	2.656	1.469	0.452	0.440	0.583	0.540	2.885	1.335
SGS-16	5.879	0.417	1.654	3.663	0.575	0.848	8.288	-0.781	2.100
SGS-17	2.225	3.075	1.585	0.088	0.146	-0.140	0.385	2.644	0.863
SGS-18	3.746	1.506	0.329	2.579	-4.198	-0.715	5.400	-3.631	-0.104
SGS-19	0.748	2.669	1.460	2.267	3.877	2.175	0.815	6.498	4.506
SGS-20	-1.067	-6.035	-7.717	-4.981	-12.320	-10.540	-5.275	-15.110	-11.870
SGS-21	1.867	4.413	2.810	2.446	3.625	3.035	2.108	6.490	4.690
SGS-22	1.040	-1.508	0.021	1.569	-2.800	-0.010	2.779	-4.117	0.098
SGS-23	1.008	0.952	0.067	1.144	4.513	1.904	1.367	5.910	2.317
SGS-24	1.940	-1.383	0.271	2.690	-2.523	-0.123	3.577	-3.898	0.433
SGS-25	0.025	-0.029	-0.079	0.015	2.827	0.313	-0.513	3.263	0.404
SGS-26	-0.538	38.930	-16.260	-3.081	8.198	-1.873	-1.929	49.340	-21.000
SGS-27	1.060	27.820	-12.760	-0.956	22.460	-11.950	0.173	50.570	-25.210
SGS-28	3.638	8.965	3.596	1.521	27.110	-4.035	3.438	32.050	-3.785
SGS-29	0.292	52.940	-0.458	2.231	4.083	0.019	0.588	56.900	0.152
SGS-30	0.902	57.230	-2.963	-0.708	13.040	-2.298	0.017	67.180	-4.675

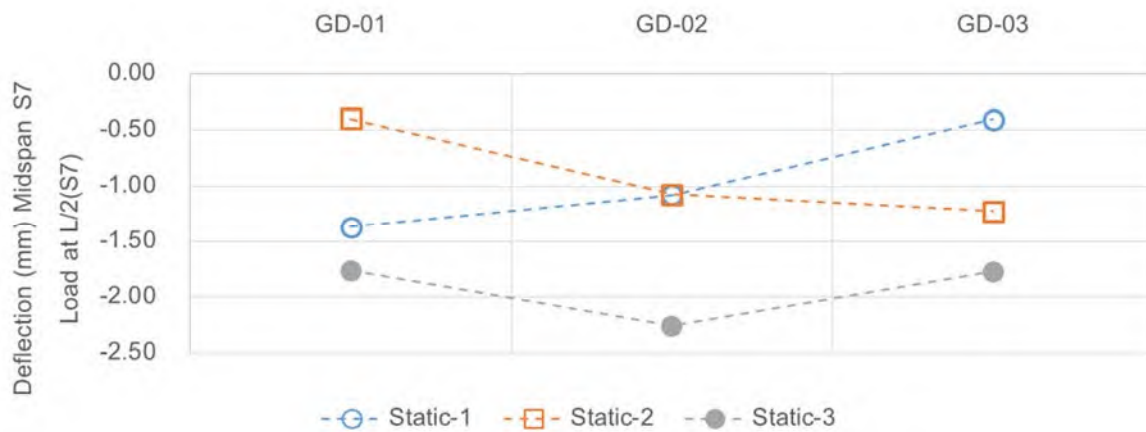


ตารางที่ 7-46 ผลการตรวจวัด Strain Gauge Steel (หน่วย : microstarin) (Span 7&8) (ต่อ)

Sensor	Static-1			Static-2			Static-3		
	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint	L/2(S1)	L/2(S2)	Joint
SGS-31	1.460	74.070	-4.813	0.863	37.910	-4.410	2.119	103.990	-8.933
SGS-32	3.885	34.950	-0.727	1.744	53.530	-3.098	3.223	84.750	-4.377
SGS-33	1.867	15.010	0.475	-1.179	62.040	-2.338	0.508	73.890	-1.948
SGS-34	0.919	11.420	0.873	-1.829	81.740	-1.848	-0.454	93.340	-0.254
SGS-35	0.697	1.845	0.422	0.996	-0.796	2.813	0.499	-1.665	-1.699
SGS-36	-1.536	26.342	-3.213	-1.142	-1.110	-0.559	-3.019	19.590	-6.870
SGS-37	0.719	1.902	0.435	1.027	-0.821	2.900	0.515	-1.717	-1.752
SGS-38	-1.567	26.880	-3.279	-1.165	-1.133	-0.571	-3.081	19.990	-7.010
SGS-39	-5.731	-2.017	-4.256	-1.410	0.444	3.519	0.773	-1.508	-2.756
SGS-40	-5.573	-0.910	-4.798	-1.433	1.477	1.863	-2.223	1.046	-6.308
SGS-41	-3.200	-0.256	-1.958	-0.740	1.440	4.144	0.906	-0.360	-2.079
SGS-42	-3.433	1.948	-1.773	0.483	4.969	4.767	2.017	4.754	-2.800
SGS-43	1.156	-1.529	0.652	1.881	0.206	0.946	-0.854	2.863	-2.142
SGS-44	1.921	1.527	1.079	1.833	4.006	0.310	-1.065	6.658	-3.098
SGS-45	1.214	-1.605	0.685	1.975	0.217	0.993	-0.897	3.006	-2.249
SGS-46	1.998	1.588	1.122	1.906	4.166	0.323	-1.108	6.924	-3.222
SGS-47	0.959	-1.269	0.541	1.561	0.171	0.785	-0.709	2.376	-1.778
SGS-48	1.614	1.283	0.906	1.540	3.365	0.261	-0.895	5.593	-2.602
SGS-49	1.372	-1.814	0.774	2.232	0.245	1.122	-1.014	3.397	-2.541
SGS-50	2.298	1.826	1.290	2.192	4.791	0.371	-1.274	7.963	-3.705
SGS-51	7.088	-22.367	2.641	1.082	-4.880	0.064	9.358	-24.551	4.530
SGS-52	6.131	-26.391	19.055	3.085	-26.746	33.759	10.232	-48.983	49.128
SGS-53	3.661	-8.492	-1.322	3.226	-25.819	4.696	7.859	-31.974	7.305



รูปที่ 7-67 การแอนตัวที่ปลายคานยื่น (Span 7)

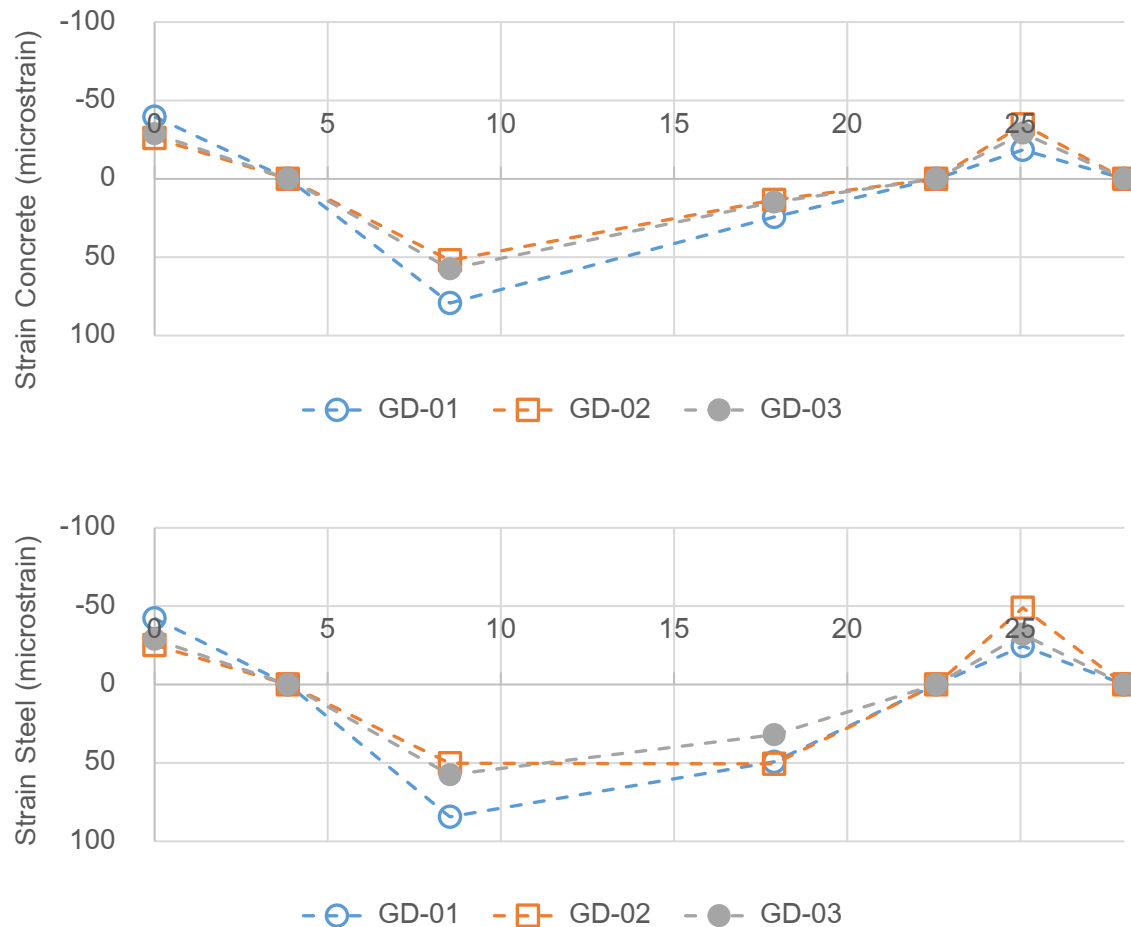


รูปที่ 7-68 การแอนตัวที่กึ่งกลางช่วงสะพาน (Span 7)



รูปที่ 7-69 การแอนตัวที่กึ่งกลางช่วงสะพาน (Span 8)





รูปที่ 7-70 ค่าความเครียดตามแนวยางของสะพาน Staitc-3 (Span 7&8)

[7.10.6] รูปแบบการทดสอบแบบพลวัต

การทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Test) เป็นการทดสอบโดยใช้รถบรรทุกวิ่งผ่านช่วงสะพานทดสอบหลายรูปแบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

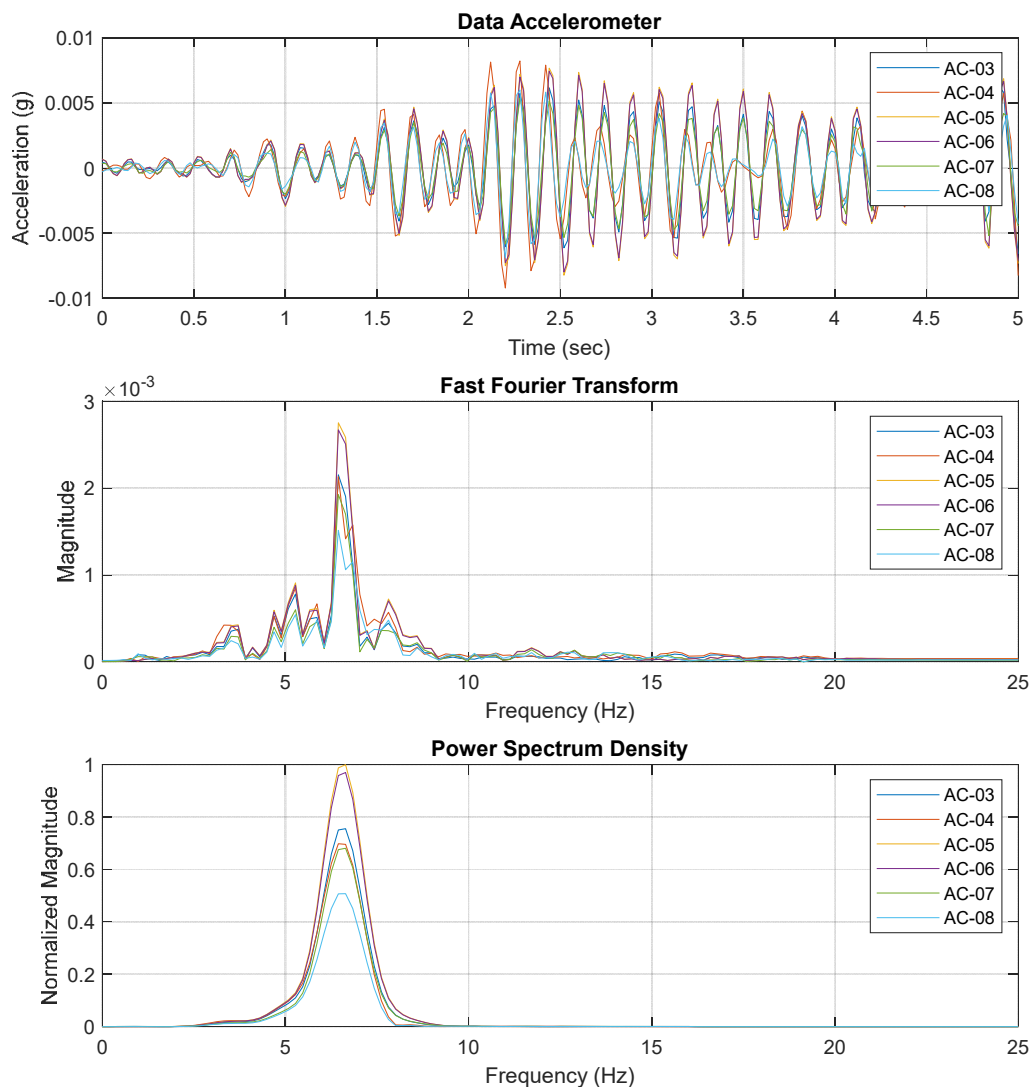
- Dynamic 1 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 20 กม./ชม. กึ่งกลางสะพาน
- Dynamic 2 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 30 กม./ชม. กึ่งกลางสะพาน

- Dynamic 3 : ทดสอบด้วยรถบรรทุกจำนวน 1 คัน วิ่งด้วยความเร็ว 50 กม./ชม.
กึ่งกลางสะพาน



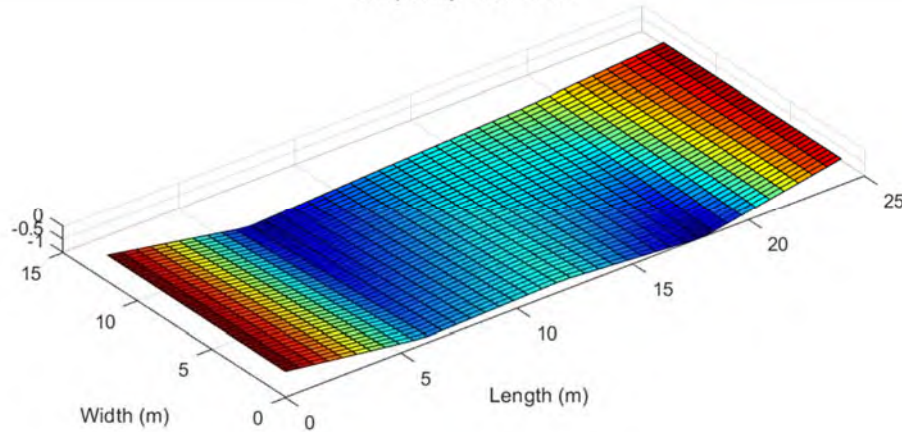
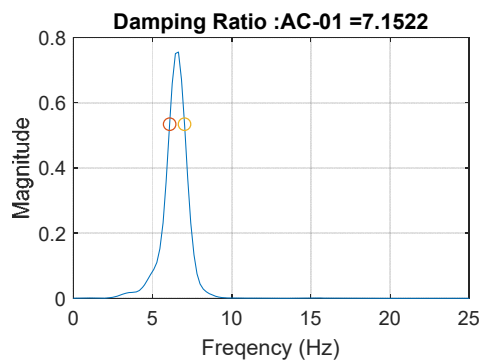
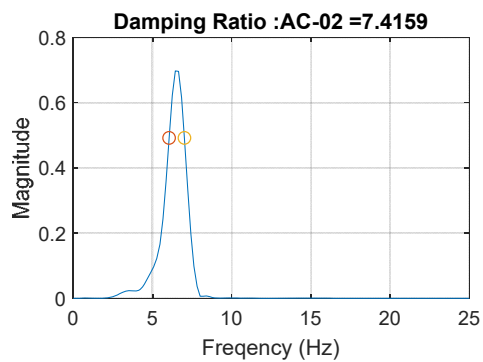
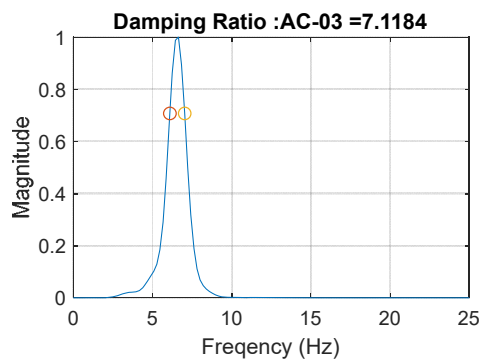
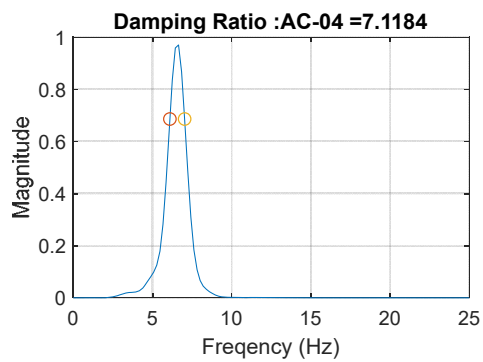
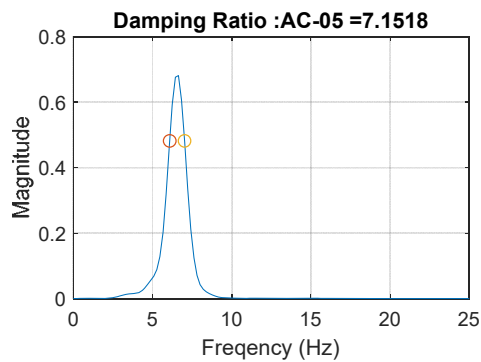
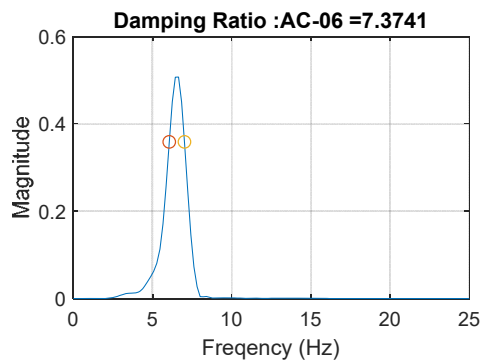
[7.10.7] ผลการตรวจวัดพฤติกรรมแบบพลวัต

Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 7&8)

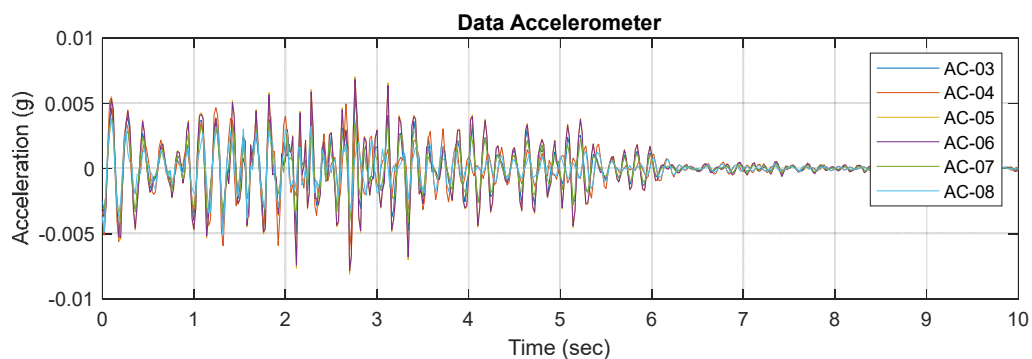
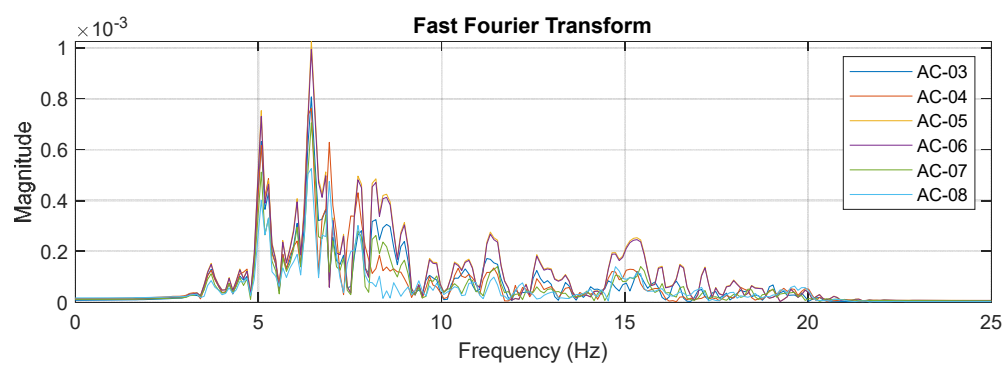
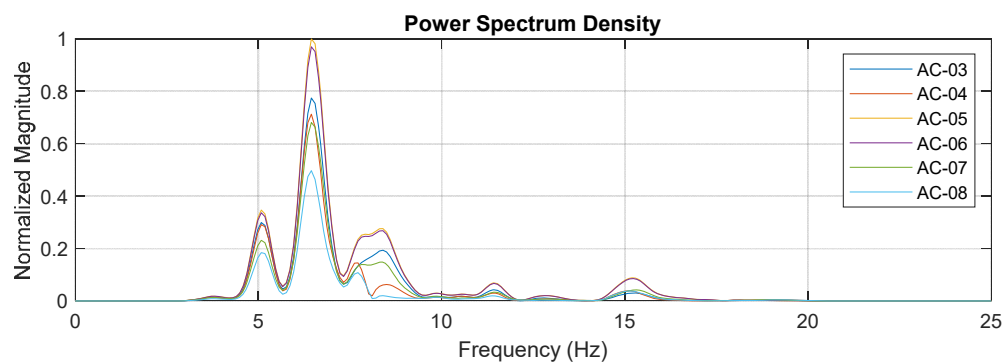
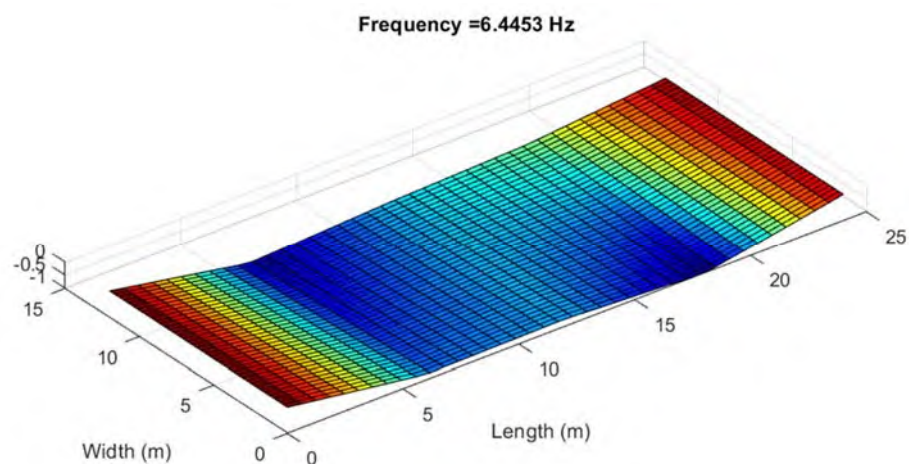


Dynamic 1 : 20 km/hr (Span 7&8)

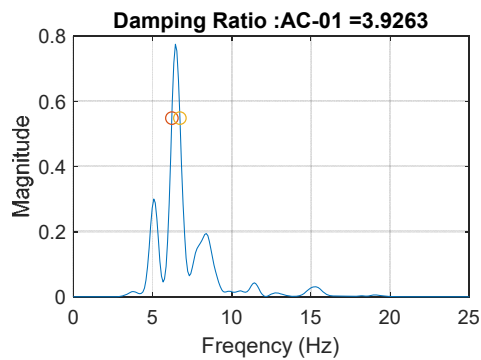
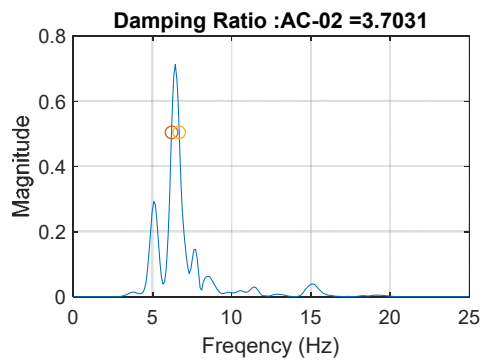
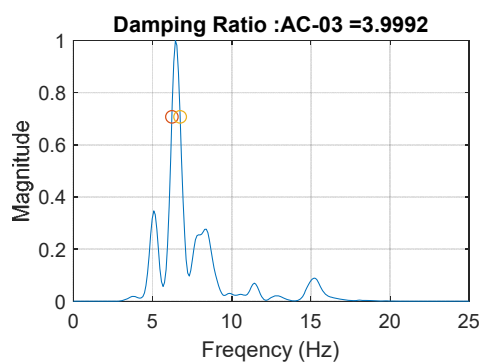
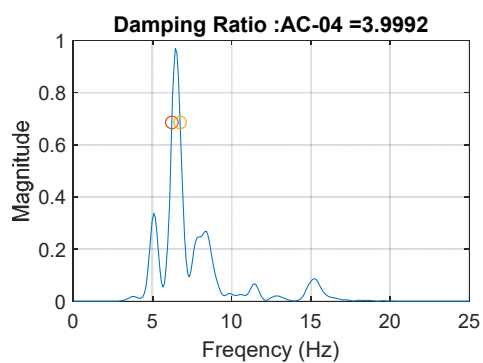
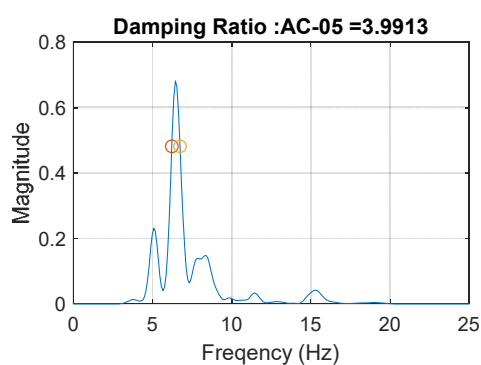
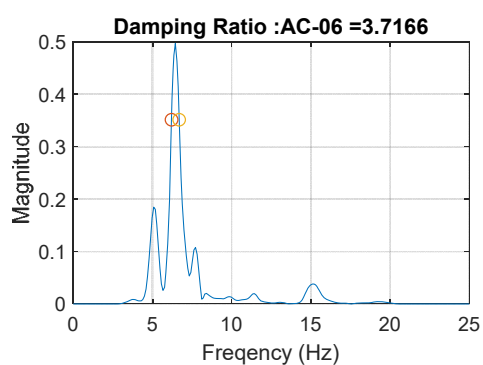
Frequency = 6.6406 Hz



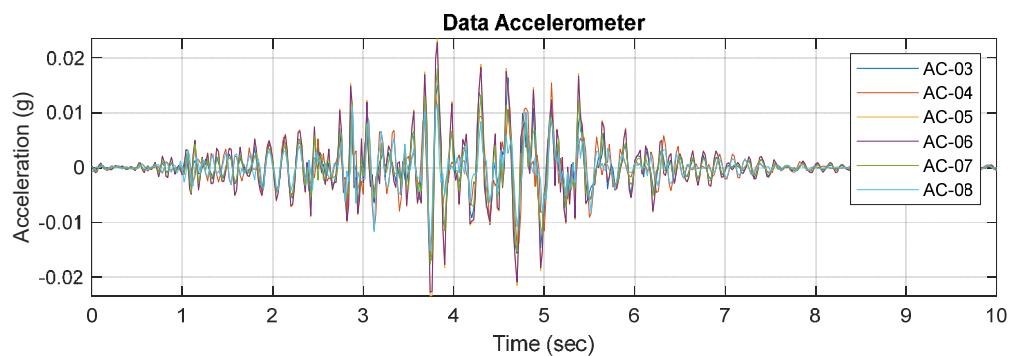
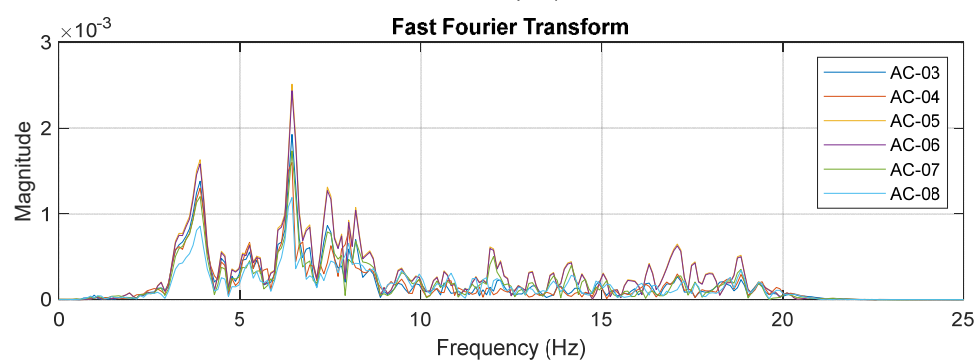
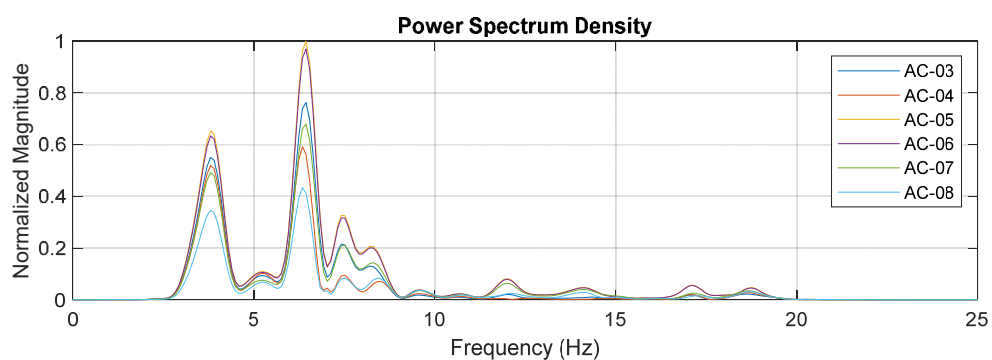
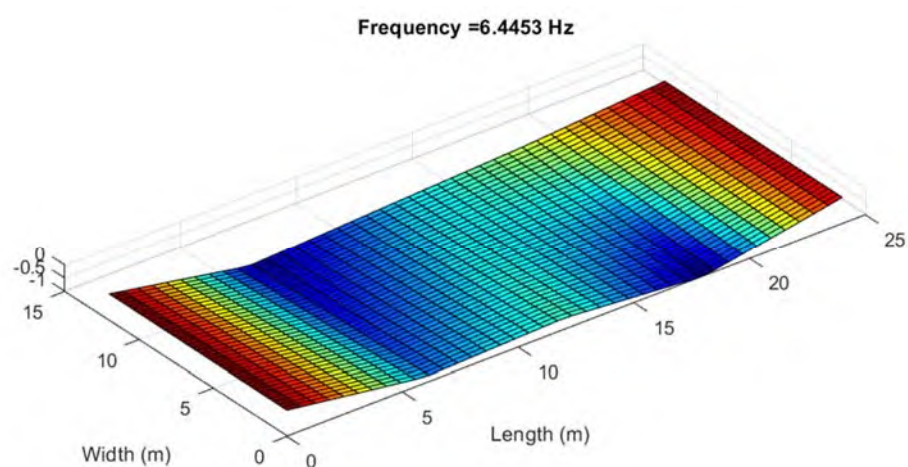
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 7&8)



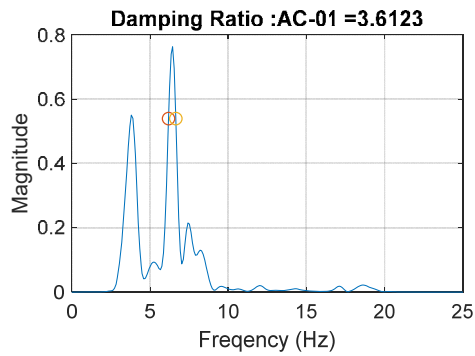
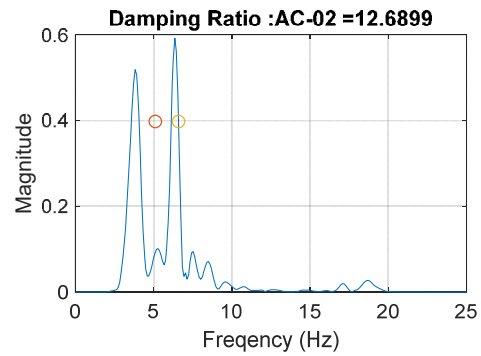
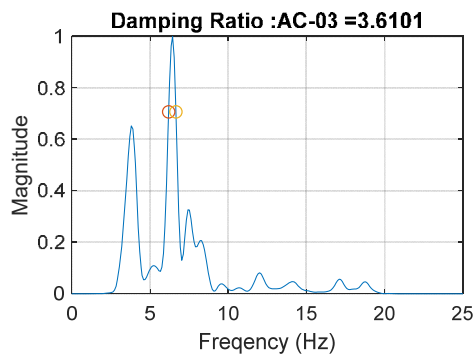
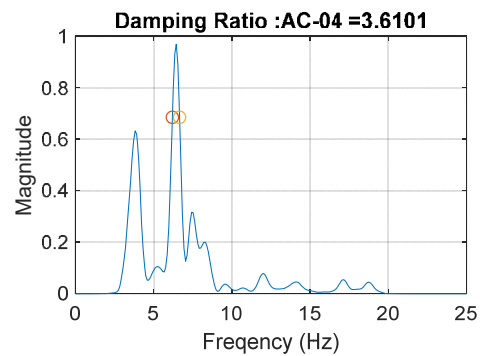
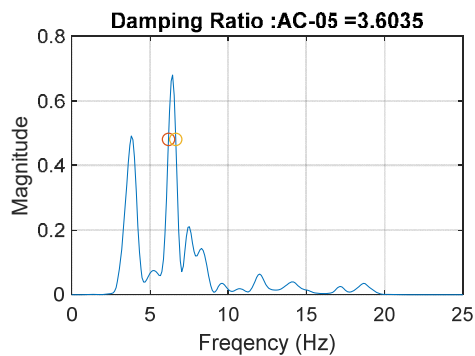
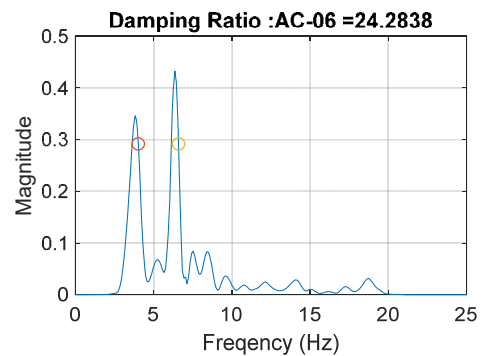
Dynamic 2 : 30 km/hr (Span 7&8)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 7&8)



Dynamic 3 : 50 km/hr (Span 7&8)



ตารางที่ 7-47 ผลการวิเคราะห์ Natural Frequency, Mode Shape และ Damping Ratio (Span 7&8)

Dynamic Case	Speed (km/h)	Frequency (Hz)	Mode Shape (1st Mode)	Damping Ratio (%)
Dynamic1	20	6.64	Bending	7.11 - 7.37
Dynamic2	30	6.44	Bending	3.70 - 3.99
Dynamic3	50	6.44	Bending	3.60 - 12.69

[7.11] อภิปรายผลการทดสอบพฤติกรรมสะพาน

ลักษณะโครงสร้างส่วนบนของสะพานปรีดี-ช้างอาจแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

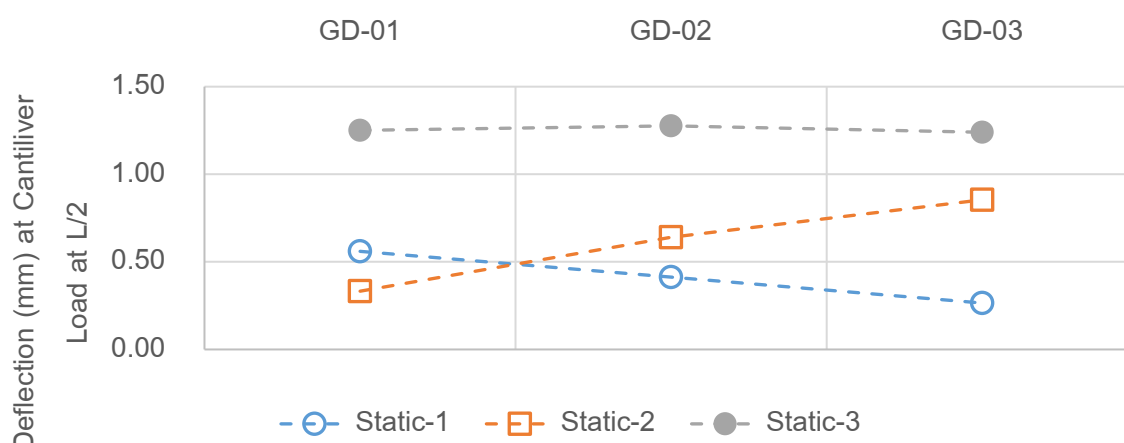
- Span with 1 Overhang ได้แก่ ช่วงสะพาน S5
- Span with 2 Overhang ได้แก่ ช่วงสะพาน S1&S2 และ S7&S8
- Suspended Span on Overhang 1 side ได้แก่ ช่วงสะพาน S3
- Suspended Span on Overhang 2 side ได้แก่ ช่วงสะพาน S6
- Arch Span ได้แก่ ช่วงสะพาน S4

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดพฤติกรรมสะพานภายใต้แรงกระทำแบบสถิตมี 2 รูปแบบหลัก โดยที่บริเวณช่วงเชิงลาด (Approach Span, S1&S2, S6, และ S7&S8) สามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวและอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดได้ แต่บริเวณช่วงสะพานหลักที่เป็นคานโค้ง (Arch Span, S4) และบริเวณช่วงเชิงลาด (Approach Span, S3) ติดตั้งได้เพียงอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดเท่านั้น เนื่องจากเป็นช่วงข้ามแม่น้ำ ไม่สามารถตั้งนั่งร้านจากแม่น้ำขึ้นไปวัดการแอ่นตัวได้ ดังนั้นในบริเวณเชิงลาดที่สามารถตั้งนั่งร้านได้จะเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวและค่าความเครียด ส่วนบริเวณสะพานช่วงข้ามแม่น้ำจะเปรียบเทียบเฉพาะค่าความเครียด ยกเว้นบริเวณช่วงเชิงลาดสะพานช่วงที่ 5 (Approach Span, S5) ที่มีช่วงคานยื่นที่สามารถตั้งนั่งร้านติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการแอ่นตัวได้

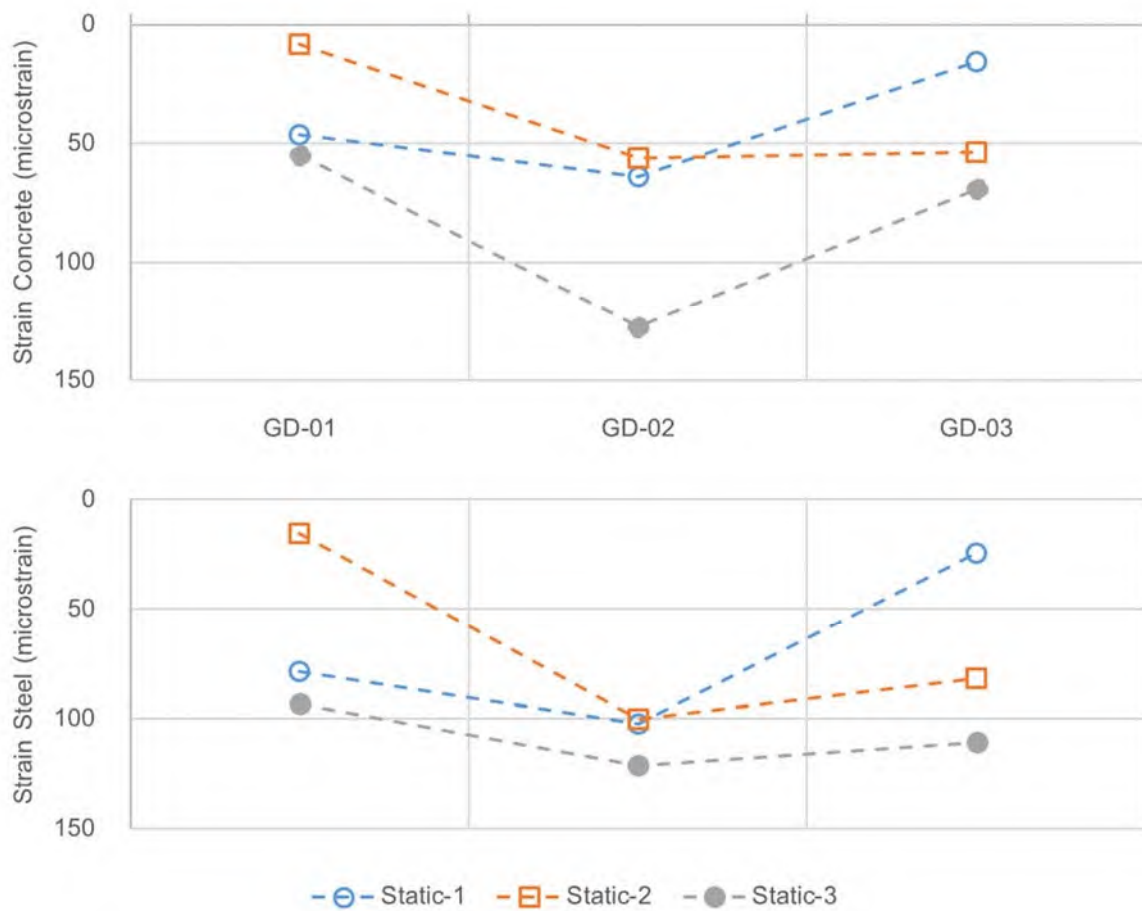


[7.11.1] Span with 1 Overhang (S5)

รูปที่ 7.11-1 แสดงผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่ปลายคานยื่นด้านซ้ายและคานด้านขวา (GD-01 และ GD-03) ของสะพานกลุ่ม Span with 1 Overhang (S5) จะเห็นได้ว่าเมื่อรถบรรทุกน้ำหนัก 18 ตัน จอดด้านซ้าย คานด้านซ้าย (GD-01) จะแอ่นตัว 0.56 มม. หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา คานด้านขวา (GD-03) จะแอ่นตัว 0.85 มม. หากนำรถบรรทุกไปจอด 2 คัน คานด้านซ้ายและด้านขวา (GD-01 และ GD-03) จะแอ่นตัวประมาณ 1.24-1.25 มม. รูปที่ 7.11-2 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเครียดที่กึ่งกลางคานด้านซ้าย คานตรงกลาง และคานด้านขวา (GD-01, GD-02 และ GD-03) ของสะพานกลุ่ม Span with 1 Overhang พฤติกรรมโดยภาพรวมจะสอดคล้องกับการแอ่นตัวที่ได้กล่าวไปข้างต้น ซึ่งเมื่อนำรถบรรทุกไปจอดด้านซ้าย คานด้านซ้ายจะเกิดความเครียดมาก หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา คานด้านขวาก็จะเกิดความเครียดมาก หากนำไปจอด 2 คัน คานด้านซ้ายและด้านขวาก็จะรับความเครียดใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดในการวัดความเครียดดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสื่อมสภาพและแตกร้าว ค่าที่ตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ถึงแม้การทดสอบจะหลีกเลี่ยงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดคร่อมรอยแตก ซึ่งจะทำให้ผลการตรวจวัดได้ค่าที่สูงมาก อย่างไรก็ตามหากติดตั้งในบริเวณที่เป็นรอยแตกขนาดเล็ก (Micro crack) หรือเสียหายขนาดเล็ก (Micro damage) ซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ก็อาจทำให้ค่าที่ตรวจวัดได้สูงเกินจริง หรือการติดตั้งใกล้บริเวณรอยแตก ค่าที่อ่านได้อาจมีความแปรปรวนสูง ดังนั้นข้อมูลความเครียดอาจใช้ประกอบดุลพินิจในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 7.11-1 ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงสะพาน Span with 1 Overhang (S5)

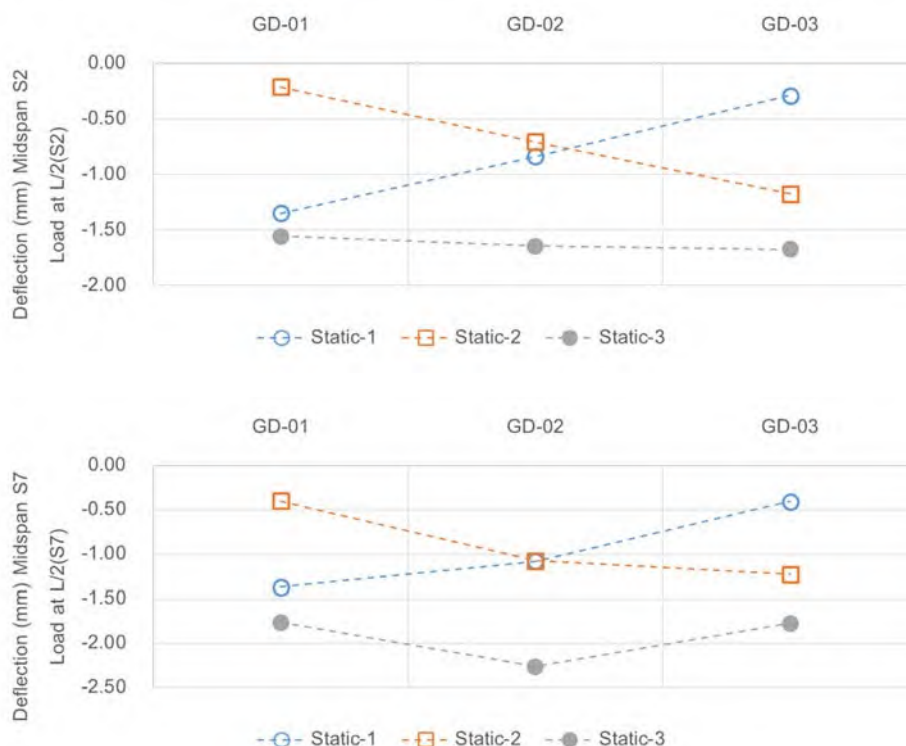


รูปที่ 7.11-2 ค่าความเครียดที่กึ่งกลางช่วงสะพาน Span with 1 Overhang (S5)

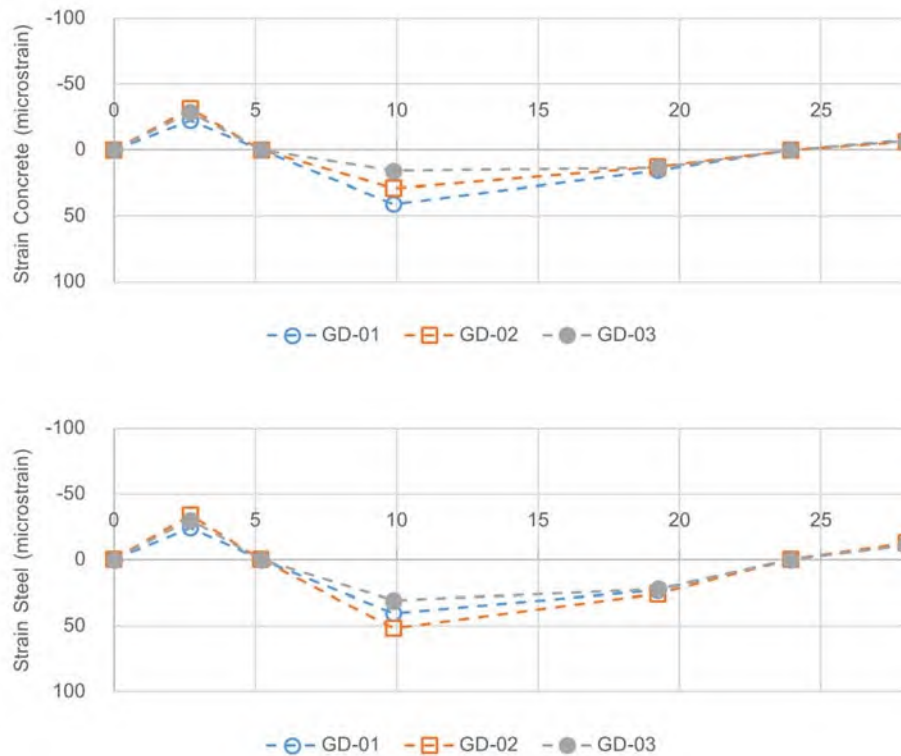


[7.11.2] Span with 2 Overhang (S1&S2 และ S7&S8)

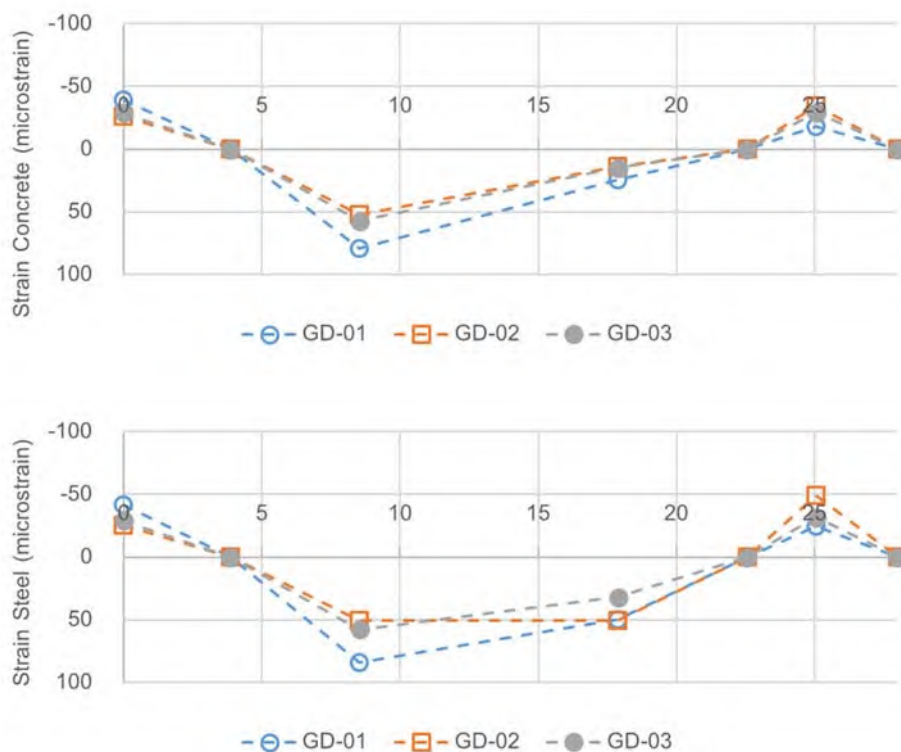
รูปที่ 7.11-3 แสดงผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานด้านซ้าย คานตรงกลาง และคานด้านขวา (GD-01, GD-02 และ GD-03) ของสะพานกลุ่ม Span with 2 Overhang จะเห็นได้ว่าเมื่อรถบรรทุกน้ำหนัก 18 ตัน จอดด้านซ้าย คานด้านซ้าย (GD-01) จะแอ่นตัวประมาณ 1.35 – 1.37 มม. หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา คานด้านขวา (GD-03) จะแอ่นตัวประมาณ 1.13 – 1.22 มม. หากนำรถบรรทุกไปจอด 2 คัน คานด้านซ้ายและด้านขวา (GD-01 และ GD-03) จะแอ่นตัวประมาณ 1.56 – 1.77 มม. โดยภาพรวมช่วงสะพาน S7&S8 มีพฤติกรรมอ่อนกว่า S1&S2 ส่วนรูปที่ 7.11-4 และรูปที่ 7.11-5 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเครียดตามความยาวคาน เมื่อจอดรถบรรทุกกึ่งกลางสะพาน คานด้านซ้าย คานตรงกลาง และคานด้านขวา (GD-01, GD-02 และ GD-03) ของสะพานกลุ่ม Span with 2 Overhang พฤติกรรมโดยภาพรวมจะมีลักษณะเป็นคานต่อเนื่องบริเวณ 0-5 เมตร ค่าความเครียดจะมีค่าเป็นลบแสดงว่าคานมีการโก่งตัวขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดในการวัดความเครียดดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเชื่อมสภาพและแตกร้าว ค่าที่ตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ดังที่ได้อธิบายไปแล้ว ดังนั้นข้อมูลความเครียดอาจใช้ประกอบดุลพินิจในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 7.11-3 ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงสะพานของกลุ่ม Span with 2 Overhang



รูปที่ 7.11-4 ค่าความเครียดช่วงสะพานของกลุ่ม Span with 2 Overhang สะพานช่วงที่ 1 และ 2

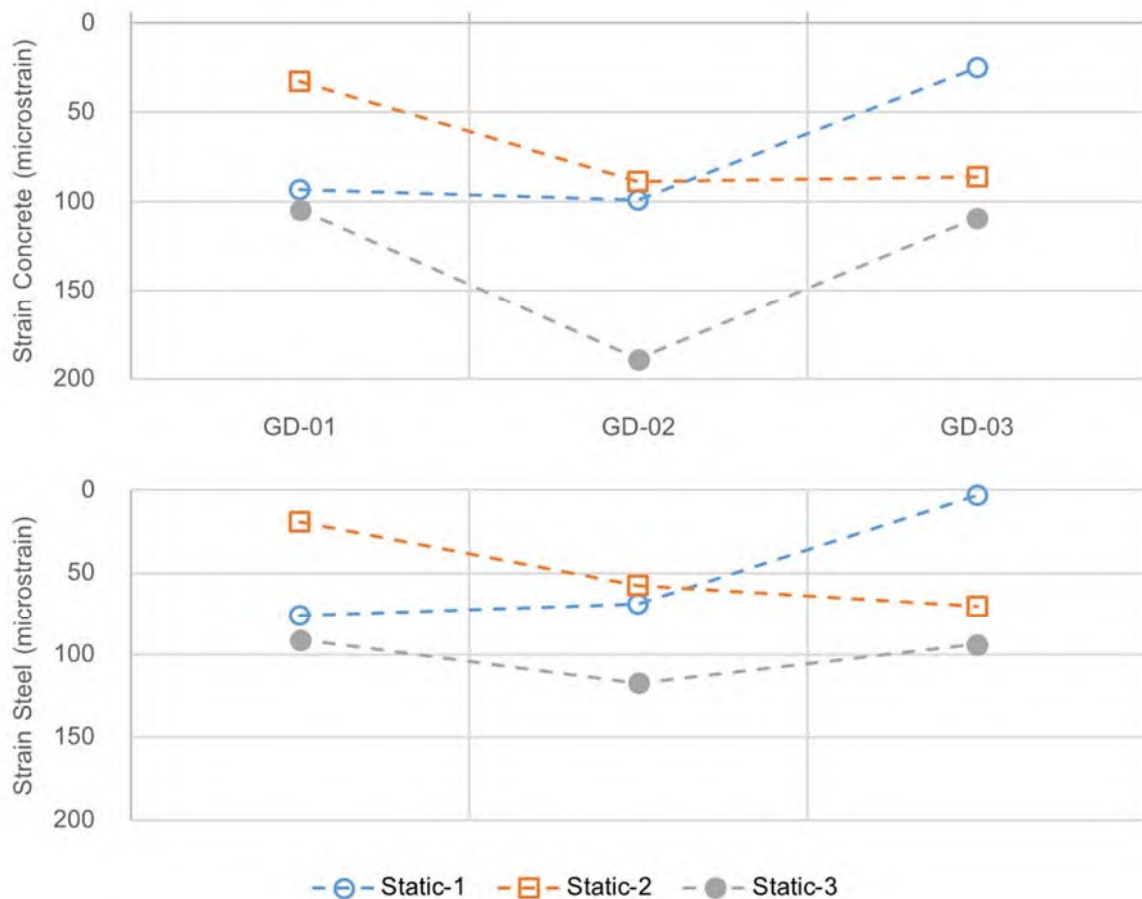


รูปที่ 7.11-5 ค่าความเครียดช่วงสะพานของกลุ่ม Span with 2 Overhang สะพานช่วงที่ 7 และ 8



[7.11.3] Suspended Span on Overhang 1 side (S3)

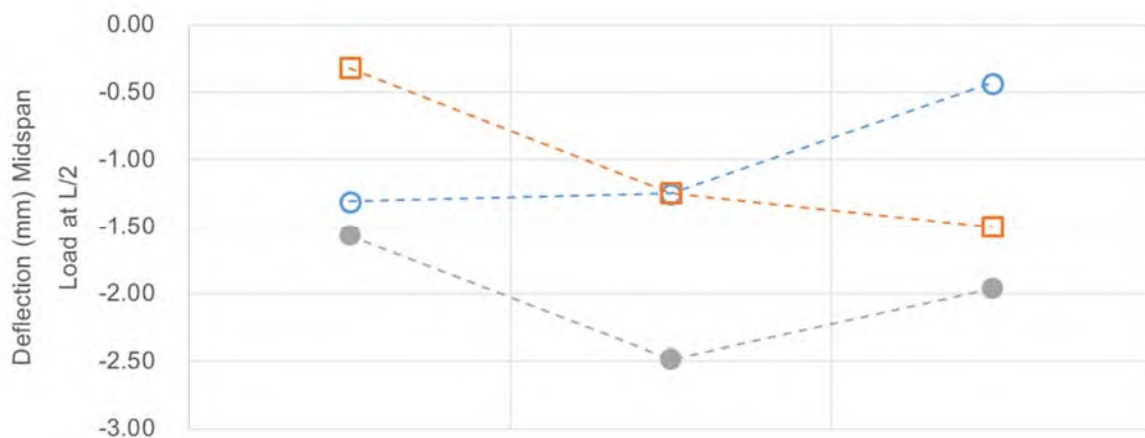
สะพานช่วงที่ 3 (S3) เป็นช่วงข้ามแม่น้ำจึงไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัดค่าการแอ่นตัวได้ รูปที่ 6.17 5 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเครียดที่กึ่งกลางคานด้านซ้ายและคานด้านขวา (GD-01 และ GD-03) ของสะพานกลุ่ม Suspended Span on Overhang 1 side จะเห็นได้ว่าเมื่อรถบรรทุกน้ำหนัก 18 ตัน จอดด้านซ้าย คานด้านซ้าย (GD-01) จะเกิดความเครียดประมาณ 75.8 microStrain หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา คานด้านขวา (GD-03) จะเกิดความเครียดประมาณ 69.9 microStrain หากนำรถบรรทุก 2 คันไปจอด คานด้านซ้ายและด้านขวา (GD-01 และ GD-03) จะเกิดความเครียดประมาณ 90.8 – 93.6 มม. อย่างไรก็ตามการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดในการวัดความเครียดดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสื่อมสภาพและแตกร้าว ค่าที่ตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ดังที่ได้อธิบายไปแล้ว ดังนั้นข้อมูลความเครียดอาจใช้ประกอบดุลพินิจในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 7.11-6 ค่าความเครียดที่กึ่งกลางช่วงสะพาน Suspended Span on Overhang 1 side (S3)

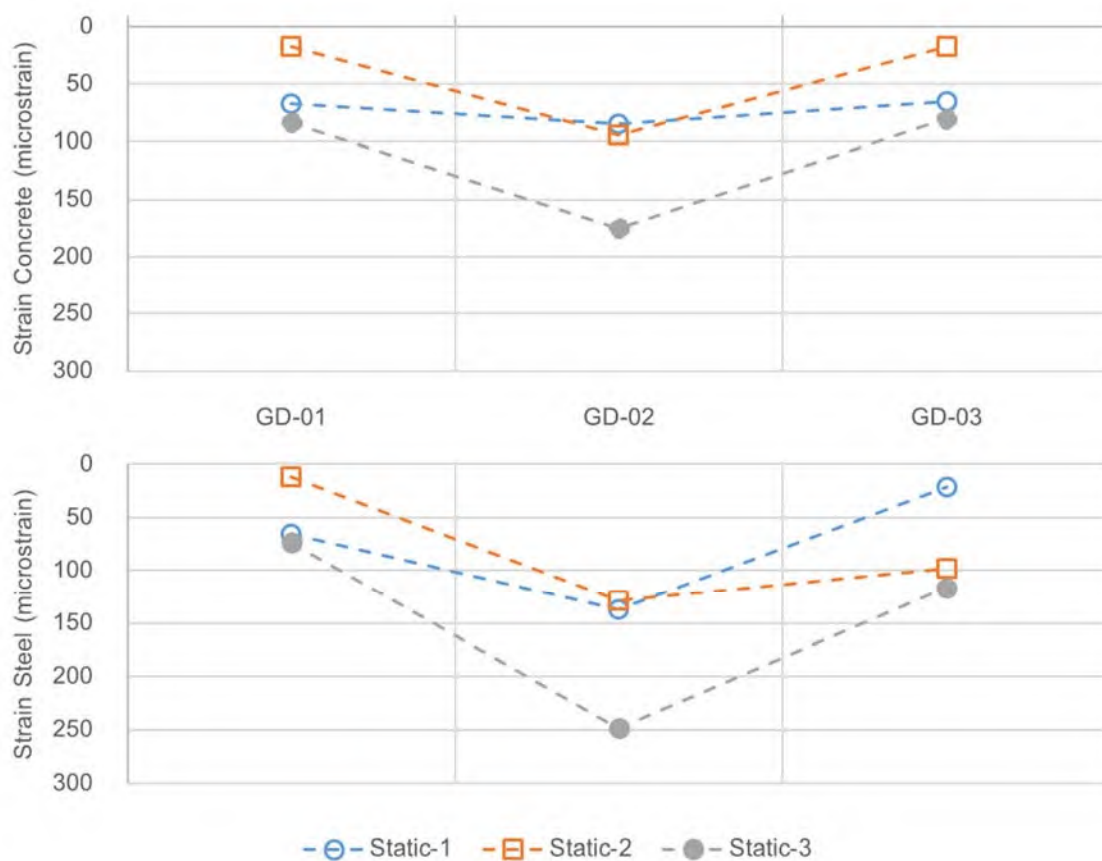
[7.11.1] Suspended Span on Overhang 2 side (S6)

รูปที่ 7.11-7 แสดงผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานด้านซ้ายและคานด้านขวา (GD-01 และ GD-003) ของสะพานกลุ่ม Span with 2 Overhang จะเห็นได้ว่าเมื่อนำรถบรรทุกน้ำหนัก 18 ตัน จอดด้านซ้าย คานด้านซ้าย (GD-01) จะแอ่นตัวประมาณ 1.31 มม. หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา คานด้านขวา (GD-003) จะแอ่นตัวประมาณ 1.5 มม. หากนำรถบรรทุกไปจอดไว้ตรงกลาง คานด้านซ้าย และด้านขวา (GD-01 และ GD-003) จะแอ่นตัวประมาณ 1.56 – 1.96 มม. ส่วนรูปที่ 7.11-8 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเครียดที่กึ่งกลางคานด้านซ้าย คานตรงกลาง และคานด้านขวา (GD-01, GD-02 และ GD-03) ของสะพานกลุ่ม Span with 2 Overhang พฤติกรรมโดยภาพรวมจะสอดคล้องกับการแอ่นตัว ซึ่งเมื่อนำรถบรรทุกไปจอดด้านซ้าย คานด้านซ้ายจะเกิดความเครียดมาก หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา คานด้านขวาก็จะเกิดความเครียดมาก อย่างไรก็ตามการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดในการวัดความเครียดดิ่งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสื่อมสภาพและแตกร้าว ค่าที่ตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ดังที่ได้อธิบายไปแล้ว ดังนั้นข้อมูลความเครียดอาจใช้ประกอบดุลพินิจในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 7.11-7 ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงสะพาน Span with 2 Overhang 2 side (S6)

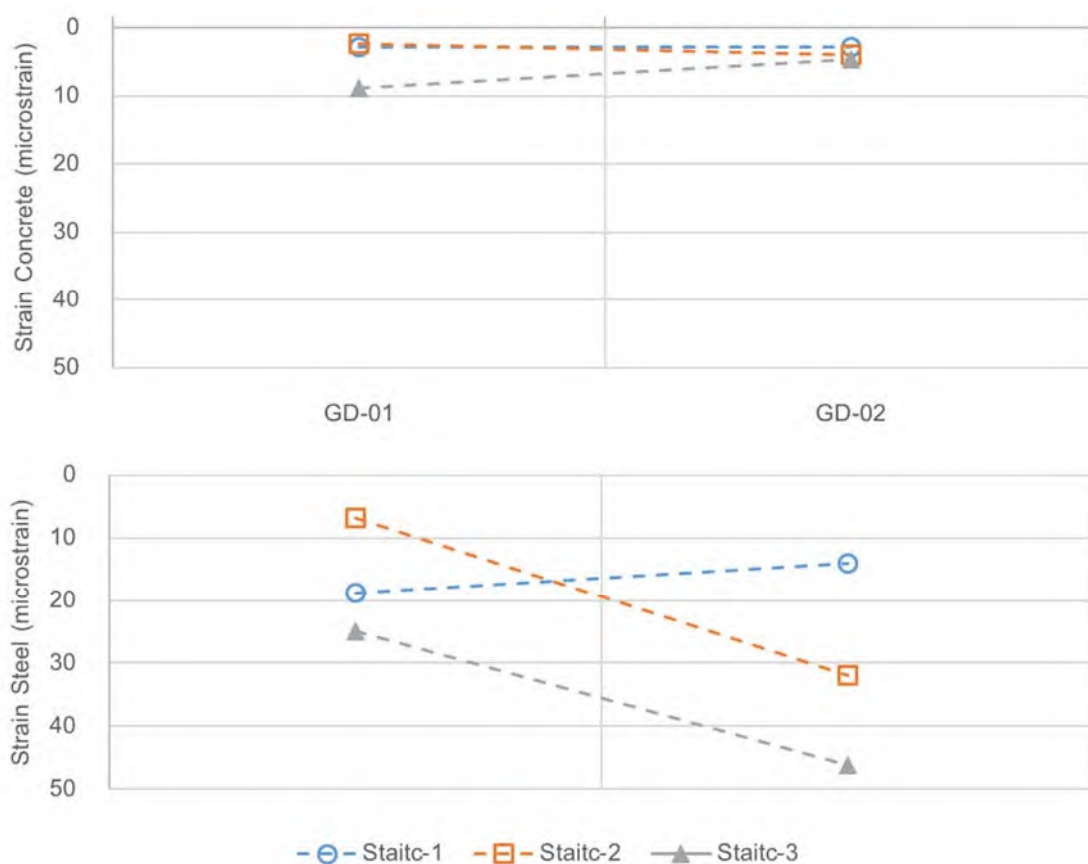




รูปที่ 7.11-8 ค่าความเครียดที่กึ่งกลางช่วงสะพาน Span with 2 Overhang 2 side (S6)

[7.11.2] Arch Span (S4)

รูปที่ 6.17 7 แสดงผลการตรวจวัดค่าความเครียดที่กึ่งกลางคานด้านซ้าย คานตรงกลาง และ คานด้านขวา (GD-01, GD-02 และ GD-03) ของสะพาน Arch Span (ไม่มีการวัดค่าการแอ่นตัว) โดย ภาพรวม มีพฤติกรรม เมื่อนำรถบรรทุกไปจอดด้านซ้าย คานด้านซ้ายจะเกิดความเครียดมาก หากนำรถบรรทุกไปจอดด้านขวา คานด้านขวาก็จะเกิดความเครียดมาก หากนำรถบรรทุก 2 คัน ไปจอด คานด้านซ้ายและคานด้านขวาก็จะรับความเครียดพอๆ กัน อย่างไรก็ตามการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดในการวัดความเครียดดิ่งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสื่อมสภาพและแตกร้าว ค่าที่ตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ดังที่ได้อธิบายไปแล้ว ดังนั้นข้อมูลความเครียดอาจใช้ประกอบดุลพินิจในการวิเคราะห์ต่อไป

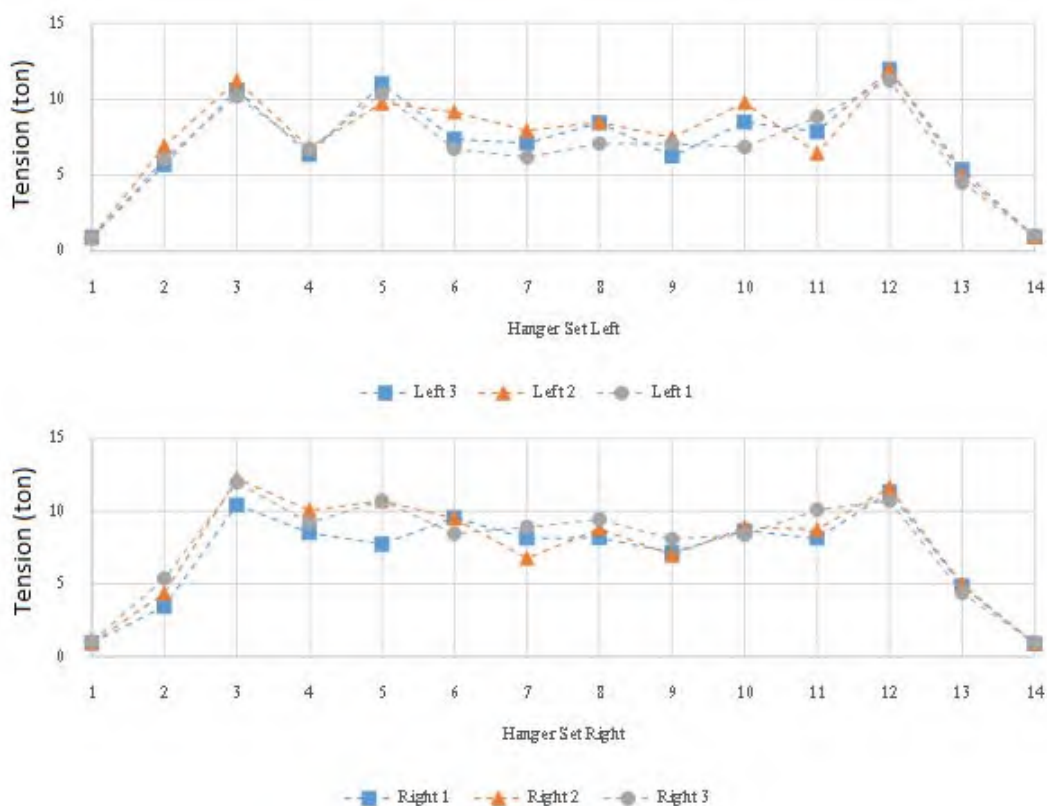


รูปที่ 7.11-9 ค่าความเครียดที่กึ่งกลางช่วงสะพานของกลุ่ม Arch Span (S4)



[7.11.3] ลวดซิง (Hanger)

รูปที่ 7.11-10 แสดงผลการตรวจวัดแรงดึงในลวดซิง (Hanger) ของสะพานกลุ่ม Arch Span โดยลวดซิงจะแบ่งเป็น 2 ฝั่ง คือ ด้านซ้ายและด้านขวา ในแต่ละตำแหน่งของลวดซิงจะมี 3 เส้นย่อย โดยทดสอบในช่วงการจราจรปกติ ลวดซิงฝั่งซ้ายและขวามีแรงดึงไม่แตกต่างกันมาก พฤติกรรมการรับแรงของลวดซิงจะประกอบด้วย 2 หลักการ คือ แรงดึงที่จะทำให้คานหลักแยกออกจากคานโค้ง และการถ่ายแรงภายในโครงถักจากกึ่งกลางคานไปสู่จุดรองรับซึ่งจะทำให้เกิด Tension Cord และ Compression Cord ซึ่งผลรวมของแรงทั้งสองหลักการนี้ทำให้ลวดซิงบางส่วนรับแรงดึงสลับกับบางส่วนรับแรงอัด โดยค่าแรงอัดที่ตรวจวัดได้ คือ ค่าแรงดึงในลวดซิงที่ลดลงเนื่องจากอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกจร หากพิจารณาน้ำหนักบรรทุกคงที่ของสะพานด้วย ผลรวมของแรงในลวดซิงทั้งหมดยังคงอยู่ภายใต้แรงดึง



รูปที่ 7.11-10 แรงดึงในเหล็ก Hanger ของ Arch Span (S4)

ตารางที่ 7-48 แสดงผลการวิเคราะห์พฤติกรรมสะพานแบบพลวัตของแต่ละช่วงสะพาน

ตารางที่ 7-48 ผลการวิเคราะห์การทดสอบแบบพลวัต

Span	Type	L (m)	Avg. Natural Frequency (Hz)	Avg. Damping Ratio (%)
S1&S2	Span with 2 Overhang	28	5.45	2.94
S3	Suspended Span on Overhang 1 side	16	5.60	2.62
S4	Arch Span	63.5	3.91	3.12
S5	Span with 1 Overhang	24	5.37	2.34
S6	Suspended Span on Overhang 2 side	12	5.37	4.28
S7&S8	Span with 2 Overhang	28	6.51	6.41

ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) เป็นค่าจำเพาะของสะพานแต่ละตัว (Unique Characteristic) สะพานอาจถูกก่อสร้างด้วยมาตรฐานเดียวกัน แต่ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานก็อาจแตกต่างกันได้ ค่าความถี่ธรรมชาติอาจถูกนำมาใช้เป็นค่าที่บ่งบอกสติฟเนสในภาพรวม (Global Stiffness) ถ้าโครงสร้างมีสติฟเนสสูง ค่าความถี่ธรรมชาติจะสูงตามไปด้วย สะพานตัวเดียวกันหากสติฟเนสลดลงจากการเสื่อมสภาพ ค่าความถี่ธรรมชาติจะลดลงตามไปด้วย หรือถ้ามีการปรับปรุงให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น (สติฟเนสสูงขึ้น) ค่าความถี่ธรรมชาติก็จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นในแต่ละช่วงอายุสะพาน อาจมีการตรวจสอบค่าความถี่ธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการปรับแก้แบบจำลองสะพานให้มีสติฟเนสในภาพรวมใกล้เคียงกับสะพานจริง ณ ช่วงเวลานั้น เพื่อใช้แบบจำลองที่ปรับแก้แล้วประเมินการกระจายแรงภายในโครงสร้าง ผลการวิเคราะห์ 5 กลุ่มช่วงสะพาน ได้แก่ Span with 1 Overhang, Span with 2 Overhang, Suspended Span on Overhang 1 side, Suspended Span on Overhang 2 side และ Arch Span พบว่ามีค่าเฉลี่ยความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 5.37, 5.98, 5.60, 5.37 และ 3.91 Hz ตามลำดับ

ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) เป็นคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการสลายพลังงานการสั่นไหว ซึ่งเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง โดยทั่วไปหากโครงสร้างมีชิ้นส่วนที่สามารถยับยั้งตัวได้มาก หรือมีส่วนประกอบของวัสดุที่ช่วยสลายพลังงาน หรือมีรอยแตกร้าว ค่าอัตราส่วนความหน่วงก็มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วนความหน่วงโดยทั่วไปเป็นค่าที่ความแปรปรวนค่อนข้างสูง ผลการวิเคราะห์ 5 กลุ่มช่วงสะพาน ได้แก่ Span with 1 Overhang, Span with 2 Overhang, Suspended Span on Overhang 1 side, Suspended Span on Overhang 2 side และ Arch Span พบว่ามีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับร้อยละ 2.34, 4.68, 2.62, 4.28 และ 3.12 ตามลำดับ



[7.12] สรุปผลการทดสอบพฤติกรรมสะพาน

โครงสร้างส่วนบนของสะพานปรีดี-ช้าง สามารถจำแนกได้เป็น 5 กลุ่มช่วงสะพาน ได้แก่ Span with 1 Overhang, Span with 2 Overhang, Suspended Span on Overhang 1 side, Suspended Span on Overhang 2 side และ Arch Span การทดสอบแบบสถิต พบว่า ผลการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวสอดคล้องกับตำแหน่งรถบรรทุกที่กระทำ หากรถบรรทุกจอดด้านซ้าย คานด้านซ้ายจะแอ่นตัวมากกว่าคานด้านขวา หากรถบรรทุกจอดด้านขวา คานด้านขวาจะแอ่นตัวมากกว่าคานด้านซ้าย โดยกลุ่ม Span with 2 Overhang ที่ช่วงสะพาน S7 อ่อนกว่าช่วงสะพาน S2 และคานตัวกลางของช่วงสะพาน S7 มีการแอ่นตัวมากกว่าคานตัวซ้ายและขวา นอกจากนี้ยังพบว่าการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่าการตรวจวัดพฤติกรรมการรับน้ำหนักโดยใช้ค่าความเครียด ทั้งนี้เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดบนผิวคอนกรีตที่แตกร้าวและหรือเสื่อมสภาพมากมีแนวโน้มที่จะให้ผลคลาดเคลื่อน ส่วนผลการทดสอบแบบพลวัต พบว่ากลุ่มช่วงสะพาน Span with 1 Overhang, Span with 2 Overhang, Suspended Span on Overhang 1 side, Suspended Span on Overhang 2 side และ Arch Span พบว่ามีค่าเฉลี่ยความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 5.37, 5.98, 5.60, 5.37 และ 3.91 Hz ตามลำดับ

บทที่ 8 แนวทางการออกแบบบูรณะสะพาน

จากผลการสำรวจภาคสนามเพื่อตรวจสอบและประเมินสภาพการใช้งานของสะพานปรีดี-ช้าง ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา พบว่าสภาพส่วนใหญ่ของสะพานมีความเสียหายจากการเกิดสนิมของเหล็ก จนทำให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตในบริเวณต่างๆ เช่น พื้นสะพาน คานสะพาน ตอม่อสะพาน เป็นต้น

ขั้นตอนการออกแบบบูรณะสะพานจะทำการประเมินความสามารถของชิ้นส่วนโครงสร้างเดิม และคัดเลือกแนวทางบูรณะสะพานที่เหมาะสมตามระดับน้ำหนักรบรรทุกที่ต้องการจะใช้งานในอนาคต โดยมีแนวทางและขั้นตอน ดังนี้

- การจัดทำแบบจำลองสะพานตามแบบก่อสร้าง
- การปรับแก้แบบจำลองของสะพาน
- หลักการออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFD
- ผลการวิเคราะห์หาแรงภายในของสะพาน ภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่างๆ
- การตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างเดิม
- การนำเสนอแนวทางการเสริมกำลังของโครงสร้าง
- การเสริมกำลังชิ้นส่วนของสะพานต่างๆ

[8.1] การจัดทำแบบจำลองของสะพานตามแบบก่อสร้าง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองของสะพานตามแบบก่อสร้างและผลการทดสอบวัสดุโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ดังนี้

[8.1.1] แบบจำลองคณิตศาสตร์ของสะพาน

1) ในการสร้างแบบจำลองของสะพาน Tie Arch

เนื่องจากสะพานประเภท Tie Arch มีพฤติกรรมที่ค่อนข้างซับซ้อน การวิเคราะห์พฤติกรรมของสะพาน ที่ปรึกษาเลือกใช้แบบจำลอง Finite Element Analysis (FEA) โดยระเบียบวิธี Finite Element Analysis เป็นวิธีสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธี Numerical Method และเป็นวิธีเชิงการประมาณ (Approximate Method)

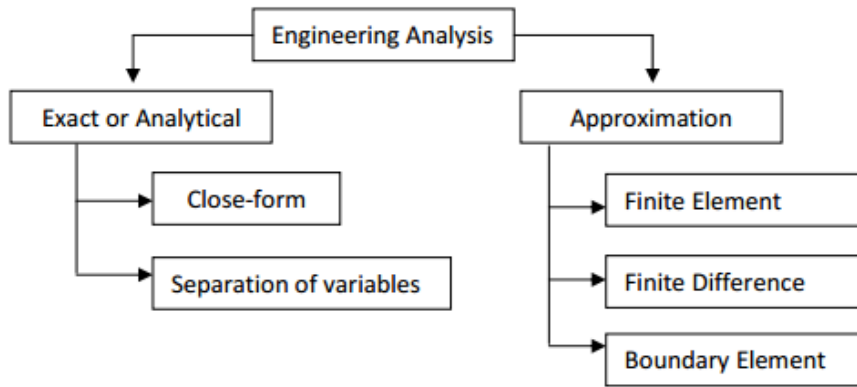
การวิเคราะห์โครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน จะต้องจำลองโครงสร้างในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีรูปร่างและคุณลักษณะต่างๆ ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงมากที่สุด วิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method & Analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าการตอบสนอง และพฤติกรรมของโครงสร้างสะพาน (Bridge Response) ได้หลายลักษณะ เช่น

- การแอ่นตัว (Deflection)
- การบิด (Torsion)
- ความเค้น (Stress)
- การเคลื่อนตัวตามยาวของสะพาน (Longitudinal Displacement)
- ความเร่งที่เกิดจากการสั่นไหว (Acceleration)
- ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน (Natural Frequency)
- รูปร่างการสั่นไหวอิสระ (Mode Shape)

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานซึ่งทำการศึกษาในครั้งนี้ เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบสากล อันได้แก่ มาตรฐานของ American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO, 2007) มาตรฐานการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) และมาตรฐานสากลอื่นๆ อันเป็นที่ยอมรับ โดยกำหนดให้ Design Criteria เป็นไปตามมาตรฐานตามที่กล่าวถึงในข้างต้น

ในการศึกษาจะจำลองโครงสร้างสะพานแบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้รับการยอมรับว่ามีพฤติกรรมใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของสะพานมากที่สุด โดยใช้โปรแกรม อาทิเช่น FEA หรือโปรแกรมอื่นที่มีความเหมาะสม มีความน่าเชื่อถือ และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือที่เรียกย่อๆ ว่า FEM คือเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อมๆ กับสมการปริพันธ์ โดยนิยมใช้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนทางด้านรูปร่าง (Geometry) และปัญหาของ Boundary



รูปที่ 8-1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เป็นการจำลองโครงสร้างที่มีความซับซ้อนด้วยชิ้นส่วนย่อย (Element) ที่มีความซับซ้อนทางเรขาคณิตน้อยกว่า และนำมาประกอบเข้าด้วยกันภายใต้เงื่อนไขความสมดุลทาง Dynamics และความต่อเนื่องของโครงสร้าง โดยแต่ละ Element จะประกอบไปด้วยโหนด (Nodes) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการกำหนดพฤติกรรมของ Element นั้นๆ กล่าวคือการเคลื่อนที่ของจุดต่างๆ ใน Element รวมถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสามารถประมาณได้จากค่าการเคลื่อนที่ของ Nodes ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Finite Element จึงเป็นการคำนวณหาการเคลื่อนที่ของ Nodes ของแต่ละ Elements

สมการความสมดุลทาง Dynamics ของ Nodes ต่างๆ เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic Equation) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P(t)\} \quad (8-1)$$

โดยที่ K = Stiffness Matrix

C = Damping Matrix

M = Mass Matrix

P(t) = เวกเตอร์ของแรงกระทำภายนอกที่ขึ้นกับเวลา (Vector of Applied Loads)

U = เวกเตอร์ของการขจัดของ Node (Nodal Displacement) ตามเวลา

$\dot{U}$ = เวกเตอร์ของการความเร็ว (Velocity) ตามเวลา

$\ddot{U}$ = เวกเตอร์ของการความเร่ง (Acceleration) ตามเวลา

ซึ่งการแก้สมการหาค่า U สามารถทำได้โดยสะดวกด้วยวิธีการทางเมทริกซ์

ในกรณีที่แรงกระทำ P(t) ทำให้โครงสร้างเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ($\ddot{U}=0$ และ $\dot{U}=0$) สมการ (8-1) สามารถเขียนได้เป็น

$$[K]\{U\} = \{P(t)\} \quad (8-2)$$

ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ Statics

หลังจากที่ได้ U การเคลื่อนที่ของ Nodes แล้ว การเคลื่อนที่ของจุดต่างๆ ภายใน Element สามารถคำนวณได้จาก Shape Function ของ Element นั้นๆ ค่าความเครียด (Strain) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเคลื่อนที่ (Strain-Displacement Relationship) และสุดท้ายคำนวณหาความเค้น (Stress) ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดซึ่งแตกต่างกันไปตามประเภทของวัสดุในแต่ละ Element

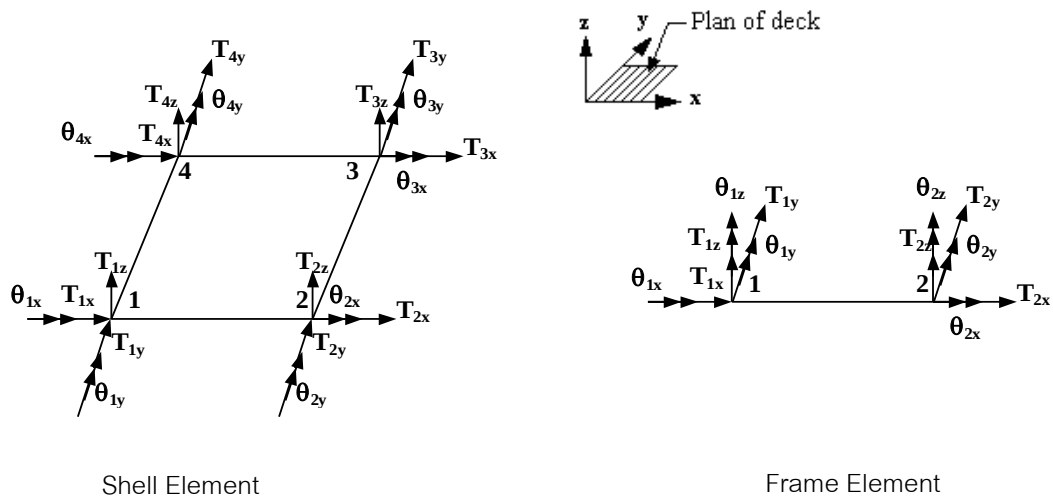
การวิเคราะห์ Finite Element ในโครงการนี้ใช้โปรแกรม FEA ที่สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้ง Statics และ Dynamics มี Element ให้เลือกใช้ได้หลายประเภท และได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานขนาดใหญ่ และสามารถพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้าง (Construction Stage) ในการสร้างแบบจำลองได้อีกด้วย

[8.1.2] แบบจำลอง Finite Element ของสะพาน

การสร้างแบบจำลองโครงสร้างสะพานเบื้องต้นด้วยวิธีโปรแกรม FEA จะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ตามลำดับดังนี้

1) การกำหนดชนิดของ Element ให้เหมาะสมกับสะพานที่ทำการวิเคราะห์

การเลือกใช้ชนิดของ Element นั้นอาจจะเลือกใช้ 1D Element หรือ 2D Element ตามความเหมาะสมกับลักษณะของโครงสร้างจริงที่จะทำการวิเคราะห์ โดยที่ชนิดของชิ้นส่วนจะต้องมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ตัวอย่างเช่น ใช้ Shell Element และ Frame Element สำหรับ Tie Girder หรือ Arch Rib ของสะพาน ใช้ Shell Element สำหรับพื้นสะพาน (Deck) หรือใช้ Frame Element สำหรับ Rigid Link / Bracing Beam ใช้ Cable Element ในการจำลองสายเคเบิล ในการวิเคราะห์จะต้องคำนึงถึงการกระทำของน้ำหนักและการถ่ายแรง ตามความละเอียดของ Element ที่ผู้วิเคราะห์เลือก โดยต้องพิจารณาเป็นแต่ละกรณีไป และได้กำหนดทิศทางโดยให้ X เป็นแกนตามยาวของสะพาน Y เป็นแกนตามแนวขวางของสะพาน และ Z เป็นแกนตามความสูงของสะพาน



รูปที่ 8-2 ตัวอย่างชนิดของ Element

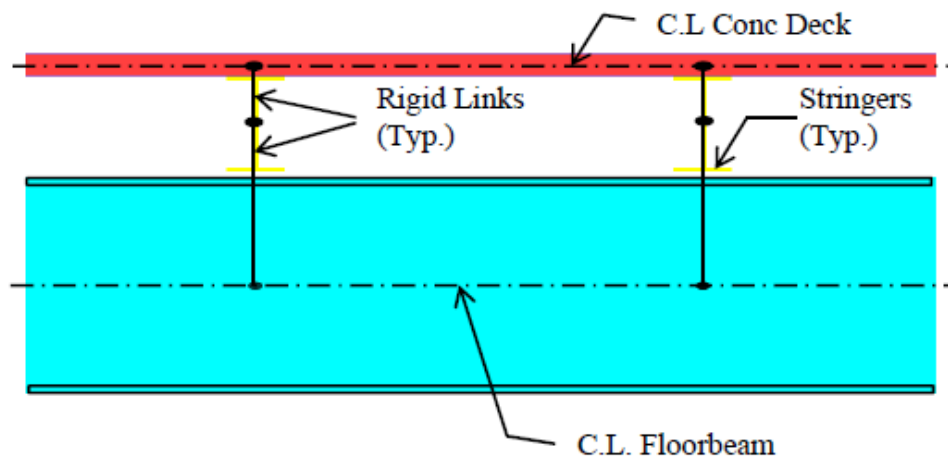
[8.1.3] การแบ่งโครงสร้างสะพานเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ (Discretization)

โครงสร้างสะพานจริงจะถูกแบ่งออกให้เป็นชิ้นส่วนย่อยๆ (Element) โดยแต่ละชิ้นส่วนจะต้องต่อเนื่องกับชิ้นส่วนที่อยู่ข้างเคียงตรงไหน (Node) หรือตามขอบของชิ้นส่วน (Element) ซึ่งเรียกว่าจุดต่อเนื่อง และจะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด กล่าวคือแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมมากที่สุด ตัวอย่างเช่น ในการจำลองส่วนที่รองรับน้ำหนักบรรทุกโดยตรง เช่น แผ่นพื้นต้องจำลองโดยพิจารณาอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของชิ้นส่วนที่เหมาะสม และจำลองขนาดชิ้นส่วน (Meshing) ขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์นั้นมีความถูกต้องแม่นยำ แต่ถ้าแบบจำลองมีจำนวนชิ้นส่วนมากเกินไปก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูงและอาจไม่สามารถทำงานได้ถ้าคอมพิวเตอร์มีข้อจำกัดในเรื่องหน่วยความจำ และการนำเสนอข้อมูล

1) ตัวอย่างแบบจำลอง Finite Element ของสะพาน

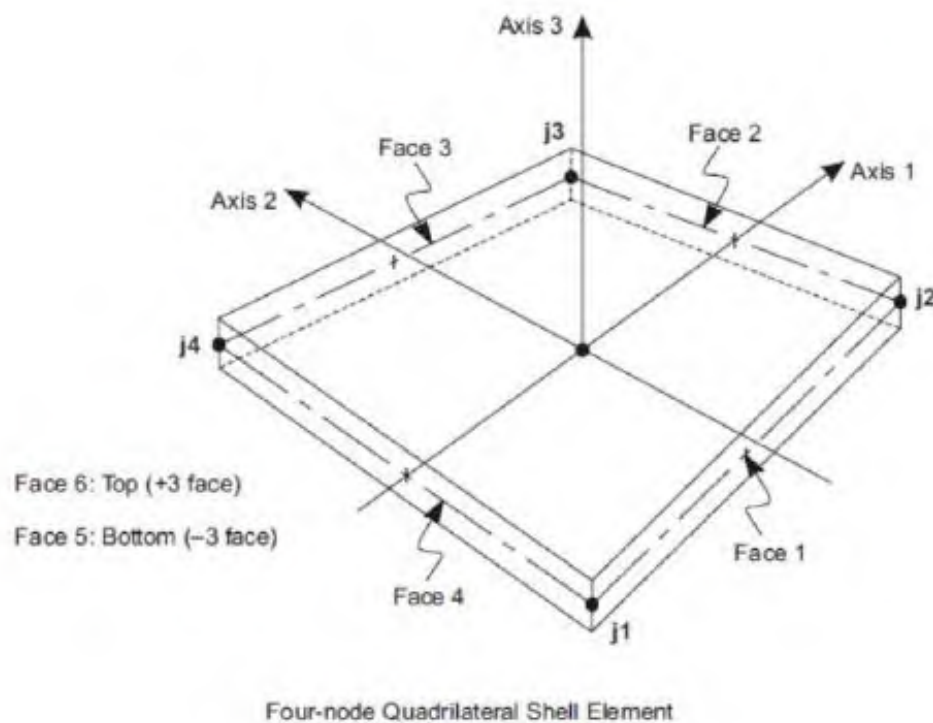
แบบจำลอง Finite Element ของสะพาน ประกอบด้วย Element ประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

- CABLE ELEMENT
- Rigid Link ELEMENT สะพานสำหรับการวิเคราะห์ในระดับ Global Model



รูปที่ 8-3 Rigid Link ELEMENT

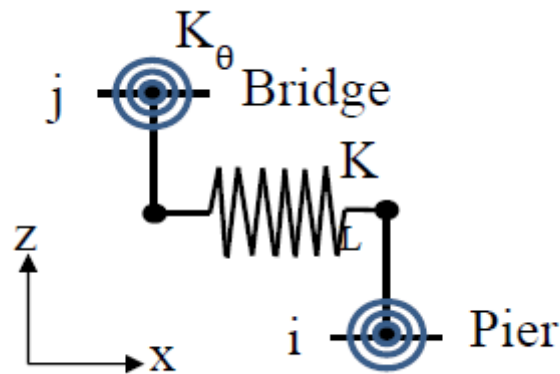
- FRAME ELEMENT จำลอง Tie Girder และ Arch Rib
- Shell Element จำลองส่วนของพื้นของสะพาน



รูปที่ 8-4 Shell Element

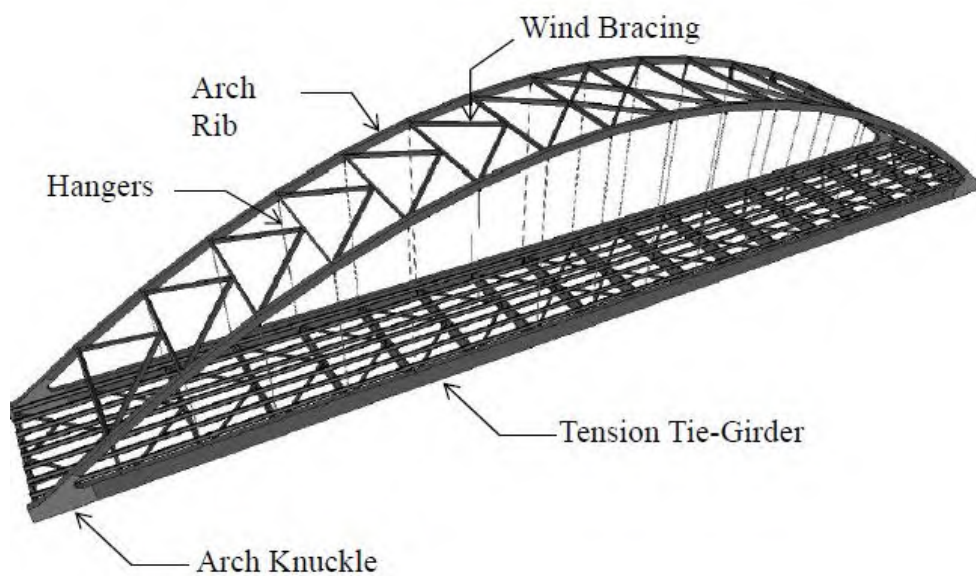


- Spring จำลองพฤติกรรมของ Bearing และ Expansion Joint

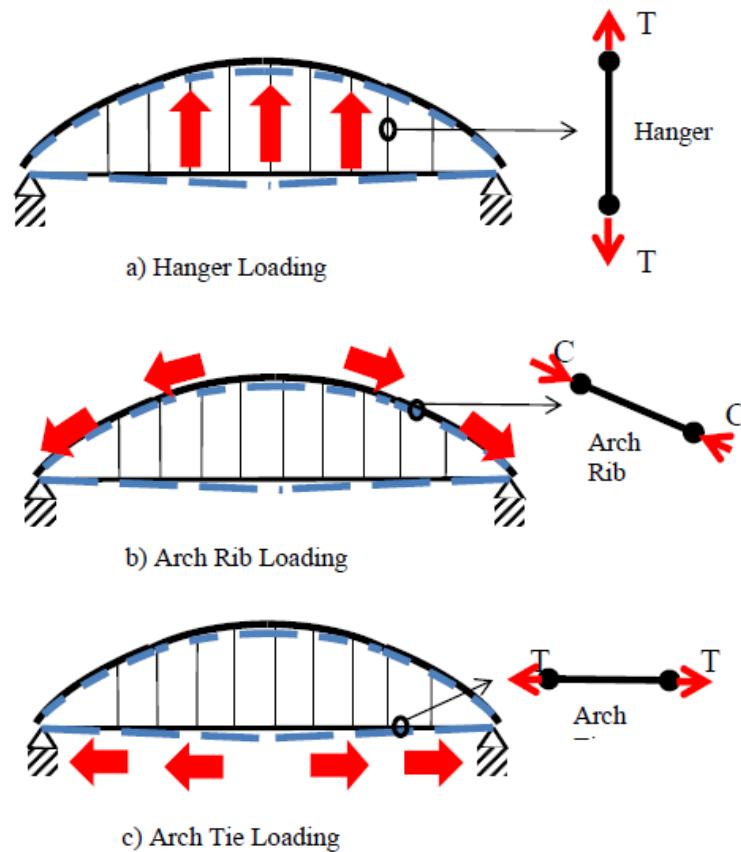


รูปที่ 8-5 Spring Element

โดยในการสร้างแบบจำลองข้างต้น หลักการเลือกประเภทของ Element เพื่อจำลองพฤติกรรมของ Tie Arch Bridge ดังนี้



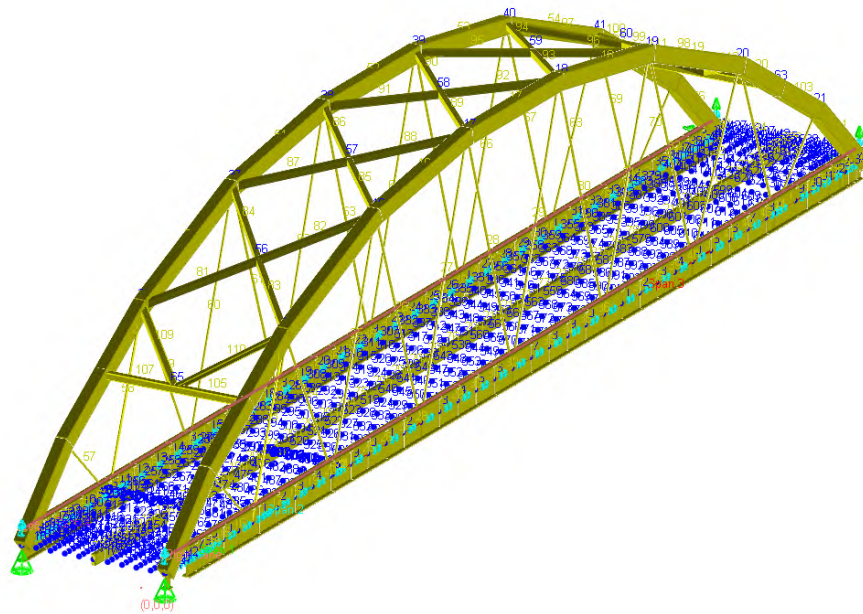
รูปที่ 8-6 ประเภทของ Element เพื่อจำลองพฤติกรรมของ Tie Arch Bridge



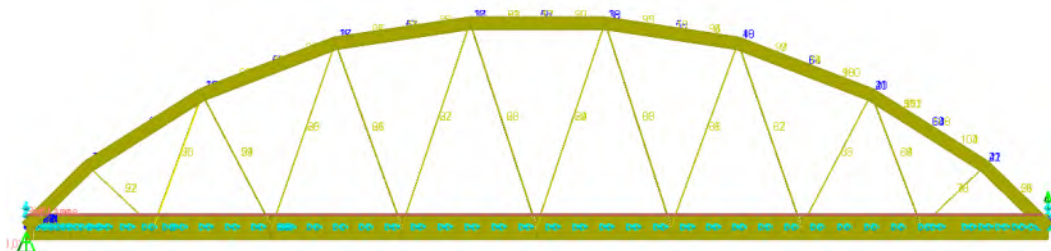
รูปที่ 8-7 การจำลองความสามารถถ่ายแรง ของ Tie Arch Bridge

ในส่วนของ Hangers หรือ Cable ของ Tie Arch จะถูกจำลองให้สามารถรับแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักของพื้นสะพานและผลของแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ส่วนของ Arch Rib จะถูกจำลองให้สามารถถ่ายแรงอัดที่เกิดจากการรองรับแรงดึงจาก Hanger ลงไปยังฐานรองรับ และ Arch Tie ที่เกิดแรงดึงเพื่อเกิดสมดุลย์แรงตามแนวราบ โดยตัวอย่างของแบบจำลองของสะพานแสดงดังนี้

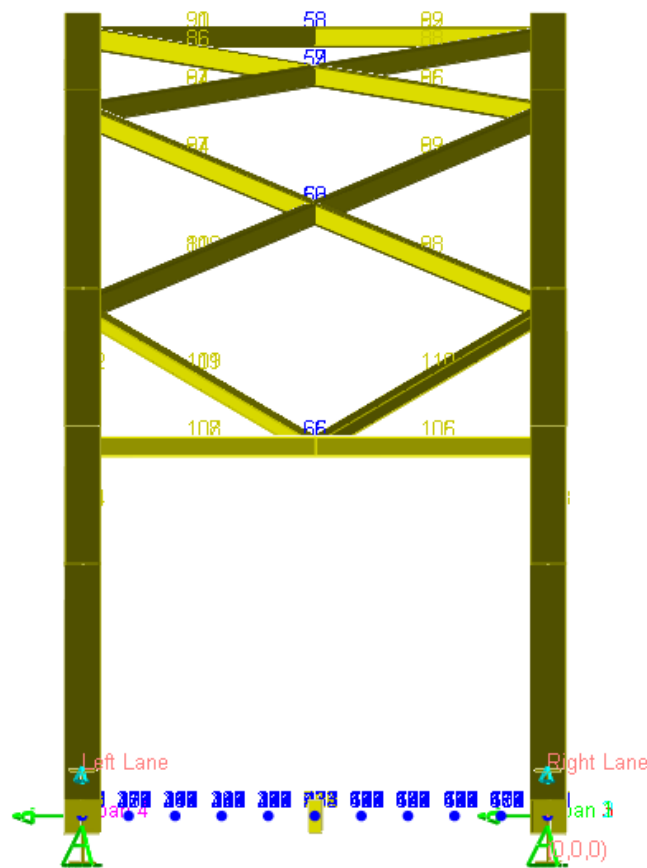




รูปที่ 8-8 แบบจำลองของ สะพานปรีดี-ธำรง (Tied Arch Bridge) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
(Finite Element Model) 3D View

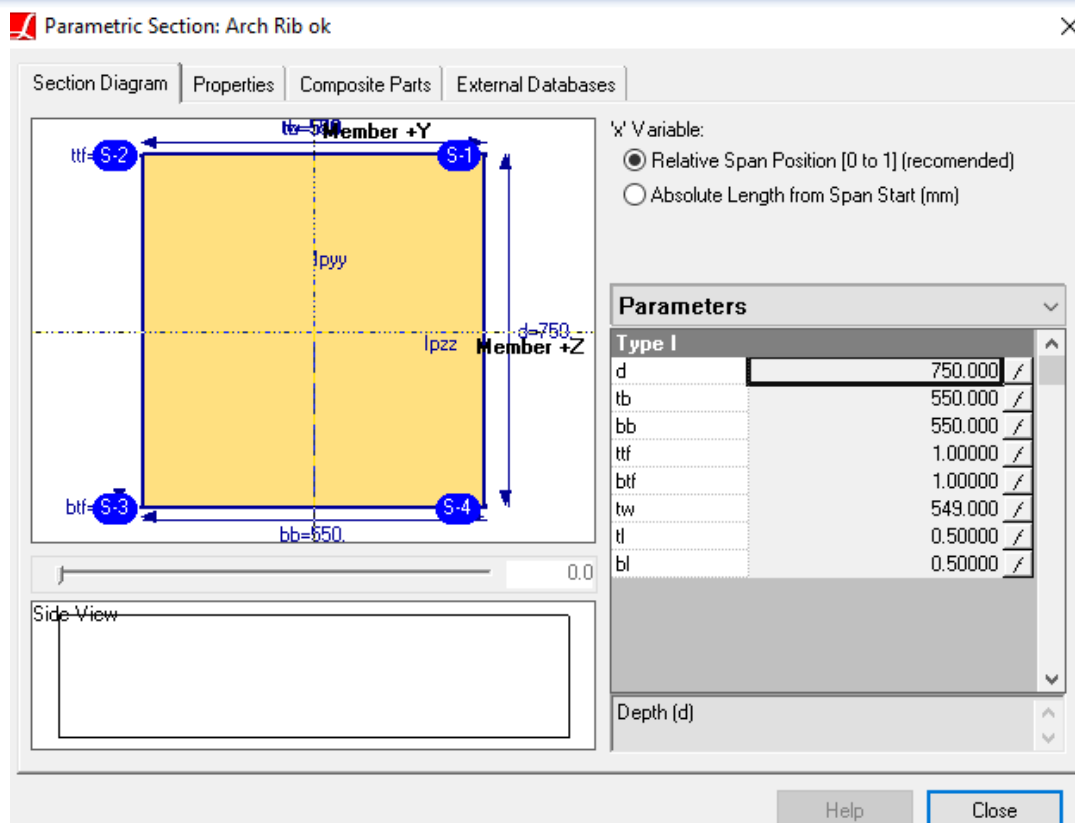


รูปที่ 8-9 แบบจำลองของ สะพานปรีดี-ธำรง (Tied Arch Bridge) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
(Finite Element Model) Elevation View

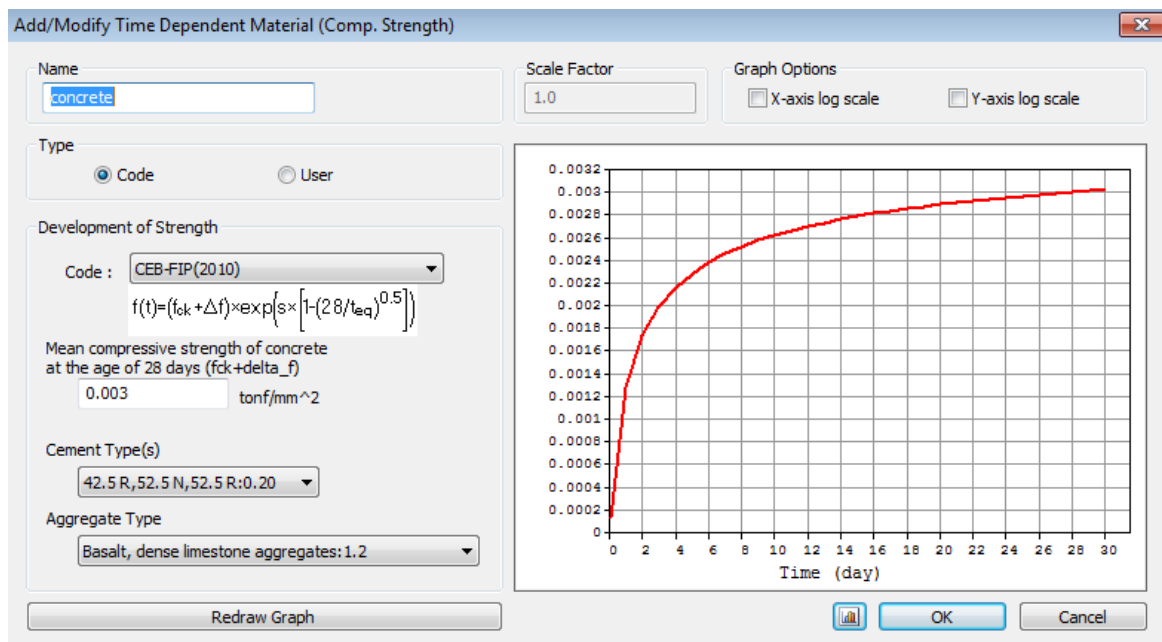


รูปที่ 8-10 แบบจำลองของ สะพานปรีดี-ธำรง (Tied Arch Bridge) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Model) Front View





รูปที่ 8-11 แบบจำลองของ สะพานปรีดี-ธำรง (Tied Arch Bridge) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Model) หน้าตัดของ Arch Rib Example



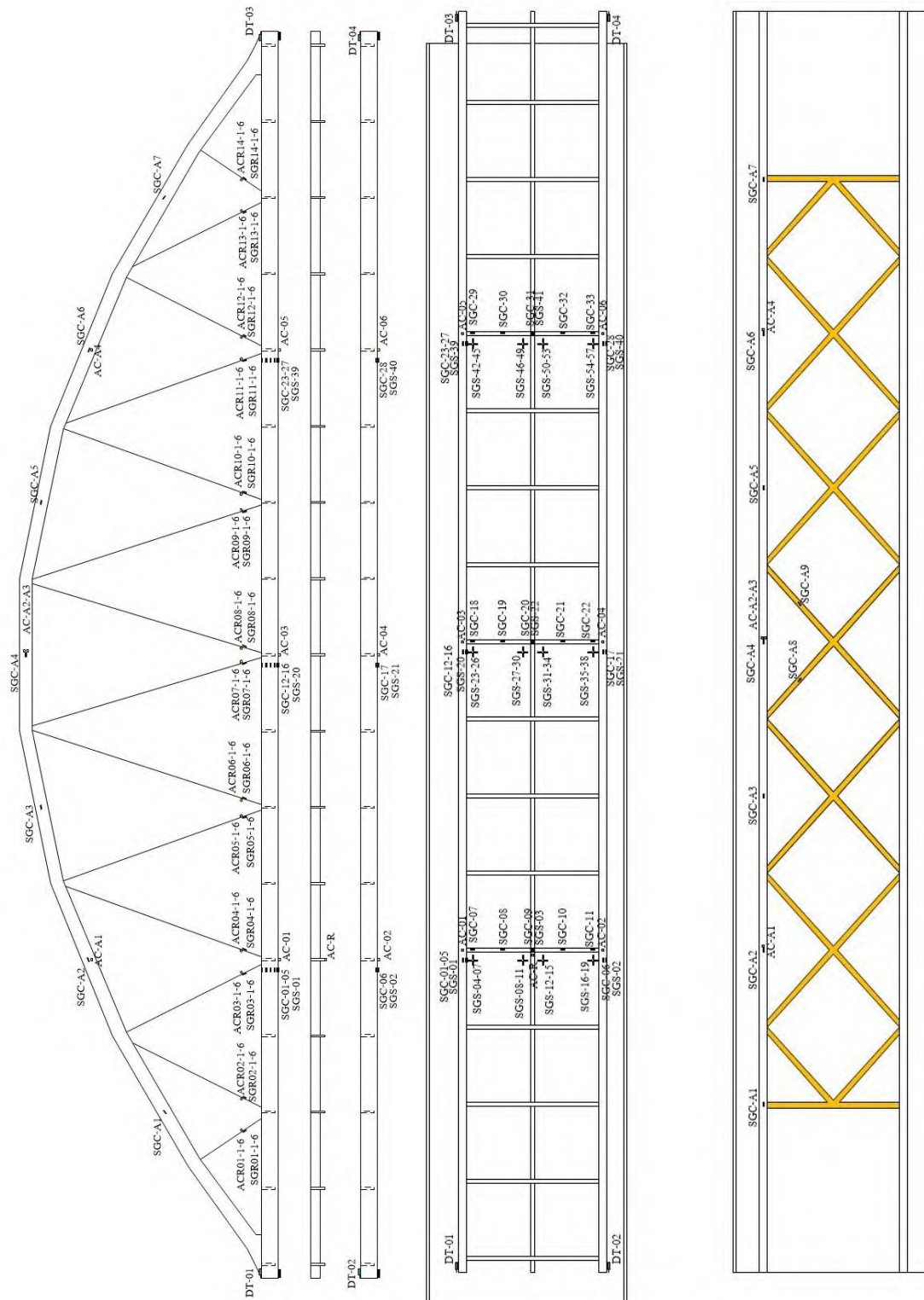
รูปที่ 8-12 แบบจำลองของสะพานในส่วนของวัสดุ Long Term Effect โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Model)

การปรับแก้แบบจำลองของสะพาน

จากแบบจำลองของสะพานข้างต้น เพื่อให้แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับสภาพและพฤติกรรมสะพานในปัจจุบัน ที่ปรึกษาได้ดำเนินการปรับแก้แบบจำลองของสะพานจากข้อมูลการทดสอบในภาคสนาม โดยมีรายละเอียดดังนี้

[8.1.4] การปรับค่าแบบจำลอง โดยอาศัยผลของ Natural Frequency

เพื่อให้การวิเคราะห์ผลเนื่องจากแบบจำลองของสะพานมีความถูกต้อง แบบจำลองตามยาวของสะพานโดยวิธี Finite Element ได้นำมาปรับค่าของ Natural Frequency ให้สอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้ในสะพาน โดยในการปรับค่าของแบบจำลองได้พิจารณา กำลังของวัสดุ ขั้นตอนการก่อสร้าง แบบจำลองของวัสดุเทียบกับเวลา เงื่อนไขของฐานรองรับของแบบจำลอง เป็นต้น ตัวอย่างของตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในการปรับค่าของแบบจำลองแสดงดังนี้



รูปที่ 8-13 ตัวอย่างของตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในการปรับค่าของแบบจำลอง

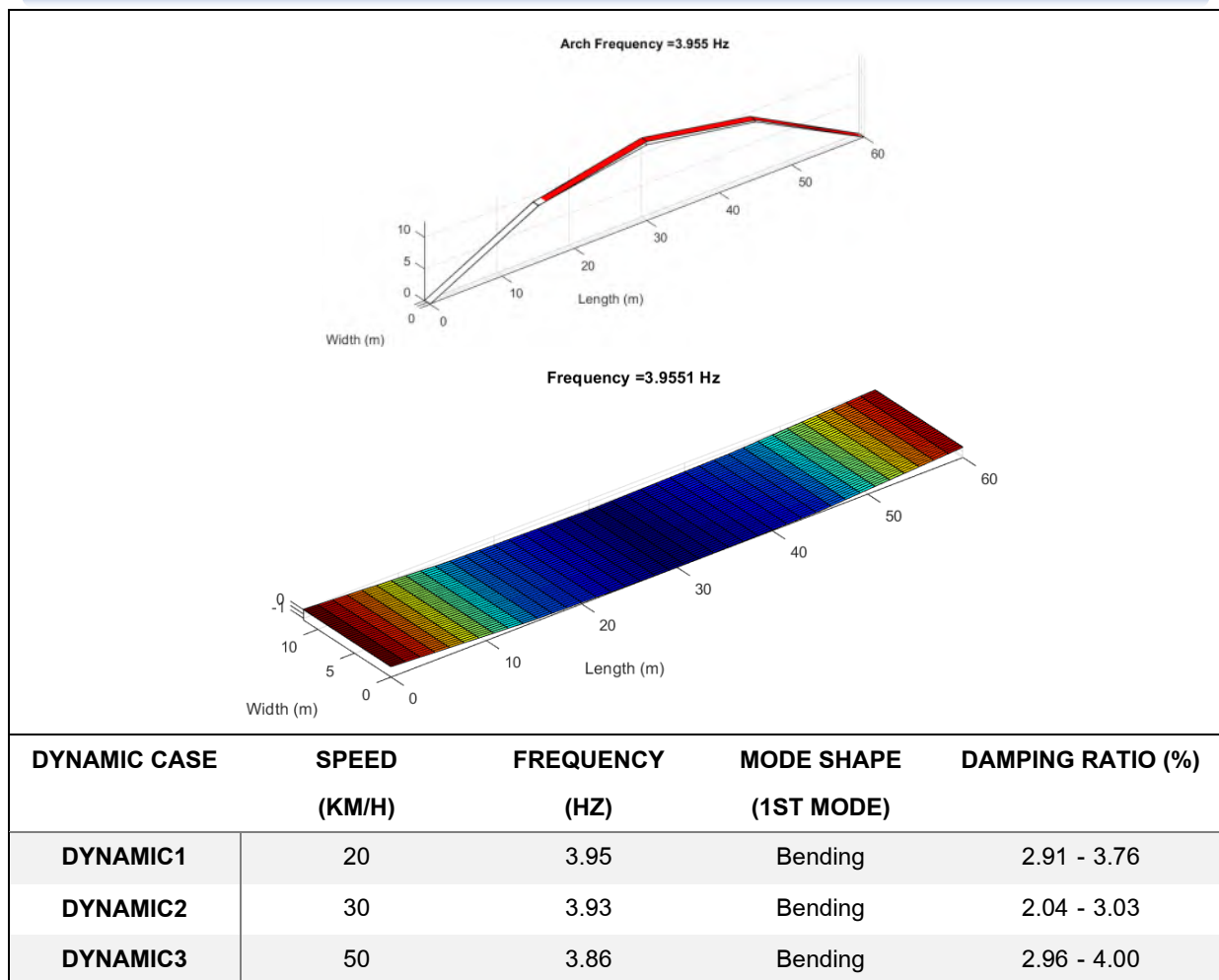
ก่อนการดำเนินการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน ที่ปรึกษาจะต้องดำเนินการวิเคราะห์ผลของขั้นตอนการก่อสร้างโดยใช้ Construction Stage Analysis เพื่อให้ผลของอายุของคอนกรีต ขั้นตอนการติดตั้ง Cable Hanger รวมทั้งลำดับการติดตั้งส่วนของ Tie Girder และการหล่อพื้น RC Deck จนสมบูรณ์เป็นคานสะพาน ได้นำมารวมในแบบจำลอง ซึ่งจะทำให้ในขั้นตอนของการปรับค่าของแบบจำลองดำเนินการได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้น

สำหรับวิธีการในการพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างในแบบจำลองนี้ ที่ปรึกษาเลือกใช้ Nonlinear Construction Stage Analysis ซึ่งลำดับการก่อสร้างที่ใช้ในแบบจำลองแสดงดังนี้

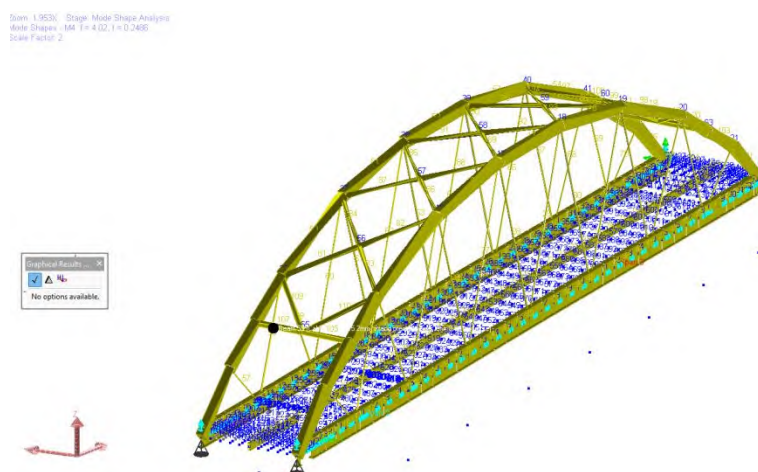
- ก่อสร้างโครงสร้างส่วนล่าง
- หล่อคาน Arch Rib
- ติดตั้งคาน Tie Arch และ คานรองรับพื้นสะพานบน Temporary Falsework
- ทำการติดตั้ง Hanger
- ดำเนินการหล่อพื้นสะพาน
- ติดตั้ง Barrier และ Wearing
- วิเคราะห์สะพานภายหลังการก่อสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่ได้นำมาทดสอบในโครงการนี้

โดยค่า Natural Frequency โหมดที่ 1 ที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบพลวัต (Dynamic Load Test) มีค่าอยู่ในช่วง 3.86 ถึง 3.95 Hz และมีรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) เป็นแบบการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical Translation in z direction) ที่ปรึกษาได้วิเคราะห์แบบจำลองของสะพาน โดยพิจารณาผลของขั้นตอนการก่อสร้าง ผลของอายุของคอนกรีต และเวลาของสะพาน ณ ปัจจุบัน หลังการก่อสร้าง และดำเนินการวิเคราะห์ Eigenvalue และ Eigenvector ของสะพาน ณ เวลานั้น เพื่อหาค่าของ Natural Frequency และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยได้ดำเนินการปรับค่าของวัสดุ และ Boundary Condition ของสะพาน เพื่อให้ได้ค่า Natural Frequency โหมดที่ 1 ใกล้เคียงกับค่าที่ทดสอบได้ โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ของสะพาน ทำนายค่า Natural Frequency โหมด 1 เท่ากับ 4.02 Hz และมีรูปร่างการสั่นไหวเหมือนกับผลทดสอบ ส่วนโหมดอื่น ๆ สามารถใช้แบบจำลองทำนายได้

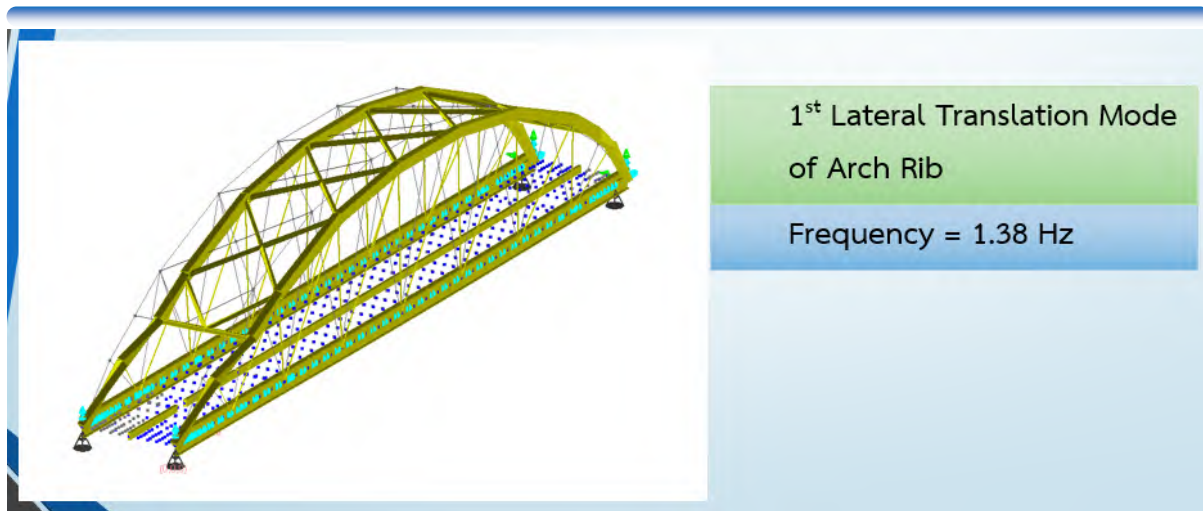
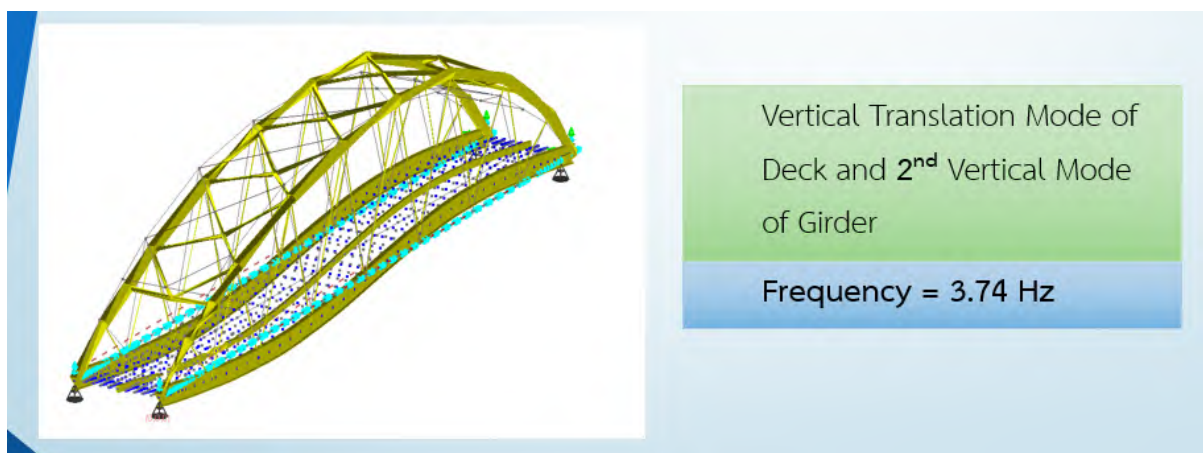
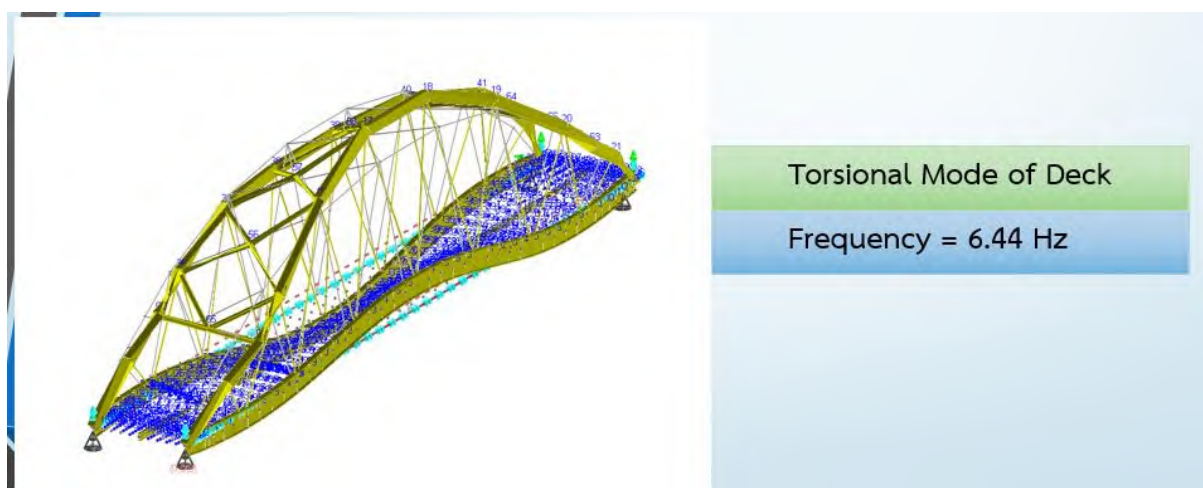




รูปที่ 8-14 ผลการวิเคราะห์ Natural Frequency, Mode Shape และ Damping Ratio
สะพานช่วงที่ 4 (ผลทดสอบภาคสนาม)



รูปที่ 8-15 Mode Shape ที่ 1 ของแบบจำลองของ สะพานปรีดี ช้าง (Tied Arch Bridge) โดย
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) Natural Frequency = 4.02 Hz (3D View)
(Bending Mode of Deck)



รูปที่ 8-16 Mode Shape อื่น ๆ ของแบบจำลองของ สะพานปรีดี ธำรง (Tied Arch Bridge) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model)

หลักการออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

หลังจากได้ปรับค่าแบบจำลองสะพานให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับผลทดสอบสะพานที่ได้ตรวจวัดเรียบร้อยแล้ว ที่ปรึกษาจะนำแบบจำลองสะพานที่ปรับแก้แล้ว ไปดำเนินการวิเคราะห์หาแรงและตรวจสอบกำลังของสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กำหนดในโครงการนี้ โดยขั้นตอนการวิเคราะห์และตรวจสอบกำลังจะพิจารณาจากหลักการออกแบบสะพานตามมาตรฐาน AASHTO LRFD แสดงดังนี้

การออกแบบโครงสร้างสะพานจะยึดตามมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specifications เป็นหลัก ยกเว้นในกรณีที่ต้องการขยายโครงสร้างเดิม โดยวิธีการต่อเชื่อมโครงสร้าง ก็จะทำการออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐานและขนาดน้ำหนักตามโครงสร้างเดิม ส่วนการออกแบบอาคารจะใช้มาตรฐานการออกแบบของประเทศสหรัฐอเมริกาและไทย โดยมาตรฐานการออกแบบที่ใช้สำหรับโครงการมีดังต่อไปนี้

[8.1.5] มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างสะพาน

AASHTO 2010	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 5 th Edition
AASHTO 2003	Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges, 2 nd Edition, with 2003 Interim Revisions
ASBI 2005	Construction Practices Handbook for Segmental Concrete Bridges

[8.1.6] มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็ก

AISC 316-89	Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design, 9 th Edition
AISC 2003	Manual of Steel Construction: Load and Resistant Factor Design, 3rd Edition
AISC 1985	Allowable Stressed Design Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts
AWS D1.1-08	Structural Welding Code – Steel

[8.1.7] มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต

ACI318M-08	Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Appendix C. adopted)
CEB-FIP 90	Model Code 1990, Design Code
ACI SP-66	ACI Detailing Manual 2004
PCI 2004	PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete, 6th Edition



[8.1.8] มาตรฐานการออกแบบสำหรับประเทศไทย

วสท.	มาตรฐานต่างๆ ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
มยผ.1302-52	มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย)
มยผ.1311-50	มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร (กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย)

ประกาศผู้อำนวยการทางหลวงพิเศษ ผู้อำนวยการทางหลวงแผ่นดินและผู้อำนวยการทางหลวงสัมปทาน เรื่องห้ามใช้ยานพาหนะที่มีน้ำหนัก น้ำหนักบรรทุก หรือน้ำหนักลงเพลากินกว่าที่ได้กำหนด หรือโดยที่ยานพาหนะนั้นอาจทำให้ทางหลวงเสียหาย เกินบนทางหลวงพิเศษ ทางหลวงแผ่นดินและทางหลวงสัมปทาน

[8.2] แรงกระทำต่อโครงสร้าง

โครงสร้างสะพานจะต้องสามารถรับแรงต่างๆ ที่มากระทำตามข้อกำหนดที่ระบุใน AASHTO LRFD Bridge Specifications ได้ โดยมีแรงกระทำต่างๆ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

[8.2.1] น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)

น้ำหนักบรรทุกคงที่ประกอบด้วย น้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้าง รวมถึงน้ำหนักผิวจราจร ทางเท้า ท่อ หรือท่อร้อยสาย และสาธารณูปโภคอื่นๆ ที่เกาะติดกับโครงสร้างนั้น น้ำหนักต่อหน่วยกำหนดไว้ดังนี้

ตารางที่ 8-1 น้ำหนักบรรทุกคงที่

ชนิดน้ำหนัก	น้ำหนักต่อหน่วย (ตัน/ลบ.ม)
คอนกรีตเสริมเหล็ก	2.40
เหล็ก ยกเว้นเหล็กหล่อ	7.85
เหล็กหล่อ	7.20
ดิน ทราย และกรวด บดอัด	2.00
ดิน ทราย และกรวด หลวม	1.60

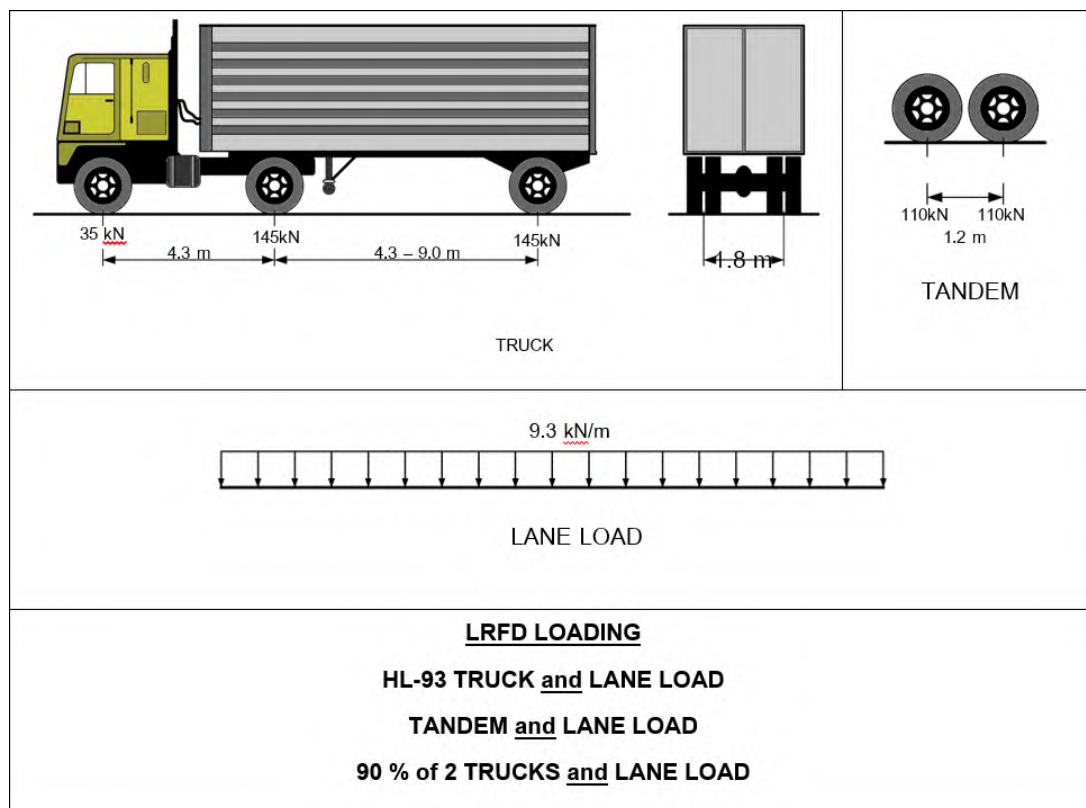
[8.2.2] น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

น้ำหนักบรรทุกจร ได้แก่ น้ำหนักของยานพาหนะที่สัญจรบนสะพานหรือทางลอด ประกอบไปด้วยรถบรรทุก รถโดยสาร รถยนต์ส่วนบุคคล น้ำหนักสมทบและน้ำหนักอื่น ๆ

น้ำหนักสำหรับรถบรรทุกต่อช่องจราจรใช้น้ำหนัก HL-93 ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD แสดงในรูปที่ 8-17 ซึ่งเป็นการรวมน้ำหนักบรรทุกขนาด 325 kN และ Lane Load 9.3 kN/m เข้าด้วยกัน นอกจากนั้นในกรณีช่วงสะพานสั้นๆ จะต้องพิจารณาผลเนื่องจากน้ำหนัก Tandem ซึ่งประกอบด้วยเพลาคู่ขนาด 110 kN ระยะห่าง 1.2 เมตร น้ำหนักบรรทุกและน้ำหนัก Tandem มีระยะห่างของล้อในแนวขวางเท่ากับ 1.8 เมตร ส่วน Lane Load นั้นมีความกว้างเท่ากับ 3.0 เมตร

น้ำหนักจรสำหรับออกแบบทางเดินเท้าบนสะพานใช้น้ำหนัก 0.5 ตัน/ตรม. ตามกฎกระทรวงของประเทศไทย แทนน้ำหนัก 0.415 ตัน/ตร.ม. ซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน AASHTO LRFD

น้ำหนักสมทบ (Surcharge Load) ที่กระทำต่อฐานรากเนื่องจากรถบรรทุกหรือรถไฟ จะต้องนำมาพิจารณาด้วย โดยแรงกระทำบนฐานรากเท่ากับ 1.0 และ 5.0 ตัน/ตร.ม. สำหรับรถบรรทุกและรถไฟตามลำดับ



รูปที่ 8-17 น้ำหนักบรรทุก HL-93 ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD

นอกจากน้ำหนักบรรทุก HL-93 ที่ระบุในมาตรฐานการออกแบบ AASHTO แล้ว ในโครงการนี้ได้กำหนดให้ตรวจสอบผลจากน้ำหนักบรรทุกจร ที่เกิดจาก

- ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น
- ยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป

ซึ่งการวิเคราะห์ที่ปรึกษาจะพิจารณา 2 กรณี คือ วิ่งเดี่ยว และ วิ่งเป็นขบวน

ตัวอย่างของยานพาหนะแต่ละประเภทแสดงดังนี้

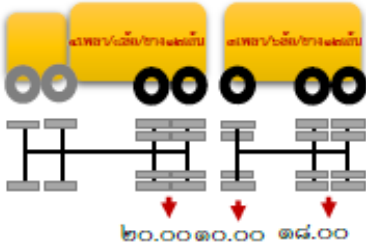
หมวดที่ ๑ ส่วนที่ ๑ ยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (SINGLE UNIT)				
ข้อที่	ชนิดยานพาหนะ	พิกัดน้ำหนัก รวมน้ำหนัก บรรทุก	รูปยานพาหนะ	ประกาศ ฉบับที่/ พ.ศ.
๕	ยานพาหนะที่มี ๒ เพลา ๔ ล้อ ยาง ๔ เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาที่ ๒) ใช้ยางเดี่ยว ต้องมีน้ำหนักลงเพลาท้าย (เพลาที่ ๒) ไม่เกิน ๗,๐๐๐ กิโลกรัม หรือน้ำหนัก ยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน ๙,๕๐๐ กิโลกรัม	๙,๕๐๐ ตัน		๑/๔๘

รูปที่ 8-18 ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น



รูปที่ 8-19 ตัวอย่างยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น



หมวดที่ ๑ ส่วนที่ ๓ ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (FULL TRAILER)				
ข้อที่	ชนิดยานพาหนะ	พิกัดน้ำหนัก รวมน้ำหนัก บรรทุก	รูปยานพาหนะ	ประกาศ ฉบับที่/ พ.ศ.
๑๔/๒	ยานพาหนะชนิดรถลากจูงและรถพ่วง (FULL TRAILER) ประเภทตัวรถลากจูงมี ๔ เพลา ๘ ล้อ ยาง ๑๒ เส้น ชนิดเพลาหน้า (เพลาที่ ๑ และเพลาที่ ๒) เป็นเพลาเดี่ยวใช้ยางเดี่ยว และเพลาท้าย (เพลาที่ ๓ และเพลาที่ ๔) เป็นเพลาคู่ (TANDEM AXLE) ใช้ยางคู่ และตัวรถพ่วงมี ๓ เพลา ๖ ล้อ ยาง ๑๒ เส้น ชนิดเพลาหน้าใช้ยางคู่ เพลาท้าย (เพลาที่ ๒ และเพลาที่ ๓) เป็นเพลาคู่ (TANDEM AXLE) ใช้ยางคู่ ตัวรถลากจูงต้องมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้ายไม่เกิน ๒๐,๐๐๐ กิโลกรัม หรือมีน้ำหนักยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน ๓๐,๐๐๐ กิโลกรัม ตัวรถพ่วงต้องมีน้ำหนักลงเพลาหน้าไม่เกิน ๑๐,๐๐๐ กิโลกรัม หรือมีน้ำหนักลงเพลาคู่ท้ายไม่เกิน ๑๘,๐๐๐ กิโลกรัม ตัวรถพ่วงเมื่อนำมาต่อพ่วงกับตัวรถลากจูงต้องมีระยะห่างระหว่างกึ่งกลางเพลาคู่ท้ายของรถลากจูงถึงกึ่งกลางเพลาคู่ท้ายของรถพ่วงไม่น้อยกว่า ๔.๗๕ เมตร	๕๐.๕๐ ตัน		๒/๕๒

รูปที่ 8-20 ยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป

[8.2.4] แรงกระแทก (Dynamic Load Allowance)

แรงเค้นอันเกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรคิดเฉพาะผลของรถบรรทุก Truck Load และ Fatigue Truck ไม่รวม Lane Load และน้ำหนักจรจากคนเดิน จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระแทก การสั่นสะเทือน และการเคลื่อนที่ตามโครงสร้าง สามารถคำนวณได้จาก $1 + IM/100$ สำหรับโครงสร้างเหนือพื้นดิน

ตารางที่ 8-3 แรงกระแทก

Components	Impact Factor (IM)
Deck Joint (All Limit State)	75 %
All Other Component	
Fatigue	15 %
All Other Cases	33 %

โครงสร้างฐานรากที่อยู่ใต้ดินและกำแพงกันดินที่ไม่ได้รับน้ำหนักโดยตรงจากพื้นสะพาน ไม่ต้องคิดเนื่องจากแรงกระแทก สำหรับส่วนของโครงสร้างใต้ดิน เช่น Box Culvert ตาม AASHTO LRFD นั้นจะต้องคิดแรงกระแทกเช่นเดียวกัน โดยมีปัจจัยสำคัญในการใช้คำนวณ ได้แก่ ความลึกส่วนโครงสร้างดังกล่าว สามารถคำนวณได้จาก

$$IM = 33 (1.0 - 4.1 \times 10^{-4} D_E) \geq 0\% \quad (8-3)$$

โดย D_E คือ ความสูงของดินถมที่อยู่เหนือโครงสร้างเป็นมิลลิเมตร

[8.2.5] แรงเนื่องจากการเบรค (Breaking Force)

การออกแบบจะพิจารณาให้โครงสร้างสามารถรับแรงตามทิศทางการเคลื่อนตัวของน้ำหนักบรรทุกจรโดยไม่รวมแรงกระแทก กระทำที่ความสูง 1.80 เมตร จากพื้นผิวจราจร และให้แรงดังกล่าวสามารถกระทำผ่านจากโครงสร้างส่วนบนไปยังโครงสร้างส่วนล่าง คำนวณตามจำนวนช่องจราจร โดยคิดผลของการเพิ่มและลดของน้ำหนักบรรทุกจรด้วย สามารถคำนวณได้จาก

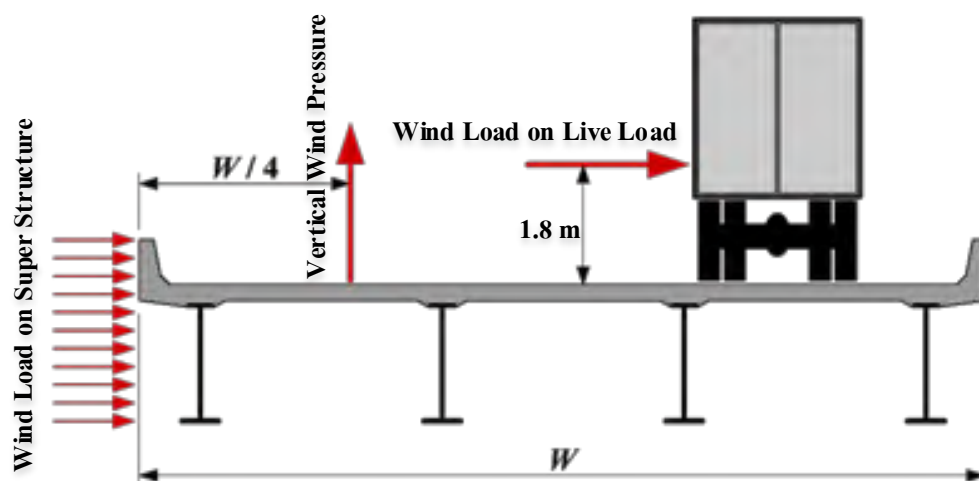
- ร้อยละ 25 ของน้ำหนักเฉพาะรถบรรทุกหรือ Tandem
- ร้อยละ 5 ของน้ำหนักรถบรรทุกและ Lane Load
- ร้อยละ 5 ของ Tandem และ Lane Load

[8.2.6] แรงลมที่กระทำบนโครงสร้าง (Wind Load on Structure)

แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างในการออกแบบจะอ้างอิงความเร็วลมพื้นฐาน (Base Design Wind Velocity, V_B) ที่ 160 กม. / ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ซึ่งแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างจะกระจายบนพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางลมดังแสดงในรูปที่ 8-22 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนบน (Wind Load on Superstructure) ใช้ค่าตามตารางที่แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 8-4 แรงลมที่กระทำบนโครงสร้าง

Skew Angle of Wind (องศา)	Transverse Load (กก./ตร.ม.)	Longitudinal Load (กก./ตร.ม.)
0	240	0
15	210	30
30	200	60
45	160	80
60	80	90



รูปที่ 8-22 แรงลมต่าง ๆ ที่กระทำต่อโครงสร้างและยานพาหนะ

- สำหรับโครงสร้างส่วนล่าง (Wind Load on Substructure) นั้นให้ใช้แรงลมขนาด 190 กก./ตร.ม. กระทำลงบนพื้นที่ตั้งฉากพร้อมกับแรงลมที่กระทำบนโครงสร้างส่วนบน
- ในกรณีแรงลมตั้งฉาก (Vertical Wind Pressure) ให้ใช้ขนาดแรงลม 96 กก./ตร.ม. คูณความกว้างของทั้งหมดของสะพานเป็นแรงลัพธ์ในทิศทางยกขึ้นกระทำที่ตำแหน่ง $\frac{1}{4}$ ของความกว้างสะพาน
- อนึ่งแรงลมที่กล่าวมานั้นมีค่ามากกว่าแรงลมตามกฎกระทรวง จึงสามารถนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างสะพานได้อย่างไม่มีปัญหา

[8.2.7] แรงลมที่กระทำต่อยานพาหนะ (Wind Load on Live Load)

แรงลมที่กระทำต่อยานพาหนะนั้นสามารถถ่ายแรงลงบนโครงสร้างสะพานได้ โดยใช้แรงลม 146 กก./เมตร กระทำตั้งฉากกับทิศทางของยานพาหนะที่ระยะ 1.80 เมตร สูงจากผิวจราจร ดังแสดงในรูปที่ 8-22 แรงลมดังกล่าวสามารถใช้ค่าตามตารางที่แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 8-5 แรงลมที่กระทำต่อยานพาหนะ

Skew Angle of Wind (องศา)	Transverse Load (กก./เมตร)	Longitudinal Load (กก./เมตร)
0	146	0
15	128	18
30	120	35
45	96	47
60	50	55

[8.2.8] แรงเนื่องจากกระแสน้ำ (Stream Current Force)

แรงเนื่องจากกระแสน้ำกระทำต่อฐานรากที่ตั้งขวางทางไหลของน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยทิศทางความเร็วของกระแสน้ำและรูปร่างของตอม่อ สำหรับโครงการนี้จะใช้ความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ย 3 เมตร/วินาที โดยคำนวณตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ด้วยสมการต่อไปนี้

$$p = 5.14 \times 10^{-4} C_D V^2 \quad (\text{For Longitudinal}) \quad (8-4)$$

$$p = 5.14 \times 10^{-4} C_L V^2 \quad (\text{For Lateral}) \quad (8-5)$$

โดย p = แรงดันเนื่องจากกระแสน้ำมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล

C_D = สัมประสิทธิ์การลาก (Drag Coefficient) สำหรับตอม่อ ใน ตารางที่ 8-6

C_L = สัมประสิทธิ์การลากด้านข้าง (Lateral Drag Coefficient) ตารางที่ 8-7 และรูปที่ 8-23

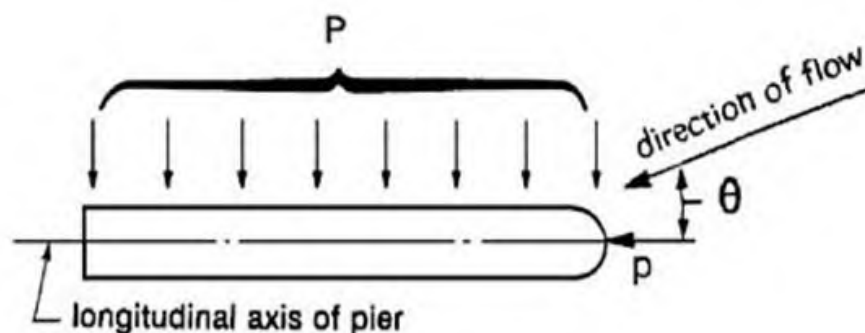
V = ความเร็วของกระแสน้ำมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 8-6 ค่าสัมประสิทธิ์การลาก

Type	C_D
semicircular-nosed pier	0.7
square-ended pier	1.4
debris lodged against the pier	1.4
wedged-nosed pier with nose angle 90 degree or less	0.8

ตารางที่ 8-7 ค่าสัมประสิทธิ์การลากด้านข้าง

Angle, between direction of flow and longitudinal axis of the pier	C_L
0 degree	0.0
5 degree	0.5
10 degree	0.7
20 degree	0.9
≥ 30 degree	1.0



รูปที่ 8-23 รูปแสดงมุมของกระแสน้ำที่กระทำต่อตอม่อ

[8.2.9] แรงกระแทกเนื่องจากเรือสัญจรตามแม่น้ำ (Collision from Vessel)

สำหรับโครงสร้างตอม่อที่ตั้งขวางลำน้ำขนาดเล็กหรือปานกลาง จะออกแบบสำหรับแรงกระแทกเนื่องจากเรือที่สัญจรหรือท่อนซุงหรือเศษวัสดุที่ลอยมาตามแม่น้ำ โดยแรงชนิดนี้จะกระทำในทิศทางเดียวกับการไหลของกระแสน้ำ โดยจะคำนวณตามสูตรที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ดังนี้

$$F = WV / (2g\Delta t) \quad (8-6)$$



โดย F = แรงกระแทกเนื่องจากเรือสัญจรหรือท่อนซุงที่ลอยมาตามแม่น้ำมีหน่วยเป็นนิวตัน

W = น้ำหนักของสิ่งที่มากระแทก มีหน่วยเป็นนิวตัน

V = ความเร็วขณะกระแทก มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

g = อัตราเร่งของโลก = 9.81 เมตรต่อวินาที²

Δt = ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มชนจนกระทั่งสิ่งที่มากระแทกหยุด = 0.03 วินาที

สำหรับโครงการนี้ จะใช้น้ำหนัก 4.5 กิโลนิวตัน ซึ่งเปรียบได้กับท่อนซุงขนาดความยาว 9.1 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร โดยกำหนดให้ความเร็วขณะชนเท่ากับ 3 เมตร/วินาที

สำหรับโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในแม่น้ำขนาดใหญ่และมีเรือบรรทุกสินค้าสัญจรในแม่น้ำ แรงกระแทกสำหรับตอม่อที่อยู่ในแม่น้ำจะออกแบบตามแรงกระแทกที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน AASHTO หัวข้อ 3.14 โดยกำหนดให้ความเร็วของเรือขณะชนเท่ากับ 3 เมตร/วินาที กระทำที่ตอม่อในทิศทางเดียวกันกับการไหลของน้ำ การคำนวณหาแรงกระแทกชนิดนี้สามารถหาได้จากสูตรของ Woisin (1979) ดังนี้

$$P_s = 1.2 \times 10^5 V (DWT)^{0.5} \quad (8-7)$$

โดย P_s = แรงกระแทกเนื่องจากเรือบรรทุกสินค้าสัญจรตามแม่น้ำมีหน่วยเป็นนิวตัน

V = ความเร็วของเรือขณะชน มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

DWT = Deadweight tonnage of vessel มีหน่วยเป็นตัน

[8.2.10] แรงเนื่องจากการคืบและการหดตัวของคอนกรีต (Creep and Shrinkage)

ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ พื้นที่ผิวคอนกรีต อายุคอนกรีต และหน่วยแรงที่มากกระทำเป็นต้น คำนวณตามมาตรฐาน CEB/FIP 90

[8.2.11] ตัวคูณเพิ่มค่าและการรวมแรงกลุ่มต่าง ๆ (Load Factor & Load Combination)

สำหรับตัวคูณเพิ่มค่าและการรวมแรงกลุ่มต่าง ๆ ที่ปรึกษาจะใช้วิธีคำนวณตามมาตรฐานของ AASHTO LRFD Bridge Design Specifications มีกลุ่มแรงหลักๆ ตามนี้

- **Strength Limit State I – V**

เป็นกลุ่มแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เนื่องจากแรงกระทำที่มีจากการคำนวณทางสถิติ ที่อาจเกิดขึ้นภายในอายุใช้งานของโครงสร้าง

- **Extreme Event I – II**

เป็นกลุ่มแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เนื่องจากแรงกระทำสุดขีด (Extreme Load) เช่น แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว หรือแรงกระแทกเนื่องมาจากการชนของเรือ แรงกระทำเหล่านี้อาจมีคาบการเกิดยาวนานกว่าอายุการใช้งานของโครงสร้างอย่างมาก

- **Service Limit State I – IV**

เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้กลุ่มแรงกระทำที่เกิดมาจากการใช้งานปกติประจำวัน การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้กลุ่มแรงชนิดนี้จะเน้นที่ Stress, deformation และ crack width

- **Fatigue Limit State**

เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อตรวจสอบช่วงของความเครียด (Stress Range) เนื่องมาจากรอบบรรทุกหนึ่งคันวิ่งอยู่บนโครงสร้าง โดยมีจำนวนรอบของการวิ่งตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน

[8.3] วิธีการออกแบบโครงสร้างสะพาน

[8.3.1] การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ใช้วิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load Resistance Factor Design) การตรวจสอบการรับกำลังใช้ Strength Limit State และตรวจสอบควบคุมรอยร้าวใช้ Service Limit State ทั้งนี้ โดยให้สอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน AASHTO LRFD ซึ่งนอกเหนือจากตัวคูณความต้านทาน (ϕ , Resistance Factor) และตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Load Factor) แล้ว จะต้องคำนึงถึงตัวคูณปรับค่าน้ำหนักบรรทุก (Load Modifier) ได้แก่ Ductility Factor, Redundancy Factor, และ Operational Factor โดยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะต้องพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของ Fatigue Limit State

[8.3.2] การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง

ใช้วิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load Resistance Factor Design) ด้วยเช่นกัน การตรวจสอบการรับกำลังใช้ Strength Limit State และพิจารณาพฤติกรรมหน่วยแรงที่ยอมรับได้ของโครงสร้างในสภาวะการใช้งาน Service Limit State ทุกขั้นตอนของน้ำหนักวิกฤตตลอดอายุโครงสร้าง ตั้งแต่เริ่มการอัดแรง โดยให้สอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน AASHTO LRFD ซึ่งนอกเหนือจากตัวคูณความต้านทาน (ϕ , Resistance Factor) จะต้องคำนึงถึงตัวคูณปรับค่าน้ำหนักบรรทุก (Load Modifier) ได้แก่ Ductility Factor, Redundancy Factor, และ Operational Factor โดยโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงนั้นจะต้องพิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของ Fatigue Limit State ด้วย

[8.3.3] ค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุก

ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Load Factor) ขึ้นอยู่กับความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุกแต่ละชนิด ความแม่นยำในการกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุก เป็นต้น ค่าของตัวคูณน้ำหนักบรรทุกจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.0 ค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุก γ ตามที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO LRFD แสดงในตารางที่ 8-8 และตารางที่ 8-9

ตารางที่ 8-8 ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกและการรวมแรงมาตรฐาน AASHTO LRFD

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use One of These at a Time			
										EQ	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	γ_p	1.75	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength II	γ_p	1.35	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength III	γ_p	—	1.00	1.40	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength IV	γ_p	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	—	—	—	—	—
Strength V	γ_p	1.35	1.00	0.40	1.0	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Extreme Event I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—
Extreme Event II	γ_p	0.50	1.00	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.0	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Service II	1.00	1.30	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	—	—	—	—	—	—
Service III	1.00	0.80	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Service IV	1.00	—	1.00	0.70	—	1.00	1.00/1.20	—	1.0	—	—	—	—
Fatigue I—LL, IM & CE only	—	1.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue I II—LL, IM & CE only	—	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ตารางที่ 8-9 ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกสำหรับน้ำหนักบรรทุกคงที่มาตรฐาน AASHTO LRFD

Type of Load, Foundation Type, and Method Used to Calculate Downdrag	Load Factor	
	Maximum	Minimum
DC: Component and Attachments	1.25	0.90
DC: Strength IV only	1.50	0.90
DD: Downdrag	Piles, α Tomlinson Method	1.4
	Piles, λ Method	1.05
	Drilled shafts, O'Neill and Reese (1999) Method	1.25
DW: Wearing Surfaces and Utilities	1.50	0.65
EH: Horizontal Earth Pressure	• Active	1.50
	• At-Rest	1.35
	• AEP for anchored walls	1.35
EL: Locked-in Erection Stresses	1.00	1.00
EV: Vertical Earth Pressure	• Overall Stability	1.00
	• Retaining Walls and Abutments	1.35
	• Rigid Buried Structure	1.30
	• Rigid Frames	1.35
	• Flexible Buried Structures other than Metal Box Culverts	1.95
	• Flexible Metal Box Culverts	1.50
		0.90
ES: Earth Surcharge	1.50	0.75

[8.3.4] ตัวคูณความต้านทาน (ϕ , Resistance Factor)

ตัวคูณความต้านทาน ตามที่กำหนดในมาตรฐาน AASHTO LRFD เป็นดังนี้

หน้าตัดรับแรงดึง (Tension-Controlled Section) ของคอนกรีตเสริมเหล็ก	=	0.90
หน้าตัดรับแรงดึง (Tension-Controlled Section) ของคอนกรีตอัดแรง	=	1.00
หน้าตัดรับแรงอัด (Compression-Controlled Section)	=	0.75
แรงเฉือนและแรงบิด (Shear and Torsion)	=	0.90
แรงกดบนคอนกรีต (Bearing)	=	0.70
แรงอัดใน strut-and-tie models	=	0.70
แรงอัดในพื้นที่สมอยึด (anchorage zones)	=	0.80
แรงดึงในเหล็กในพื้นที่สมอยึด	=	1.00
แรงต้านทานขณะตอกเสาเข็ม	=	1.00

[8.4] วัสดุก่อสร้างโครงสร้างสะพาน

วัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น คอนกรีต เหล็กเสริม ลวดอัดแรง หรือวัสดุจำเป็นอย่างอื่น โดยจะใช้วัสดุภายในประเทศไทย ซึ่งวัสดุที่ใช้จะเป็นไปตามมาตรฐานสำคัญๆ เช่น มาตรฐานอุตสาหกรรมไทย ASTM และ JIS เป็นต้น

[8.4.1] คอนกรีต

กำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 ซม. ที่อายุ 28 วัน ในแต่ละส่วนของโครงสร้างเป็นดังนี้



ตารางที่ 8-10 กำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีต

ประเภทโครงสร้าง	f'_c , MPa	Class
โครงสร้างส่วนบนคานคอนกรีตของส่วน Arch และ Stiffening Girder	40	-
โครงสร้างส่วนบนชนิดพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	35	
โครงสร้างส่วนล่างชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก	35	A
เสาชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก	25	A
เสาเข็ม Spun คอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จ	50	-
เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จทั่วไป	35	A พิเศษ
เสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่	30	-
อื่นๆ	ตามระบุใน แบบก่อสร้าง	-

[8.4.2] เหล็กเสริม

- เหล็กเสริมขนาด 28 มม. ขึ้นไป เป็นเหล็กข้ออ้อยชนิด Hot-rolled High Yield ระดับ SD-50 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 24 โดยมีกำลังที่จุดคาน 4,900 กก./ซม.²
- เหล็กเสริมขนาด 10-25 มม. เป็นเหล็กข้ออ้อยชนิด Hot-rolled High Yield ระดับ SD-40 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 24 โดยมีกำลังที่จุดคาน 3,900 กก./ซม.²
- เหล็กเสริม 9 มม. และเล็กกว่า เป็นเหล็กชนิด Hot-rolled Mild Steel ระดับ SR-24 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 20 โดยมีกำลังที่จุดคาน 2,350 กก./ซม.²

1) ลวดอัดแรง (Prestressing Strand)

ลวดอัดแรงเป็นลวดเหล็กกล้าตีเกลียว 7 เส้น (7-wire strand) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 420 โดยมีความทนแรงดึง 1,860 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร (18.96 ตัน/ตร.ซม.) หรือเทียบเท่า หรือลวดอัดแรงเป็นลวดเหล็กกล้า (steel wire) ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 95 โดยมีความทนแรงดึงอย่างน้อย 1,570 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร (16.04 ตัน/ตร.ซม.) หรือเทียบเท่า

2) เหล็กรูปพรรณ (Structural Steel)

- เหล็กรูปพรรณที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปเป็นชนิด Hot-rolled หรือ Cold-rolled Mild Steel ชั้น Fe 24 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 116 โดยมีกำลังที่จุดคาน 2,400 กก./ซม.²
- เหล็กโครงสร้างรูปดัดกลวงเป็นชนิด Hot-rolled หรือ Cold-rolled Mild Steel ชั้น HS 41 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย TIS 107 โดยมีกำลังที่จุดคาน 2,400 กก./ซม.²

- นอกจากนั้นในโครงการนี้ ได้อ้างอิงวัสดุตามแบบ As-Built ของโครงการสะพานข้ามแยกลาดพร้าวประกอบในการประเมิน

[8.4.3] ข้อกำหนดพิเศษการออกแบบสะพานประเภท Tie Arch Bridge

ในการออกแบบปรับปรุงสะพานประเภท Tie Arch ที่พิจารณาในโครงการนี้ ที่ปรึกษาจะพิจารณาเพิ่มเติมจากข้อกำหนดตาม AASHTO LRFD ดังนี้

- การพิจารณาความถี่ธรรมชาติของสะพาน Tie Arch ต่อการสั่นของรถยนต์ (Traffic Influenced Bridge Dynamics)
- การพิจารณาความถี่ธรรมชาติของสะพาน Tied Arch ต่อแรงลมที่กระทำด้านข้างของสะพาน (Wind Influenced Bridge Dynamic)
- ความแข็งแรงของส่วนประกอบของสะพาน Tie Arch ต่อแรงกระทำ และผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรตามมาตรฐาน AASHTO LRFD หรือ HL-93
- การพิจารณาการปรับแรงใน Cable ที่เหมาะสมของสะพาน

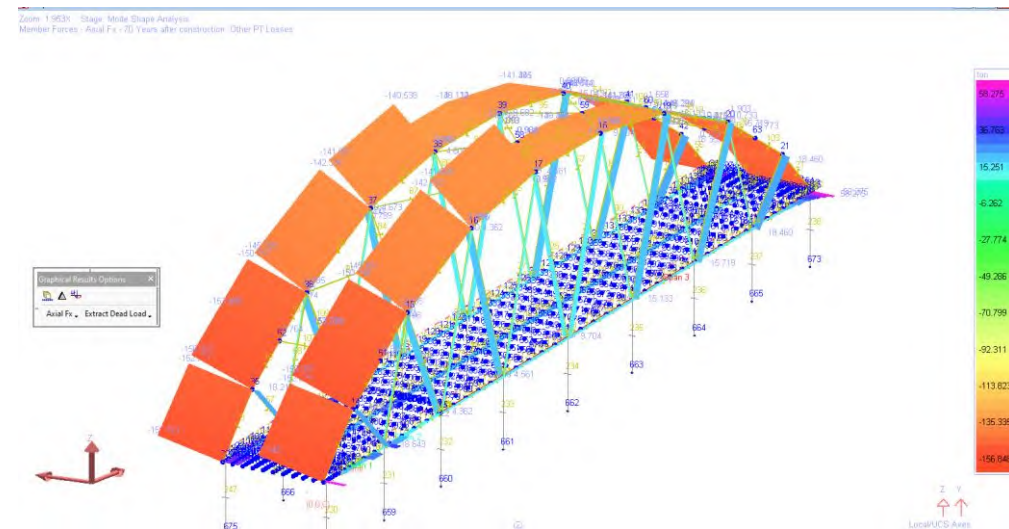
จากข้อกำหนดตามมาตรฐาน AASHTO LRFD และข้อกำหนดพิเศษ ที่ปรึกษาพิจารณา ในขั้นตอนต่อมาที่สำคัญได้แก่ การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการออกแบบปรับปรุงตามข้อกำหนดข้างต้น

ผลการวิเคราะห์หาแรงภายในของสะพาน ภายใต้น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

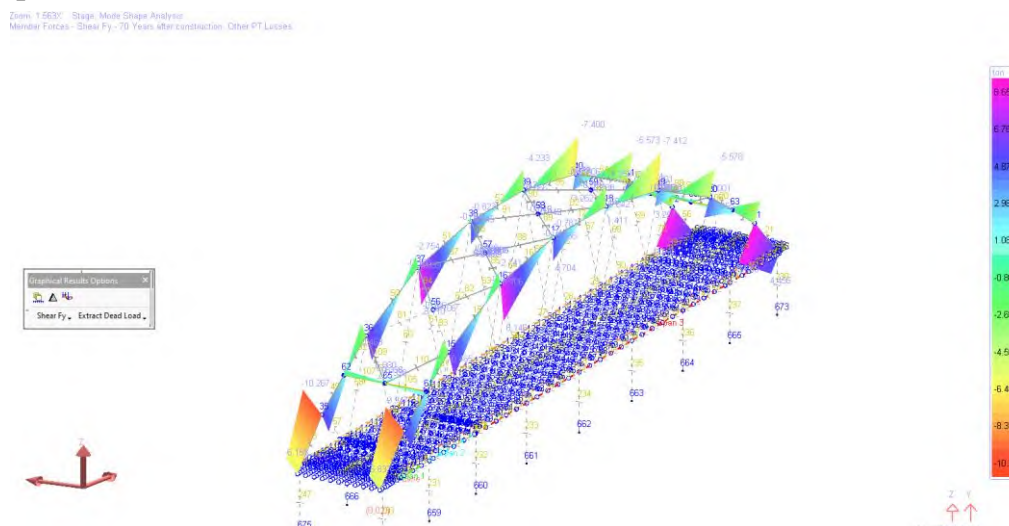
ในส่วนนี้ที่ปรึกษาจะนำเสนอการวิเคราะห์ผลของแรงภายในสะพานเนื่องจากแรงกระทำประเภทต่างๆ โดยการวิเคราะห์หาแรงภายใน จะวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองที่ได้ปรับแก้แล้ว ร่วมกับการวิเคราะห์ขั้นตอนการก่อสร้างที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้



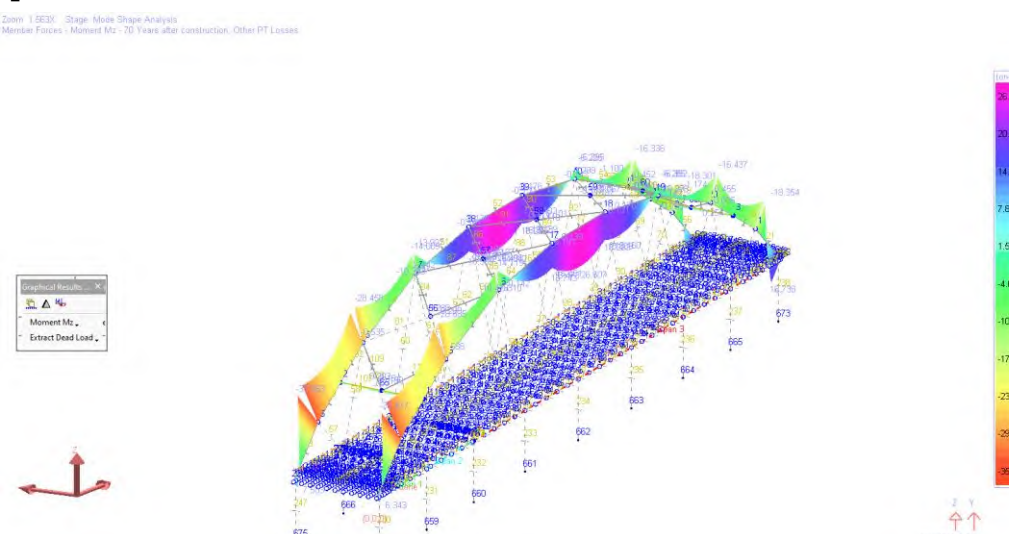
[8.4.4] ผลของแรงภายในส่วนของ Arch Rib



รูปที่ 8-24 การวิเคราะห์หาแรง F_x (Axial Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก DL

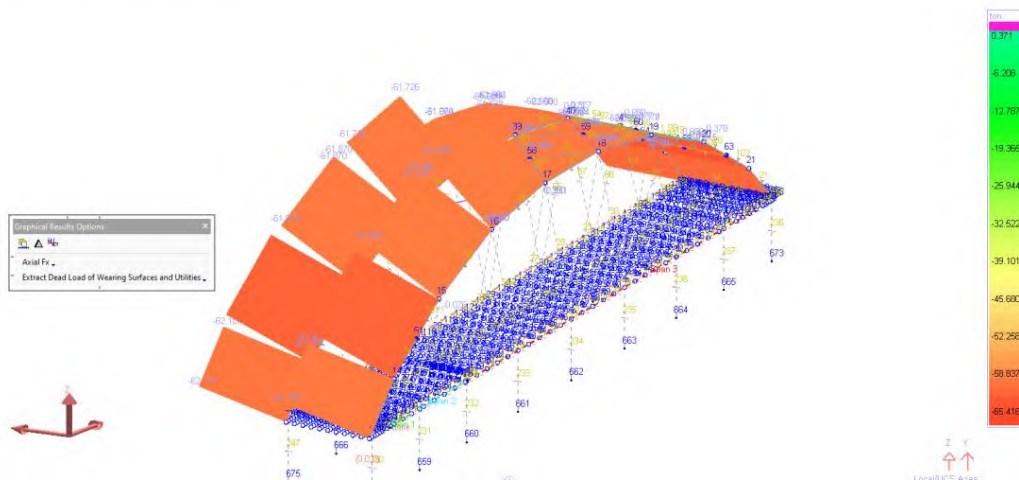


รูปที่ 8-25 การวิเคราะห์หาแรง F_y (Shear Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก DL



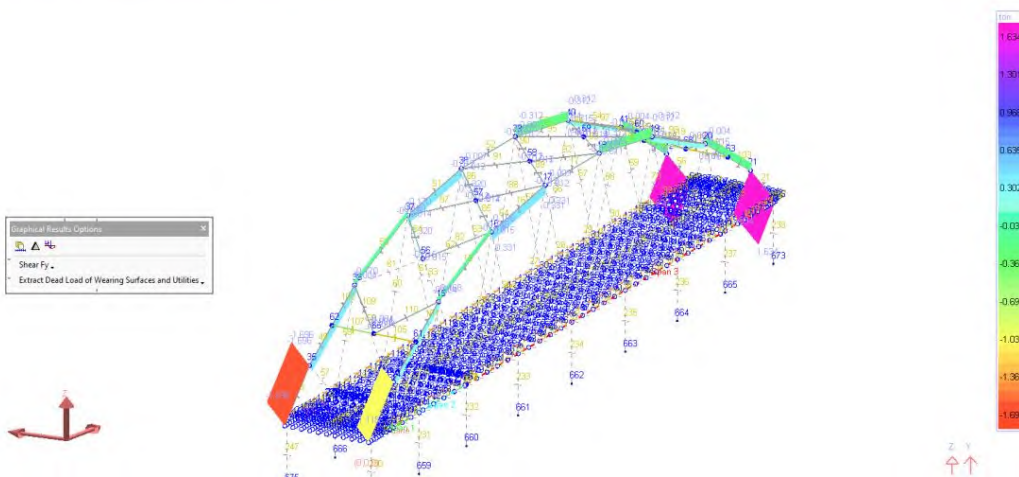
รูปที่ 8-26 การวิเคราะห์หาแรง M_z (Moment) T-m ภายใน Arch Rib เนื่องจาก DL

Zoom: 1.563K Stage: Mode Shape Analysis
Member Forces - Axial Fx - 70 Years after construction Other PT Losses



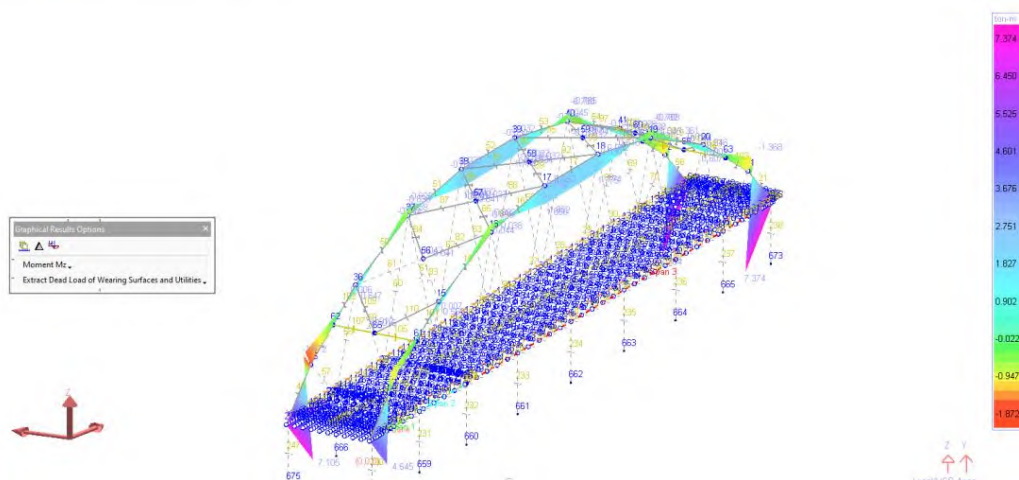
รูปที่ 8-27 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก SDL

Zoom: 1.563K Stage: Mode Shape Analysis
Member Forces - Shear Fy - 70 Years after construction Other PT Losses



รูปที่ 8-28 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก SDL

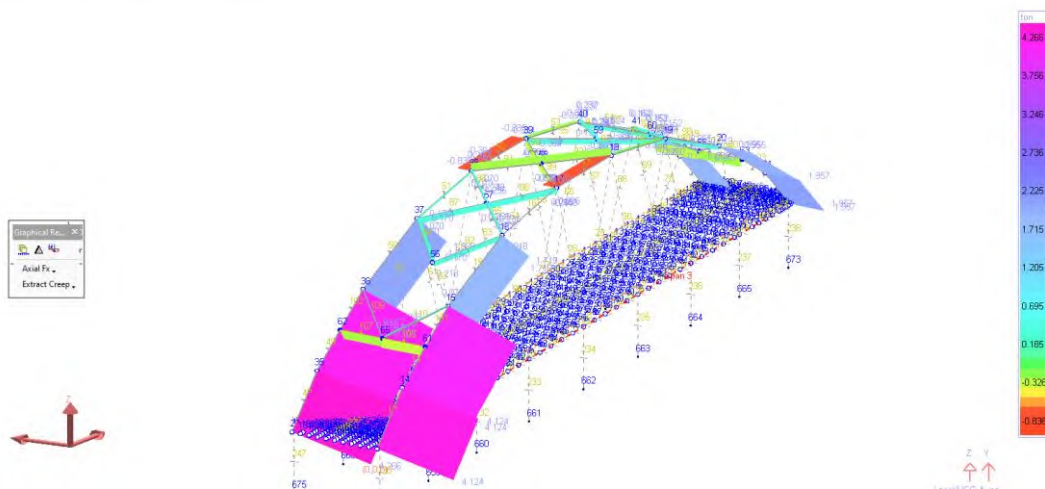
Zoom: 1.563K Stage: Mode Shape Analysis
Member Forces - Moment Mz - 70 Years after construction Other PT Losses



รูปที่ 8-29 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Arch Rib เนื่องจาก SDL

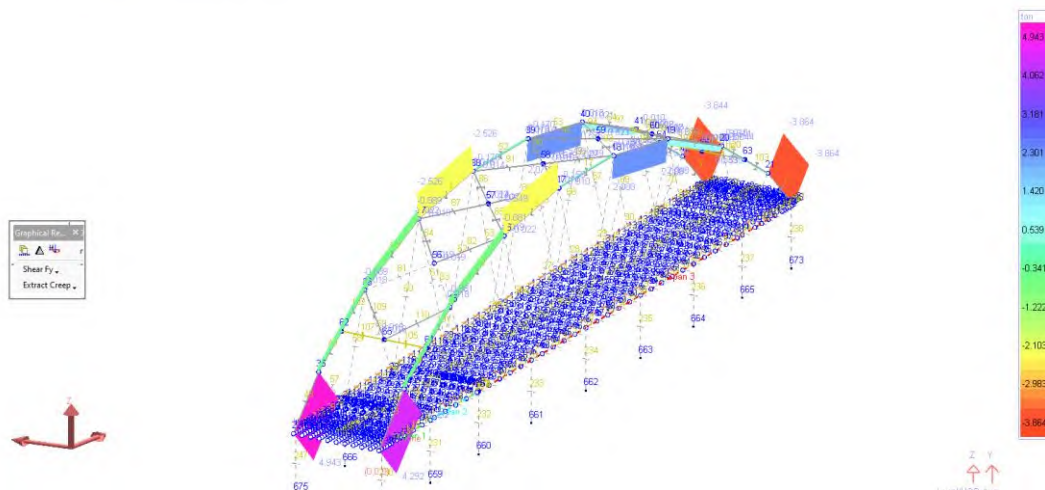


Item: 1.563K Stage: Mode Shape Analysis
Member Forces - Axial Fx - 70 Years after construction, Other PT Losses



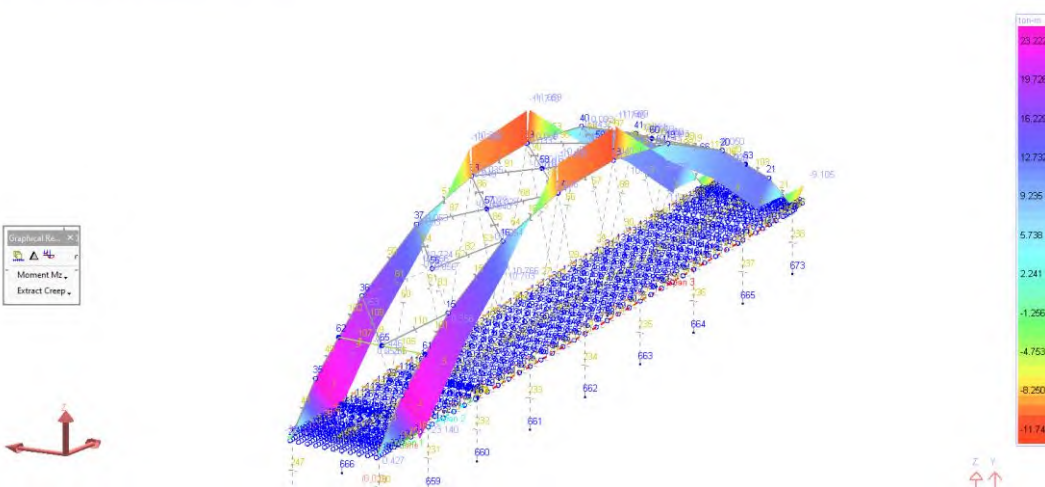
รูปที่ 8-30 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก CR

Item: 1.563K Stage: Mode Shape Analysis
Member Forces - Shear Fy - 70 Years after construction, Other PT Losses



รูปที่ 8-31 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก CR

Item: 1.563K Stage: Mode Shape Analysis
Member Forces - Moment Mz - 70 Years after construction, Other PT Losses



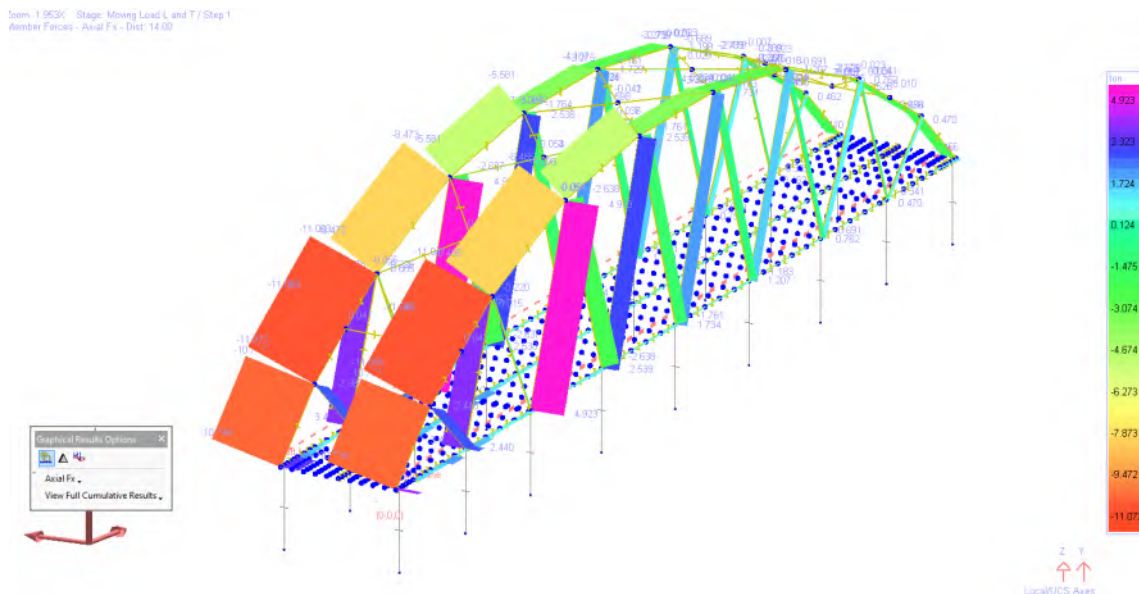
รูปที่ 8-32 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Arch Rib เนื่องจาก CR

ผลการวิเคราะห์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

[8.4.5] กรณี ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น จำนวน 1 คันต่อ

Lane

Arch Rib (ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น จำนวน 1 คันต่อ Lane) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน รูปด้านล่างแสดงผลวิเคราะห์แบบจำลอง



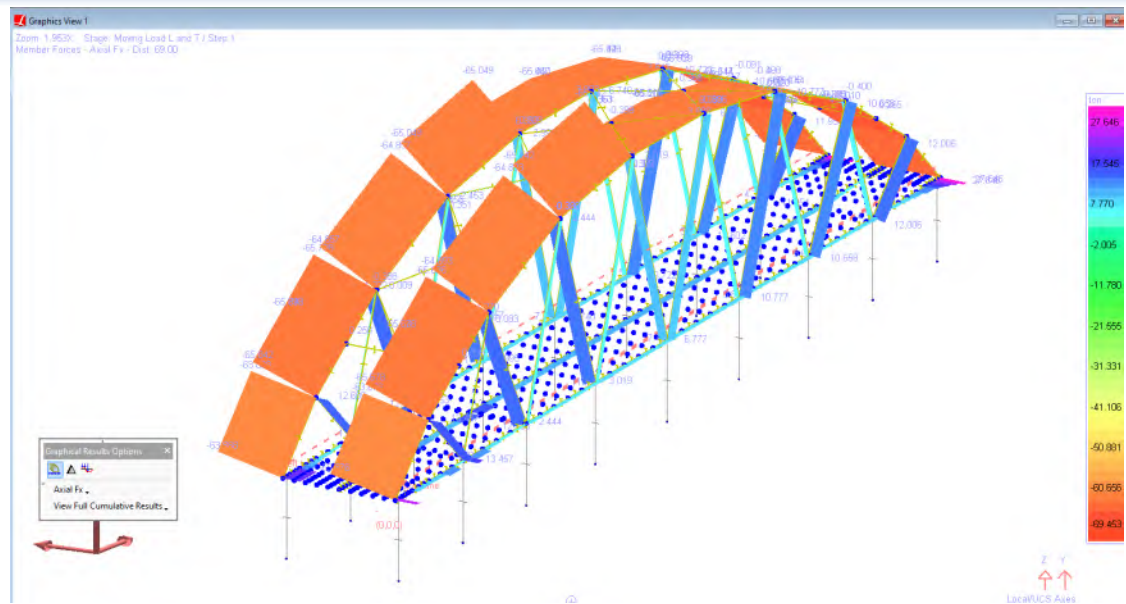
รูปที่ 8-33 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Axial Force = -11 T Per Rib Hangers
(ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น จำนวน 1 คันต่อ Lane) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน

[8.4.6] กรณียานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น วิ่งเป็นขบวน ต่อ

Lane

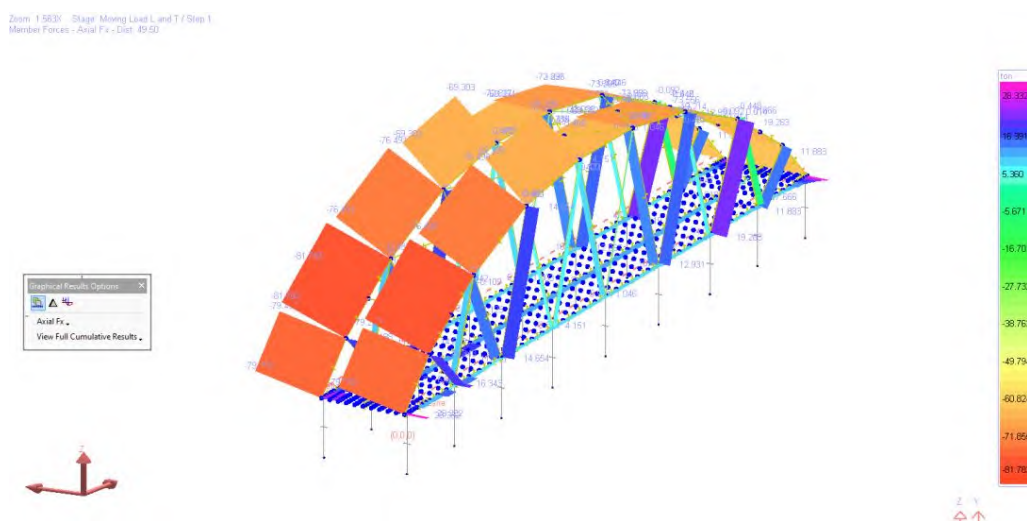
Arch Rib (ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน รูปด้านล่างแสดงผลวิเคราะห์แบบจำลอง





รูปที่ 8-34 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Axial Force = -69 T Per Rib Hangers (ยานพาหนะ
ขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน

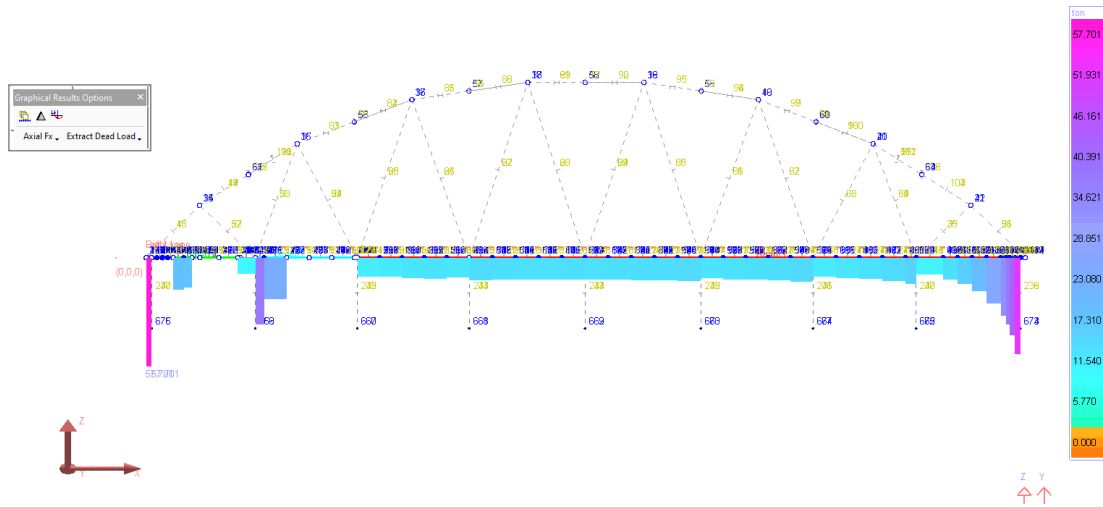
[8.4.7] กรณี ยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน
โดยวิ่ง 2 Lane พร้อมกัน



รูปที่ 8-35 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Axial Force = -82 T Per Rib Hangers
(ขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน

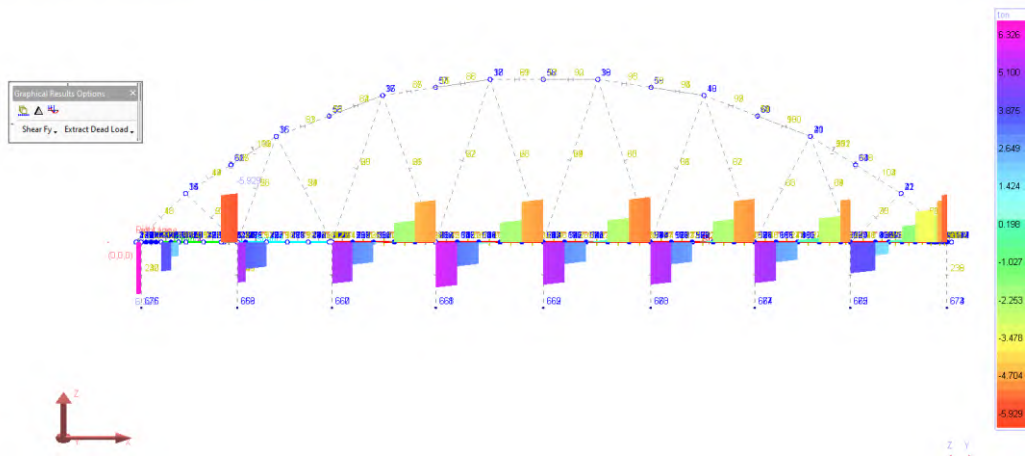
[8.4.8] ผลของแรงภายในส่วนของ Stiffening Girder

Zoom: 1.553K Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - 70 Years after construction; Other PT Losses



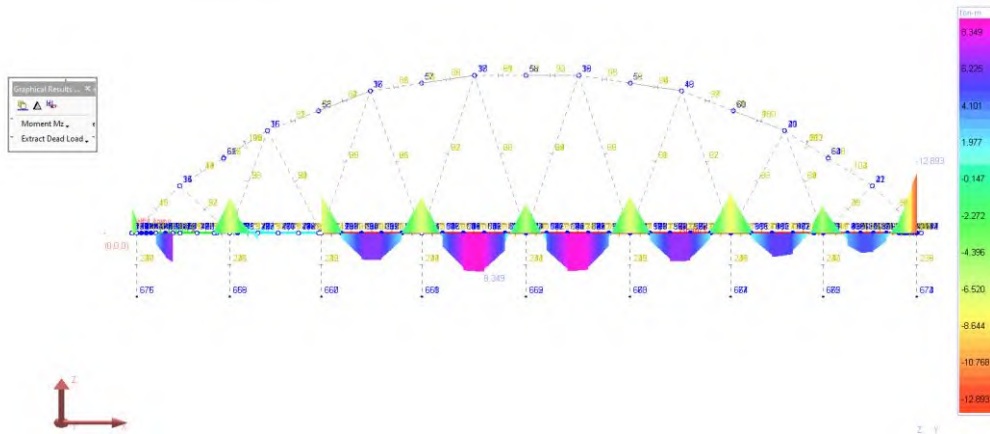
รูปที่ 8-36 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก DL

Zoom: 1.553K Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Shear Fy - 70 Years after construction; Other PT Losses



รูปที่ 8-37 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก DL

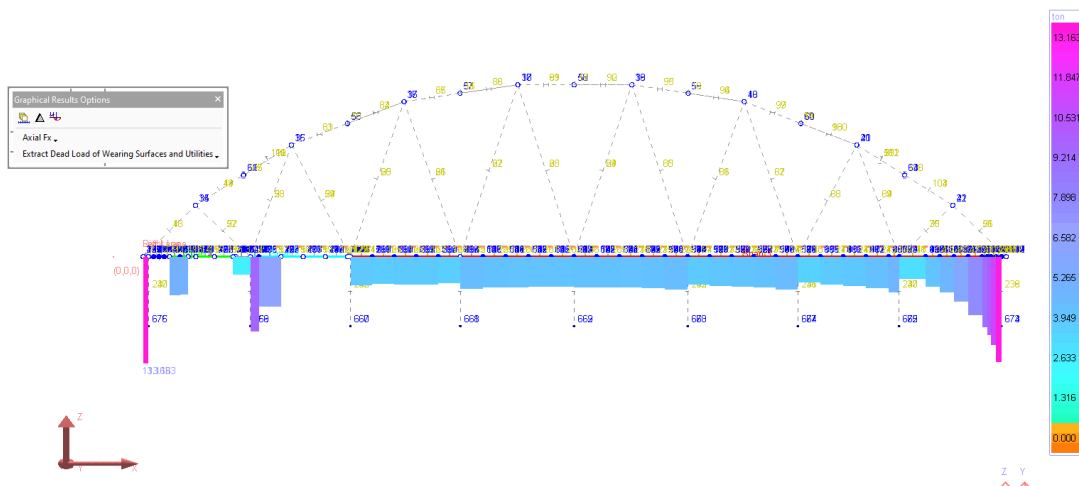
Zoom: 1.553K Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Moment Mz - 70 Years after construction; Other PT Losses



รูปที่ 8-38 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก DL

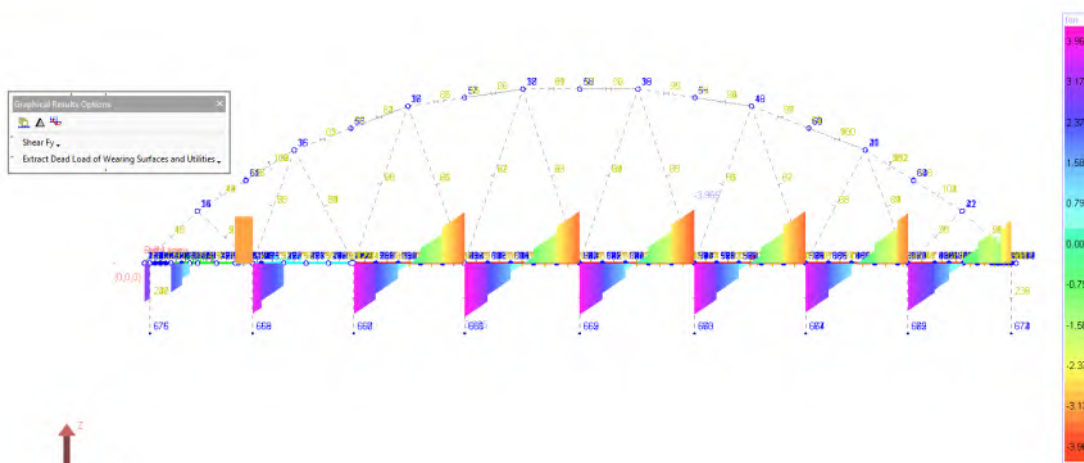


Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - 70 Years after construction Other PT Losses



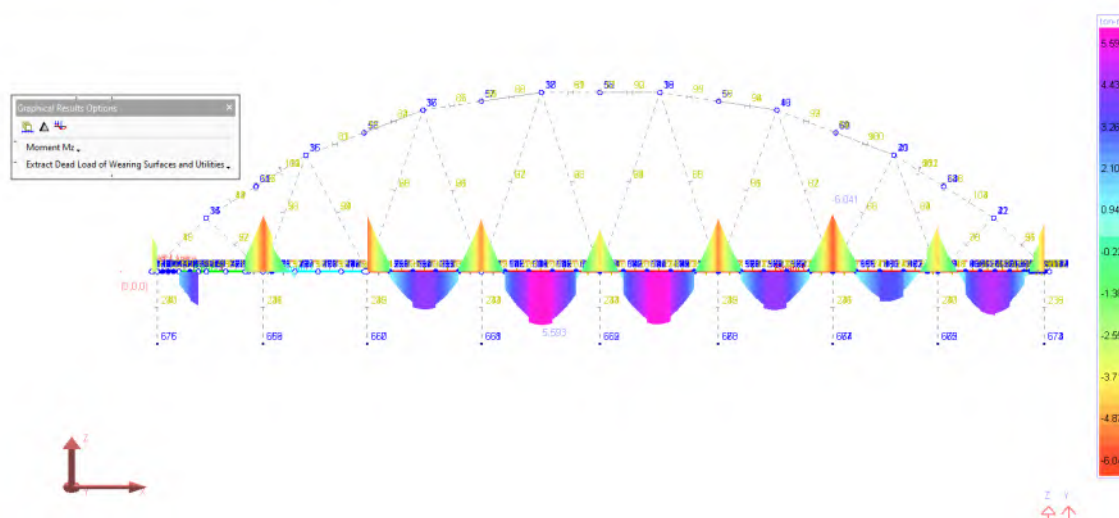
รูปที่ 8-39 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก SDL

Zoom: 1.962X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Shear Fy - 70 Years after construction Other PT Losses



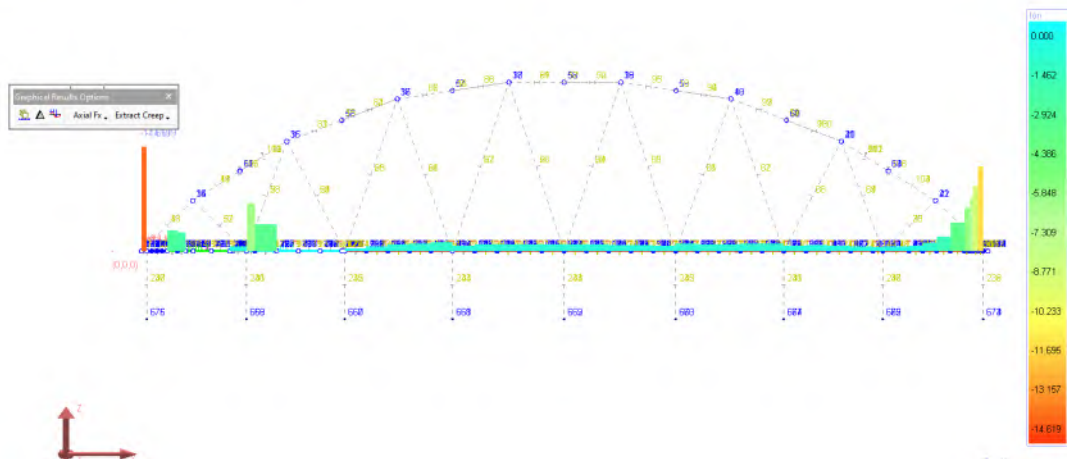
รูปที่ 8-40 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก SDL

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Moment Mz - 70 Years after construction Other PT Losses



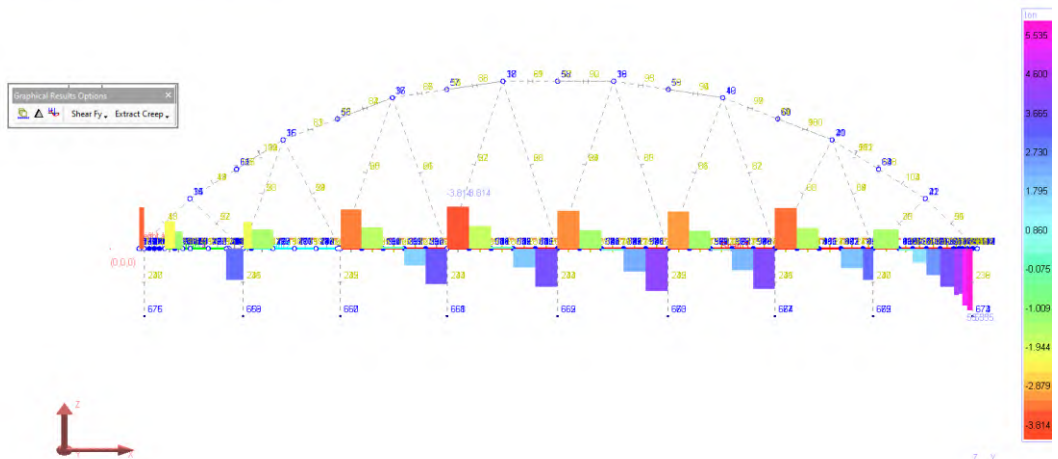
รูปที่ 8-41 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก SDL

Zoom: 1.503X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - 70 years after construction; Other PT Losses



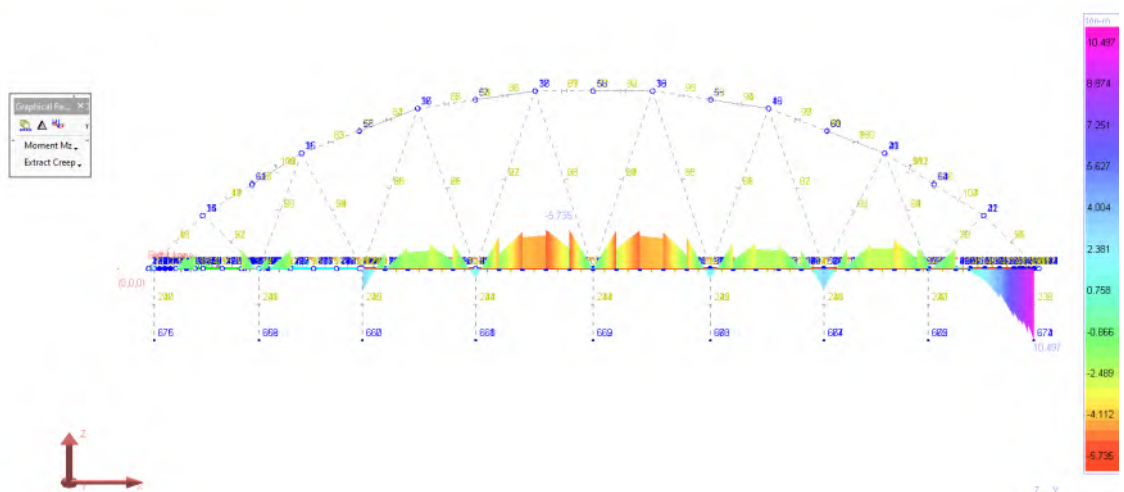
รูปที่ 8-42 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก CR

Zoom: 1.503X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Shear Fy - 70 years after construction; Other PT Losses



รูปที่ 8-43 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก CR

Zoom: 1.503X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Moment Mz - 70 years after construction; Other PT Losses

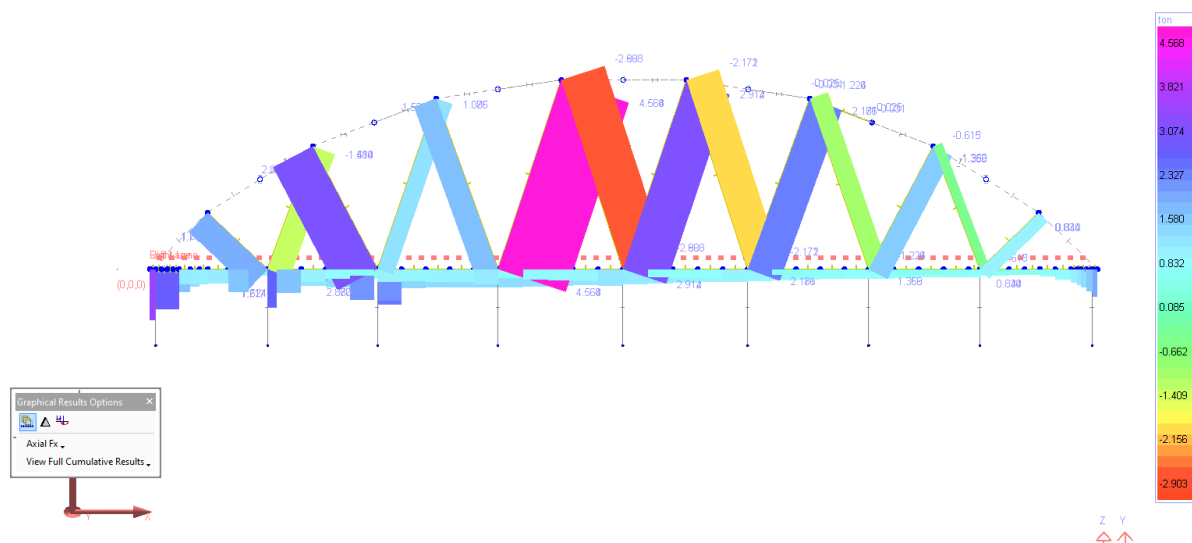


รูปที่ 8-44 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก CR

ผลของน้ำหนักบรรทุกจร

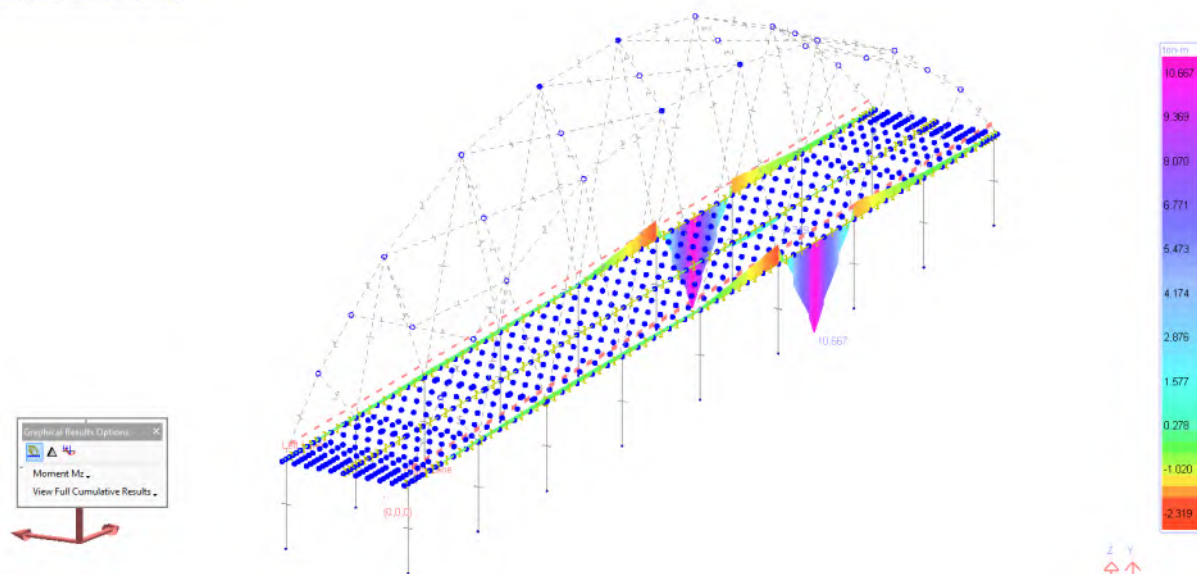


Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step: 1
Member Forces - Axial Fx - Dist: 23.00

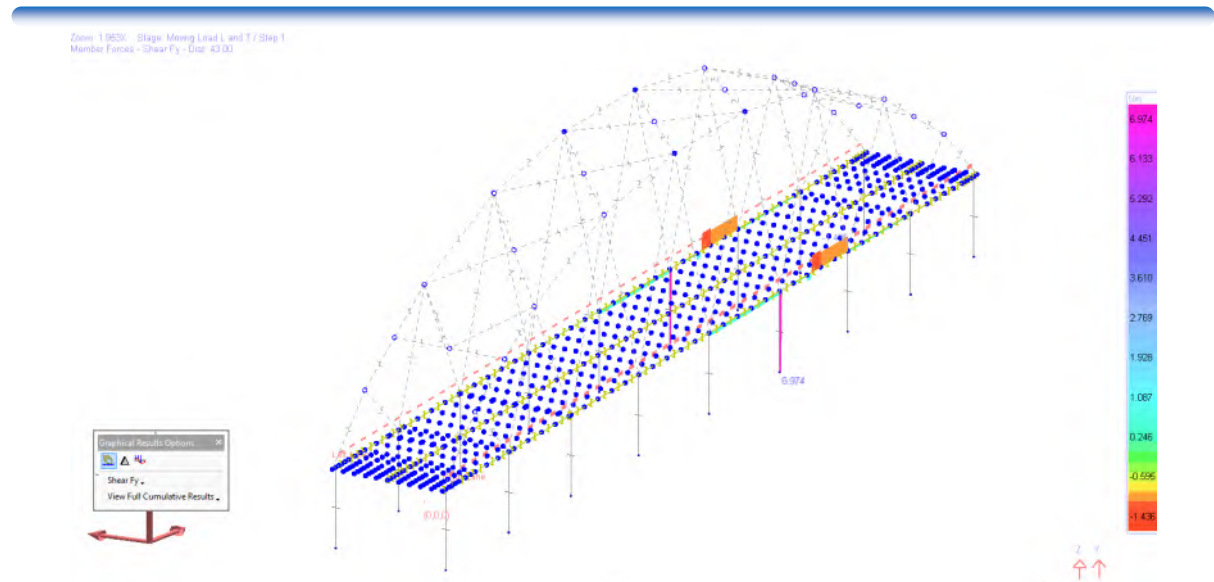


รูปที่ 8-45 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Tension = 4.5 T per Stiffening Girder
(ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น จำนวน 1 คันต่อ Lane) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน

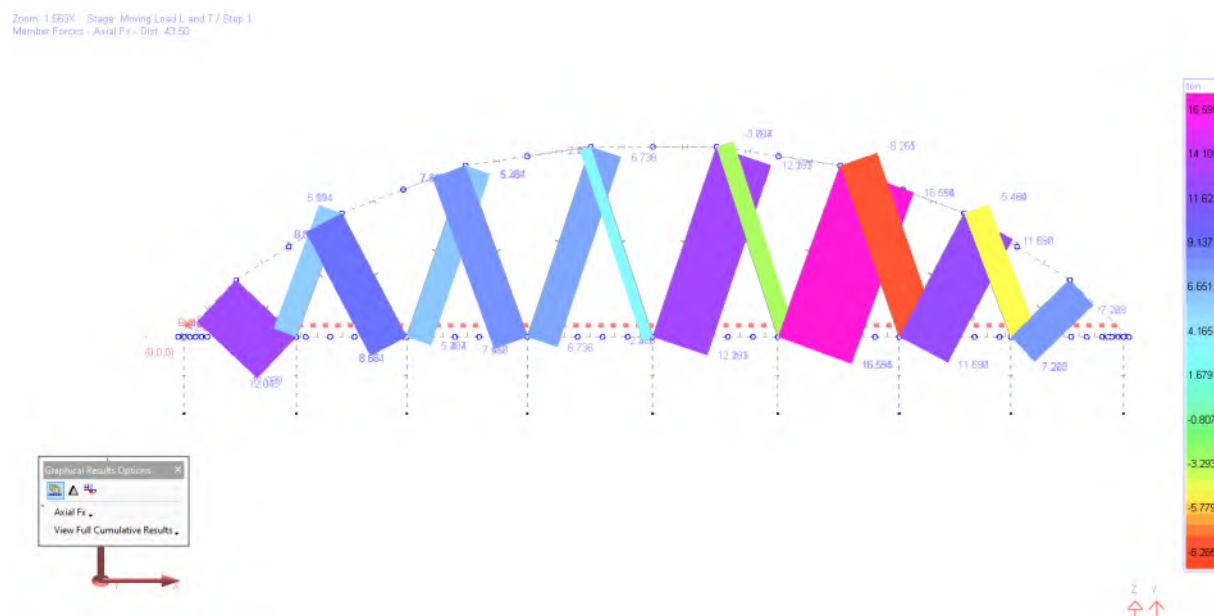
Zoom: 1.953X Stage: Moving Load L and T / Step: 1
Member Forces - Moment Mz - Dist: 46.50



รูปที่ 8-46 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Moment = 10.6 T-m



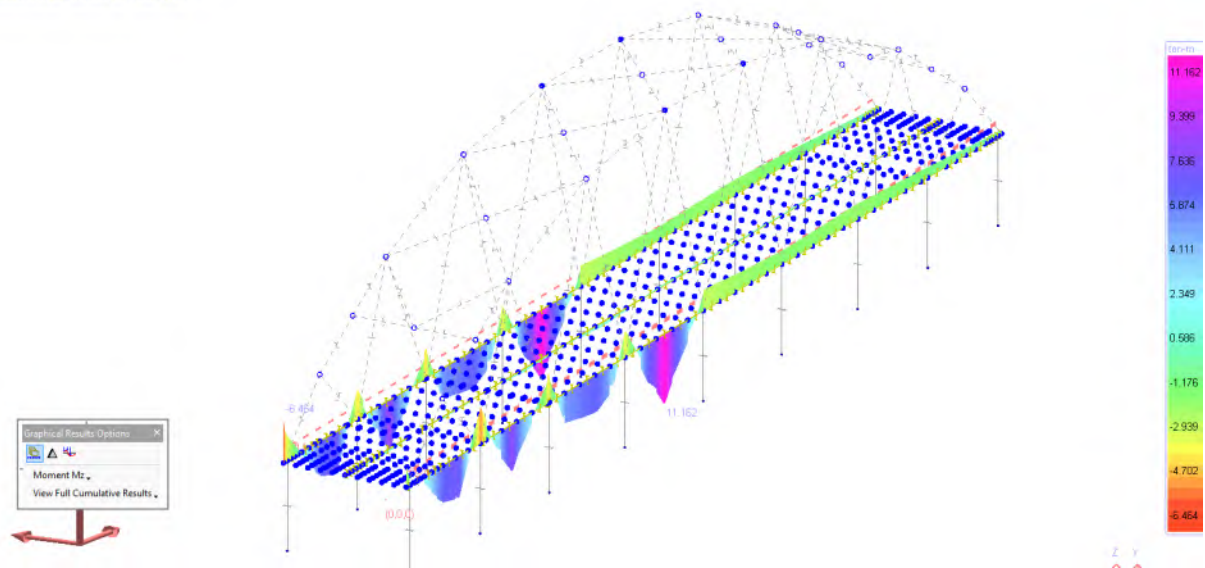
รูปที่ 8-47 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Shear = 6.97 T



รูปที่ 8-48 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Tension = 16 T per HangerStiffening Girder
(ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน

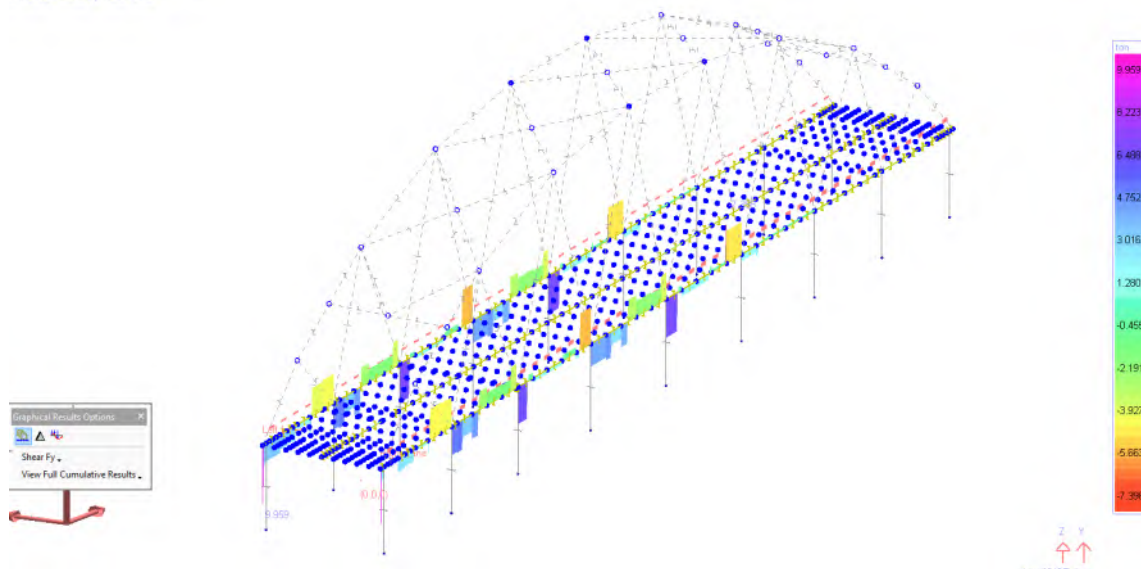


Zoom: 1.953X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Moment Mz - Dist: 30.50



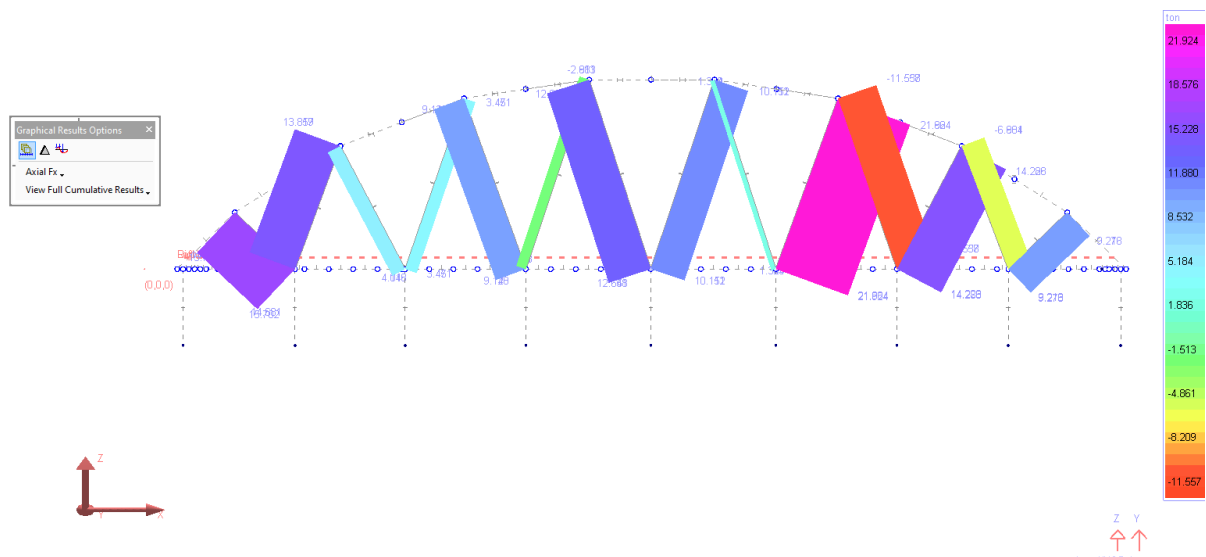
รูปที่ 8-49 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Moment = 11.1 T-m

1.953X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Shear Fy - Dist: 41.00



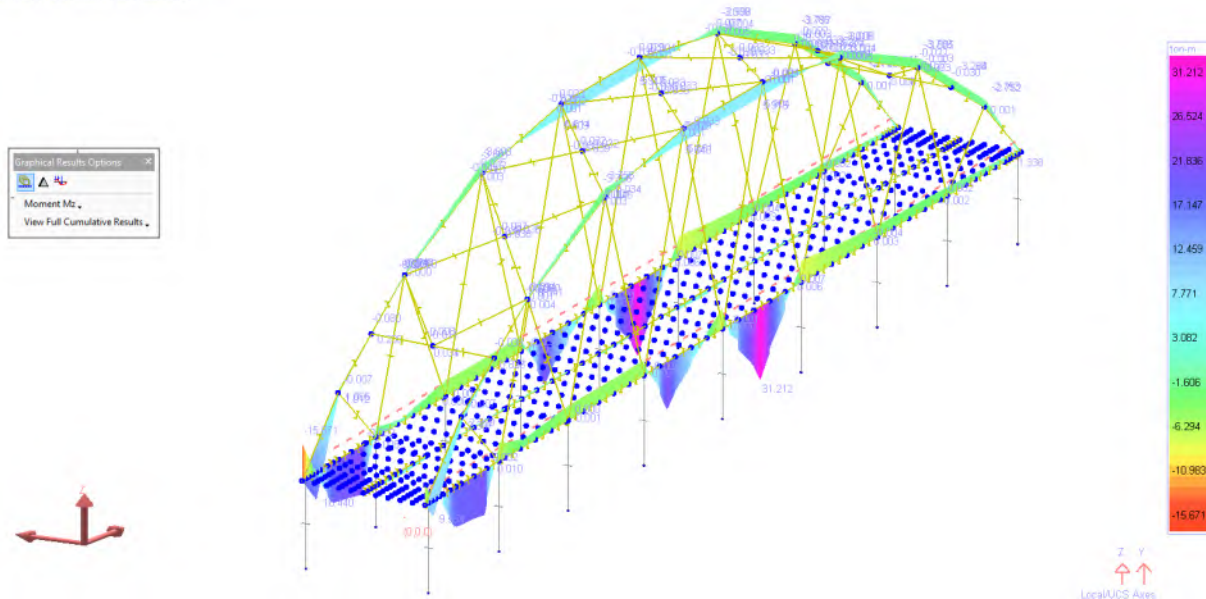
รูปที่ 8-50 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Shear = 9.9 T

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - Dist: 42.00



รูปที่ 8-51 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Tension = 21 T per Hanger Stiffening Girder (ขนาดตั้งแต่ 3 เฟลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน

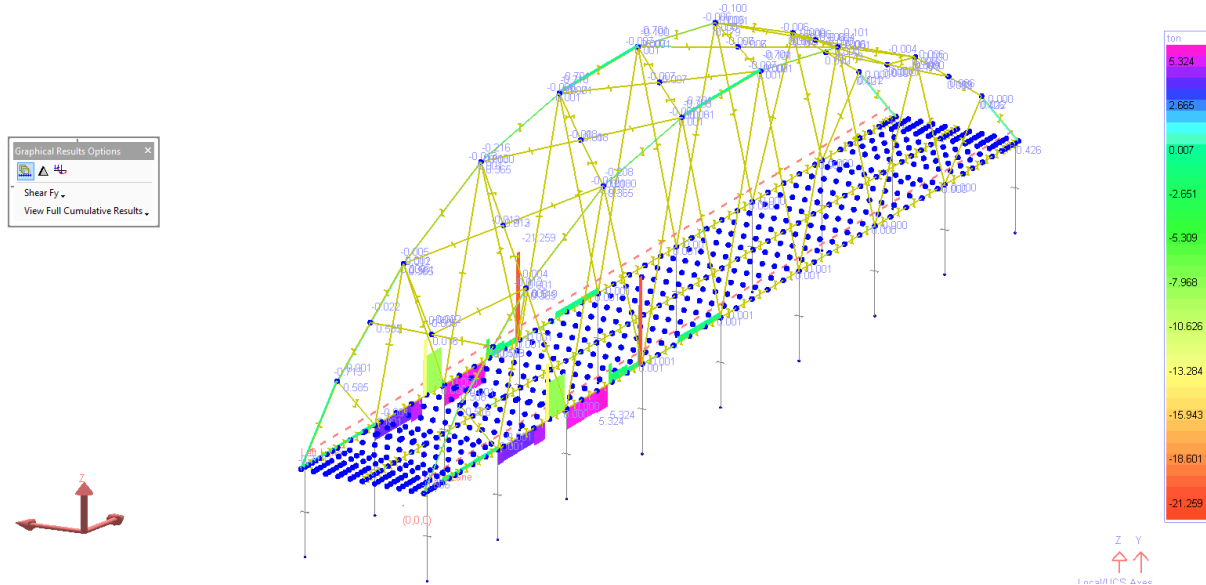
Zoom: 1.953X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Moment Mz - Dist: 39.00



รูปที่ 8-52 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Moment = 31.2 T-m



Zoom: 1.35x Stage: Moving Load L and I / Step 1
Member Forces - Shear Fy - Dist: 35.50



รูปที่ 8-53 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Shear = 21 T

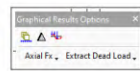
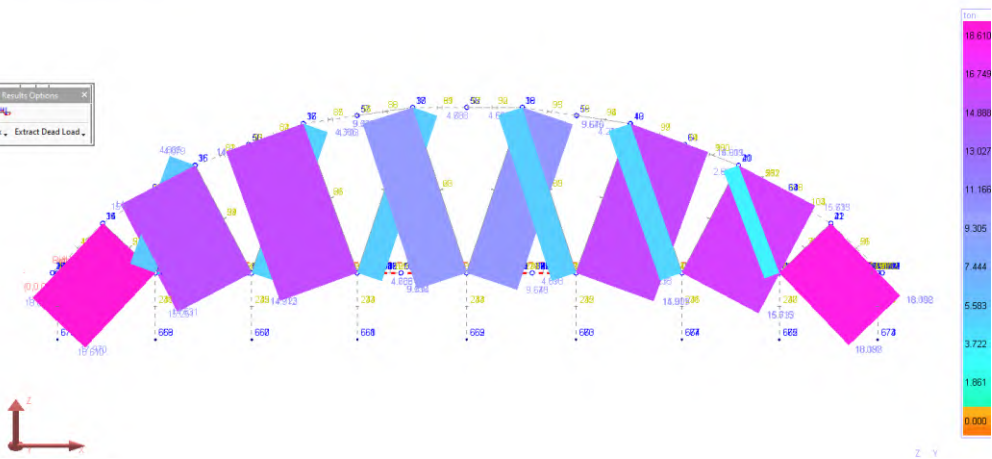
[8.4.9] ผลของแรงภายในส่วนของ Hanger

ในการรายงานผลจากแบบจำลอง ค่าของแรงใน Hanger จะเป็นค่าของ 3 เส้น Tie Rod รวมกัน
ที่ก่อสร้างจริง (3 Tie Rod / Hanger)



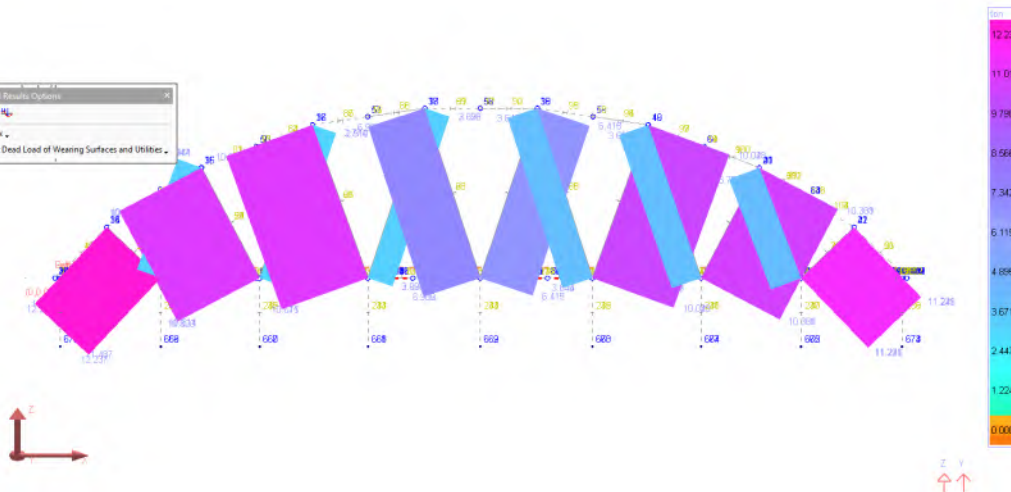
รูปที่ 8-54 Tie Rod

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - Moving Load L and T, Other PT Losses



รูปที่ 8-55 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Hanger เนื่องจาก DL

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - Moving Load L and T, Other PT Losses

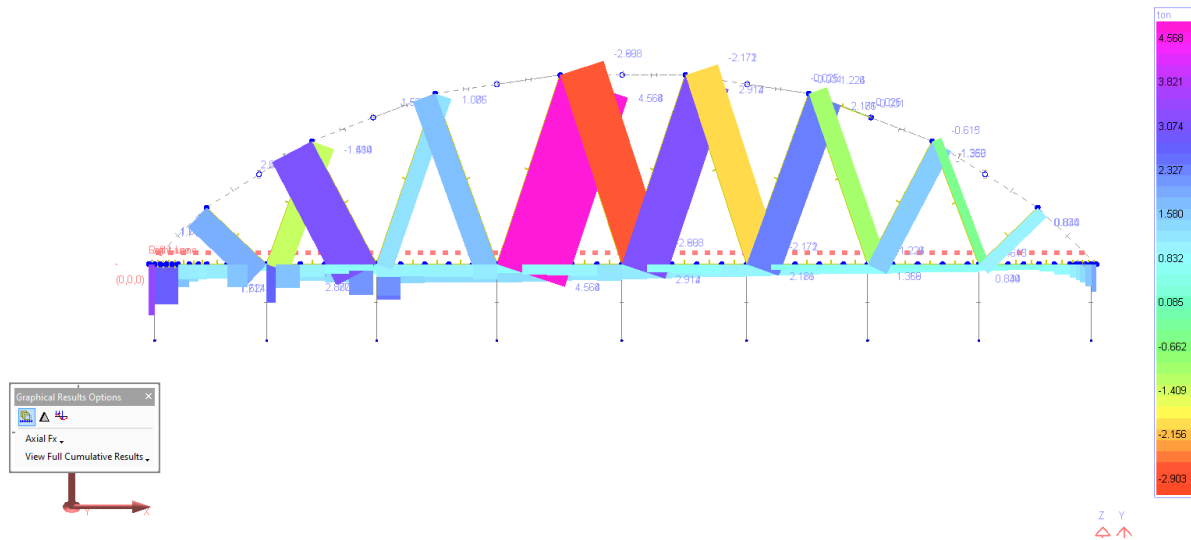


รูปที่ 8-56 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Hanger เนื่องจาก SDL



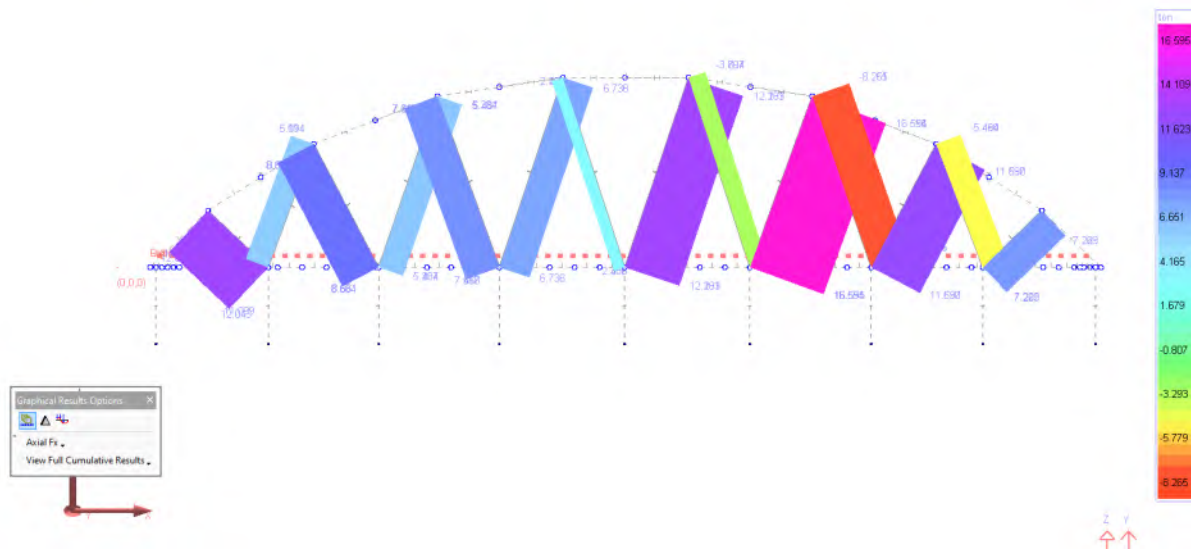
แรงภายใน Hanger เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step: 1
Member Forces - Axial Fx - Dist: 23.00



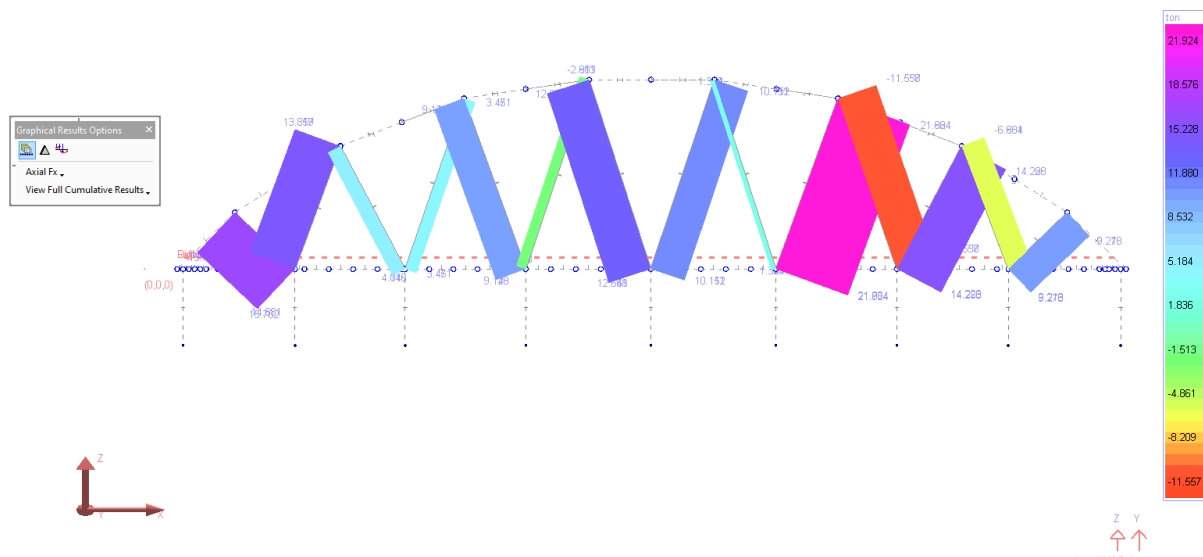
รูปที่ 8-57 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Tension = 4.5 T per Stiffening Girder
(ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น จำนวน 1 คันต่อ Lane) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step: 1
Member Forces - Axial Fx - Dist: 43.50



รูปที่ 8-58 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Tension = 16 T per Hanger Stiffening Girder
(ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - Dist: 42.00



รูปที่ 8-59 ผลวิเคราะห์แบบจำลอง Max Tension = 21 T per Hanger Stiffening Girder (ขนาดตั้งแต่ 3 เฟลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน

การตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างเดิม

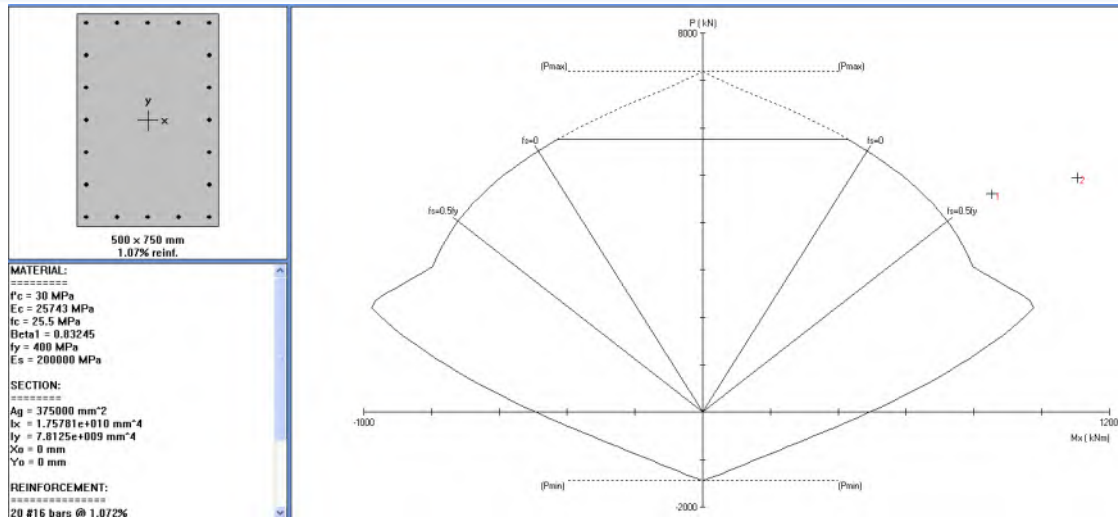
จากผลการวิเคราะห์แรงภายในของหัวข้อที่ผ่านมา ที่ปรึกษานำมาตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างเดิม ดังนี้

❖ ผลเนื่องจากยานพาหนะ ไม่เกิน 2 เฟลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น

ส่วนของ Arch Rib

ผลการวิเคราะห์เนื่องจาก LL (ยานพาหนะ ขนาดไม่เกิน 2 เฟลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น) แรงอัดที่เกิดขึ้นใน Arch Rib เท่ากับ 69 ตัน (LL) ที่ปรึกษาได้ตรวจสอบกำลังของ Arch Rib พบว่า ไม่เพียงพอในการรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูป P-M Interaction Diagram (ซึ่งค่าแรงกระทำอยู่นอก Diagram)

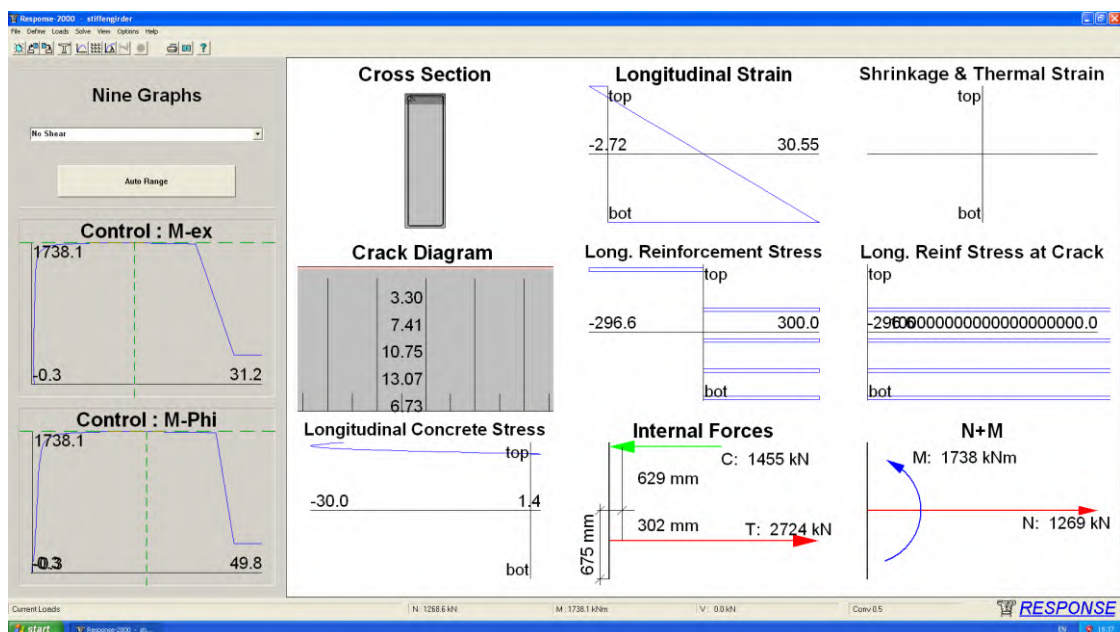




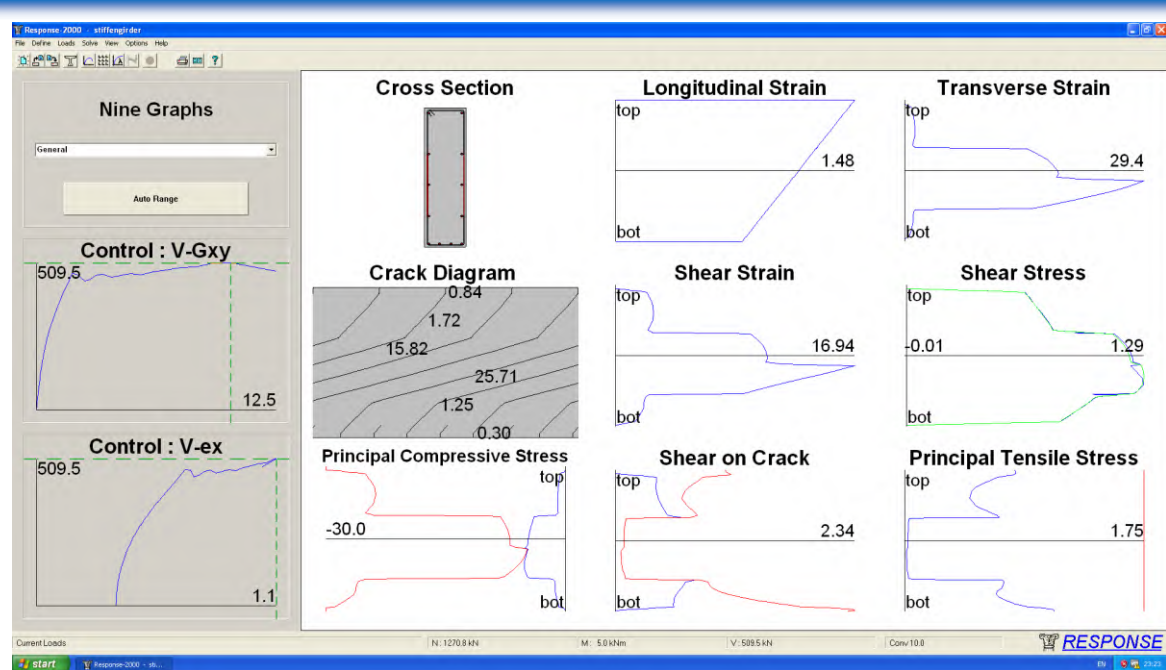
รูปที่ 8-60 P-M Interaction Diagram ตรวจสอบกำลังของ Arch Rib

ส่วนของ Stiffening Girder

ผลการวิเคราะห์เนื่องจาก LL (ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน Max Moment = 11.1 T-m และ Max Shear = 9.9 T จากการรวมแรงตาม Load Combination ของ AASHTO ที่ปรึกษาได้ตรวจสอบกำลังของ Stiffening Girder เดิม พบว่ายังเพียงพอในการรับน้ำหนักที่เกิดขึ้น ในกรณีของ ยานพาหนะ ขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น ($M_u = 48.7 \text{ T-m} < 0.9M_n (150 \text{ T-m})$ และ $V_u = 22.3 \text{ T} < 0.85V_n = 42.5 \text{ T}$)



รูปที่ 8-61 ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนัก Moment ของหน้าตัด Stiffening Girder เดิม



รูปที่ 8-62 ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนัก Shear ของหน้าตัด Stiffening Girder เดิม

ส่วนของ Hanger

ผลการวิเคราะห์เนื่องจาก LL (ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน Max Tension = 16 T per 3 Tie Rod (1 Hanger ประกอบด้วย 3 Tie Rod) จากการรวมแรงตาม Load Combination ของ AASHTO ที่ปรึกษาได้ตรวจสอบกำลังของ Hanger ตามวิธี Allowable Stress Design โดยใช้ค่าที่ยอมให้ของ Stress ที่เกิดขึ้นใน Tie Rod ไม่เกิน $0.45 F_u$ ในสภาวะใช้งาน จากข้อกำหนด FIB สรุปได้ดังนี้

3.12 ALLOWABLE TENSILE STRESS FOR STAY CABLES:

3.12.1 $0.45 F'_s$ FOR AASHTO GROUP I LOADING UPON COMPLETION OF CONSTRUCTION. (NOTE: F'_s = MINIMUM SPECIFIED ULTIMATE TENSILE STRENGTH OF THE STRANDS).

3.12.2 $0.50 F'_s$ FOR ALL OTHER AASHTO GROUP LOADINGS. (TO BE USED IN LIEU OF AASHTO ALLOWABLE OVER-STRESS FACTORS.)

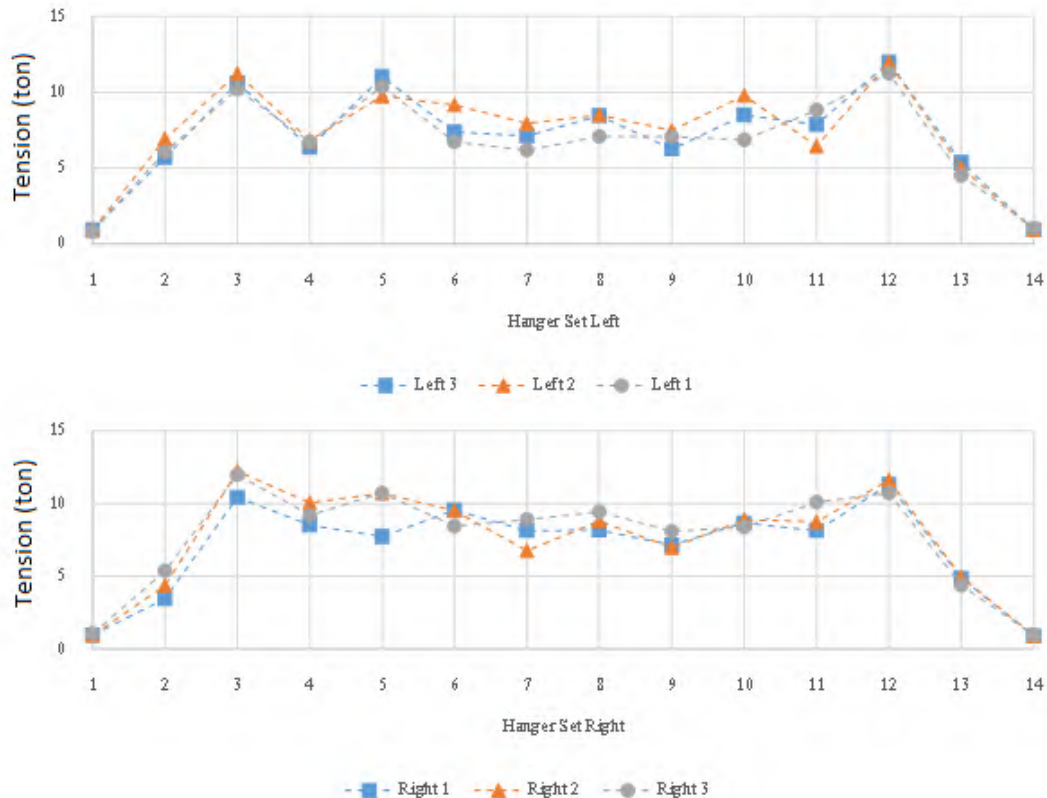
3.12.3 $0.56 F'_s$ DURING CONSTRUCTION AND STAY CABLE REPLACEMENT.

3.12.4 $0.60 F'_s$ FOR CABLE LOSS.

- ค่าของแรงดึงใน Hanger สูงสุด (3 x tie rod force) กรณี DL+SDL เท่ากับ 32 T ซึ่งไม่เกิน $0.45 F_u$ (36.7 T)
- ค่าของแรงดึงใน Hanger สูงสุด (3 x tie rod force) กรณี DL+SDL+LL เท่ากับ 54 T หรือ $0.68 F_u$ ซึ่งเกิน $0.45 F_u$ (36.7 T)
- จากการตรวจสอบค่าแรงดึงของ Hangers ในแบบจำลองที่ปรับค่า พบว่า ค่าแรงดึงใน Hanger ที่ตรวจวัดมาในปัจจุบันมีบางเส้นที่หย่อน (เส้นที่ 1, 2, 13, 14 ของ Arch Rib ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา รวม 8 เส้น) และมีค่าแรงดึงน้อยกว่าที่ควรเป็น



ซึ่งควรทำการเปลี่ยนเพื่อให้เกิดความปลอดภัย เพื่อป้องกันการรับภาระน้ำหนักที่มากเกินไปในส่วนของ Stiffening Girder ดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 8-63 แรงดึงในเหล็ก Hanger ของสะพานช่วงที่ 4 (Span 4)

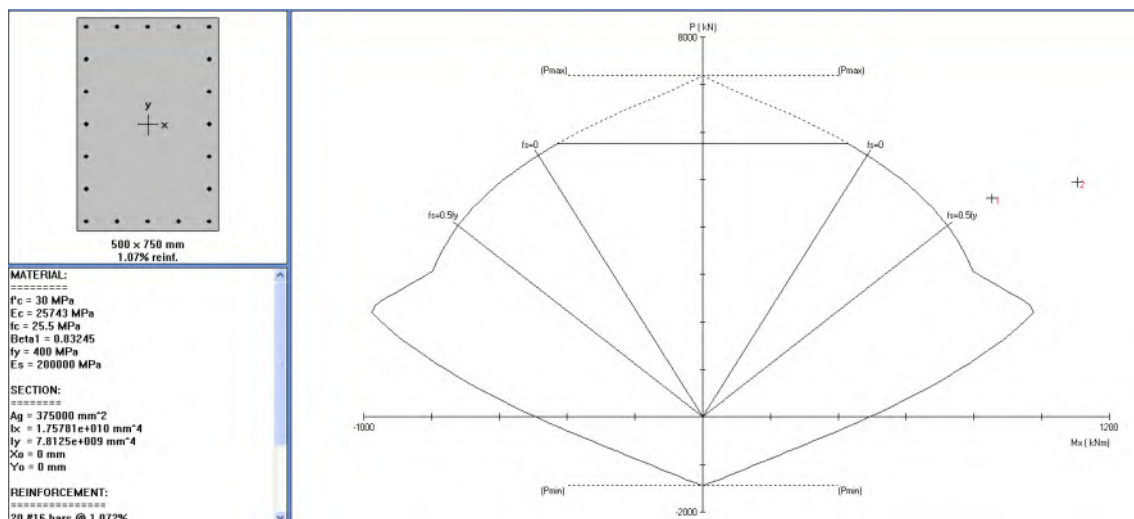
สรุปการบูรณะสำหรับรองรับยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น มีแนวทางการเสริมกำลังดังนี้

- ควรเสริมกำลังในส่วนของ Arch Rib และเปลี่ยน Hanger เส้นที่ 1, 2, 13, 14 ของ Arch Rib ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา รวม 8 เส้น ให้สามารถรองรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นได้
- ในส่วนของ Stiffening Girder ไม่มีความจำเป็นต้องเสริมกำลัง แต่ควรฉาบปิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก รวมทั้งการทาเคลือบสีกันเชื้อรา เพื่อเพิ่มความคงทนในอนาคต

❖ ผลเนื่องมาจากยานพาหนะ ไม่เกิน 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น

ส่วนของ Arch Rib

การวิเคราะห์หาแรงภายใน Arch Rib เนื่องจาก DL, SDL และ CR จะมีค่าเท่ากับหัวข้อ “ผลเนื่องมาจากยานพาหนะ ไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น” เนื่องจากแรงกระทำเหล่านี้ไม่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักบรรทุกทุก ส่วนผลการวิเคราะห์เนื่องจาก LL (ยานพาหนะ ขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้นขึ้นไป) พบว่า Max Axial Force = -82 T Per Rib จากการนำหน้าตัดของ Arch Rib ที่ได้จากการสำรวจ กำลังของคอนกรีตที่ได้จากการตรวจวัด รวมทั้งเหล็กเสริมที่ได้จากการสำรวจโดยวิธี Ferro Scan ที่ปรึกษาได้ตรวจสอบกำลังของ Arch Rib พบว่าไม่เพียงพอในการรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูป P-M Interaction Diagram (ซึ่งค่าแรงกระทำอยู่นอก Diagram)

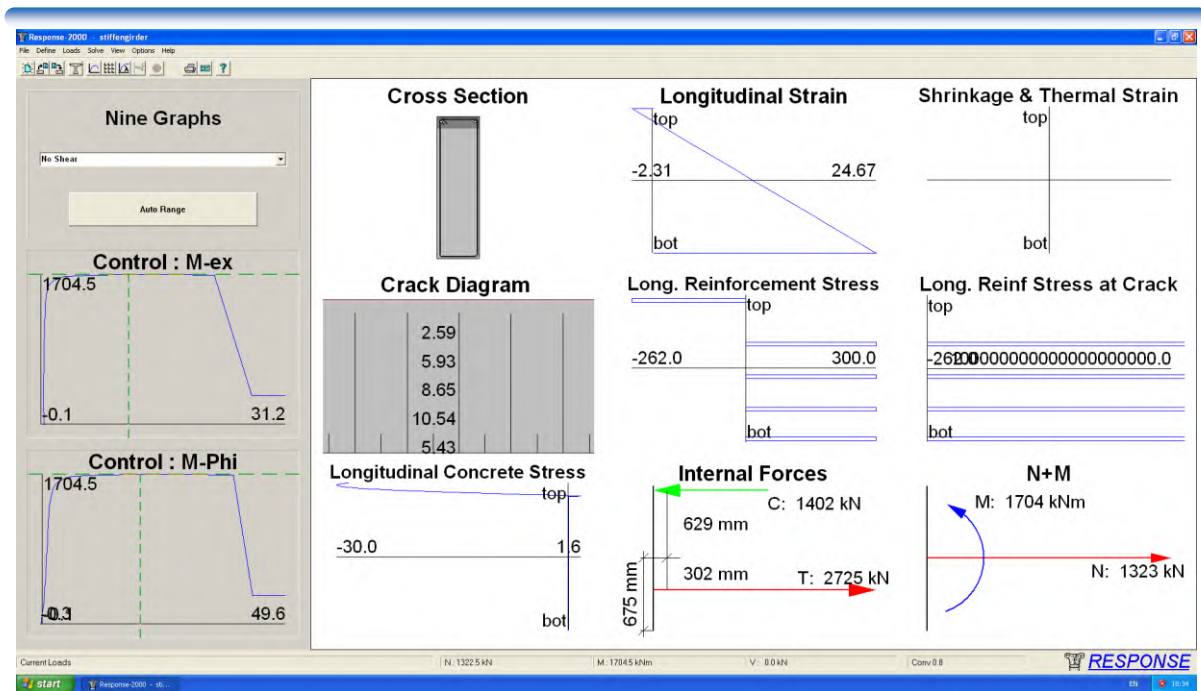


รูปที่ 8-64 P-M Interaction Diagram ตรวจสอบกำลังของ Arch Rib

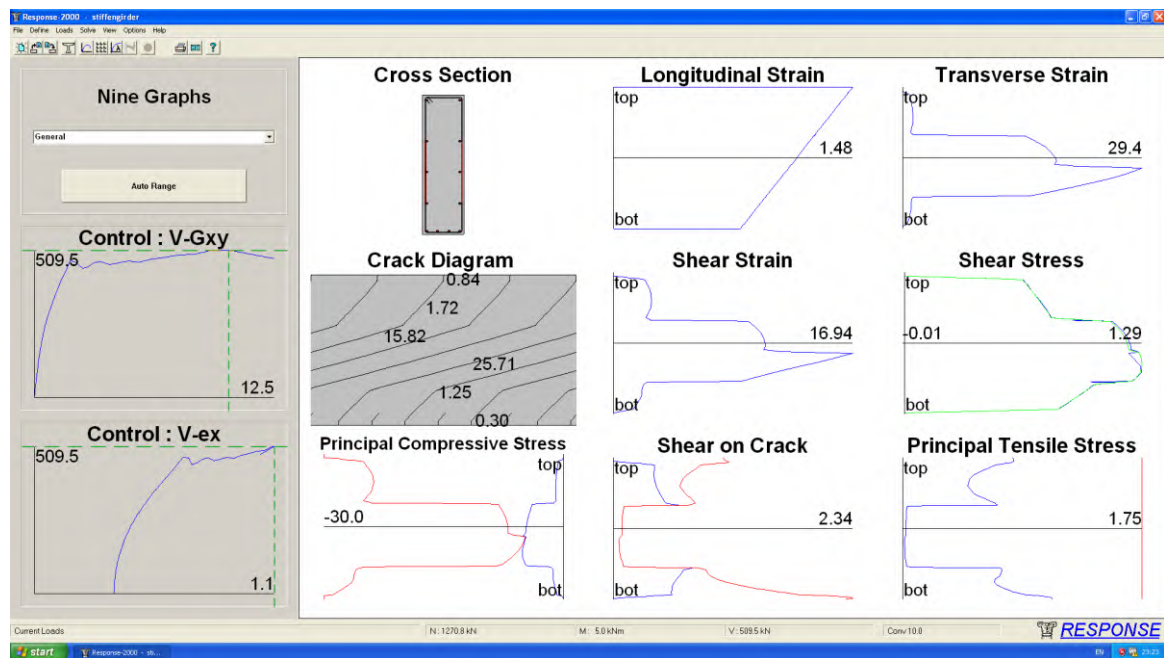
[8.4.10] Stiffening Girder

การวิเคราะห์หาแรงภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก DL, SDL และ CR จะมีค่าเท่ากับหัวข้อ “ผลเนื่องมาจากยานพาหนะ ไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น” เนื่องจากแรงกระทำเหล่านี้ไม่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักบรรทุกทุก ส่วนผลการวิเคราะห์เนื่องจาก LL (ยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน) Max Moment = 31.2 T-m และ Max Shear = 21 T จากการรวมแรงตาม Load Combination ของ AASHTO และตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของหน้าตัดคานเดิมที่ได้จากการสำรวจกำลังของคอนกรีต รวมทั้งเหล็กเสริมที่ได้จากการสำรวจโดยวิธี Ferro Scan ที่ปรึกษาได้ตรวจสอบกำลังของ Stiffening Girder ไม่เพียงพอในการรับน้ำหนักที่เกิดขึ้น ในกรณีของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในกรณี ยานพาหนะ ขนาดตั้งแต่ -3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป ($M_u = 84.25 \text{ T-m} < 0.9 M_n$ (153 T-m), ($V_u = 54 \text{ T} > 0.85 V_n = 42.5 \text{ T}$)





รูปที่ 8-65 ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนัก Moment ของหน้าตัด Stiffening Girder เดิม



รูปที่ 8-66 ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนัก Shear ของหน้าตัด Stiffening Girder เดิม

[8.4.11] Hanger

การวิเคราะห์หาแรงภายใน Hanger เนื่องจาก DL, SDL และ CR จะมีค่าเท่ากับหัวข้อ “ผลเนื่องจากยานพาหนะ ไม่เกิน 2 เฟลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น” เนื่องจากแรงกระทำเหล่านี้ไม่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักบรรทุกทุก ส่วนผลการวิเคราะห์เนื่องจาก LL (ยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เฟลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้นขึ้นไป) วิ่ง 2 Lane พร้อมกัน Max Tension = 21 T per Hanger จากการรวมแรงตาม Load Combination ของ AASHTO ที่ปรึกษาได้ตรวจสอบกำลังของ Hanger ตามวิธี Allowable Stress Design โดยใช้ค่าที่ยอมให้ของ Stress ที่เกิดขึ้นใน Tie Rod ไม่เกิน $0.45F_u$ ในสภาวะใช้งาน จากข้อกำหนด FIB นี้ สรุปได้ดังนี้

3.12 ALLOWABLE TENSILE STRESS FOR STAY CABLES:

3.12.1 $0.45 F_u$ FOR AASHTO GROUP I LOADING UPON COMPLETION OF CONSTRUCTION. (NOTE: F_u = MINIMUM SPECIFIED

ULTIMATE TENSILE STRENGTH OF THE STRANDS).

3.12.2 $0.50 F_u$ FOR ALL OTHER AASHTO GROUP LOADINGS. (TO BE USED IN LIEU OF AASHTO ALLOWABLE OVER-STRESS FACTORS.)

3.12.3 $0.56 F_u$ DURING CONSTRUCTION AND STAY CABLE REPLACEMENT.

3.12.4 $0.60 F_u$ FOR CABLE LOSS.

- ค่าของแรงดึงใน Hanger สูงสุด (3 x tie rod force) กรณี DL+SDL เท่ากับ 32 T ซึ่งไม่เกินกรณีปกติ $0.45 F_u$ (36.7 T)
- ค่าของแรงดึงใน Hanger สูงสุด (3 x tie rod force) กรณี DL+SDL+LL เท่ากับ 60 T หรือ $0.74F_u$ ซึ่งเกินกรณีปกติ $0.45 F_u$ (36.7 T) และเกินกรณีที่ยอมให้ Overload ($0.50F_u$)
- จากการตรวจสอบค่าแรงดึงของ Hangers ในแบบจำลองที่ปรับค่า เทียบกับค่าแรงดึงใน Hanger ที่ตรวจวัดมาในปัจจุบัน พบว่ามีบางเส้นที่ย่อนและมีค่าแรงดึงน้อยกว่าที่ควรเป็น ควรทำการเปลี่ยน Hangers ใหม่ทั้งหมดเพื่อให้เกิดความปลอดภัย และเพื่อป้องกันการรับภาระน้ำหนักที่มากเกินไปในส่วนของ Stiffening Girder

สรุปการบูรณะสำหรับรองรับยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เฟลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป มีแนวทางการเสริมกำลังดังนี้

- ควรทำการเสริมกำลังในส่วนของ Arch Rib และเปลี่ยน Hanger ทุกเส้น เพื่อให้สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกจรรยาบรรณที่เกิดขึ้นได้
- ในส่วนของ Stiffening Girder จำเป็นต้องเสริมกำลังเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน
- ในส่วนต่างๆ ของสะพานก่อนการเสริมกำลัง ควรทำการฉาบปิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก รวมทั้งทาเคลือบสีกันเชื้อรา เพื่อเพิ่มความคงทนในอนาคตภายหลังการเสริมกำลัง

[8.5] การตรวจสอบพฤติกรรมสะพานเพื่อรองรับแรงลม (Critical Wind Speed)

ในหัวข้อนี้ที่ปรึกษาจะพิจารณาการสั่นทางด้านข้างของสะพานจาก Critical Wind Speed (V_{cr}) ที่อาจเกิดขึ้นได้ ที่ปรึกษาได้เลือกใช้หลักการที่เสนอโดย Svensson (2012) ที่พิจารณาการสั่นของสะพานเนื่องจากผลของแรงลมต่างๆ เช่น ผลของ Turbulence ผลของ Vortex และผลของการเคลื่อนตัวของมวลลม โดยสะพานที่มีความยาวช่วงที่มากขึ้นย่อมมีความเสี่ยงต่อการสั่นเนื่องจากกระแสลมได้ โดยทั่วไปการวิเคราะห์การสั่นของสะพานเนื่องจากกระแสลม จำเป็นต้องพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและกระแสลม ซึ่งเป็นเรื่องที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้น การนำวิธีตาม Svensson (2012) ที่พิจารณาจากความสัมพันธ์ของ Vortex Shedding กับมิติของโครงสร้าง จึงเป็นวิธีอย่างง่าย สามารถใช้ตรวจสอบได้อย่างรวดเร็ว โดยมีสมการดังนี้

$$f = VS/D \quad (8-8)$$

โดยที่

f = the frequency of the pulsating pressure due to vortex shedding

V = the wind speed

S = the Strouhal number

D = the characteristic dimension, measured normal to the wind direction

โดยหากให้ความเร็วลม V คือ ความเร็ววิกฤติของลมที่ทำให้เกิดการสั่นแบบอันตราย (V_{cr}) โดยความเร็วลมที่ใช้เปรียบเทียบ คือ ความเร็วลมในช่วง 10 นาที (10 min Wind Speed, V_m) หากทราบความถี่ของสะพาน (f) และมิติของสะพานในแนวตั้งฉากกับแรงลม (D) และค่า Strouhal Number ก็จะสามารถประมาณหาความเร็ววิกฤติได้ โดยทั่วไปความเร็ววิกฤติควรมากกว่าความเร็วลมในช่วง 10 นาที (10min Wind Speed) ดังนี้ ($V_{cr} > 1.25V_m$)

จากการพิจารณาค่าของความเร็วลมวิกฤติและความเร็วลมในช่วง 10 นาที ของประเทศไทย พบว่า สะพานก่อนปรับปรุงยังสามารถ รองรับผลเนื่องจากกระแสลมได้ดังรูป

For Predee Bridge

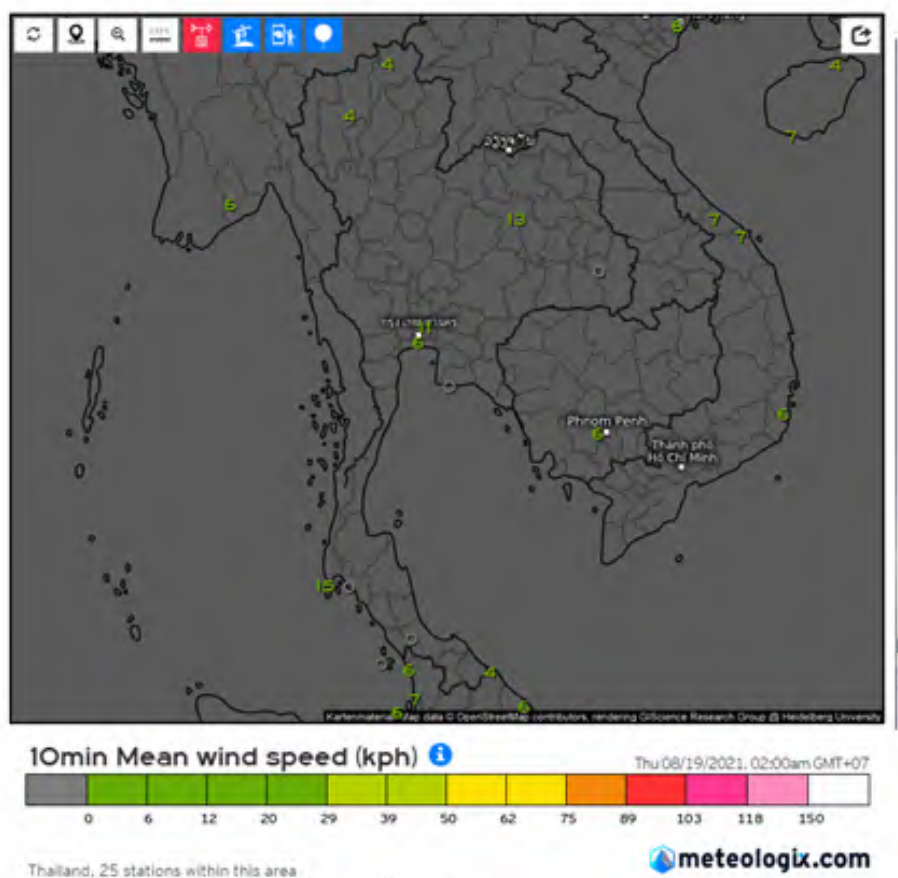
ก่อนปรับปรุง

Depth = 1.7 m (of Stiffen Girder)
 Width = 8 m
 St = 0.1
 fb = 1.36 Natural Frequency for first bending mode (transver
 ft = 3.05 Natural Frequency for first torsion mode

Vcr = 51.85 mph 82.96 kmperhr

V10min = 13 kmperhr Ratio = 6.381538

Vcr Shall be greater than 1.25Vm OK



รูปที่ 8-67 การประเมินความเร็วลมวิกฤติของสะพานปรีดี-ธำรง



[8.6] การบูรณะสะพานเพื่อรองรับการสั่นเนื่องจากรถยนต์ (Vehicle Induced Vibration)

ในหัวข้อนี้ ที่ปรึกษาจะนำเสนอแนวทางในการประเมินการสั่นไหวของสะพานเนื่องจากการวิ่งของรถยนต์ที่ทำให้เกิดความถี่กระตุ้น (Excitation Frequency) ระดับต่าง ๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Omega(t) = V_v/S \quad (8-9)$$

โดยที่

$\Omega(t)$ = the excitation frequency caused by the passing vehicle

V_v = velocity of the vehicle in feet per second

S = Panel spacing, feet

หากค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดการสั่นไหวแนวดิ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่กระตุ้นที่เกิดจากการวิ่งผ่านของรถบรรทุกวิ่งที่ระดับความเร็วค่าหนึ่ง ๆ จะทำให้สะพานเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ขึ้นได้ ควรต้องปรับปรุงให้โครงสร้างสะพานมีค่าความถี่ธรรมชาติต่างไปจากค่าความถี่ที่เกิดจากความเร็วการวิ่งรถบรรทุกระดับนั้น โดยมีผลการคำนวณดังนี้

- Panel Spacing Between Hanger (S) = 3.74 m
- For Vehicle Speed = 50 km/hr (V_{50}), Excitation Frequency (Ω) = 3.735 Hz
- For Vehicle Speed = 80 km/hr (V_{80}), Excitation Frequency (Ω) = 5.976 Hz

จากผลของความถี่กระตุ้น 3.735 Hz จำเป็นต้องเสริมกำลังให้สะพานมีความถี่สูงขึ้นใน Vertical Deck Translation 1st Mode เนื่องจาก Excitation Frequency/Natural Frequency = 0.93 ใกล้เคียง 1.0 อาจเกิดการสั่นหารถบรรทุกวิ่งที่ความเร็ว 50 km/hr

[8.7] การนำเสนอแนวทางการเสริมกำลังของโครงสร้าง

จากการนำเสนอ การวิเคราะห์แรงภายในและผลของพฤติกรรมสะพาน ที่มีค่าที่ไม่เพียงพอตามมาตรฐานการออกแบบ ดังที่เสนอมา ที่ปรึกษาจะนำเสนอแนวทางการบูรณะเพื่อปรับปรุงสะพานดังนี้

แนวทางเลือกการออกแบบเสริมกำลัง Arch Rib

ส่วนของ Arch Rib รองรับแรงอัดที่ถ่ายมาจากพื้นสะพานไปยัง Hanger ดังนั้น การเสริมกำลังส่วนประกอบนี้ สามารถทำได้ ดังนี้

1) การทำ Steel Jacketing

ข้อดี

- ติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว น้ำหนักเบา
- ทนแสง UV
- ราคาปานกลาง
- ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ

ข้อด้อย

- ไม่ทนไฟ
- ต้องมีระบบป้องกันสนิม
- กรณีที่ไม่ได้ใช้ Epoxy อาจต้องเจาะยึดกับโครงสร้างเดิม
- มีสภาพหลังการบูรณะต่างจากสะพานเดิม

2) การทำ CFRP Wrapping

ข้อดี

- ติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว น้ำหนักเบา
- ติดตั้งโดยใช้ Epoxy จึงไม่กระทบกับโครงสร้างเดิม
- ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ

ข้อด้อย

- ไม่ทนไฟ
- ไม่ทนแสง UV ต้องมีการ Coating
- มีสภาพหลังการบูรณะต่างจากสะพานเดิม

3) การทำ Concrete Jacketing



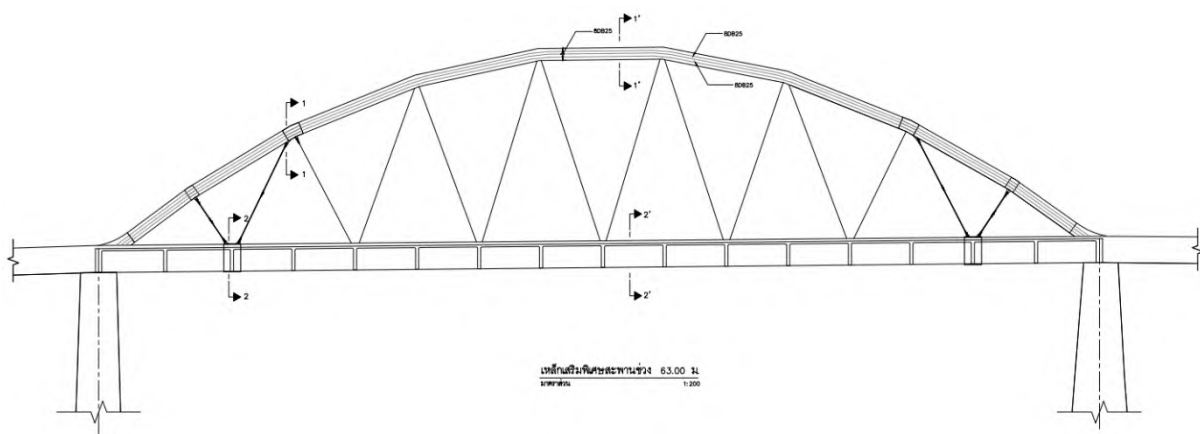
ข้อดี

- ทนไฟ
- ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ
- มีสภาพหลังการบูรณะเหมือนกับสะพานเดิม

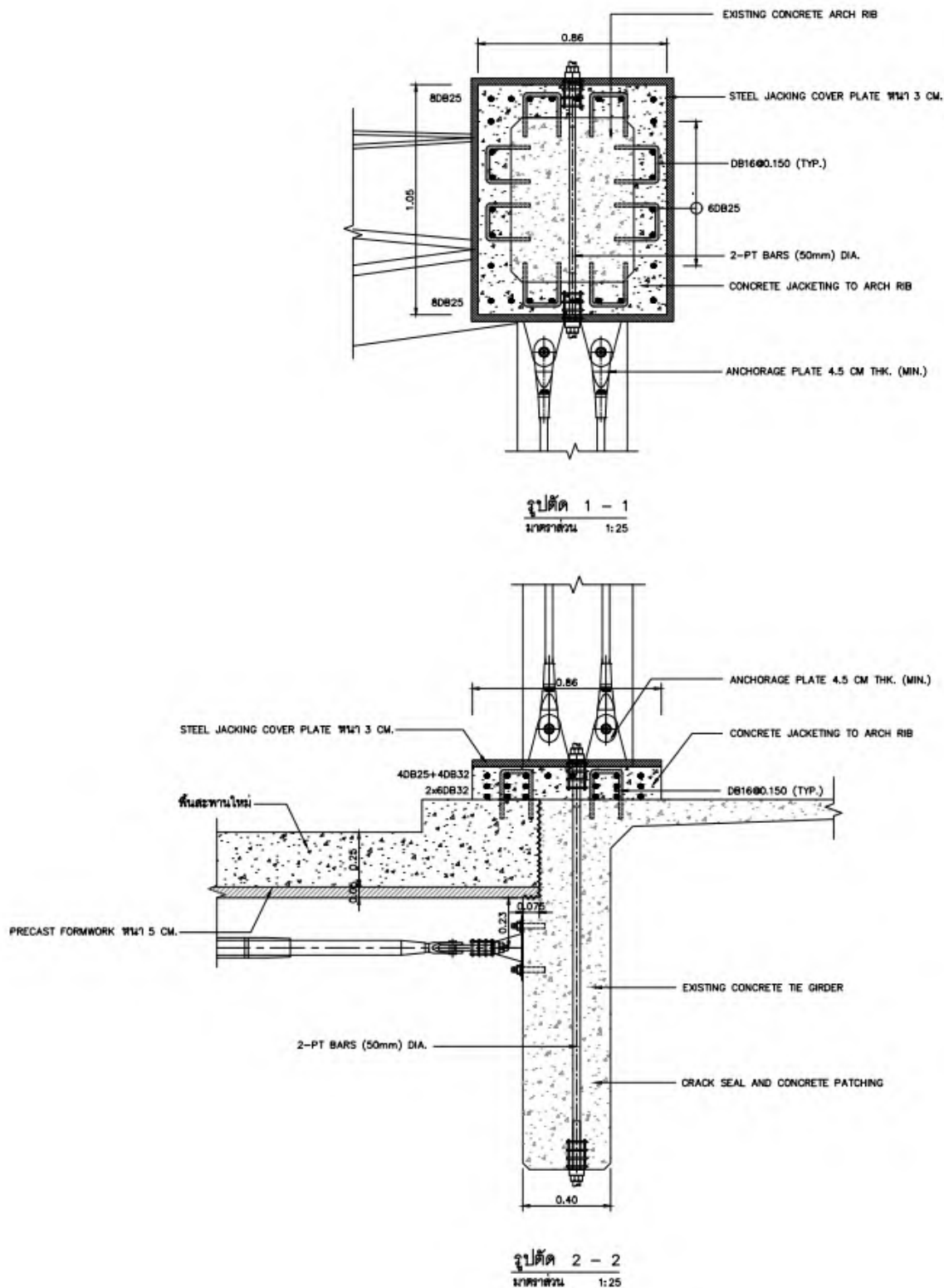
ข้อด้อย

- ก่อสร้างใช้ระยะเวลานาน น้ำหนักมาก
- ต้องเจาะยึดกับโครงสร้างเดิม

จากข้อดีและข้อด้อยข้างต้น ที่ปรึกษาเสนอ Concrete Jacketing และ Steel Jacketing สำหรับ Arch Rib



รูปที่ 8-68 ตัวอย่างรูปแบบการซ่อมและเสริมกำลัง Arch Rib (1)



รูปที่ 8-69 รูปแบบของการเสริมกำลัง Arch Rib (2)

ส่วนของ Stiffening Girder



1) การทำ Steel Jacketing

ข้อดี

- ติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว น้ำหนักเบา
- ทนแสง UV
- ราคาปานกลาง
- ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ

ข้อด้อย

- ไม่ทนไฟ
- ต้องมีระบบป้องกันสนิม
- กรณีที่ไม่ได้ใช้ Epoxy อาจต้องเจาะยึดกับโครงสร้างเดิม
- มีสภาพหลังการบูรณะต่างจากสะพานเดิม

2) การทำ CFRP Wrapping

ข้อดี

- ติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว น้ำหนักเบา
- ติดตั้งโดยใช้ Epoxy จึงไม่กระทบกับโครงสร้างเดิม
- ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ

ข้อด้อย

- ไม่ทนไฟ
- ไม่ทนแสง UV ต้องมีการ Coating
- มีสภาพหลังการบูรณะต่างจากสะพานเดิม

3) การทำ Concrete Jacketing

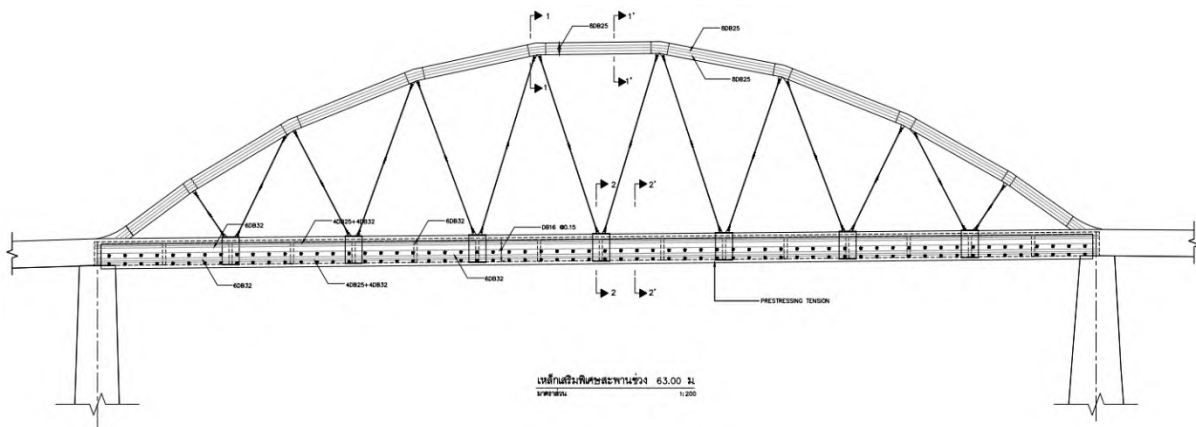
ข้อดี

- ทนไฟ
- ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ
- มีสภาพหลังการบูรณะเหมือนกับสะพานเดิม

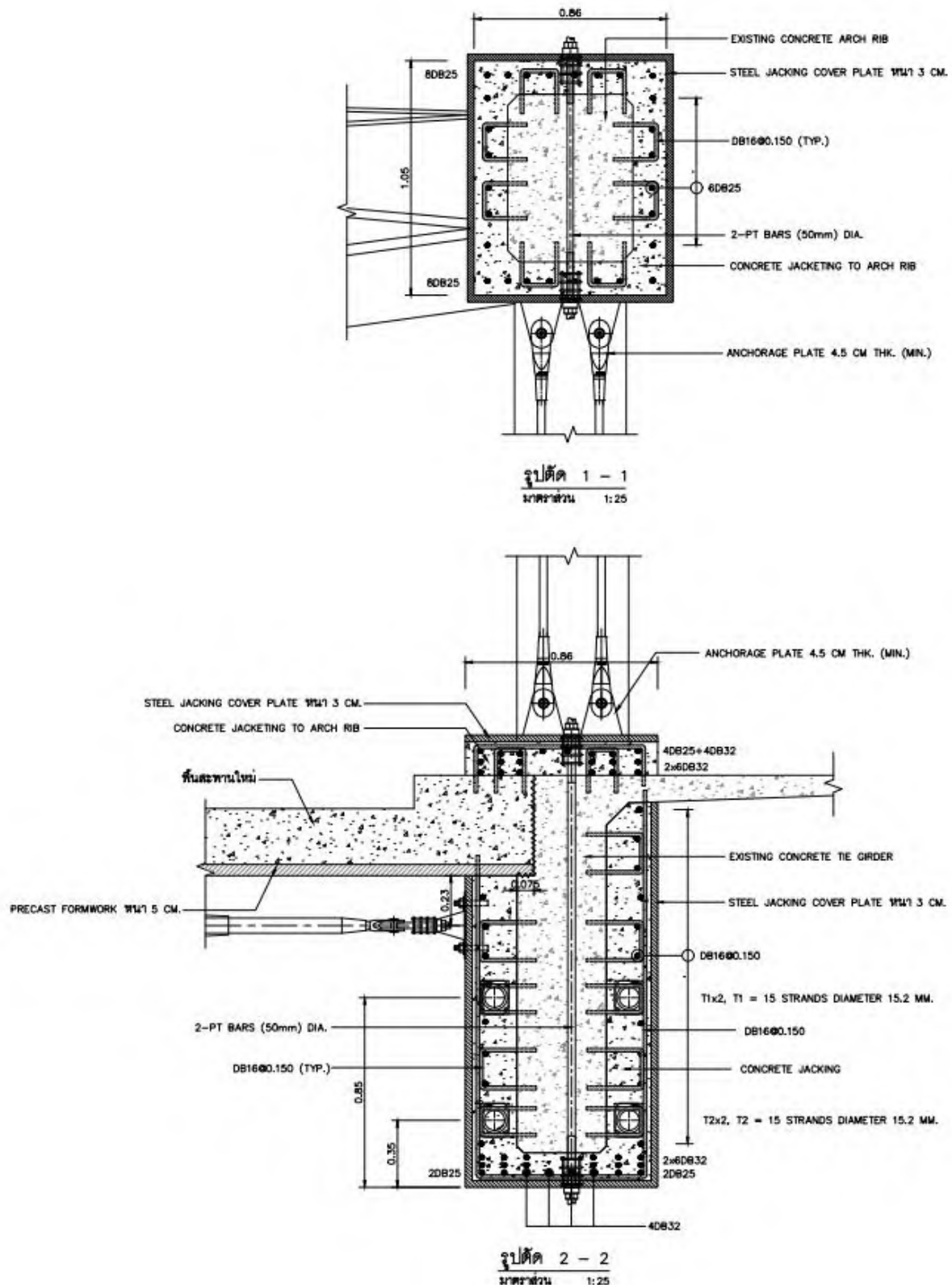
ข้อด้อย

- ก่อสร้างใช้ระยะเวลานาน น้ำหนักมาก

จากข้อดีและข้อด้อยข้างต้น ที่ปรึกษาเสนอ Concrete Jacketing สำหรับ Tie Girder โดยสามารถใช้ร่วมกับระบบลวดอัดแรงเพื่อลดโอกาสการแตกร้าวของ Tie Girder ในอนาคต



รูปที่ 8-70 ตัวอย่างรูปแบบการซ่อมและเสริมกำลัง Stiffening Girder (1)



รูปที่ 8-71 รูปแบบของการเสริมกำลัง Stiffening Girder (2)

แนวทางเลือกการออกแบบเสริมกำลังพื้นสะพานของช่วง Approach Span

1) การทำ Steel Plate Strengthening

ข้อดี

- ติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว น้ำหนักเบา
- ทนแสง UV
- ราคาปานกลาง
- ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ

ข้อด้อย

- ไม่ทนไฟ
- ต้องมีระบบป้องกันสนิม

2) การทำ CFRP Wrapping และ Strip

ข้อดี

- ติดตั้งได้อย่างรวดเร็ว น้ำหนักเบา
- ติดตั้งโดยใช้ Epoxy จึงไม่กระทบกับโครงสร้างเดิม
- ไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ

ข้อด้อย

- ไม่ทนไฟ
- ไม่ทนแสง UV ต้องมีการ Coating
- มีสภาพหลังการบูรณะต่างจากสะพานเดิม

3) การทำ Deck Replacement

ข้อดี

- มีความแข็งแรงทนทาน สามารถปรับจำนวนเหล็กเสริมให้เพียงพอตามน้ำหนักของรถบรรทุกหนักได้
- สามารถใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนได้
- สามารถทนไฟได้
- ค่าก่อสร้างถูกกว่า



ข้อดี

- ก่อสร้างช้ากว่าวิธีอื่น ๆ
- ต้องใช้ระบบค้ำยันตลอดการก่อสร้าง

จากข้อดีและข้อด้อยข้างต้น ที่ปรึกษาเสนอวิธี Deck Replacement สำหรับพื้นสะพาน

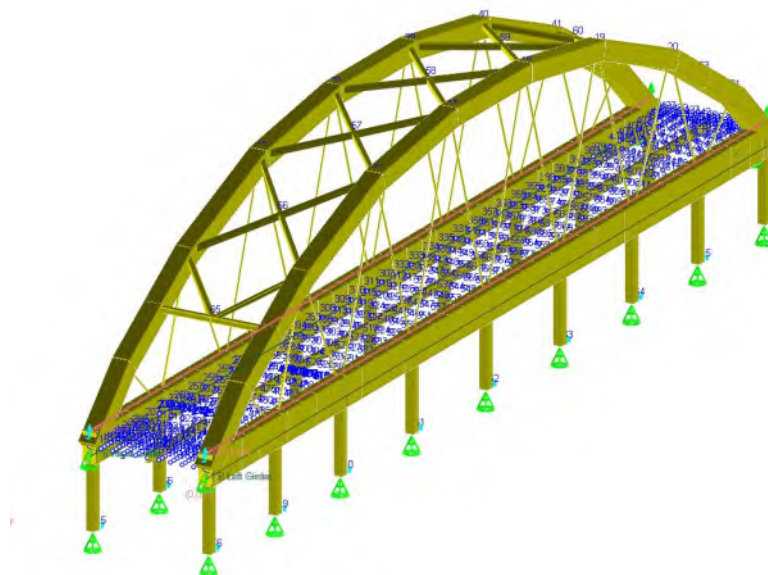
[8.8] การออกแบบหน้าตัดและสะพานภายหลังการเสริมกำลังของโครงสร้าง

ในหัวข้อนี้ที่ปรึกษาได้นำแนวความคิดสำหรับการเสริมกำลังและปรับปรุงสะพาน มาแสดงในรายละเอียด ดังนี้

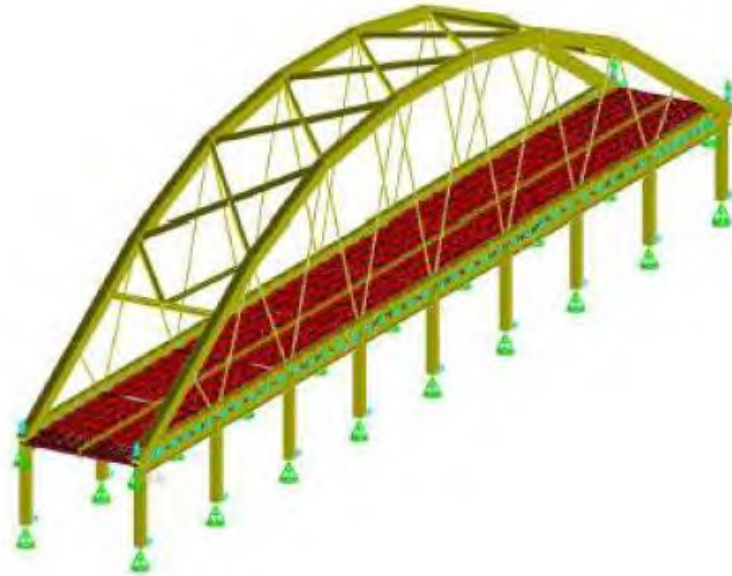
[8.8.1] การเสริมกำลังสะพาน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของสะพาน

ในหัวข้อนี้ที่ปรึกษาจะนำแนวทางการเสริมกำลังเพื่อเพิ่มความแข็งแรง และลดการสั่นไหว เนื่องจากการวิ่งของยานพาหนะบนสะพาน และลดโอกาสการเกิดการสั่นไหวภายใต้แรงลมใกล้เคียงระดับ Critical Wind Speed โดยแนวทางของการเสริมกำลังแสดงดังนี้

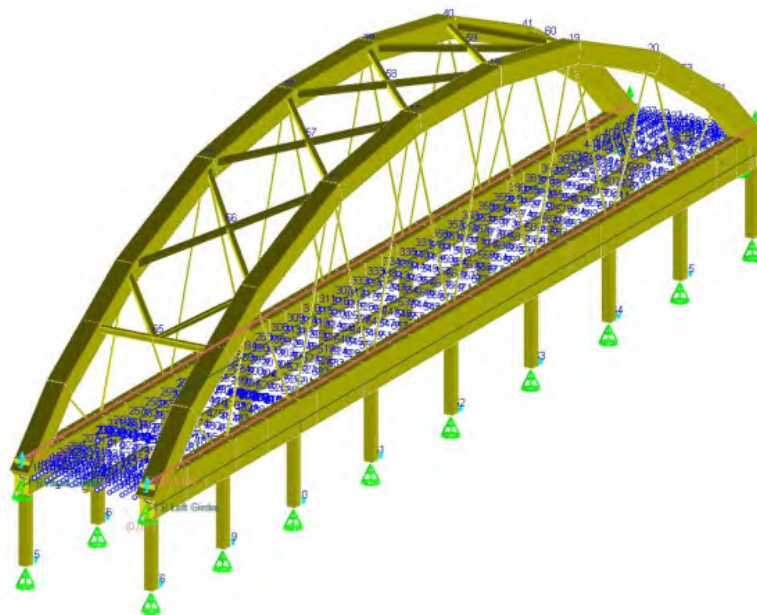
จากแนวความคิดข้างต้น ที่ปรึกษา เสริมกำลัง และ ทำการวิเคราะห์ขั้นตอนการก่อสร้างของสะพานภายหลังการเสริมกำลัง เพื่อใช้ประเมินตามมาตรฐาน AASHTO LRFD และ FIB โดยในการวิเคราะห์สะพานได้ดำเนินการสร้างแบบจำลอง ต่อจากเวลาเปิดใช้งานสะพานมาแล้ว 70 ปี ดังนี้



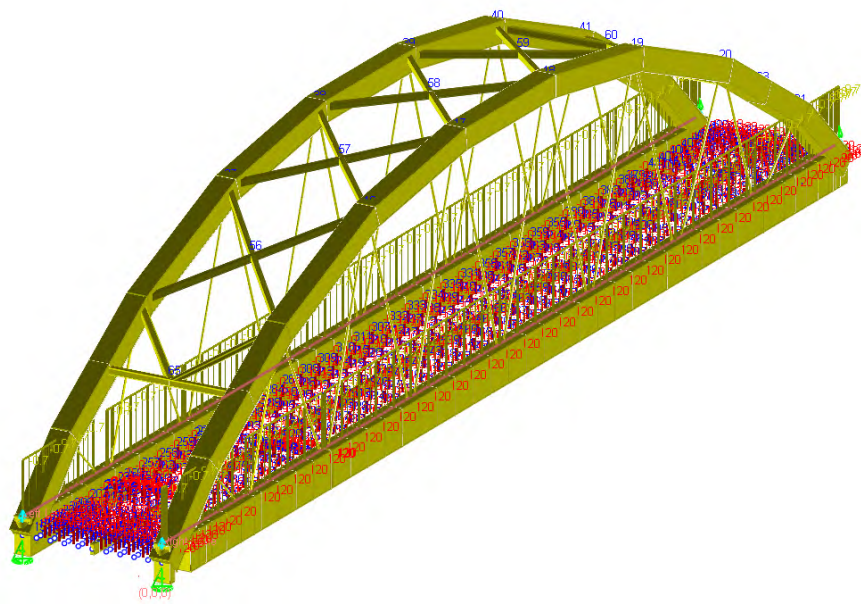
รูปที่ 8-72 ขั้นตอนการติดตั้ง Temporary Support ใต้คานของสะพานเดิม



รูปที่ 8-73 ขั้นตอนการ เปลี่ยน Hanger เดิมของสะพาน



รูปที่ 8-74 ขั้นตอนการติดตั้งอัดแรงภายใน Stiffening Girder



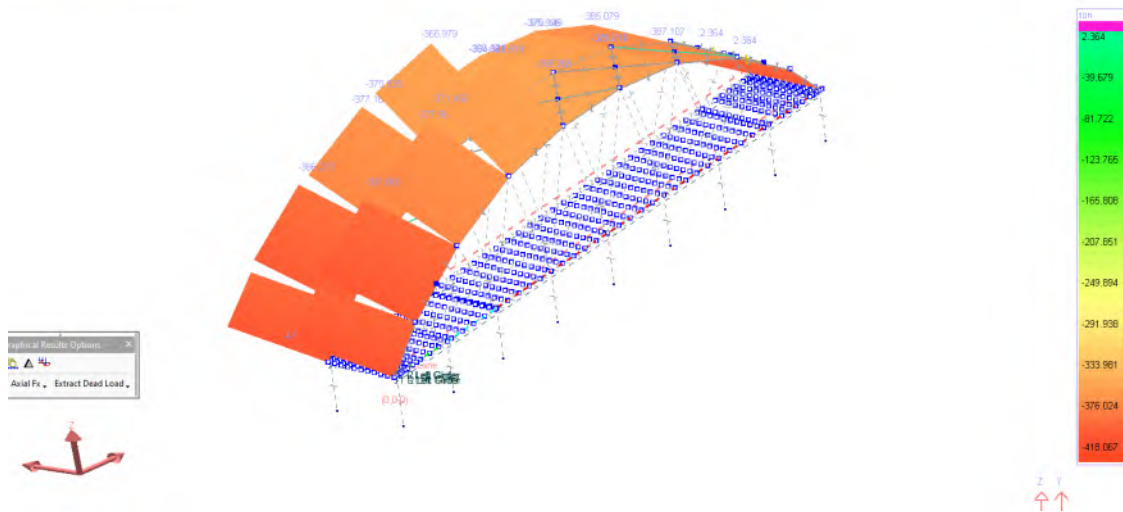
รูปที่ 8-75 ขั้นตอนการถ่ายน้ำหนักลง Bearing ของสะพาน

Joint Reactions									
☐ Envelope Selected Result Cases ☐ Incremental Results ☐ Report In Local UCS									
Min/Max for Force --X-- (ton) ☐ ABS View Full Cumulative Results									
	Joint	Result Case	Force X (ton)	Force Y (ton)	Force Z (ton)	Moment X (ton-m)	Moment Y (ton-m)	Moment Z (ton-m)	
1	1	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	33.1632	-99.8836	343.5020	11.8613	0.0000	5.3579	
2	12	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	0.0000	0.0000	0.0000	2.2462	0.0000	0.0000	
3	13	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	0.0000	-82.9910	351.1036	7.2018	0.0000	6.6404	
4	22	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	-33.1704	104.0434	348.7715	-7.9444	0.0000	0.7078	
5	23	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	0.0000	0.0000	0.0000	-2.4830	0.0000	0.0000	
6	24	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	0.0000	0.0000	0.0000	-6.0350	0.0000	0.0000	
7	33	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	0.0000	0.0000	0.0000	-2.2184	0.0000	0.0000	
8	34	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	0.0000	78.8319	349.8176	-6.5826	0.0000	0.6347	
9	100	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	0.0000	0.0000	0.0000	3.7705	0.0000	0.0000	
10	101	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	0.0000	0.0000	0.0000	3.5781	0.0000	0.0000	
11	102	nd Barrier: Wearing: Barrier and Rail and	0.0000	0.0000	0.0000	3.3325	0.0000	0.0000	

รูปที่ 8-76 แรงกระทำของ Bearing กรณี (DL+SDL+PS+TIME)

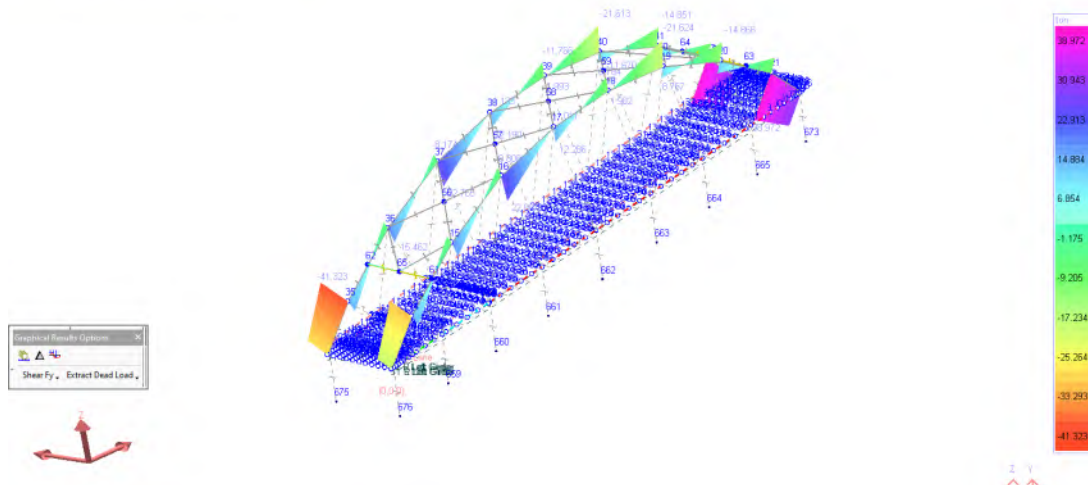
ที่ปรึกษาได้นำแบบสะพานที่ได้ทำการเสริมกำลัง ทำการวิเคราะห์หาแรงภายในเพื่อตรวจสอบกำลังการรับน้ำหนักภายหลังจากการเสริมกำลังแสดงดังนี้

on: 1.250k Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - 70 Years after construction Other PT Losses



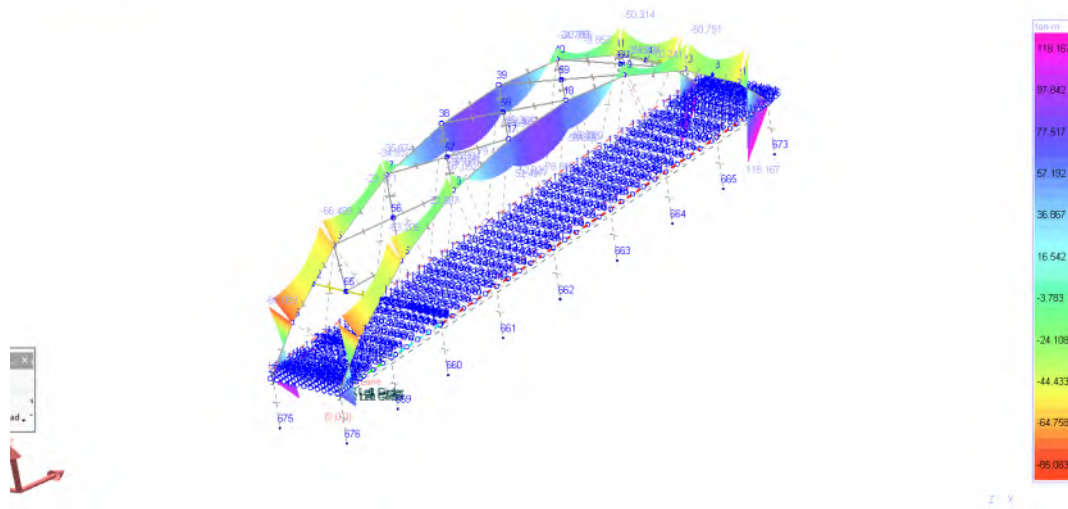
รูปที่ 8-77 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก DL

Zoom: 1.250k Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Shear Fy - 70 Years after construction Other PT Losses



รูปที่ 8-78 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก DL

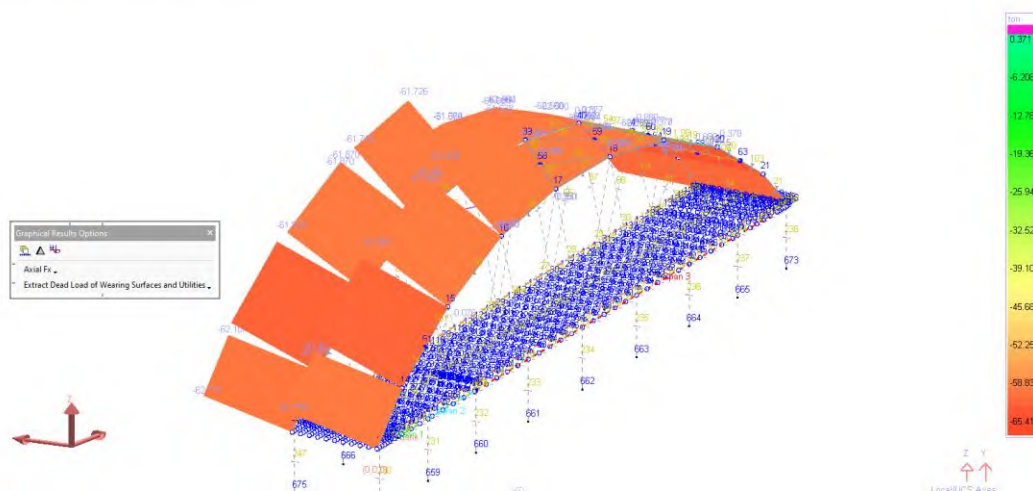
Stage: Moving Load L and T / Step 1
Moment Mz - 70 Years after construction Other PT Losses



รูปที่ 8-79 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Arch Rib เนื่องจาก DL

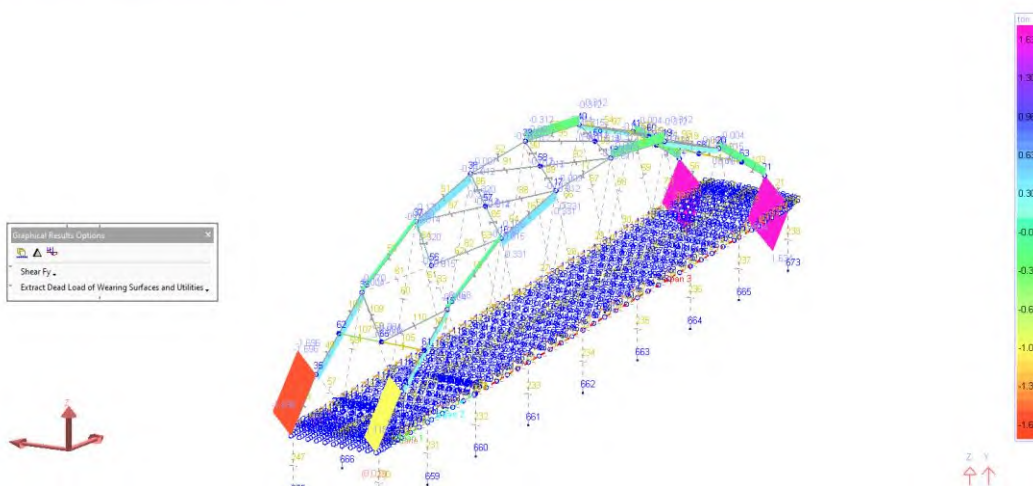


Zoom: 1.563X - Stage: Mode Shape Analysis
Member Forces - Axial Fx - 70 Years after construction - Other PT Losses



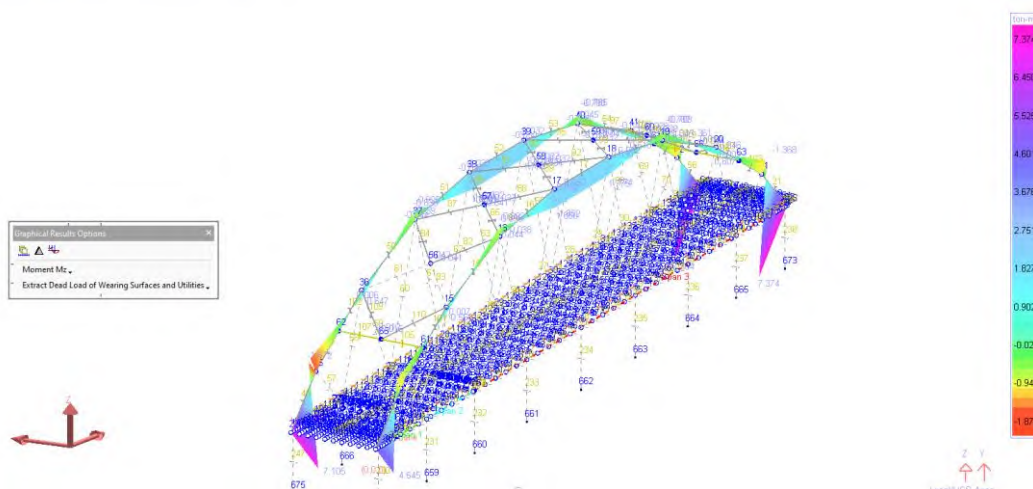
รูปที่ 8-80 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก SDL

Zoom: 1.563X - Stage: Mode Shape Analysis
Member Forces - Shear Fy - 70 Years after construction - Other PT Losses



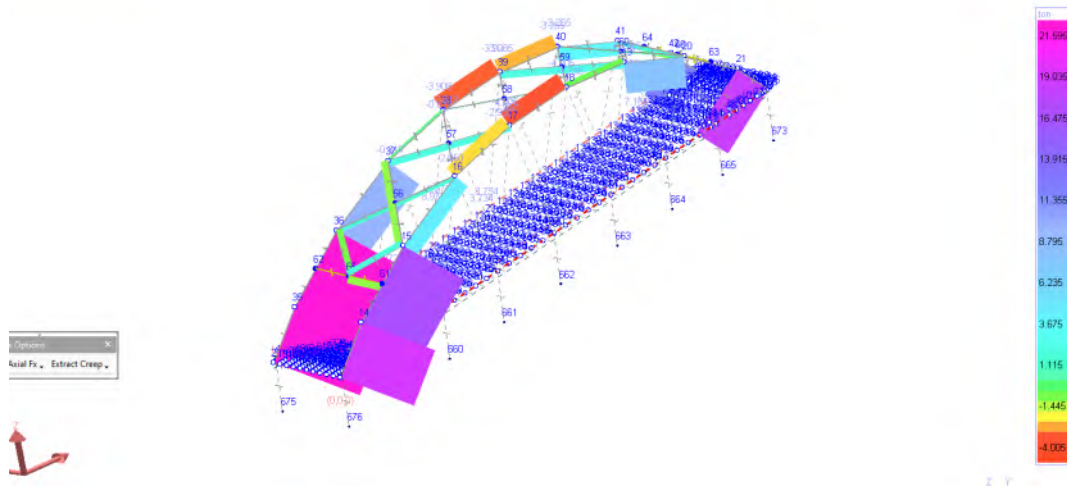
รูปที่ 8-81 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก SDL

Zoom: 1.563X - Stage: Mode Shape Analysis
Member Forces - Moment Mz - 70 Years after construction - Other PT Losses



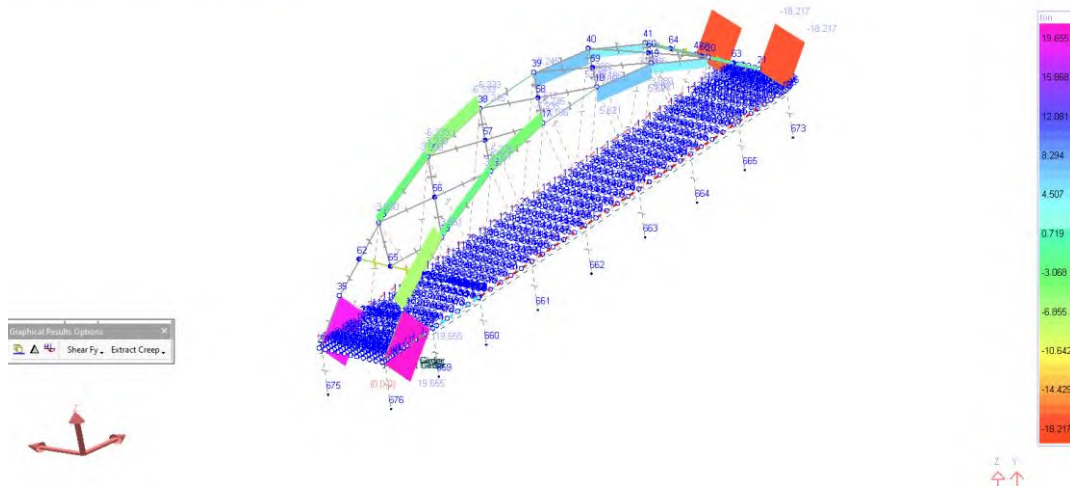
รูปที่ 8-82 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Arch Rib เนื่องจาก SDL

Stage: Moving Load L and T / Step 1
Axial Fx - 70 Years after construction: Other PT Losses



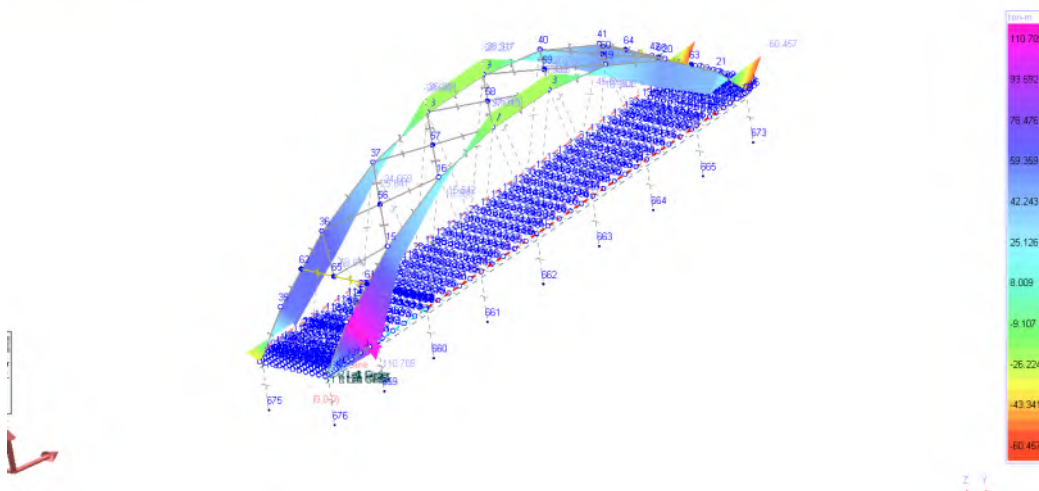
รูปที่ 8-83 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก CR

Stage: Moving Load L and T / Step 1
Shear Forces - Shear Fy - 70 Years after construction: Other PT Losses



รูปที่ 8-84 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก CR

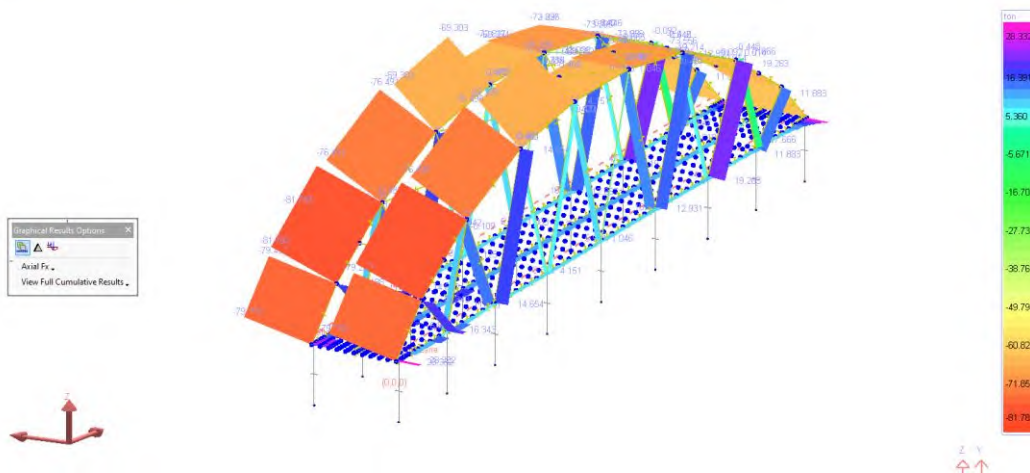
Stage: Moving Load L and T / Step 1
Moments Mz - 70 Years after construction: Other PT Losses



รูปที่ 8-85 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Arch Rib เนื่องจาก CR



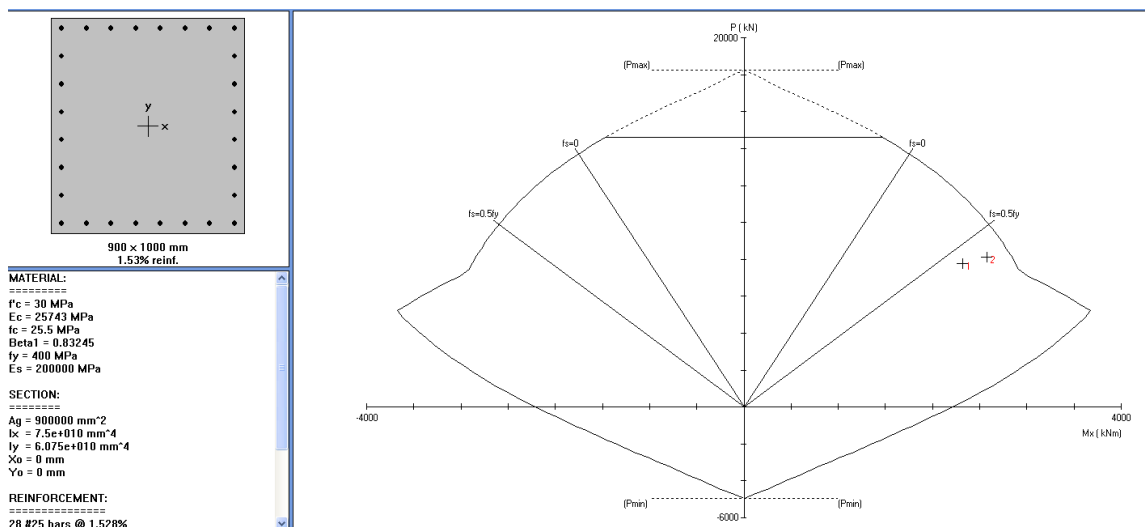
Zoom 1.563x - Stage: Moving Load T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - Dist: 49.90



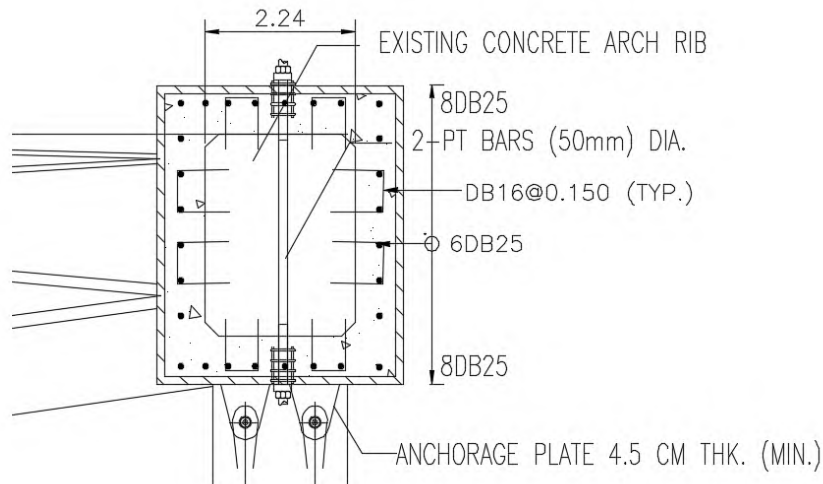
รูปที่ 8-86 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Arch Rib เนื่องจาก LL
(ขนาดตั้งแต่ 3 เฟลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน 2 Lane)

Max Axial Force = -82 T Per Rib

จากการนำหน้าตัดของ Arch Rib มาทำการเสริมกำลังด้วย Concrete Jacketing ที่ปรึกษาได้
ตรวจสอบกำลังของ Arch Rib พบว่า เพียงพอในการรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูป P-M Interaction
Diagram (แรงกระทำอยู่ภายใน Diagram)



รูปที่ 8-87 P-M Interaction Diagram ตรวจสอบกำลังของ Arch Rib ที่เสริมกำลัง



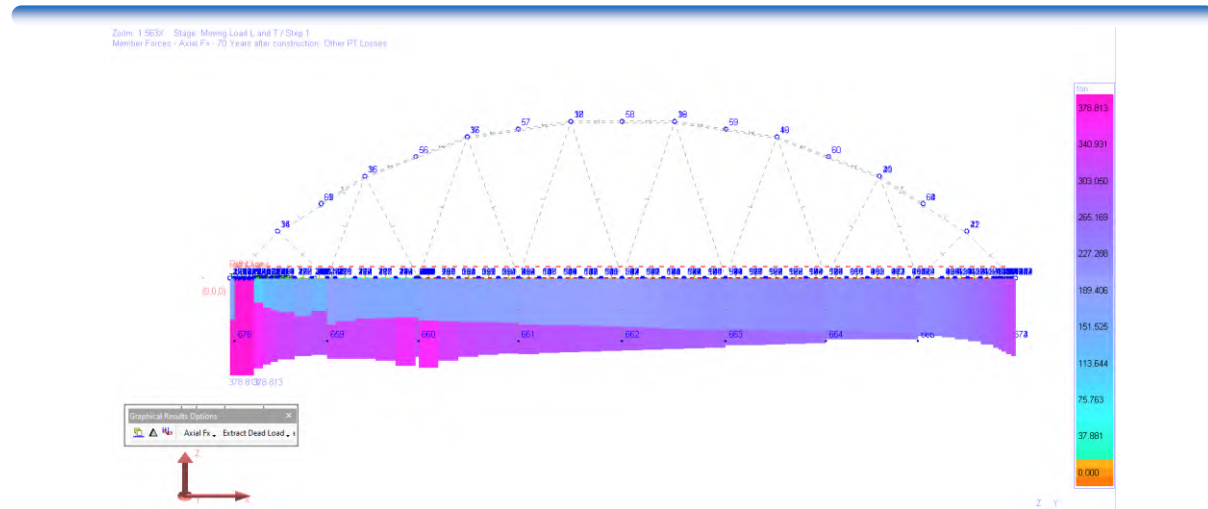
รูปตัด 1 - 1
มาตราส่วน 1:25

รูปที่ 8-88 ตัวอย่างของการเสริมกำลังของ Arch Rib

[8.8.2] การเสริมกำลังส่วนของ Stiffening Girder

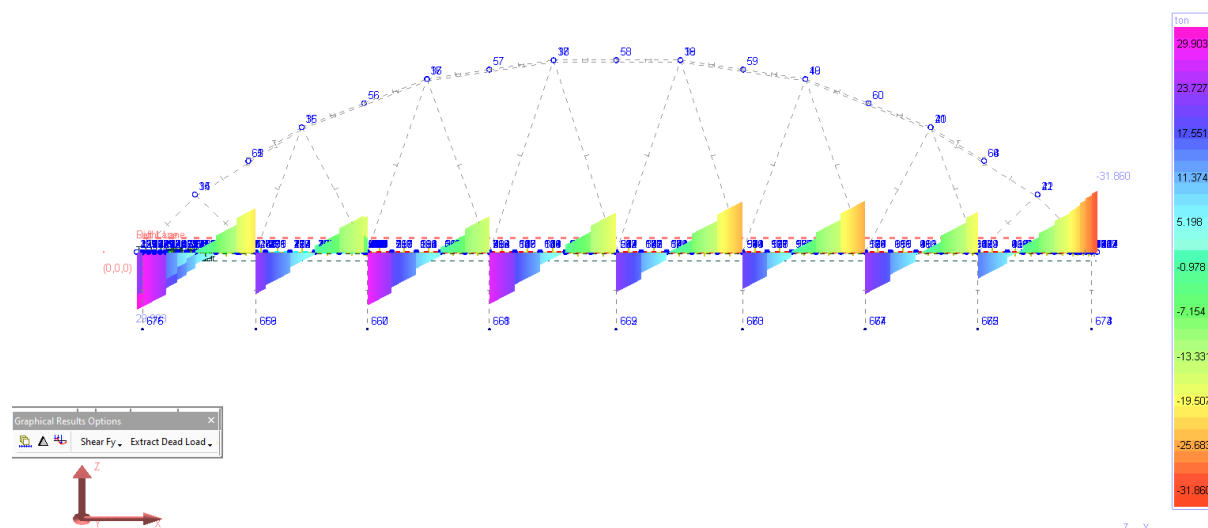
ที่ปรึกษาแสดงการเสริมกำลังของ Stiffening Girder โดยการใช้ Concrete Jacketing รวมกับการดัดลวดอัดแรงตามยาว เพื่อช่วยในการลดความเค้นดึงในระหว่างการใช้งาน และช่วยในการเพิ่มกำลังของหน้าตัด โดยรายละเอียดแสดงดังนี้





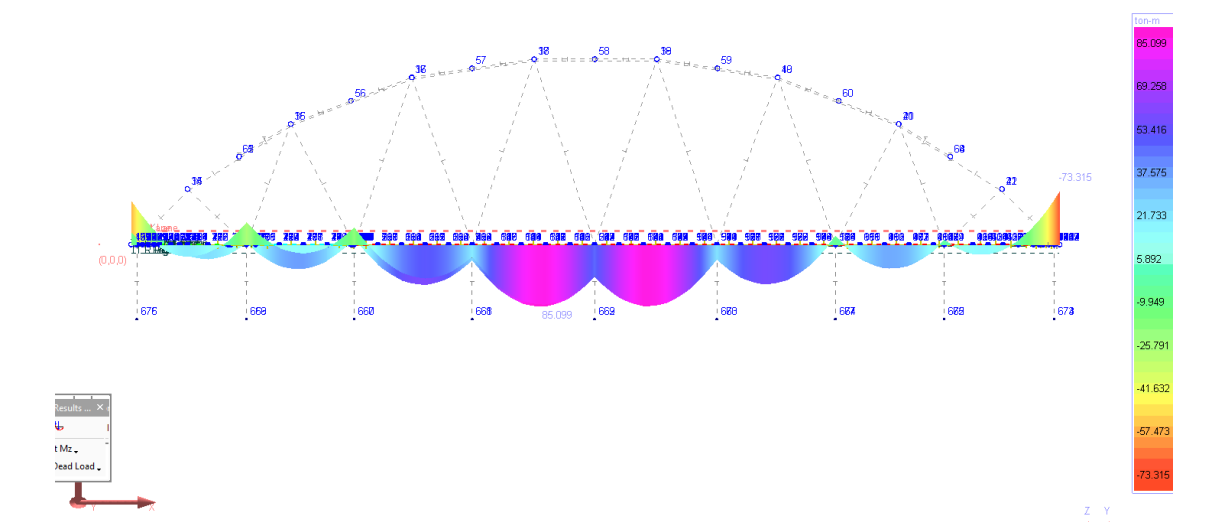
รูปที่ 8-89 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก DL

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Shear Fy - 70 Years after construction: Other PT Losses



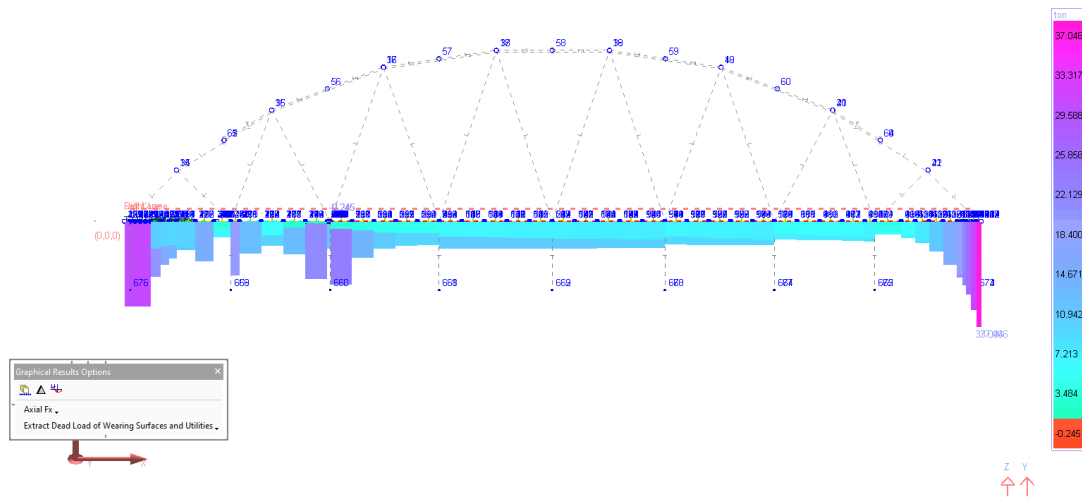
รูปที่ 8-90 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก DL

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Moment Mz - 70 Years after construction: Other PT Losses



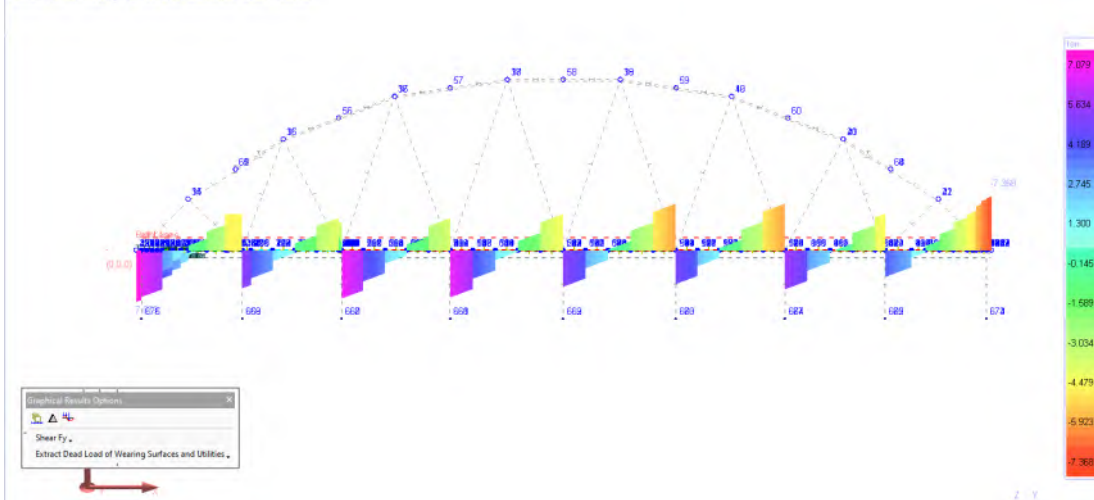
รูปที่ 8-91 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก DL

com: 1.56304 Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - 70 Years after construction Other PT Losses



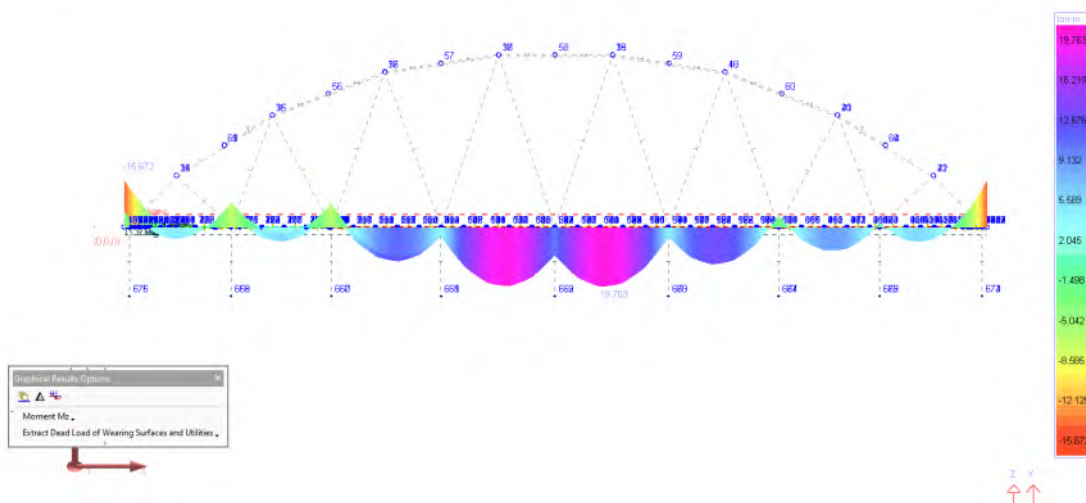
รูปที่ 8-92 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก SDL

com: 1.56304 Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Shear Fy - 70 Years after construction Other PT Losses



รูปที่ 8-93 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก SDL

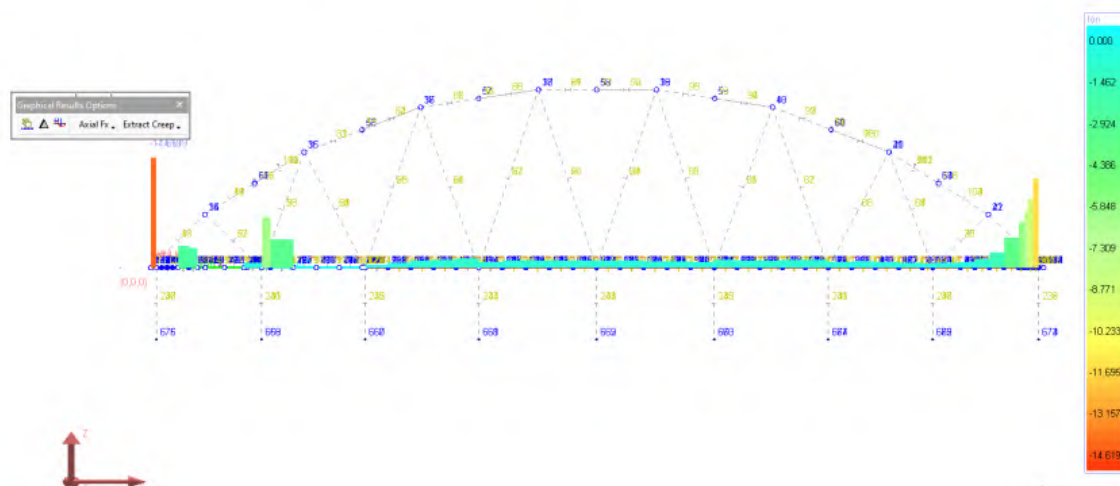
com: 1.56304 Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Moment Mz - 70 Years after construction Other PT Losses



รูปที่ 8-94 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก SDL

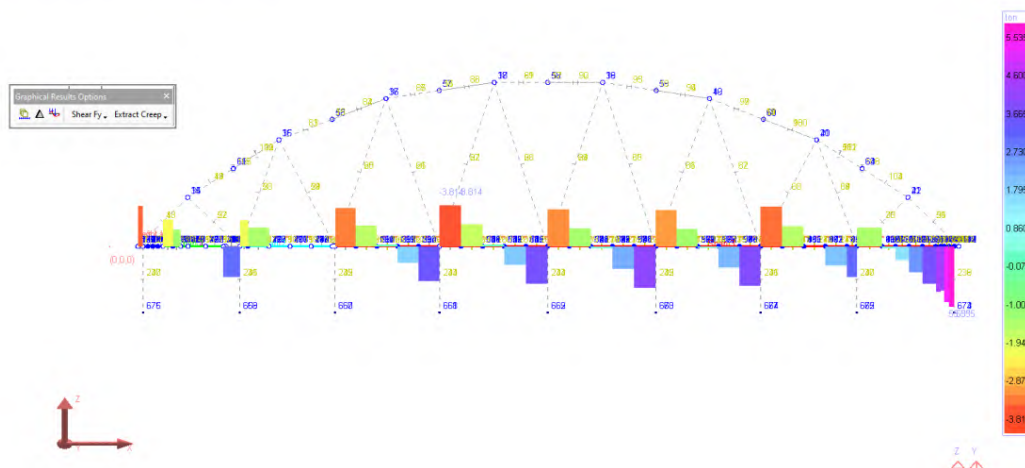


Zoom: 1.503X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - 70 Years after construction Other PT Losses



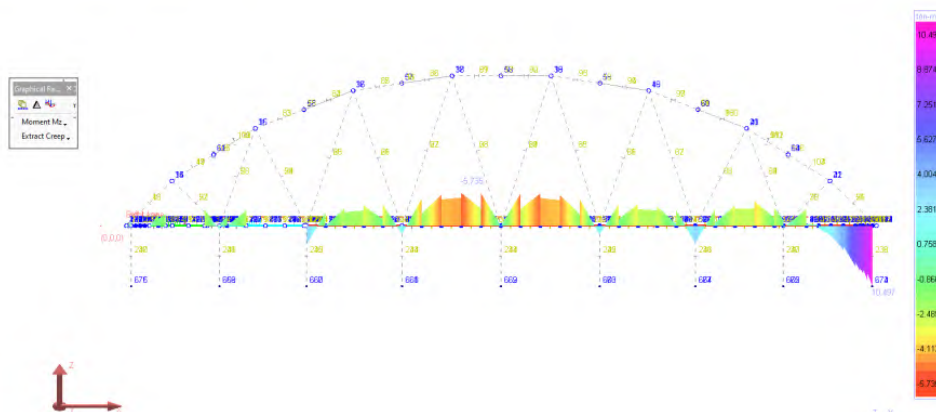
รูปที่ 8-95 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก CR

Zoom: 1.503X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Shear Fy - 70 Years after construction Other PT Losses



รูปที่ 8-96 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก CR

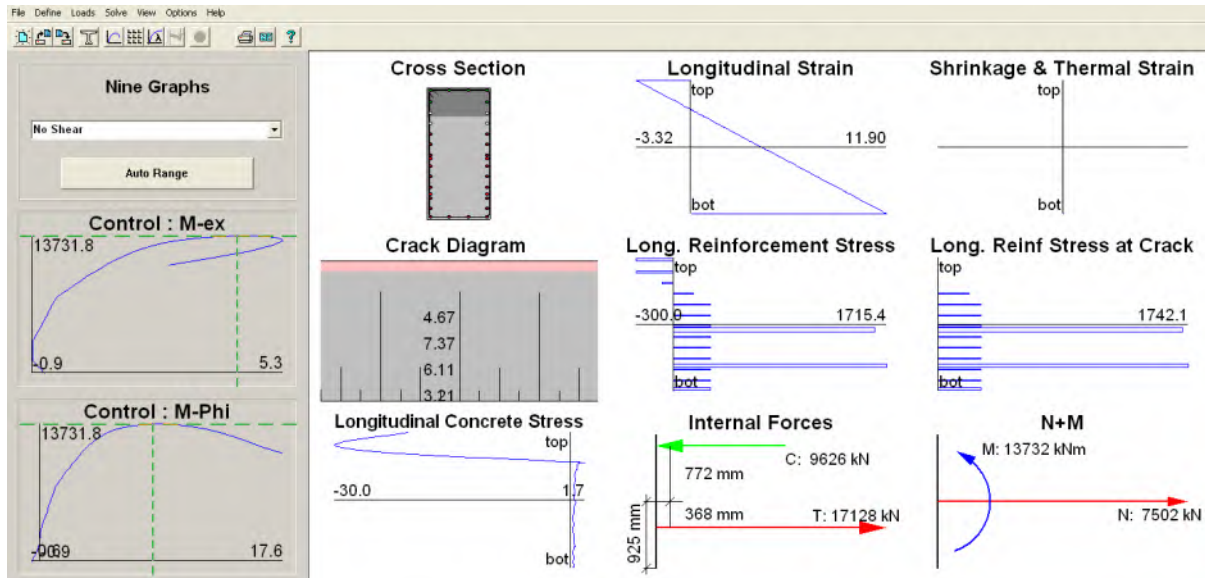
Zoom: 1.503X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Moment Mz - 70 Years after construction Other PT Losses



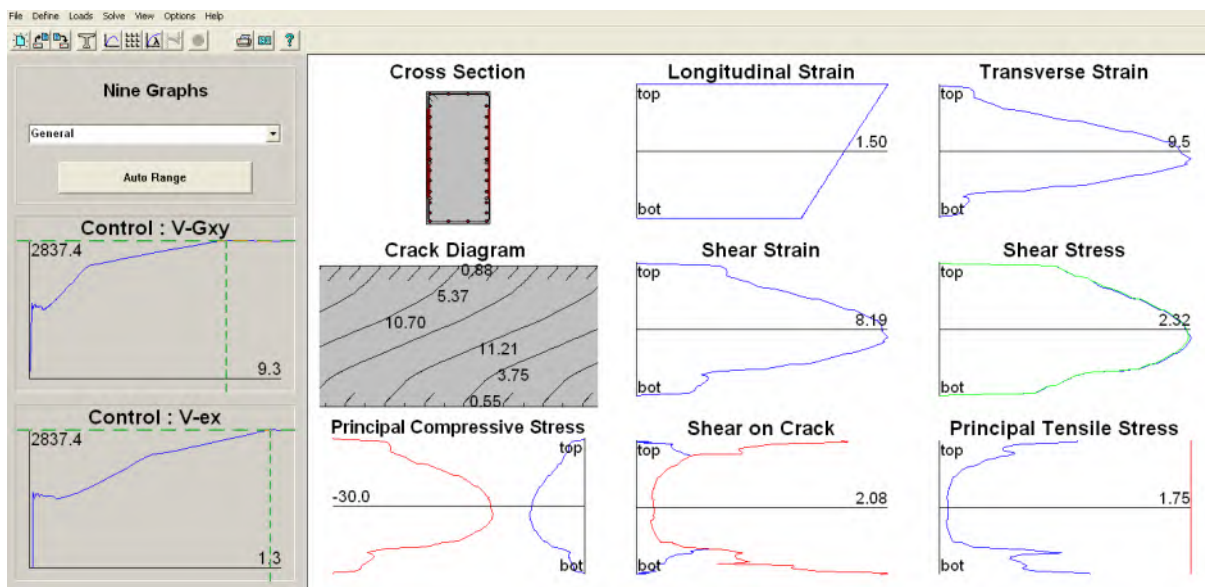
รูปที่ 8-97 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Stiffening Girder เนื่องจาก CR

ผลการวิเคราะห์ Stiffening Girder เนื่องจาก LL (ยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป วิ่งต่อกันเป็นขบวน 2 Lane) Max Moment = 31.2 T-m Max Shear = 21 T จากการรวม

แรงตาม Load Combination ของ AASHTO และตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของหน้าตัดคานที่ได้ทำการเสริมกำลังของ Stiffening Girder พบว่าเพียงพอในการรับน้ำหนักที่เกิดขึ้น ($M_u = 223.75 \text{ T-m} < 0.9M_n (1235 \text{ T-m})$, ($V_u = 99 \text{ T} < 0.85V_n = 240 \text{ T}$)

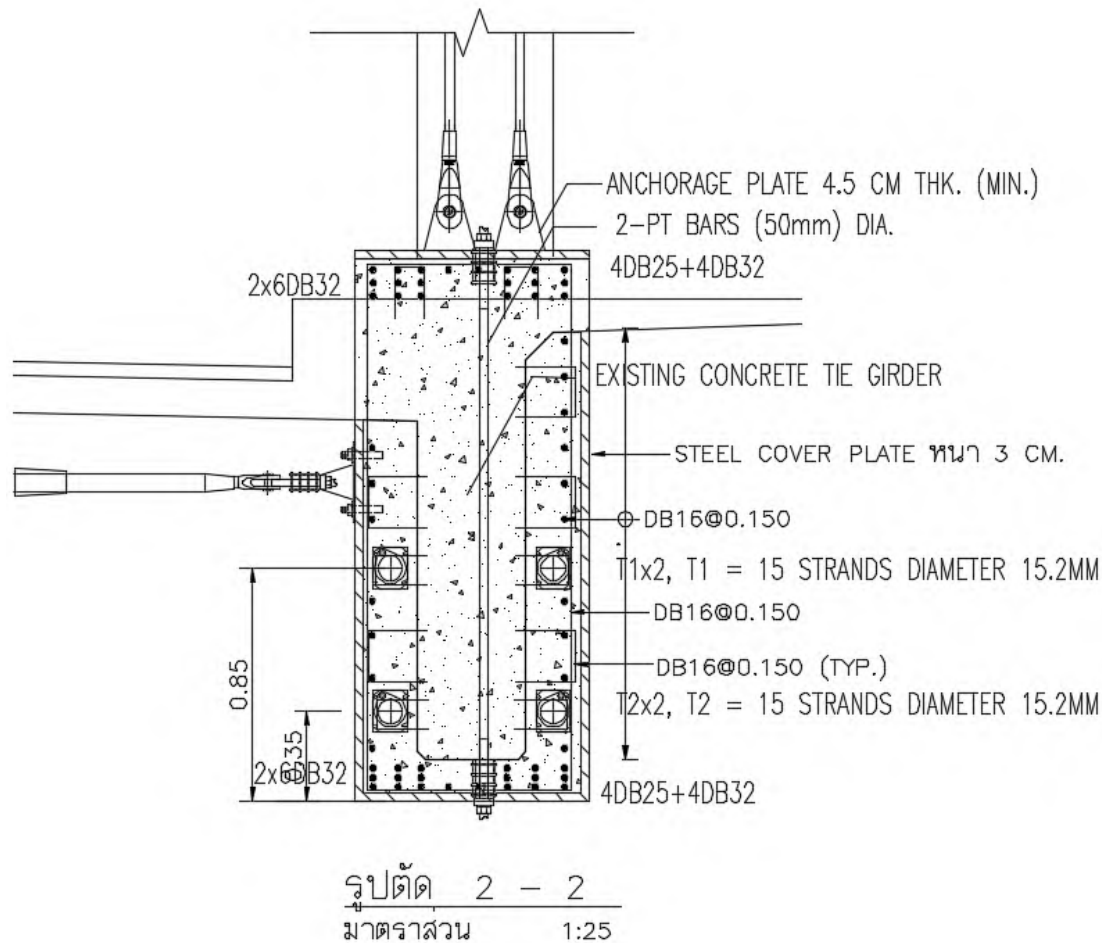


รูปที่ 8-98 ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนัก Moment ของหน้าตัด Stiffening Girder ที่เสริมกำลัง



รูปที่ 8-99 ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนัก Shear ของหน้าตัด Stiffening Girder ที่เสริมกำลัง



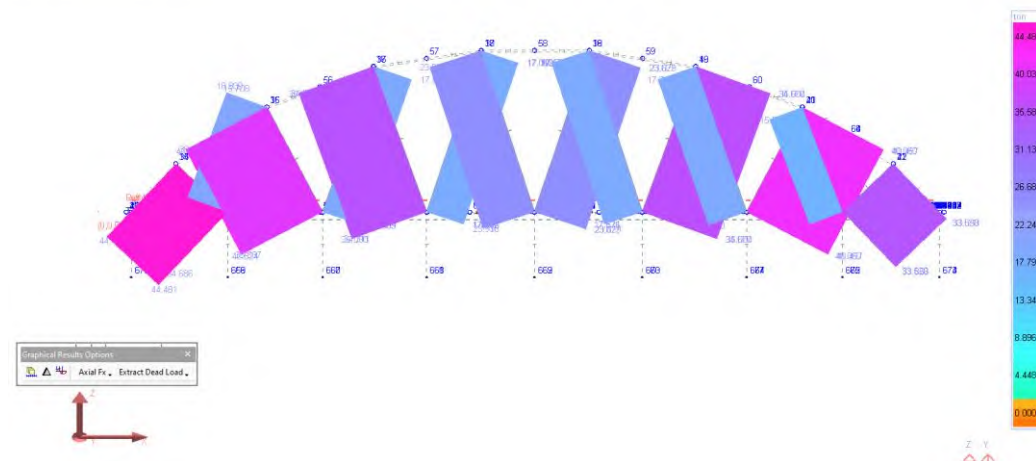


รูปที่ 8-100 ตัวอย่างของการเสริมกำลังของ Stiffening Girder

[8.8.3] การเสริมกำลังส่วนของ Hanger

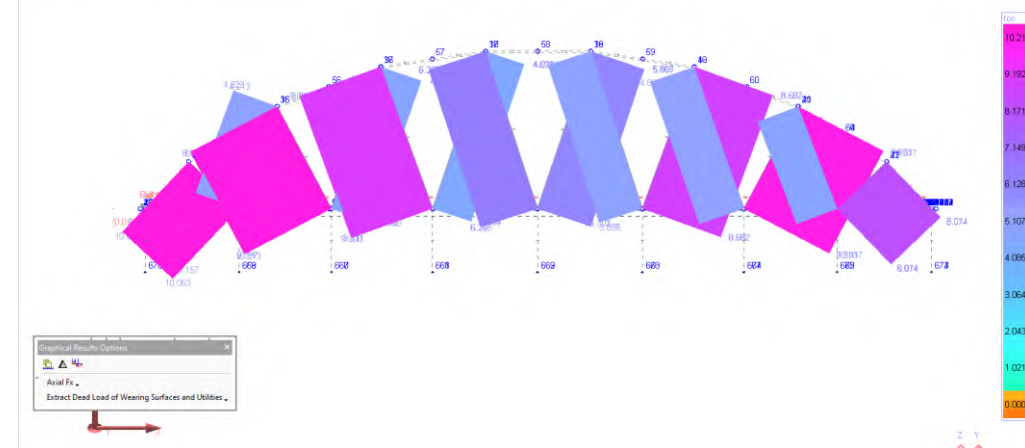
ที่ปรึกษาแสดงผลการวิเคราะห์การเปลี่ยน Hanger ใหม่ โดยใช้เหล็กกำลังสูง (PT Bar) ทดแทนเหล็กเดิมที่เป็นเหล็กกำลังต่ำและพบว่าการหย่อนของแรง เพื่อให้โครงสร้างมีความแข็งแรงในการใช้งานในอนาคต ในการรายงานผลจากแบบจำลอง ค่าของแรงใน Hanger จะเป็นค่าของ 2 เส้น PT Bars รวมกัน ที่ก่อสร้างจริง (2 Bars / Hanger)

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - 70 Tons after construction, Other PT Losses



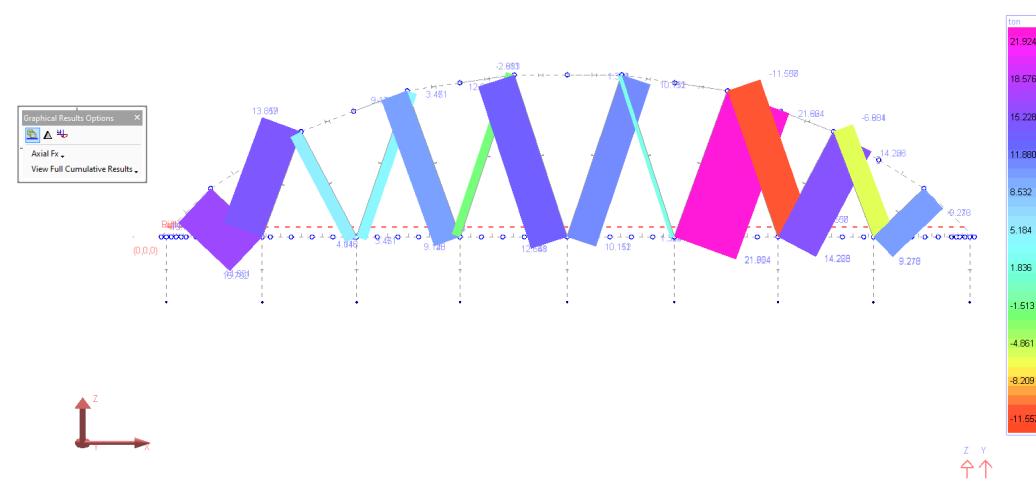
รูปที่ 8-101 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Hanger เนื่องจาก DL

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - 70 Tons after construction, Other PT Losses



รูปที่ 8-102 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Hanger เนื่องจาก SDL

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T / Step 1
Member Forces - Axial Fx - Dist: 42.00



รูปที่ 8-103 การวิเคราะห์หาแรง Fx (Axial Force) T ภายใน Hanger เนื่องจาก LL
(ยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น วิ่งต่อกันเป็นขบวน 2 Lane)

Max Tension = 21 T per Hanger



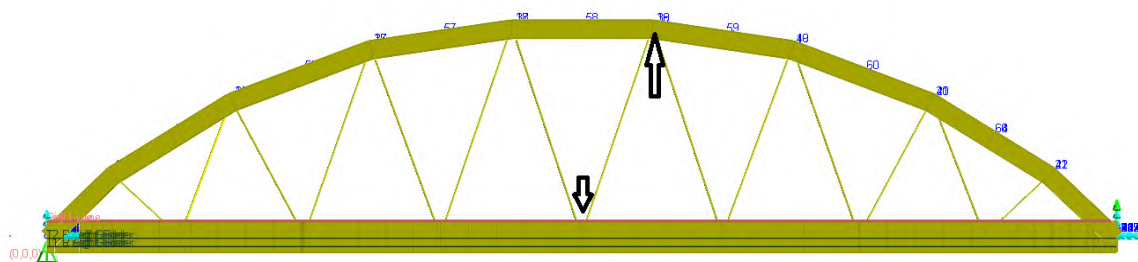
จากการรวมแรงตาม Load Combination ของ AASHTO และตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของ Hanger ตามวิธี Allowable Stress Design โดยใช้ค่าที่ยอมให้ของ Stress ที่เกิดขึ้นใน PT Bar ไม่เกิน $0.45 F_y$ ในสภาวะใช้งาน จากข้อกำหนด FIB นี้ สรุปได้ดังนี้

3.12 ALLOWABLE TENSILE STRESS FOR STAY CABLES:

- 3.12.1 $0.45 F'_s$ FOR AASHTO GROUP I LOADING UPON COMPLETION OF CONSTRUCTION. (NOTE: F'_s = MINIMUM SPECIFIED ULTIMATE TENSILE STRENGTH OF THE STRANDS).
- 3.12.2 $0.50 F'_s$ FOR ALL OTHER AASHTO GROUP LOADINGS. (TO BE USED IN LIEU OF AASHTO ALLOWABLE OVER-STRESS FACTORS.)
- 3.12.3 $0.56 F'_s$ DURING CONSTRUCTION AND STAY CABLE REPLACEMENT.
- 3.12.4 $0.60 F'_s$ FOR CABLE LOSS.

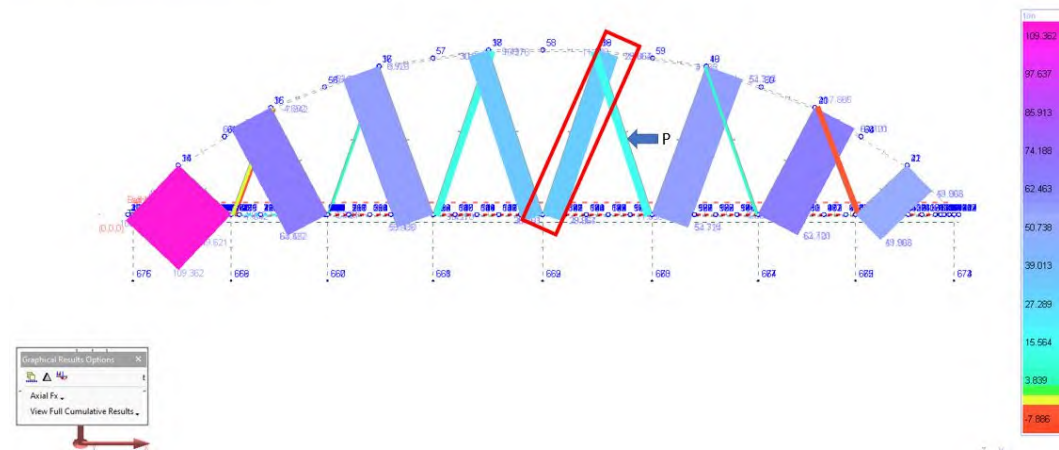
- ค่าแรงดึงใน Hanger สูงสุด (2 x PT Bar Diameter 50mm) กรณี DL+SDL เท่ากับ 55 T ซึ่งไม่เกิน $0.45 F_u$ (176 T)
- ค่าแรงดึงใน Hanger สูงสุด (2 x PT Bar Diameter 50mm) กรณี DL+SDL+LL เท่ากับ 103 T ไม่เกิน $0.45 F_u$ (176 T) และในกรณี Strength Limit State 1 ไม่เกินกรณีที่ยอมให้ Overload ($0.50 F_u$) ตามข้อกำหนด ในกรณีที่ให้ยานพาหนะ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้นขึ้นไป วิ่งบนสะพาน

จากนั้น ที่ปรึกษาตรวจสอบในกรณีที่เกิดการเปลี่ยน Cable Stay ตามข้อกำหนด FIP และกรณีเกิด Cable ขาด ว่าโครงสร้างภายหลังการเสริมกำลัง ยังสามารถรับได้หรือไม่ เนื่องจากกรณี Cable Loss จะ Critical กว่า การเปลี่ยน Cable ดังนั้น ที่ปรึกษาจึงดำเนินการตรวจสอบดังนี้ ในการคำนวณแรงที่เกิดจาก Cable ขาด FIP ให้สมมุติการเกิด Impact ของแรงย้อนกลับเท่ากับ 200% ของแรงดึงใน Cable ก่อนขาด จากข้อกำหนดนี้ ที่ปรึกษาได้พิจารณาเลือก Cable บริเวณกลางสะพานเกิดการขาดเพื่อดำเนินการวิเคราะห์ดังนี้



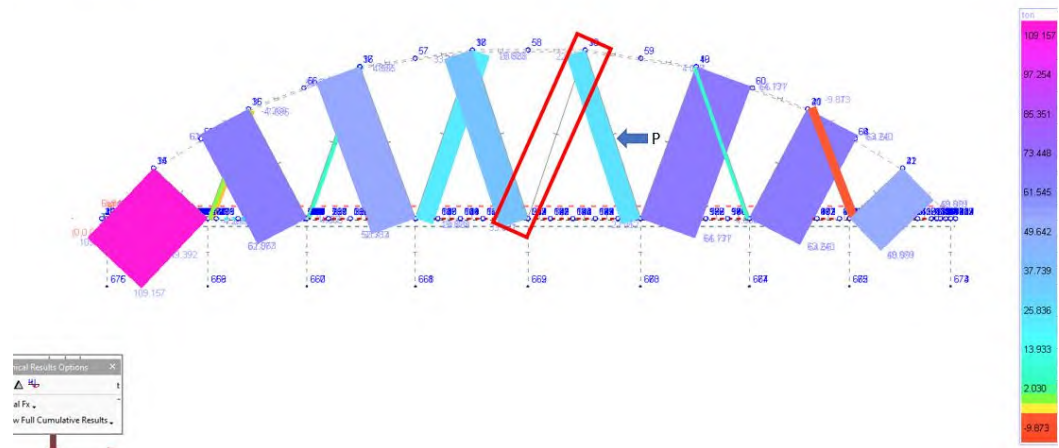
รูปที่ 8-104 Cable ที่เลือกบริเวณกลางสะพาน ให้เกิดการขาดเพื่อดำเนินการวิเคราะห์

000 1.563X Stage: Apply prestressing / jacking prestress
Member Forces - Axial Fx - 70 Years after construction: Other PT Losses



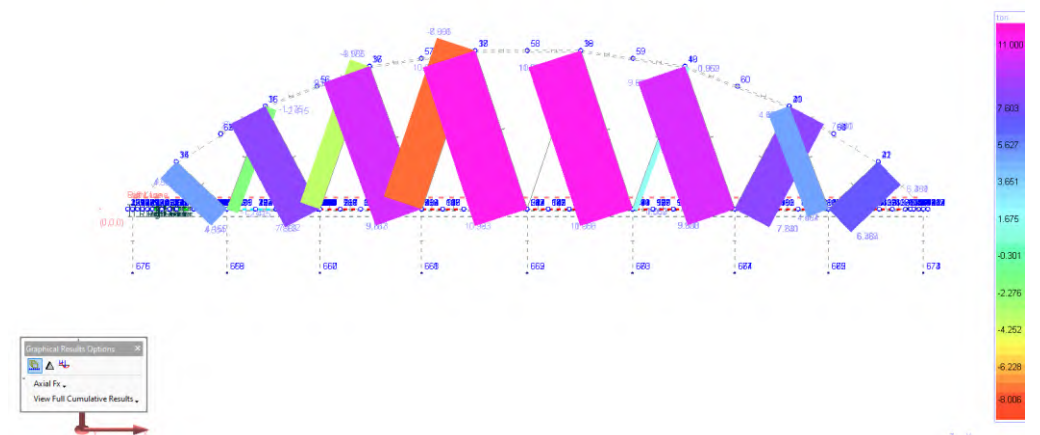
รูปที่ 8-105 แรงภายใน Hanger (ในระดับสถานะใช้งาน DL+SDL+LL+IM+PS) ก่อน Cable Loss

0000 - Axial Fx - Cable Loss, Step 1



รูปที่ 8-106 แรงภายใน Hanger (ในระดับสถานะใช้งาน DL+SDL+LL+IM+PS+Cable Loss) หลัง Cable Loss

Zoom: 1.563X Stage: Moving Load L and T: Step 1
Member Forces - Axial Fx - Other: 100.50



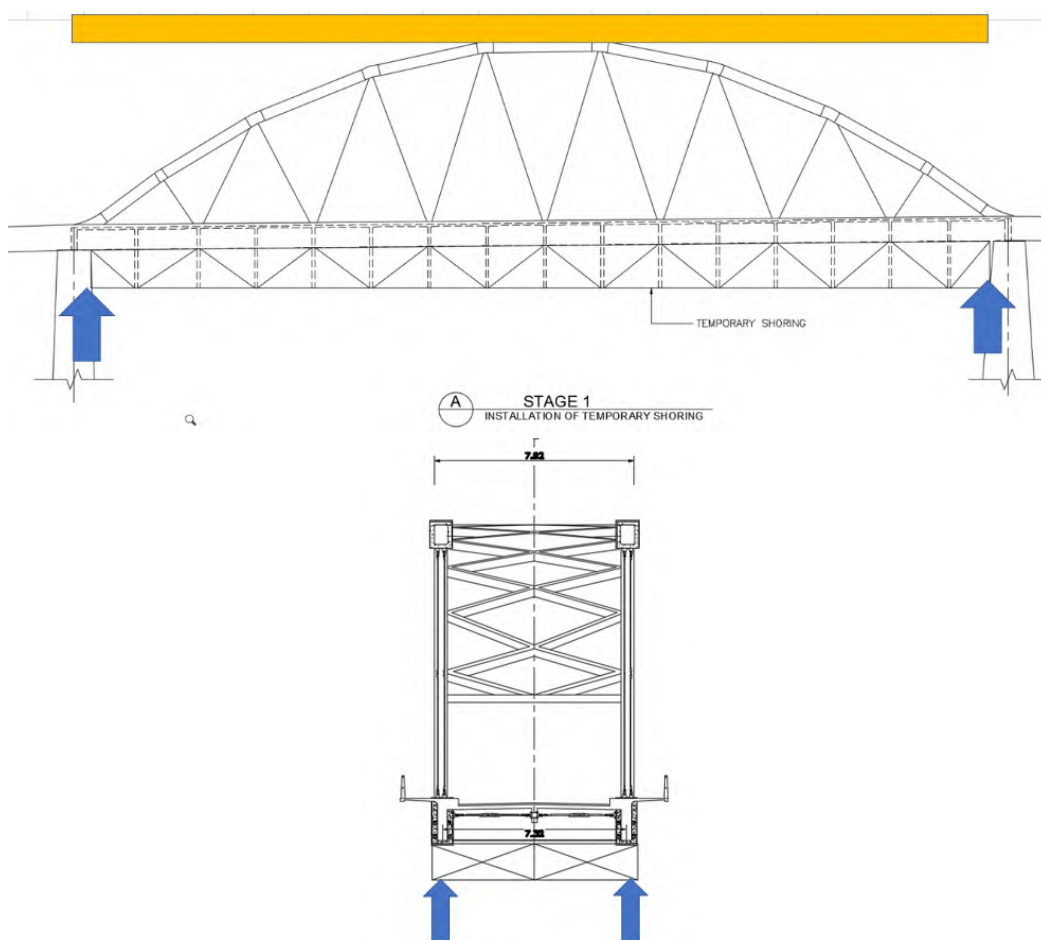
รูปที่ 8-107 แรงภายใน Hanger (เนื่องจาก LL+IM) หลัง Cable Loss ของ ยานพาหนะ ยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น



จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ภายหลังเกิดการขาดของ Cable จะทำให้แรงที่เกิดขึ้นจากการขาด Redistribute ไปยัง Hanger ข้างเคียง โดยแรงที่เพิ่มขึ้นใน Cable ข้างเคียง อยู่ในระดับประมาณ 25 T เมื่อรวมกับผลของน้ำหนักบรรทุกที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างที่ Cable ขาด แรงภายใน Cable จะมีค่าเท่ากับ -35 T ซึ่งยังไม่เกินระดับที่ FIP ยอมให้ ($0.6F_u = 235 \text{ T/Hanger}$)

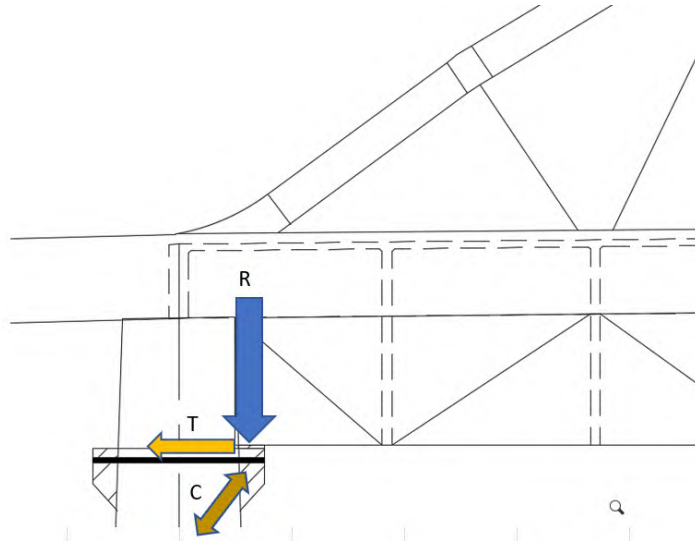
[8.9] การออกแบบส่วนของโครงสร้าง ในระหว่างการยกสะพานเดิม ระหว่างการเสริมกำลัง

กิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลัง Stiffening Girder การเปลี่ยน Hanger ทุกเส้น รวมทั้งการเสริมกำลัง Arch Rib ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น กิจกรรมเหล่านี้มีความจำเป็นต้องปิดการจราจร และต้องใช้คานเหล็กยกสะพานเดิมเพื่อรองรับน้ำหนักของสะพานในระหว่างดำเนินการ ซึ่งคานเหล็กที่ใช้ในการยกสะพานจะต้องติดตั้งบนตอม่อสะพานเดิมโดยใช้ Bracket เหล็ก ดังนั้น เพื่อให้เกิดความปลอดภัย ที่ปรึกษาได้ประมาณค่าของแรงที่เกิดขึ้นบริเวณฐานรองรับของ Bracket เพื่อใช้ประกอบการดำเนินการของผู้รับจ้างในอนาคตได้ ตัวอย่างของคานเหล็กติดตั้งเพื่อรองรับน้ำหนักของสะพานแสดงดังนี้



รูปที่ 8-108 การใช้คานเหล็กยกสะพาน

โดยจากการประมาณค่าของ Dead Load ของสะพานทั้งหมด รวมทั้ง น้ำหนักของอุปกรณ์และน้ำหนักบรรทุกทุกกระหว่างการเสริมกำลัง จะมีค่ารวมประมาณ 2.85 TSM โดยหากพิจารณาใช้ คานเหล็ก จำนวน 2 คาน รองรับได้สะพานเดิม จะเกิดแรงกระทำต่อคานเหล็กเท่ากับ $2.85 \times 7.32 / 2 = 10.431 \text{ T/m}$ หรือ ได้ค่าแรงกระทำต่อ Bracket เท่ากับ 328 T สามารถแสดงในรูปแบบของ Truss Model ดังนี้



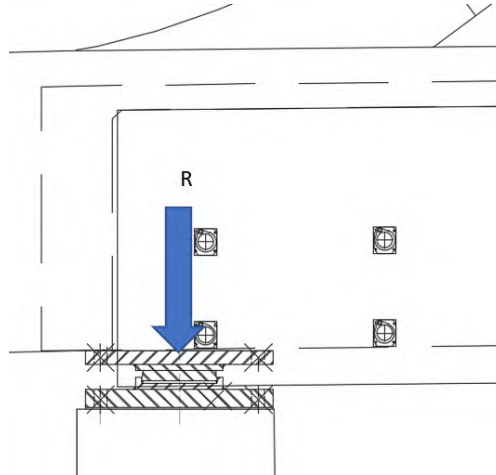
รูปที่ 8-109 แรงกระทำต่อ Bracket

จากรูปแบบของ Truss Model สามารถประมาณหาค่าแรงดึง T เพื่อใช้ในการยึด Bracket กับเสาตอม่อเดิมได้เท่ากับ $T_u = R_u / \tan(60) = 190 \text{ T}$ โดยหากพิจารณาใช้เหล็กกำลังสูง PT Bar ขนาด 50 mm Diameter จะต้องใช้จำนวน 2 เส้น ต่อ Bearing เพื่อให้มีกำลังต้านทานเพียงพอ



[8.10] การออกแบบส่วนของ Bearing Plinth เพื่อรองรับ Bearing ของสะพานที่เปลี่ยนใหม่

ในหัวข้อนี้ที่ปรึกษาแสดงขนาดของ Bearing Plinth ใต้ Bearing ของสะพานเดิมเพื่อใช้ในการเปลี่ยน Bearing ใหม่ โดยจากค่าของน้ำหนักฐานรองรับของสะพานภายหลังการเสริมกำลังเท่ากับ - 339 T/ Bearing จาก ค่าของ Bearing Strength ของคอนกรีตตาม AASHTO สามารถประมาณขนาดของ Bearing Plinth ได้ดังนี้



รูปที่ 8-110 ขนาดของ Bearing Plinth

The Reaction (R) = 339 T per bearing.

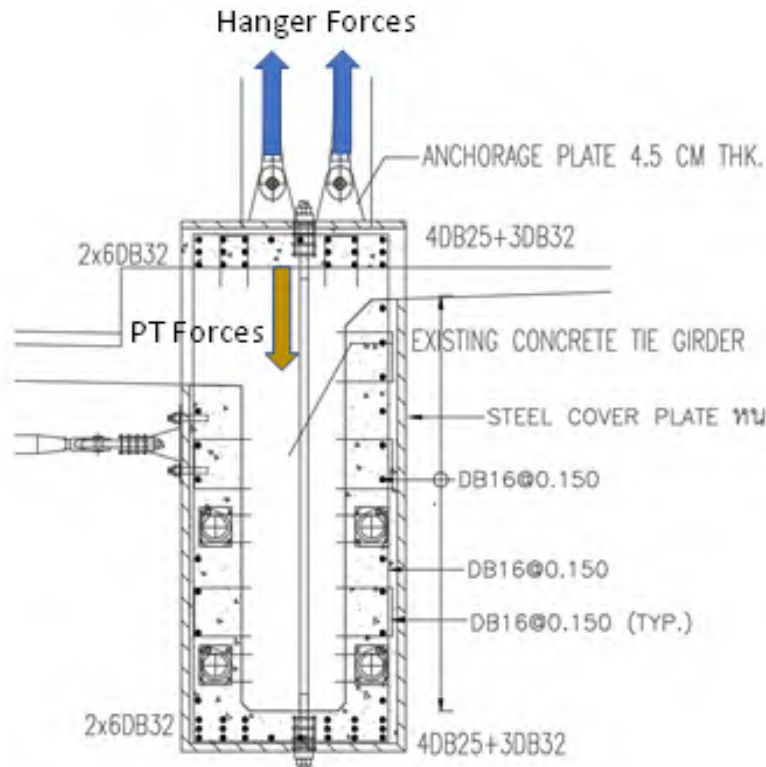
หรือค่าของ R_u = 525 T (โดยใช้ Strength Limit State I)

เลือกขนาดของ Bearing Plint (A1) = $0.65\text{m} \times 0.65\text{m} = 0.4225 \text{ SQ.m}$

โดยใช้กำลังของคอนกรีต Concrete Compressive Strength = 40 Mpa

ดังนั้น ค่าของ Bearing Strength ตามหัวข้อ 5.7.7 ของ AASHTO LRFD ที่สามารถรับได้
 $0.7P_n = 10050 \text{ T} > R_u$ (OK)

การออกแบบส่วนของการถ่ายแรงระหว่าง Hanger ใหม่กับส่วนของเหล็ก Plate ของ Stiffening Girder ในหัวข้อนี้ที่ปรึกษาได้ดำเนินการวิเคราะห์การถ่ายแรงระหว่าง Hanger กับส่วนของ Plate ด้านบนของ Stiffening Girder โดยแสดงดังรูปนี้



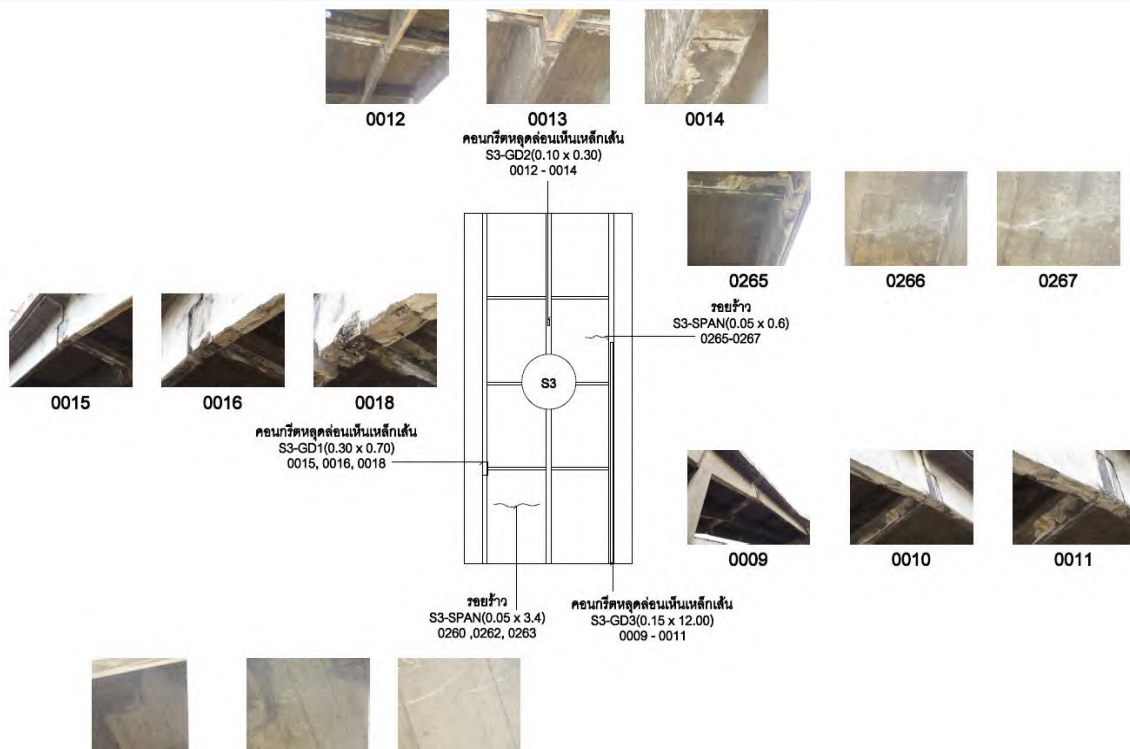
รูปที่ 8-111 การถ่ายแรงระหว่าง Hanger และ Stiffening Girder

ค่าแรงดึงสูงสุดต่อ Hanger (DL+SDL+LL) เท่ากับ 105 T per (2 Bars/Hanger) ดังนั้น เลือกใช้ เหล็ก PT Bar ขนาด Diameter 50mm จำนวน 2 เส้น และเหล็กเสริม Stirrup DB16@0.150m ในการ รับแรงดึงนี้ กำลังการต้านทานในบริเวณความกว้าง 1.50 m คำนวณได้ดังนี้ The capacity of PT Bar Diameter 50mm (jacking to $0.7F_{pu}$) = 274 T / Hanger กำลังรับแรงดึงของ Stirrup เท่ากับ 53 T (พิจารณาใช้ Stress = $0.50 F_y$) เพื่อควบคุมรอยแตกร้าว ที่อาจจะเกิดขึ้น ดังนั้น กำลังต้านทานรวม เท่ากับ 327 T จึงเพียงพอในการต้านทานแรงดึงที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน

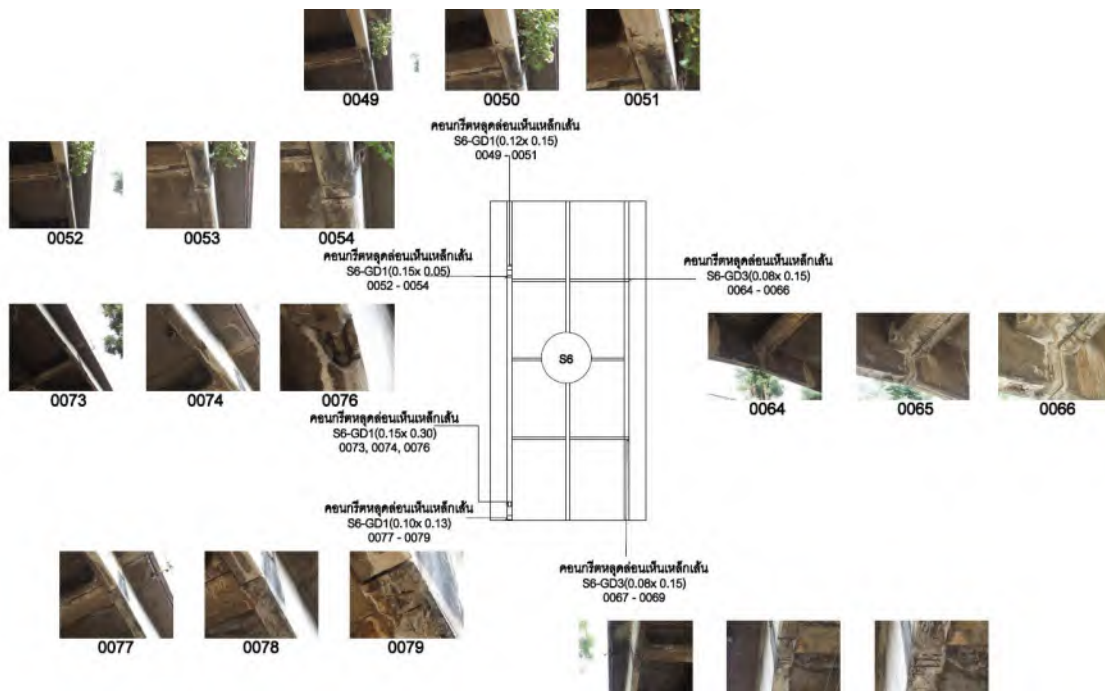


ในหัวข้อนี้ที่ปรึกษาจะนำผลการวิเคราะห์แรงภายในของสะพานที่ได้ดำเนินการปรับค่าของแบบจำลองแล้ว นำมาใช้ในการประเมินผลรวมแรงภายในตามมาตรฐาน AASHTO โดยจะดำเนินการใช้ผลของน้ำหนักบรรทุกทุกกรณี ยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เฟลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น ที่ได้วิเคราะห์ก่อนหน้านี้ในการประเมิน ตัวอย่างของแบบช่วง Approach ที่ใช้ประกอบการทำแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 8-112 ตัวอย่างสภาพความเสียหายที่สำคัญของช่วง Approach เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาการประเมินแสดงดังรูปที่ 8-113 และ รูปที่ 8-114 ตัวอย่างของเหล็กเสริมที่ได้จากการสำรวจในภาคสนามที่ใช้สำหรับการประเมินแสดงดังรูปที่ 8-115 ถึง รูปที่ 8-117 ตัวอย่างของแบบจำลองช่วง Approach แสดงดังรูปที่ 8-118



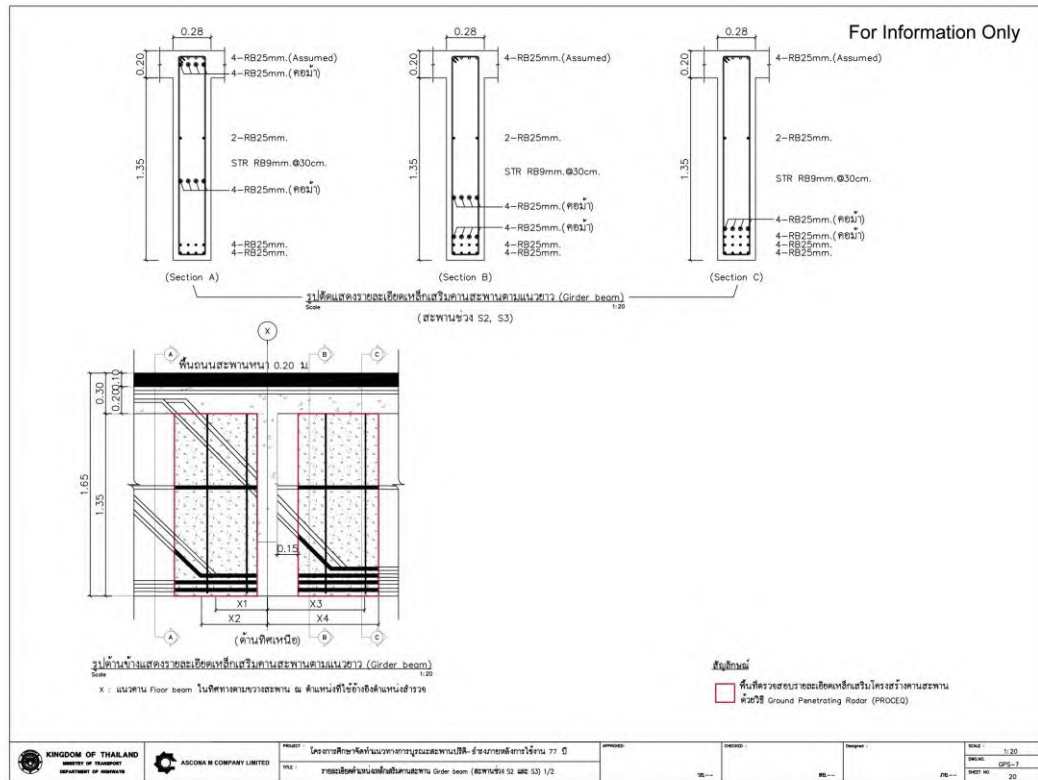


รูปที่ 8-113 ตัวอย่างสภาพความเสียหายที่สำคัญของช่วง Approach

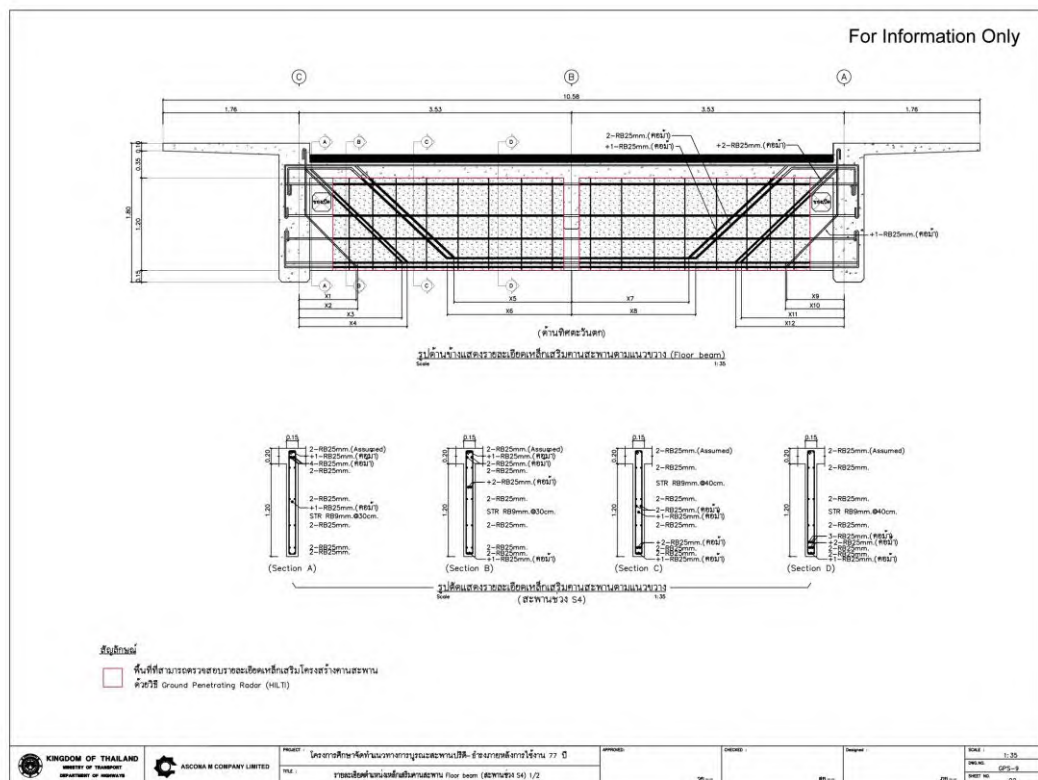


รูปที่ 8-114 ตัวอย่างสภาพความเสียหายที่สำคัญของช่วง Approach

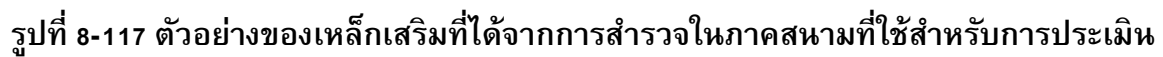


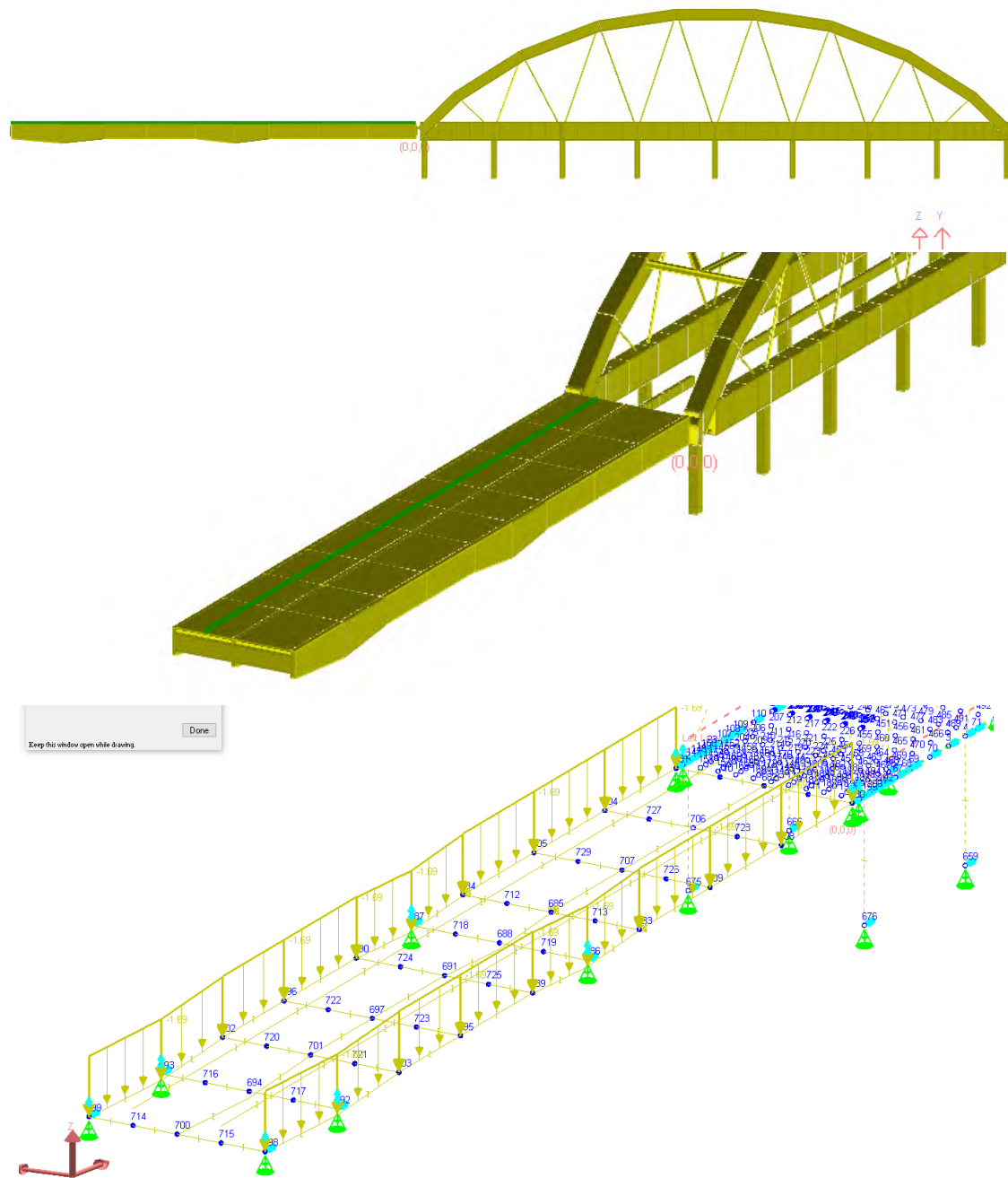


รูปที่ 8-115 ตัวอย่างของเหล็กเสริมที่ได้จากการสำรวจในภาคสนามที่ใช้สำหรับการประเมิน



รูปที่ 8-116 ตัวอย่างของเหล็กเสริมที่ได้จากการสำรวจในภาคสนามที่ใช้สำหรับการประเมิน

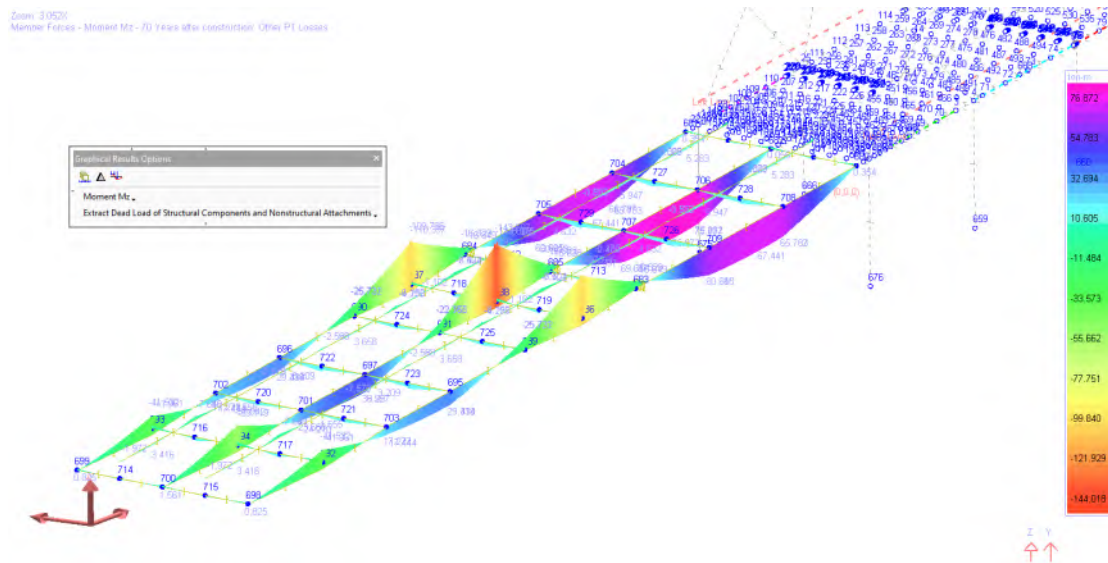




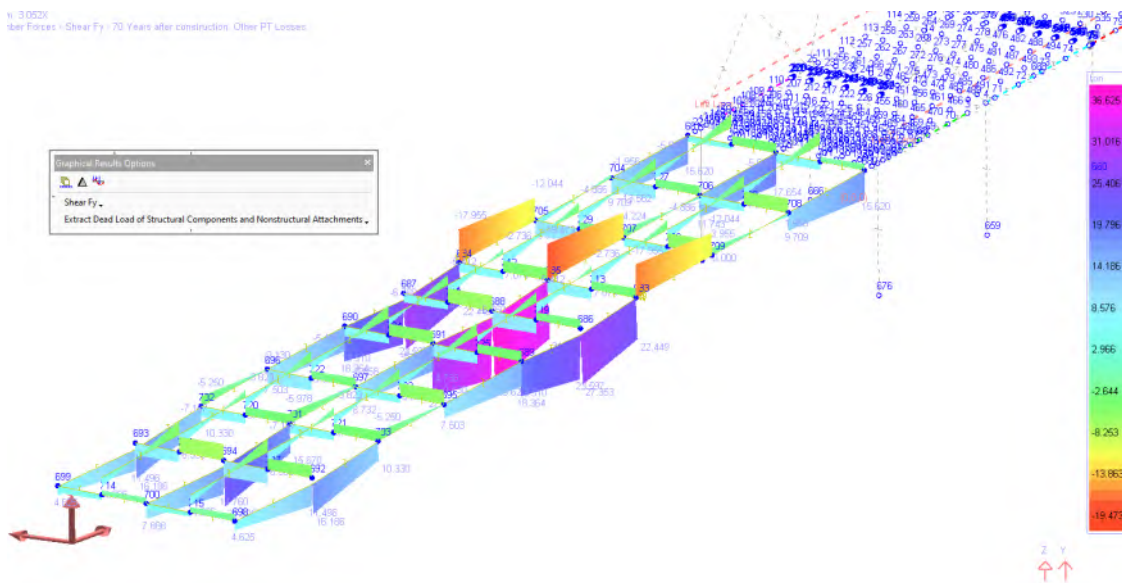
รูปที่ 8-118 ตัวอย่างของแบบจำลองช่วง Approach

ที่ปรึกษาได้ใช้แบบจำลอง Finite Element ในการวิเคราะห์ผลของน้ำหนัก DL และน้ำหนักบรรทุกจร (LL) ที่เกิดขึ้นในช่วงของ Approach โดยจากการวิเคราะห์ จะนำแรงภายในประเภทต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นไปประเมินตามมาตรฐาน AASHTO LRFD โดยน้ำหนักบรรทุกจรจะดำเนินการตามข้อกำหนดในโครงการนี้ คือ

[8.11.1] กรณี ยานพาหนะ ขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น
สำหรับผลการวิเคราะห์แสดงดังนี้

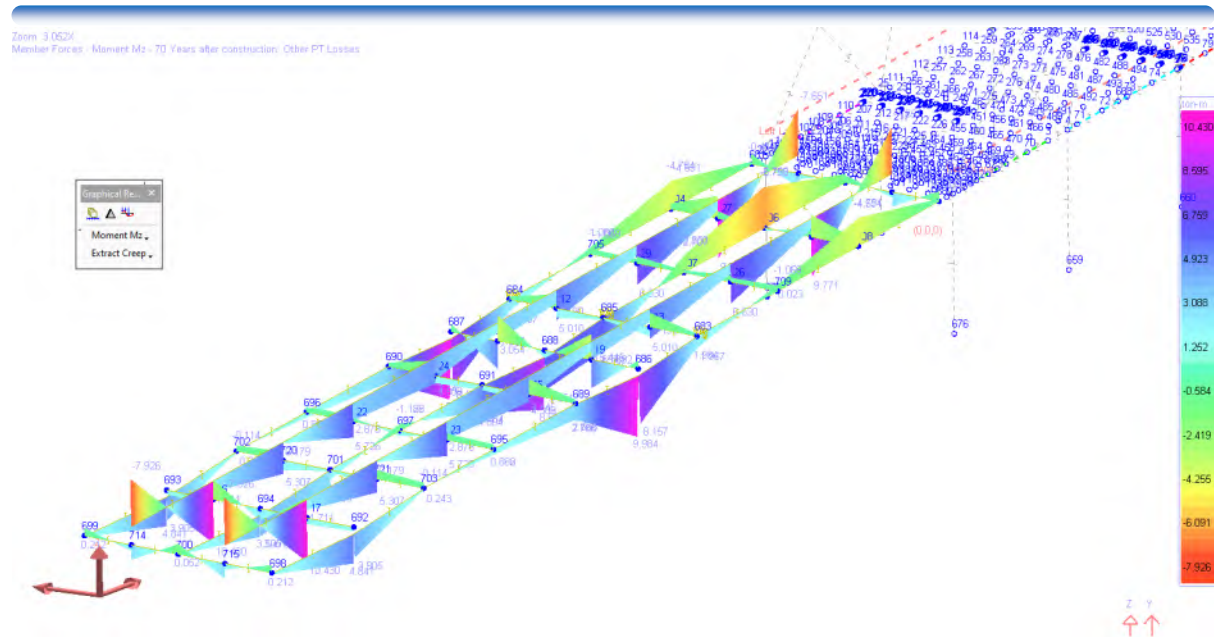


รูปที่ 8-119 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Approach เนื่องจาก DL

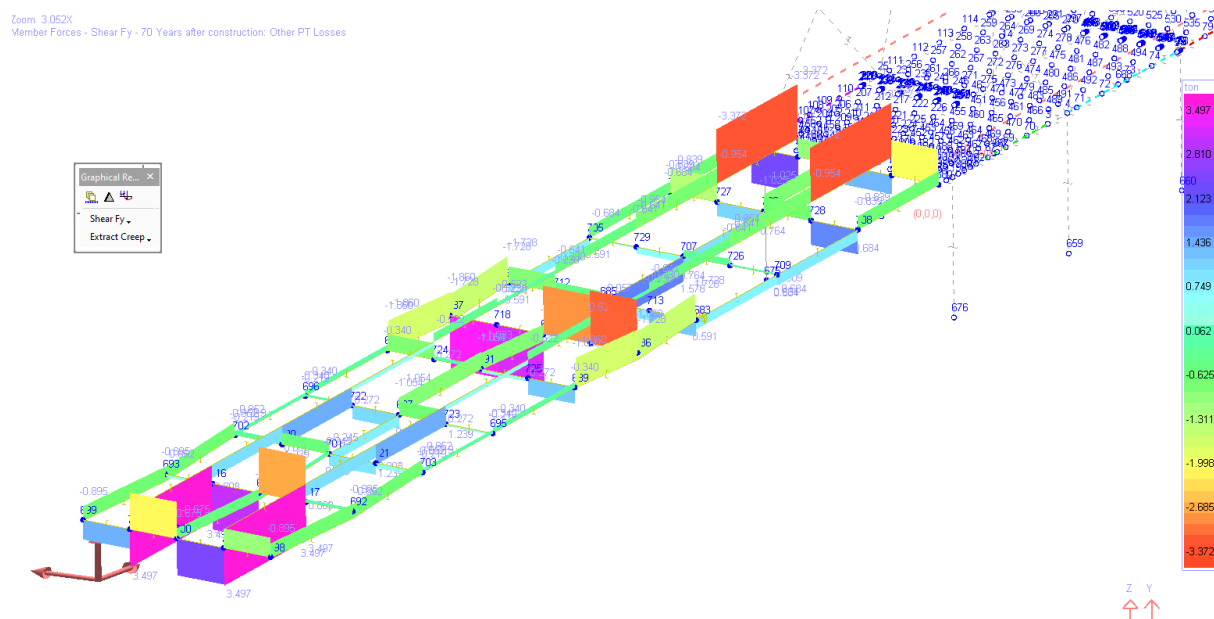


รูปที่ 8-120 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Approach เนื่องจาก DL

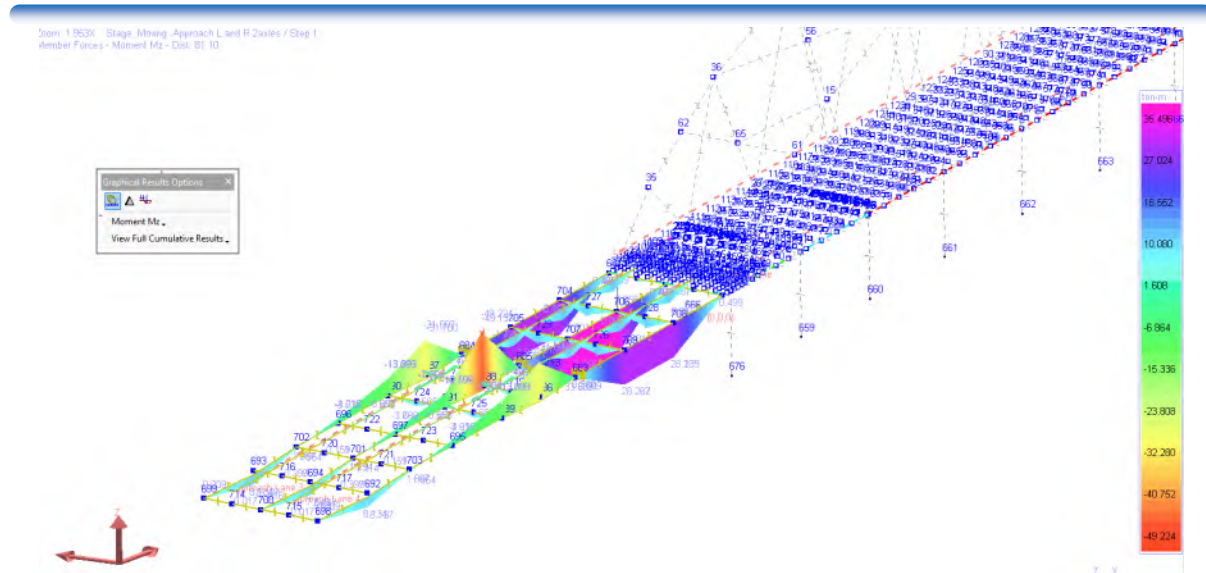




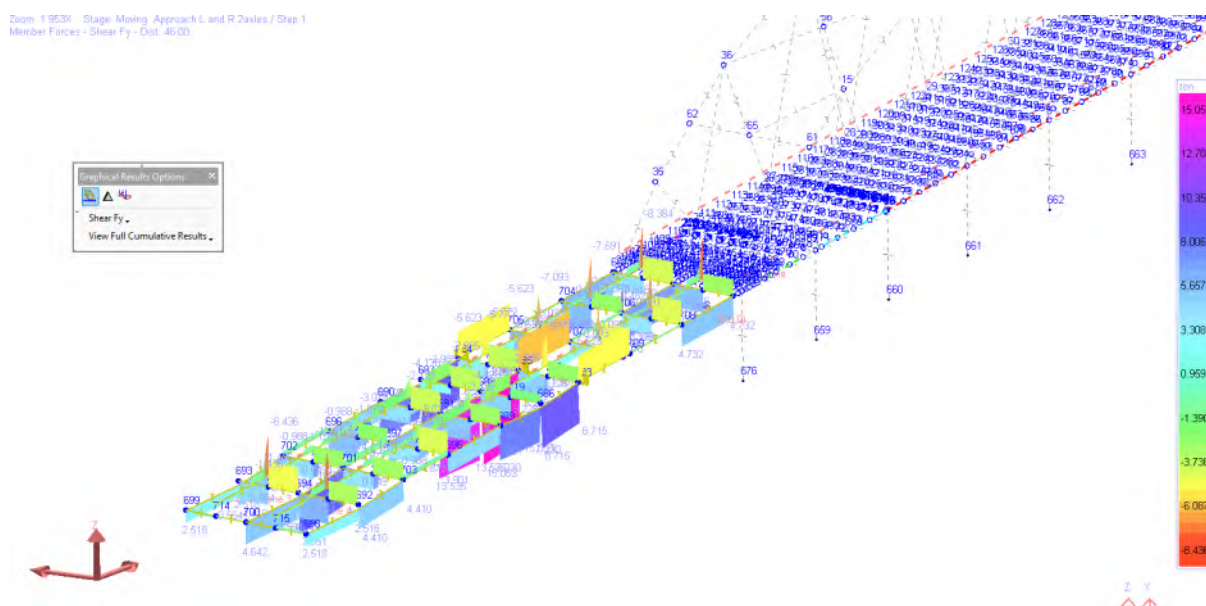
รูปที่ 8-121 การวิเคราะห์หาแรง M_z (Moment) T-m ภายใน Approach
เนื่องจากผลของการคืบ (Creep)



รูปที่ 8-122 การวิเคราะห์หาแรง F_y (Shear Force) T ภายใน Approach
เนื่องจากผลของการคืบ (Creep)



รูปที่ 8-123 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Approach
เนื่องจาก LL (ยานพาหนะ ขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น)



รูปที่ 8-124 การวิเคราะห์หาแรง Fy (Shear Force) T ภายใน Approach
เนื่องจาก LL (ยานพาหนะ ขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น)



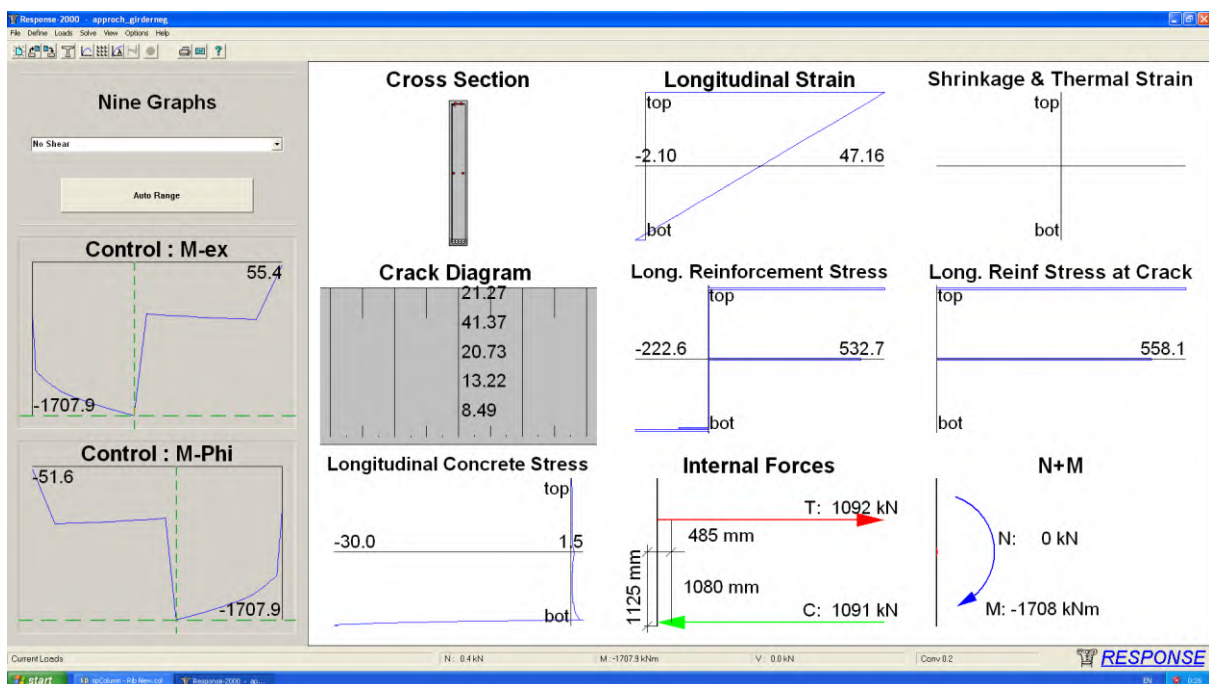
จากผลการรวมแรงตามมาตรฐาน AASHTO LRFD โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกตามที่กำหนดในโครงการ สามารถหาแรงภายในประเภทต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในคานสะพาน (F_yu และ M_zu) ดังนี้

$F_yu = 50.75 \text{ T}$ (Maximum Shear)

$M_zu = 165 \text{ T-m}$ (Maximum Moment) กลางช่วงความยาว

$M_zu = -307 \text{ T-m}$ (Maximum Moment) ช่วง Pier คานยื่น

จากการนำหน้าตัดของคานสะพานบริเวณกลางสะพานที่ได้จากการสำรวจ กำลังของคอนกรีตที่ได้จากการตรวจวัด รวมทั้งเหล็กเสริมที่ได้จากการสำรวจโดยวิธี Ferro Scan ที่ปรึกษาได้ตรวจสอบกำลังของหน้าตัด พบว่าไม่เพียงพอในการรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นในบริเวณช่วงคานยื่น ($M_zu = -307 \text{ T-m} > 0.9M_n = -160 \text{ T-m}$) ในกรณียานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น โดยที่ปรึกษาเสนอให้ควรมีการเสริมกำลัง เนื่องจากสะพานเดิมมีความชำรุดค่อนข้างมากและไม่สามารถรับน้ำหนักยานพาหนะได้ โดยวิธีการเสริมกำลังที่ปรึกษาเสนอให้ดำเนินการใช้ ระบบลวดอัดแรงเพื่อให้สามารถเสริมกำลังโครงสร้างและยังสามารถช่วยลดโอกาสการเกิดการแตกร้าวได้ในอนาคต



รูปที่ 8-125 ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนัก **Moment** ของหน้าตัดคานสะพานเดิม

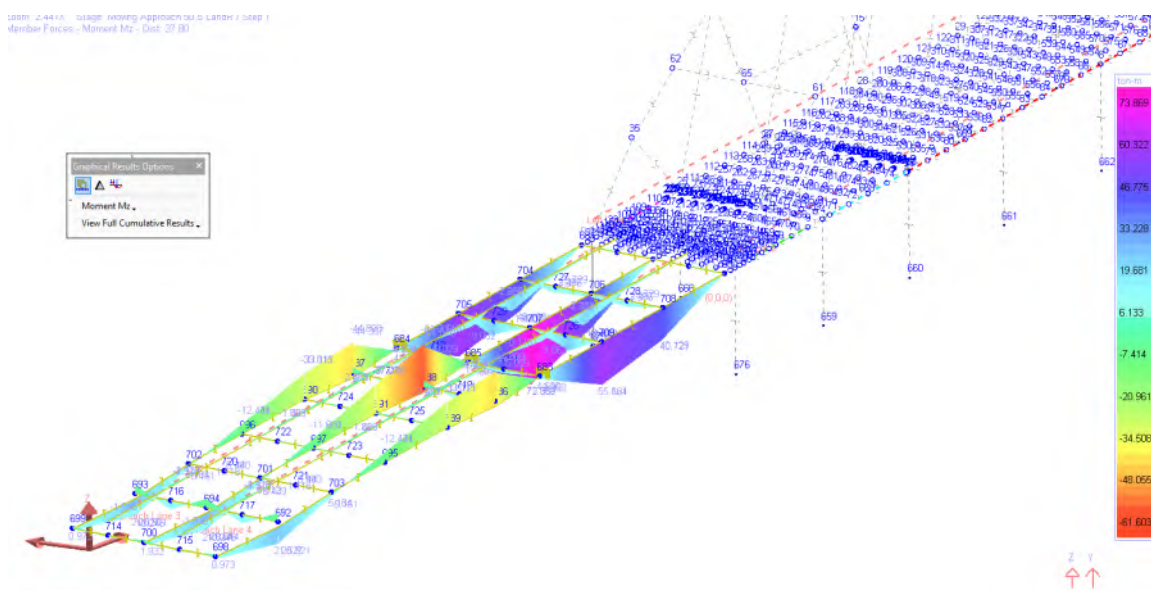
[8.12] บูรณะสะพานเพื่อรองรับยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป (กรณีส่วน Approach Span)

ในหัวข้อนี้ที่ปรึกษาจะนำผลการวิเคราะห์แรงภายในของสะพานที่ได้ดำเนินการปรับค่าของแบบจำลองแล้ว นำมาใช้ในการประเมินแรงภายในตามมาตรฐาน AASHTO โดยจะดำเนินการใช้ผลของน้ำหนักบรรทุก กรณียานพาหนะ ขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป ที่ได้วิเคราะห์ก่อนหน้านี้ ประกอบการประเมิน ตัวอย่างของแบบช่วง Approach ที่ใช้ประกอบการทำแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 8-112 ตัวอย่างสภาพความเสียหายที่สำคัญของช่วง Approach เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาการประเมินแสดงดังรูปที่ 8-113 และ รูปที่ 8-114 ตัวอย่างของเหล็กเสริมที่ได้จากการสำรวจในภาคสนามที่ใช้สำหรับการประเมินแสดงดังรูปที่ 8-115 ถึง รูปที่ 8-117 ตัวอย่างของแบบจำลองช่วง Approach แสดงดังรูปที่ 8-118

ที่ปรึกษาได้ใช้แบบจำลอง Finite Element ในการวิเคราะห์ผลของน้ำหนัก DL และ น้ำหนักบรรทุกจร (LL) ที่เกิดขึ้นในช่วงของ Approach โดยจากการวิเคราะห์ จะนำแรงภายในประเภทต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมาประเมินตามมาตรฐาน AASHTO LRFD โดยน้ำหนักบรรทุกจร จะดำเนินการตามข้อกำหนดในโครงการนี้คือ

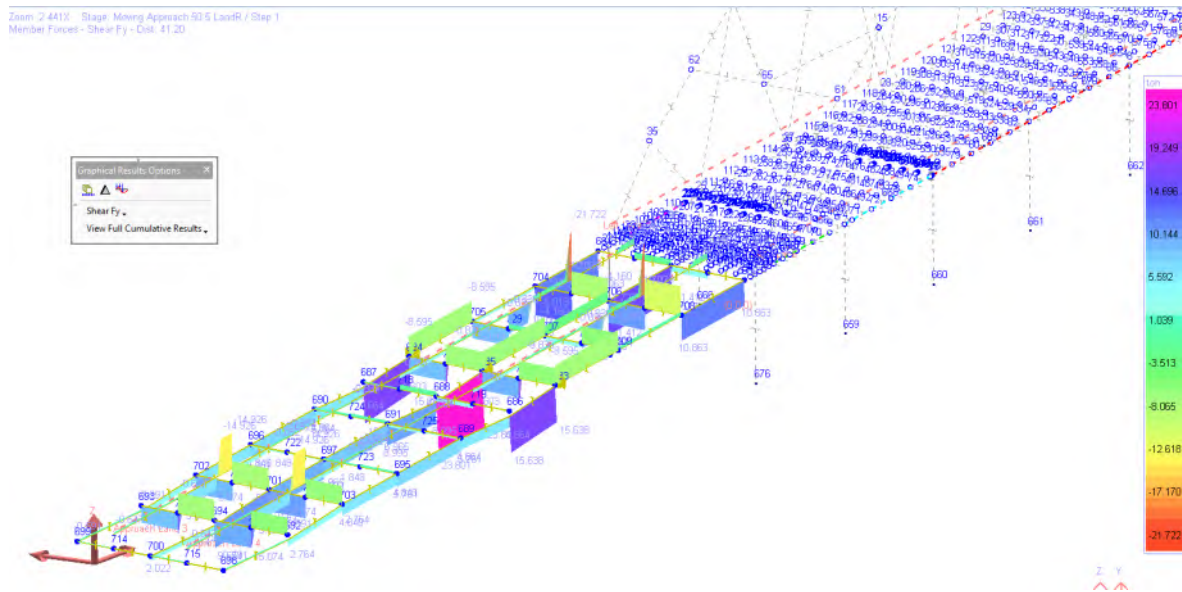
[8.12.1] กรณี ยานพาหนะ ขนาด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น

สำหรับผลการวิเคราะห์ผลของน้ำหนัก DL แสดงในรูปที่ 8-119 และรูปที่ 8-120 สำหรับผลการวิเคราะห์ผลของการคืบ (Creep) แสดงในรูปที่ 8-121 และรูปที่ 8-122 ผลการวิเคราะห์เนื่องจาก LL (ยานพาหนะ ขนาด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น) แสดงในรูปที่ 8-126 และรูปที่ 8-127



รูปที่ 8-126 การวิเคราะห์หาแรง Mz (Moment) T-m ภายใน Approach
เนื่องจาก LL (ยานพาหนะ ขนาด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น)





รูปที่ 8-127 การวิเคราะห์หาแรง F_y (Shear Force) T ภายใน Approach
เนื่องจาก LL (ยานพาหนะ ขนาด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น)

จากผลการรวมแรงตามมาตรฐาน AASHTO LRFD โดยใช้น้ำหนักบรรทุกตามที่กำหนดใน
โครงการ สามารถหาแรงภายในที่เกิดขึ้นในคานสะพาน (F_y และ M_z) ดังนี้

$F_y = 64.75$ T (Maximum Shear)

$M_z = 233$ T-m (Maximum Moment) กลางช่วงความยาว

$M_z = -328$ T-m (Maximum Moment) ช่วง Pier คานยื่น

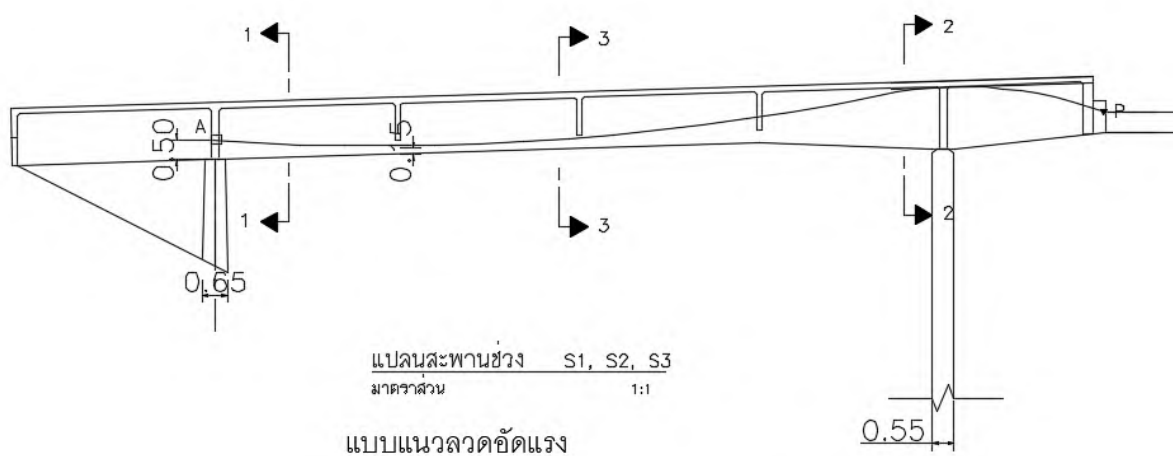
จากการนำหน้าตัดของคานสะพานบริเวณกลางสะพานที่ได้จากการสำรวจกำลังของคอนกรีตที่
ได้จากการตรวจวัด รวมทั้งเหล็กเสริมที่ได้จากการสำรวจโดยวิธี Ferro Scan ที่ปรึกษาได้ตรวจสอบ
กำลังของหน้าตัด พบว่าไม่เพียงพอในการรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นในบริเวณ ช่วงคานยื่น ($M_z = -328$ T-m
> $0.9M_n = -160$ T-m) และ บริเวณปลายคานที่มีค่าแรงเฉือนสูง ($F_y = 64.75$ T > $0.9V_n = 63.325$ T)
นอกจากนั้น ถึงแม้ว่า บริเวณกลางคานจะมีค่าของ Moment ดัดไม่เกินกำลังของหน้าตัด ($M_z = 233$ T-
m < $0.9M_n = 239.85$ T-m) แต่เนื่องจาก Ratio ของ $M_n/(M_u)$ ประมาณ 1.02 หรือ มีส่วนเผื่อความ
ปลอดภัยเพียง 2% ซึ่งถือว่าน้อยมาก และในกรณีที่หน้าตัดหรือเหล็กเสริมมีการเกิดสนิมดังที่สำรวจ
กำลังของโครงสร้างย่อมลดลงมาก ดังนั้น จึงถือว่าไม่ผ่านเช่นกันในบริเวณกลางสะพาน

ในกรณียานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป ที่ปรึกษาเสนอให้ควรมีการ
เสริมกำลัง เนื่องจากสะพานเดิมมีความชำรุดค่อนข้างมากและ ไม่สามารถรับน้ำหนักยานพาหนะได้ โดย

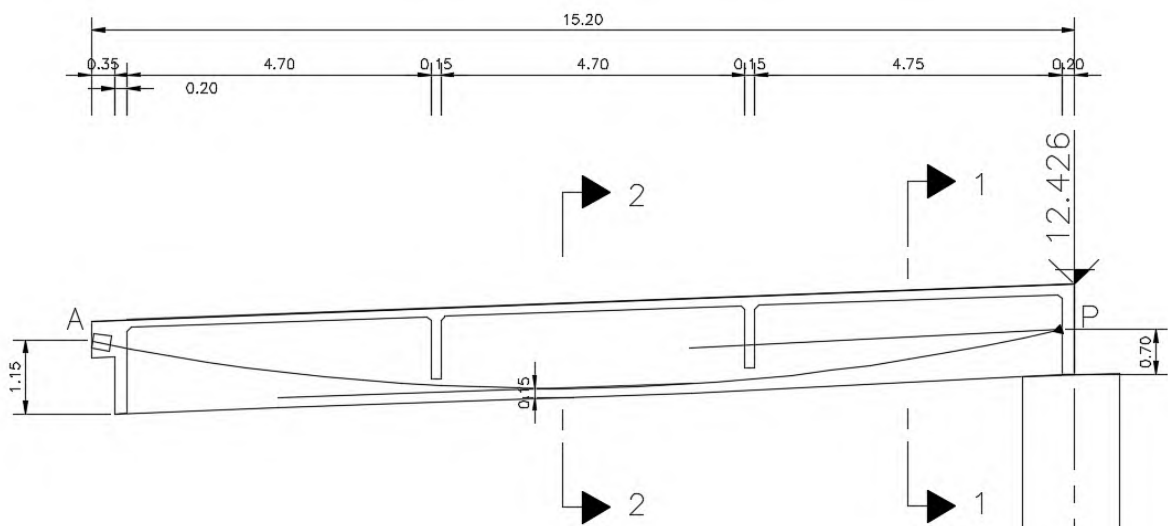
วิธีการเสริมกำลังที่ปรึกษาเสนอให้ดำเนินการใช้ ระบบลวดอัดแรงเพื่อให้สามารถ เสริมกำลังโครงสร้าง และยังสามารถช่วยลดโอกาสการเกิดการแตกร้าวได้ในอนาคต

[8.12.2] การออกแบบเสริมกำลัง บริเวณ คานสะพานช่วง Approach ด้วยวิธีการเสริมลวดอัดแรง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการเสริมแนวลวดอัดแรงบริเวณช่วง Approach โดยใช้ระบบลวดอัดแรงเป็นระบบ Internal Prestressing ที่ใช้ขนาดของลวดอัดแรงเป็นกลุ่ม โดยแต่ละกลุ่ม ประกอบด้วย Strand ขนาด 15.2mm Diameter จำนวน 10 เส้น โดยตัวอย่างของแนวลวดอัดแรงแสดงดังนี้

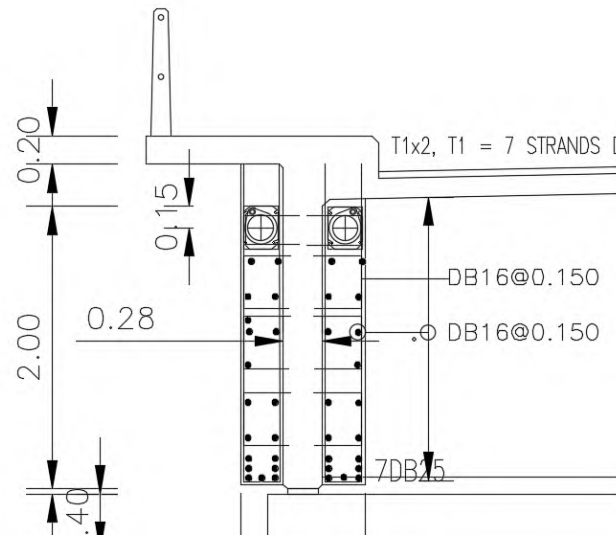


รูปที่ 8-128 ตัวอย่างของแนวลวดอัดแรง (1)



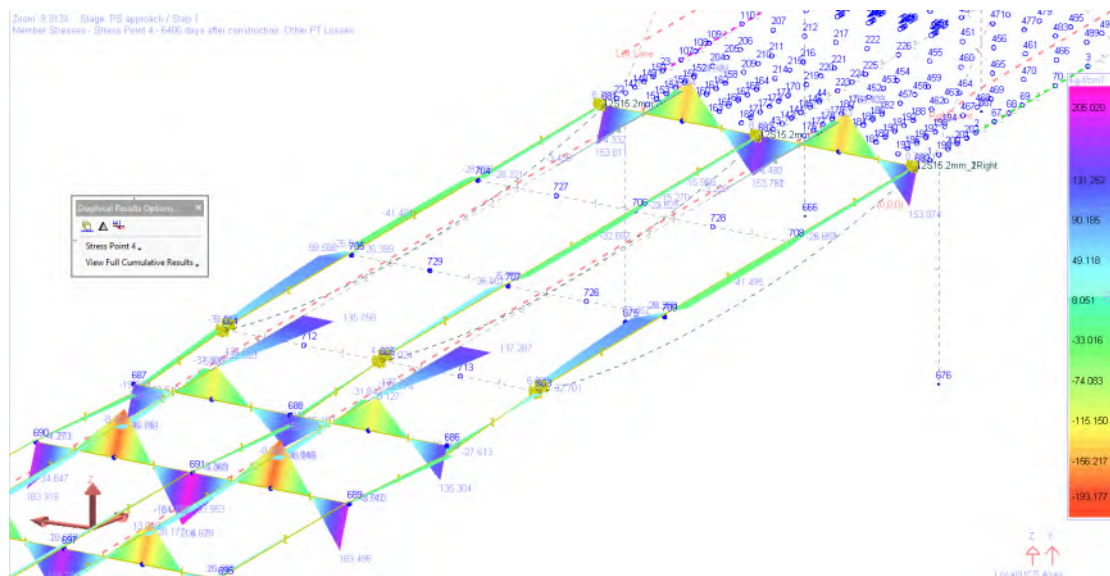
รูปที่ 8-129 ตัวอย่างของแนวลวดอัดแรง (2)



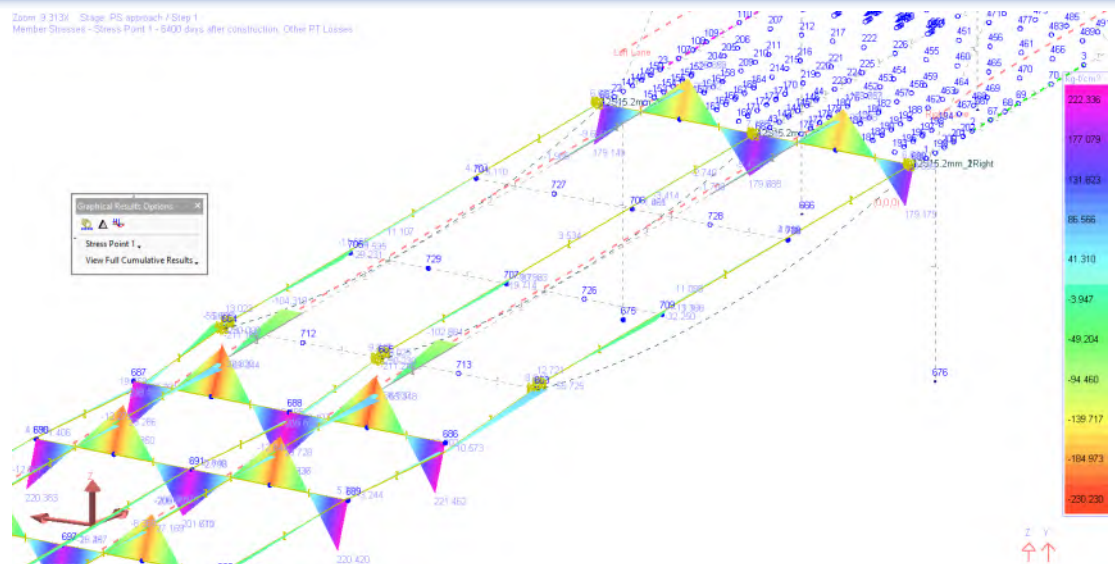


รูปที่ 8-130 ตัวอย่างของแนวลดอัดแรง (3)

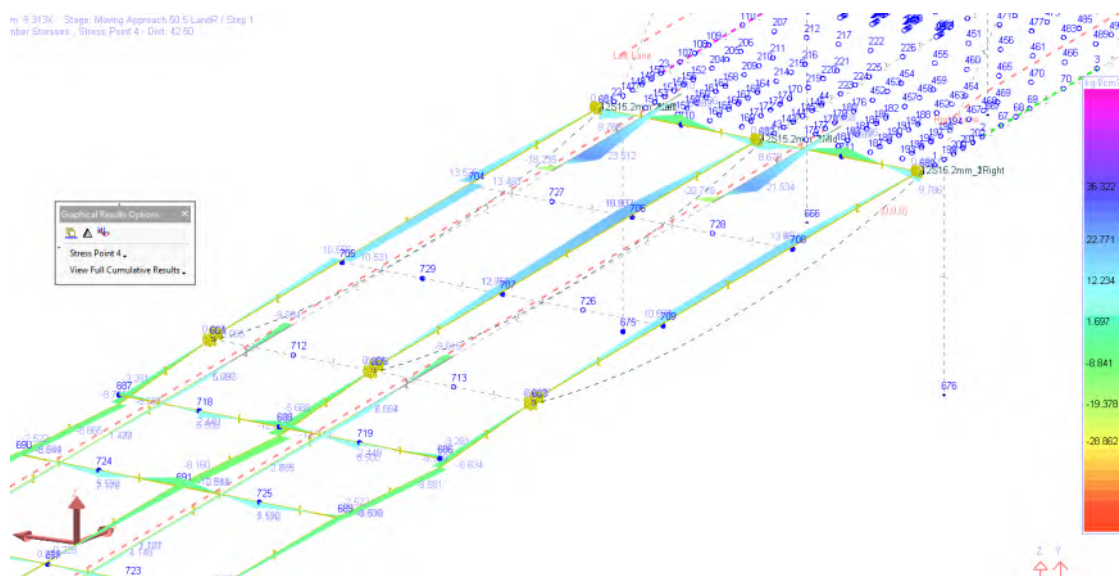
โดยจากการวิเคราะห์ ผลของขั้นตอนการก่อสร้างของสะพาน Construction Stage Analysis ร่วมกับ Moving Load ของรถบรรทุก ยานพาหนะ ขนาด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ที่วิ่งเป็นขบวน สามารถแสดงให้เห็นค่าของความเค้นเนื่องจากการดึงลดอัดแรงสามารถทำให้เกิดผลรวมของความเค้นในระยะยาวที่อยู่ภายในแรงอัด ช่วยลดโอกาสการเกิดความเค้นดึงขึ้นเนื่องจากยานพาหนะได้ ดังแสดงดังรูป



รูปที่ 8-131 ค่าของความเค้นเนื่องจากการดึงลดอัดแรง TOP

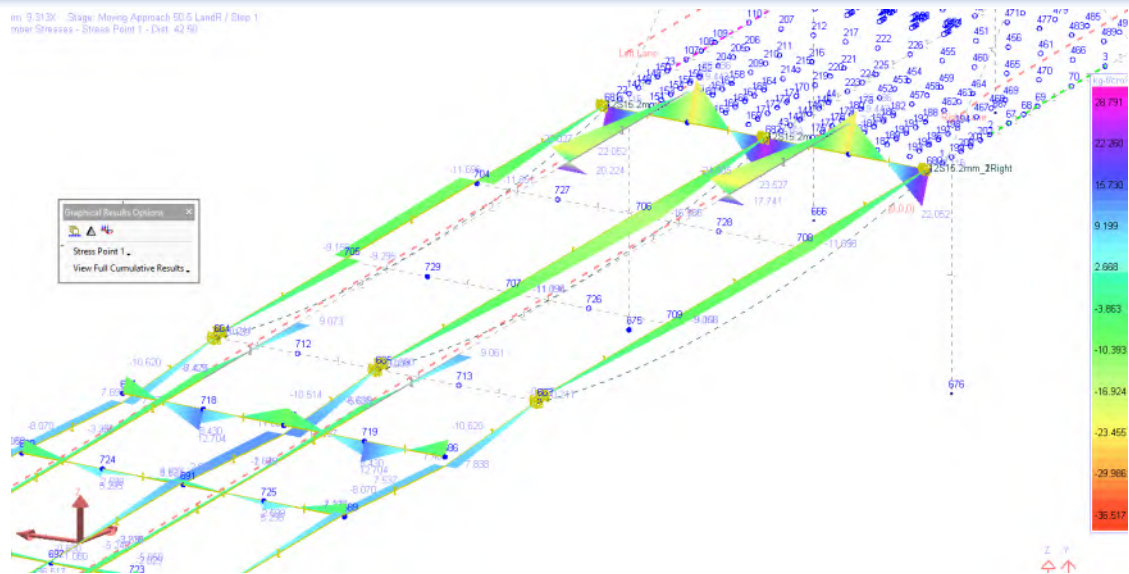


รูปที่ 8-132 ค่าของความเค้นเนื่องจากการดึงลวดอัดแรง Bottom



รูปที่ 8-133 ผลของความเค้นอัดบริเวณ Top Fiber ของสะพานช่วง Approach
เนื่องจากการดึงลวดอัดแรง





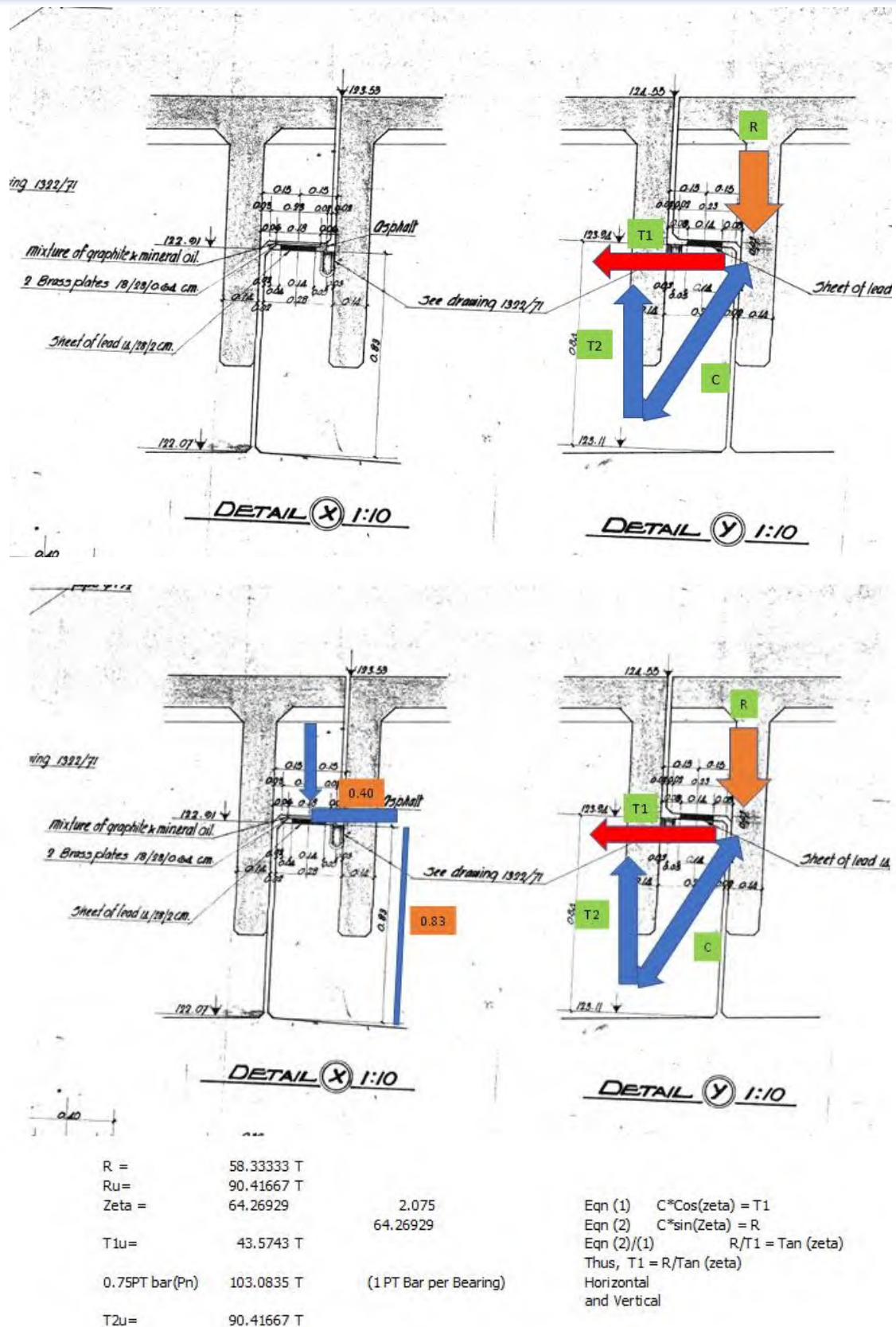
รูปที่ 8-134 ผลของความเค้นอัดบริเวณ Bottom Fiber ของสะพานช่วง Approach
เนื่องจากการดึงลวดอัดแรง

[8.13] การออกแบบเหล็กเสริม พิเศษบริเวณฐานรองรับของ Approach Span

จากการตรวจสอบสภาพของปลายคานช่วง Approach ที่ปรึกษาพบสภาพที่มีความสึกหรองลงรวมทั้งมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในบริเวณดังกล่าว โดยส่วนนี้ เป็นส่วนสำคัญในการรองรับน้ำหนักของสะพานส่วนบน จึงควรทำการเสริมกำลัง ดังนี้

- 1) ทำการซ่อมปิดรอยแตกกว้างขนาดเล็กด้วย Epoxy Injection
- 2) ทำการซ่อมปิดคอนกรีตหลุดลอกโดย Concrete Patching
- 3) ในบริเวณที่มีการหลุดลอกจนเหล็กเป็นสนิม ควรทำการเสริมกำลังเพิ่มเติมโดยใช้ PT Bar ดังนี้

จากการคำนวณหาค่าของแรงที่เกิดขึ้นบริเวณป่าของช่วง Approach โดยใช้ Truss Model



รูปที่ 8-135 ตรวจสอบแรงกระทำบริเวณบ่าของช่วง Approach โดยใช้ Truss Model



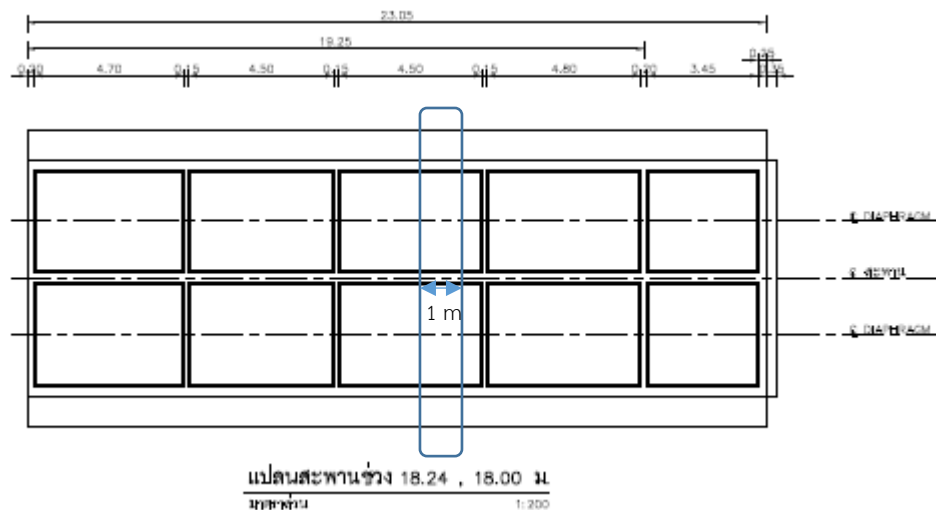
ค่าของ Reaction ของช่วงสะพาน I-Girder มีค่าประมาณ 58 ตันต่อ Bearing (ในสภาวะการใช้งาน) หรือ เท่ากับ 90 ตัน ต่อ Bearing ในสภาวะ Strength Limit ดังนั้น จากรูปแบบของ Truss Model สามารถประมาณหาค่าแรงดึงในแนวนอน (T1) และแนวตั้ง (T2) ได้เท่ากับ 43.5 T และ 90 T ตามลำดับ ดังนั้น เลือกใช้ PT Bar ขนาด 50 mm Dia จำนวน 1 เส้น ในแนวนอน และ จำนวน 1 เส้น ในแนวตั้ง ซึ่งมีค่าของกำลังการต้านทานเท่ากับ 103 T สามารถรองรับแรงที่เกิดขึ้นได้

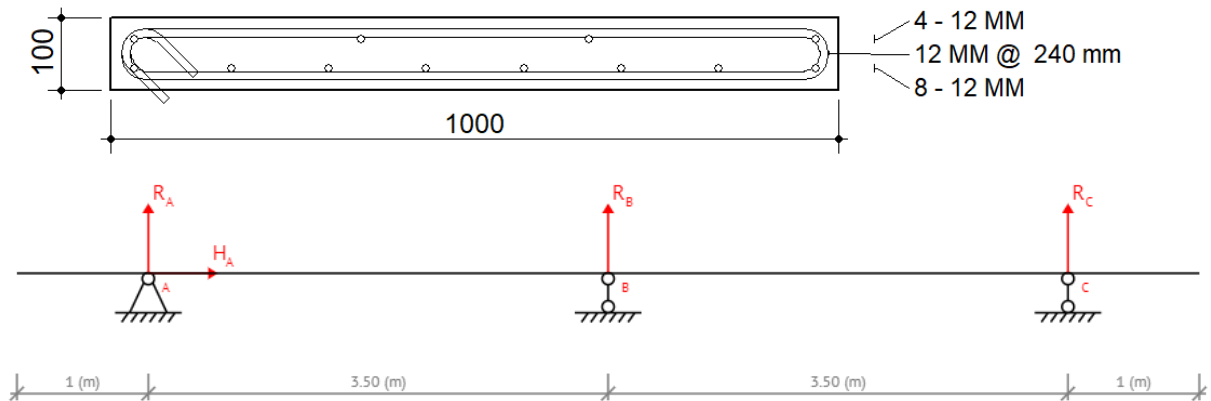
[8.14] การออกแบบเสริมกำลังแผ่นพื้นสะพาน

การเสริมกำลังแผ่นพื้นสะพานปรีดี-ช้าง จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามการพิจารณาจากน้ำหนักบรรทุก คือ การออกแบบเสริมกำลังเพื่อรองรับยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น และ การออกแบบเสริมกำลังเพื่อรองรับยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

[8.14.1] การออกแบบเสริมกำลังเพื่อรองรับยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น

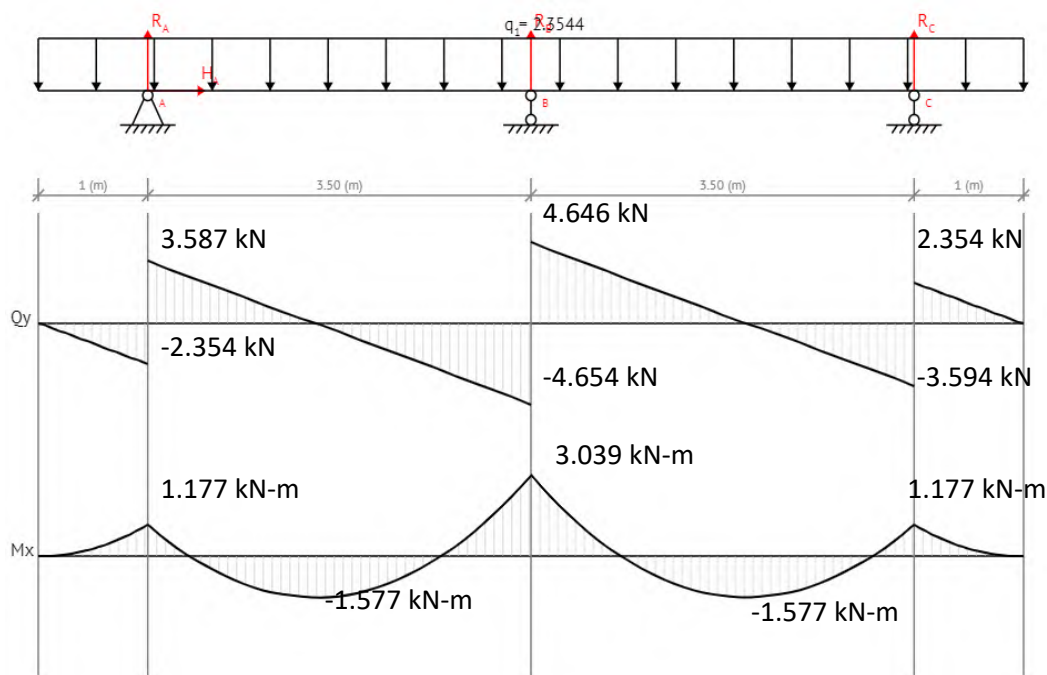
ในการวิเคราะห์แรงกระทำต่อชิ้นส่วนพื้นสะพานปรีดี-ช้าง จะพิจารณาพื้นสะพานต่อความกว้าง 1 เมตร วางพาดคานที่รองรับพื้นสะพานในรูปแบบของคานต่อเนื่องดังรูปที่ 8-136





รูปที่ 8-136 การวิเคราะห์ชั้นส่วนแผ่นพื้นสะพานปรีดี - ธำรง

เมื่อนำรูปแบบคานต่อเนื่องมาพิจารณาหาแรงโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักโครงสร้าง (Dead Load) จะได้ค่าดังรูปที่ 8-137



รูปที่ 8-137 การวิเคราะห์หาแรงโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักโครงสร้าง

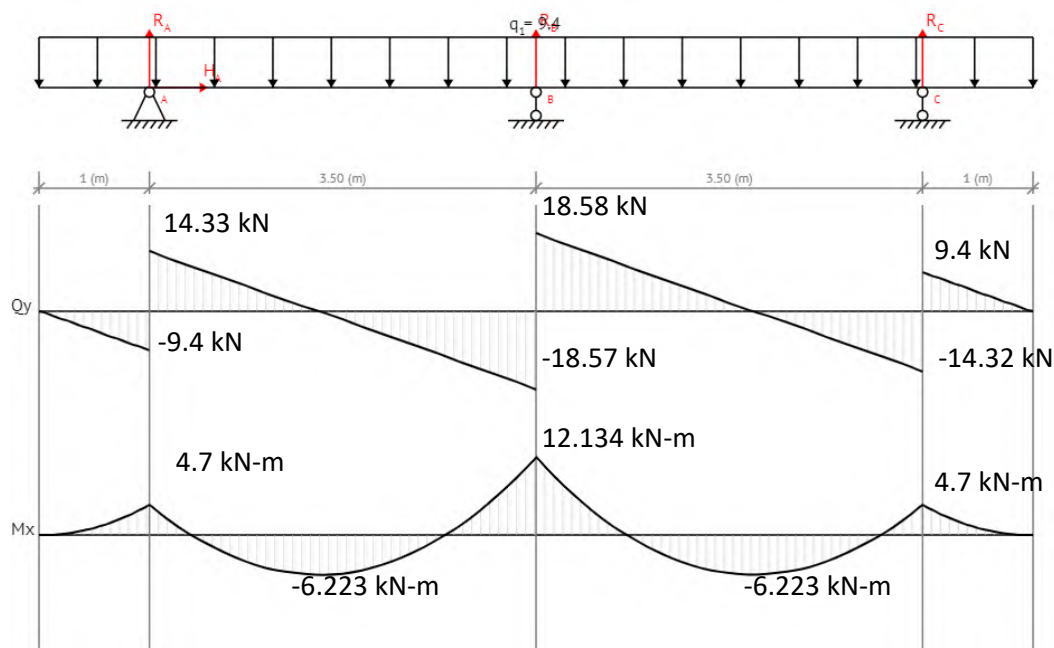
ในการพิจารณาขนาดน้ำหนักกระทำจากยานพาหนะขนาด 2 เฟส 4 ล้อ ยาง 4 เส้น จะพิจารณาถึงน้ำหนักทั้งหมดของรถตามประกาศผู้อำนวยการทางหลวงและขนาดของตัวรถที่ใช้อ้างอิง ดังรูปที่ 8-138



หมวดที่ ๑ ส่วนที่ ๑ ยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (SINGLE UNIT)				
ข้อที่	ชนิดยานพาหนะ	พิกัดน้ำหนัก รวมน้ำหนัก บรรทุก	รูปยานพาหนะ	ประกาศ ฉบับที่/ พ.ศ.
๕	ยานพาหนะที่มี ๒ เพลา ๔ ล้อ ยาง ๔ เส้น ชนิดเพลาท้าย (เพลาที่ ๒) ใช้ยางเดี่ยว ต้องมีน้ำหนักลงเพลาท้าย (เพลาที่ ๒) ไม่เกิน ๗,๐๐๐ กิโลกรัม หรือน้ำหนัก ยานพาหนะรวมน้ำหนักบรรทุกไม่เกิน ๔,๕๐๐ กิโลกรัม	๔.๕๐ ตัน		๑/๔๘

รูปที่ 8-138 รูปแบบยานพาหนะขนาด 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้นที่นำมาพิจารณา

เมื่อนำขนาดน้ำหนักทั้งหมดของยานพาหนะดังกล่าวและขนาดตัวรถที่นำมาใช้อ้างอิง เพื่อคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกที่กระจายลงบนโครงสร้างพื้นสะพาน แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ตัดจากน้ำหนักกระทำ ดังรูปที่ 8-139



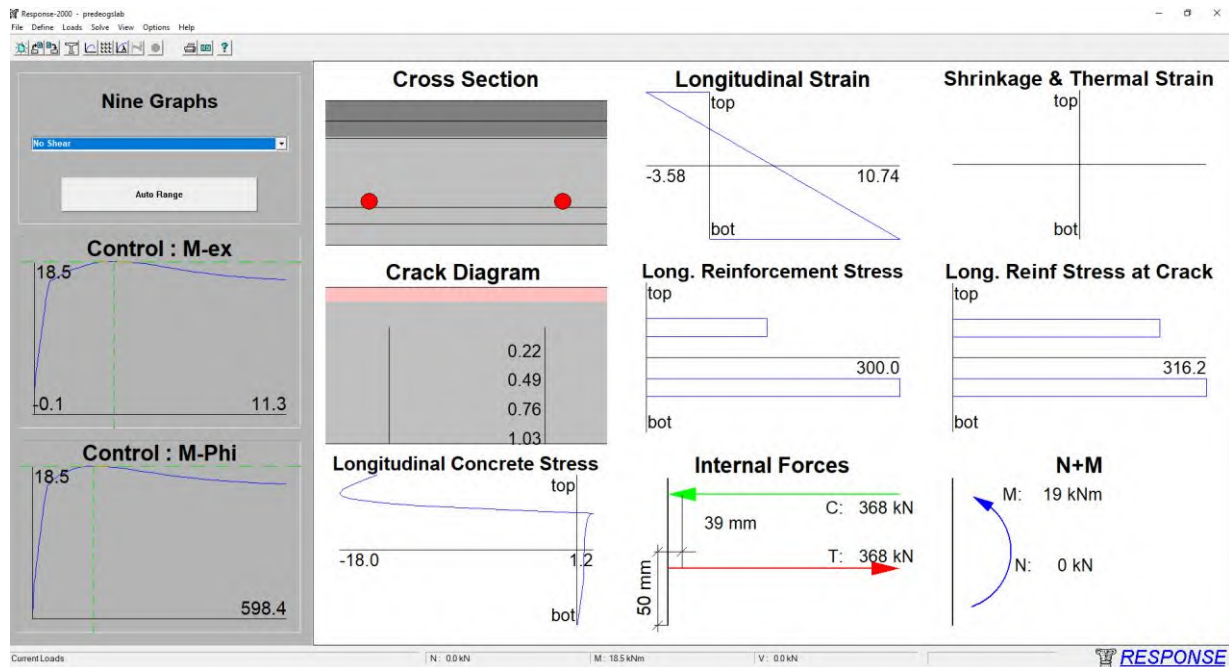
รูปที่ 8-139 การวิเคราะห์หาแรงโมเมนต์ตัดจากน้ำหนักกระทำโดย
ยานพาหนะขนาด 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น

เมื่อได้ค่าแรงโมเมนต์ตัดจากการวิเคราะห์แล้ว ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD ต้องนำมาปรับ
เพิ่มด้วย Load Factor ในการออกแบบ ดังสมการ

$$M_u = 1.25M_{DL} + 1.75M_{LL} \quad (8-10)$$

$$\text{ได้ว่า } M_u = 1.25(3.039) + 1.75(12.134) = 25.03 \text{ kN} - m$$

จากรูปหน้าตัดพื้นสะพานในรูปที่ 8-136 เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Response2000 แสดงดังรูปที่ 8-140 จะได้ค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดโครงสร้าง $M_n = 18.544 \text{ kN} - m$



รูปที่ 8-140 การวิเคราะห์หาค่ากำลังโมเมนต์ดัดสูงสุดที่จะรับได้จากหน้าตัดโครงสร้างปัจจุบัน

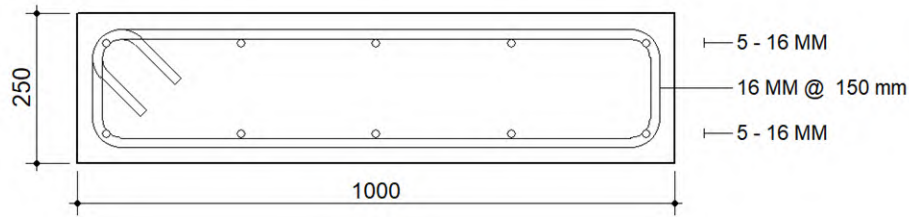
ตามมาตรฐาน AASHTO LRFD จะพิจารณาความปลอดภัยของโครงสร้างจากการออกแบบดังนี้

$$\phi M_n > M_u, \phi = 0.9 \quad (8-11)$$

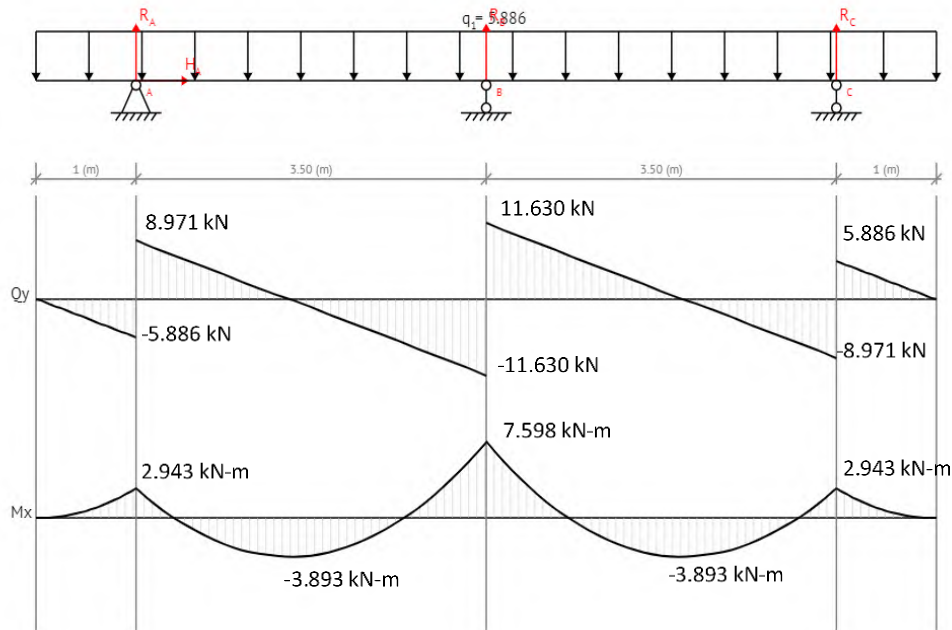
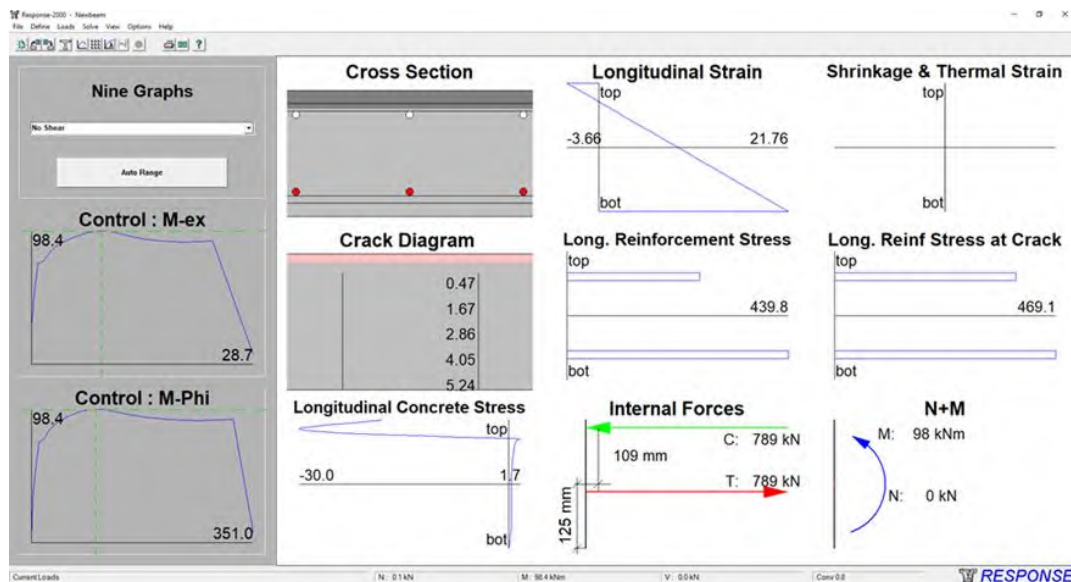
$$\text{พบว่า } \phi M_n = 0.9(18.544) = 16.69 \text{ kN} - m < M_u = 25.03 \text{ kN} - m$$

ดังนั้น โครงสร้างในปัจจุบันจึงไม่อาจรองรับน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะขนาด 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น จึงจำเป็นต้องมีการเสริมกำลังให้เพียงพอ ที่ปรึกษามีความเห็นให้รื้อแผ่นพื้นเก่า แล้วก่อสร้างแผ่นพื้นขึ้นมาใหม่ (Deck Replacement) โดยมีรายละเอียดขนาดหน้าตัดและการวางเหล็กเสริม ดังรูปที่ 8-141 ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปและวิเคราะห์หาค่ากำลังโมเมนต์ดัดสูงสุดที่จะรับได้จากหน้าตัดพื้นสะพานดังรูปที่ 8-142

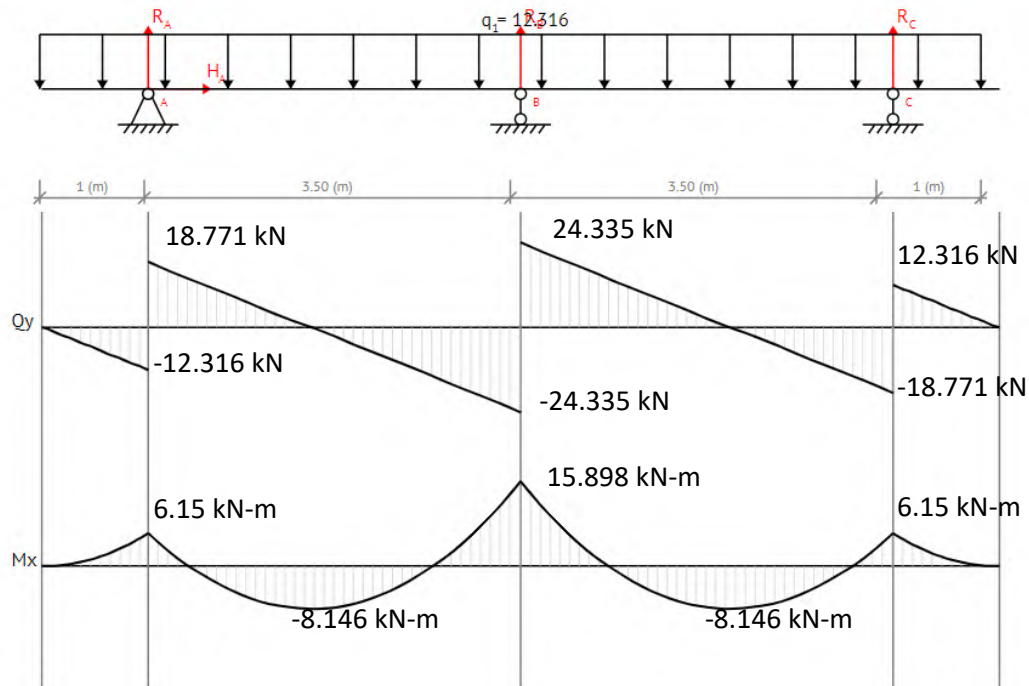




รูปที่ 8-141 รายละเอียดหน้าตัดและการวางเหล็กเสริมสำหรับพื้นสะพานใหม่



รูปที่ 8-142 การวิเคราะห์น้ำหนักคงที่จากน้ำหนักโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไป (บน) และการวิเคราะห์หาค่ากำลังโมเมนต์ดัดสูงสุดที่จะรับได้จากหน้าตัดโครงสร้าง (ล่าง)



รูปที่ 8-144 การวิเคราะห์หาแรงโมเมนต์ตัดจากน้ำหนักกระทำโดยยานพาหนะขนาด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น

สำหรับการเสริมกำลังสำหรับการรับน้ำหนักยานพาหนะขนาด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ที่ปรึกษาจะใช้รูปแบบเดียวกับการรับน้ำหนักยานพาหนะขนาดไม่เกิน 2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น คือการรื้อแผ่นพื้นเก่าแล้วทำการก่อสร้างแผ่นพื้นใหม่ (Deck Replacement) ดังนั้น จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 8-142 และรูปที่ 8-144 เมื่อนำมาแทนค่าในสมการที่ ((8-10) จะได้ว่า

$$M_u = 1.25(7.598) + 1.75(15.898) = 37.319 \text{ kN} - \text{m}$$

และจากผลการวิเคราะห์กำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดของหน้าตัดจากรูปที่ 8-142 ได้ว่า

$$\phi M_n = 0.9(98.365) = 88.528 \text{ kN} - \text{m} > M_u$$

ดังนั้น การทำการรื้อแผ่นพื้นเก่าและทำการก่อสร้างแผ่นพื้นใหม่ (Deck Replacement) จะช่วยให้โครงสร้างพื้นสะพานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกของยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไปได้

[8.15] การตรวจสอบโครงสร้างตอม่อสะพานปรีดี-ธำรง (Bridge Pier)

ในหัวข้อนี้ที่ปรึกษาจะทำการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างตอม่อคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด 2 รูปแบบ ประกอบด้วย ตอม่อของสะพานทั่วไป (Approach Bridge) ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 3 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 8-145 และตอม่อของสะพานโค้ง (Tie - Arch Bridge) ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างตอม่อแบบ Caisson ดังแสดงในรูปที่ 8-146



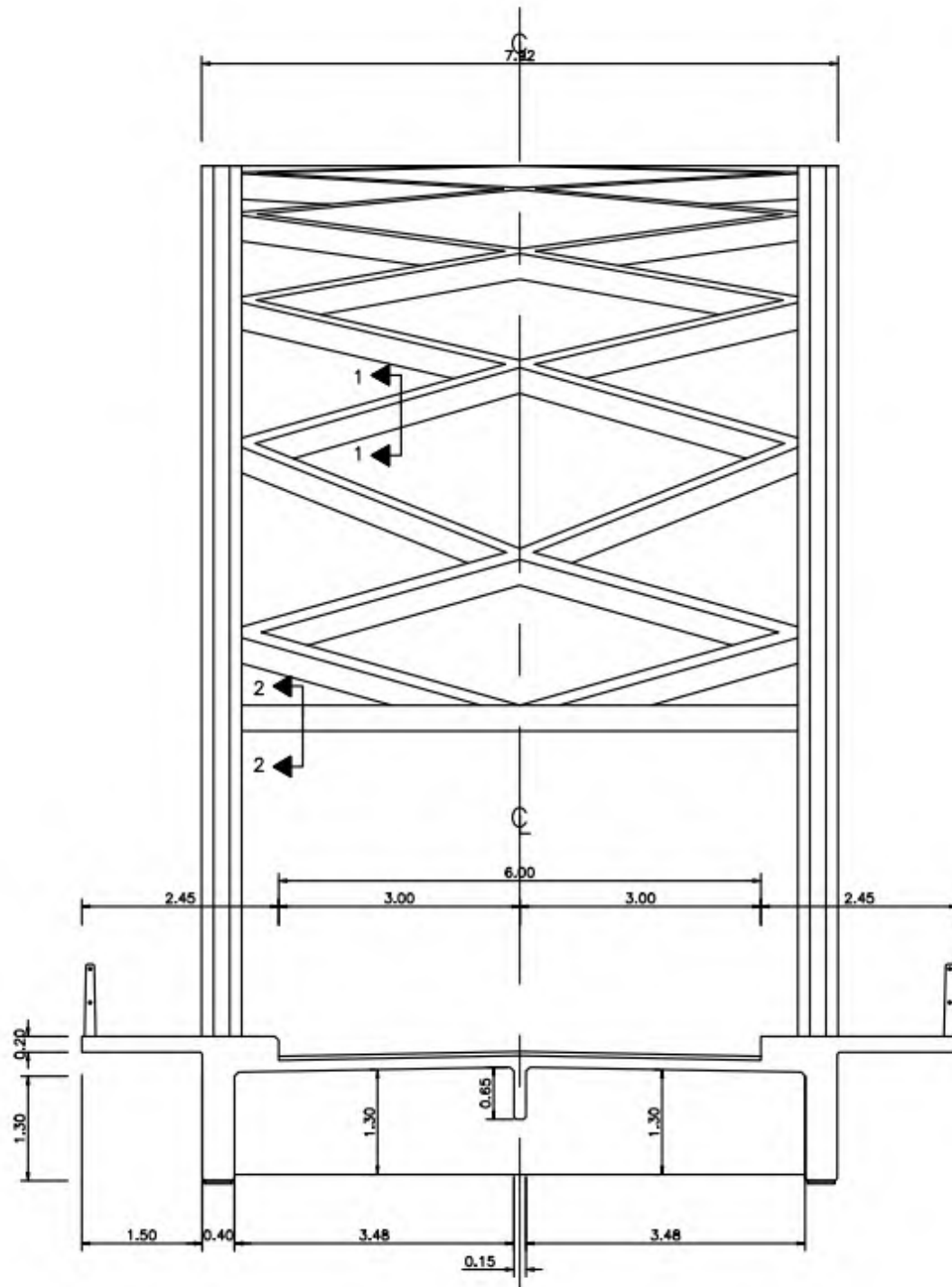
รูปที่ 8-145 โครงสร้างตอม่อของสะพาน Approach Bridge



รูปที่ 8-146 โครงสร้างตอม่อของสะพาน Tie - Arch Bridge

พิจารณาน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างตอม่อสะพาน ประกอบด้วย น้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้างตอม่อ (Dead Load, DL) น้ำหนักบรรทุกคงที่จากโครงสร้างสะพานส่วนบน (Superstructure Dead Load, SDL) น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำต่อสะพาน (Live Load, LL) แรงที่กระทำต่อโครงสร้างสะพานเนื่องจากการเบรค (Braking Force) แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง (Wind Load on Structure)



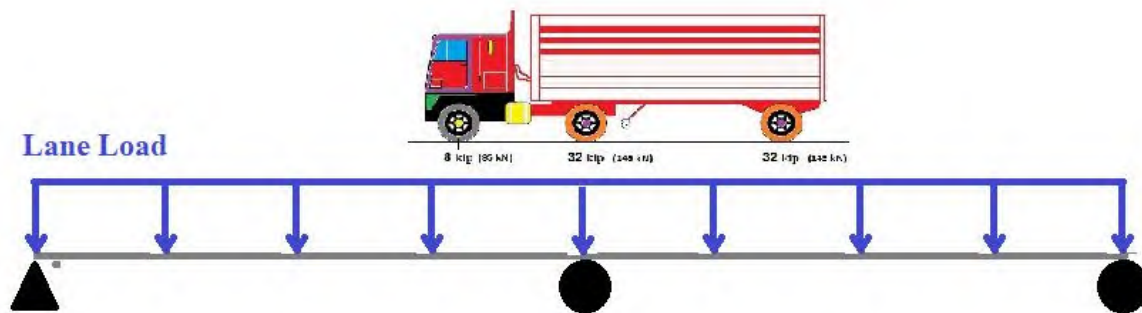


รูปที่ 8-148 หน้าตัดโครงสร้างสะพานส่วนบนของ Tie-arch Bridge

น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างต่อสะพานคือ HL93 (Lane Load) มีขนาด 930 kg/m ต่อ 1 เลน ตามมาตรฐาน AASHTO (ดังรูปที่ 8-149) ซึ่งให้ค่าที่สูงกว่า HS20-44 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการออกแบบสะพานปรีดี-ช้าง นอกเหนือจากนี้ยังได้พิจารณาแรงที่เกิด

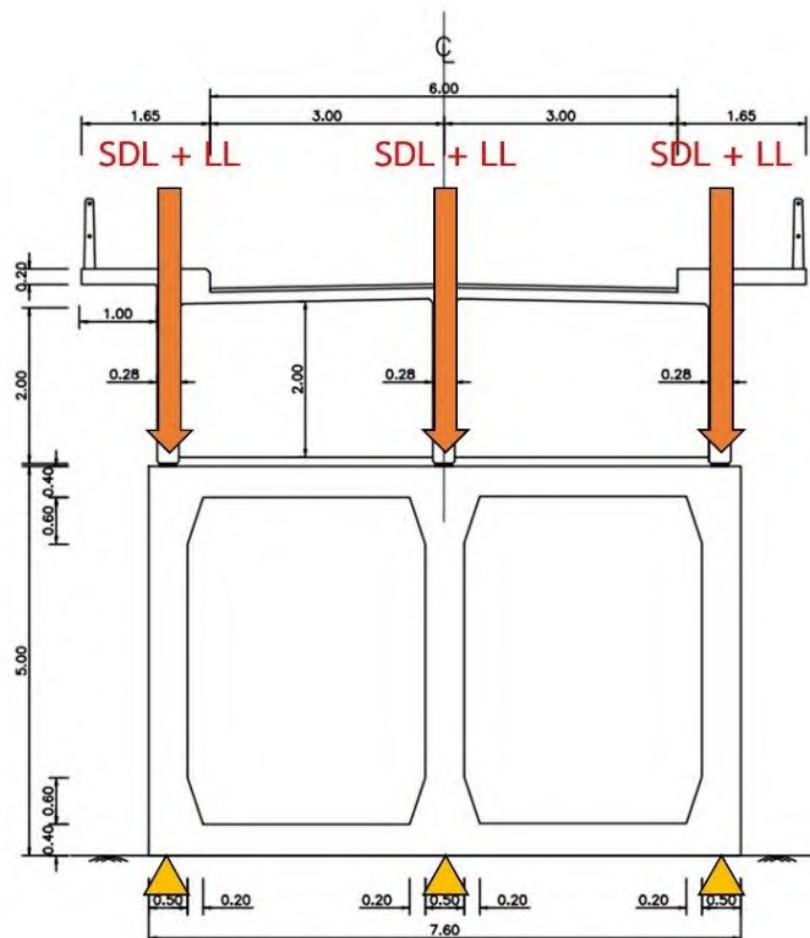


จากยานพาหนะขนาดตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป น้ำหนักรวม 50.50 ตัน (Truck Load) สำหรับประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างด้วย



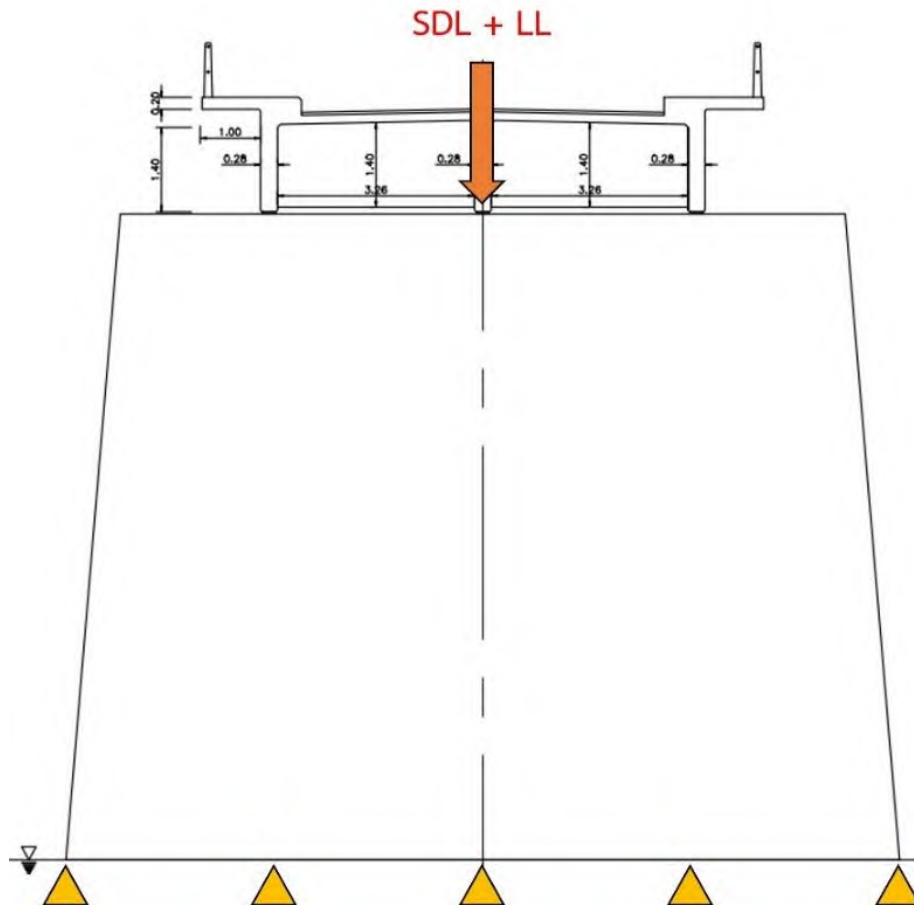
รูปที่ 8-149 แบบจำลองน้ำหนักบรรทุกทุกจุดที่กระทำต่อสะพานตาม AASTHO HL-93

การตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกจุดที่และน้ำหนักบรรทุกทุกจุดของโครงสร้างต่อม่อสะพานจะทำการตรวจสอบโครงสร้างต่อม่อสะพานทั่วไป โดยจะถ่วงน้ำหนักลงโครงสร้างต่อม่อดังแสดงในรูปที่ 8-150



รูปที่ 8-150 แบบจำลองตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกจุดที่กระทำต่อโครงสร้างต่อม่อของสะพานทั่วไป

การตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรของโครงสร้างตอม่อสะพานจะทำการตรวจสอบโครงสร้างตอม่อสะพานโค้ง โครงสร้างตอม่อนี้จะถูกพิจารณาเป็นโครงสร้างเสาคอนกรีตกลวงซึ่งมีขนาดดังรูปที่ 8-151



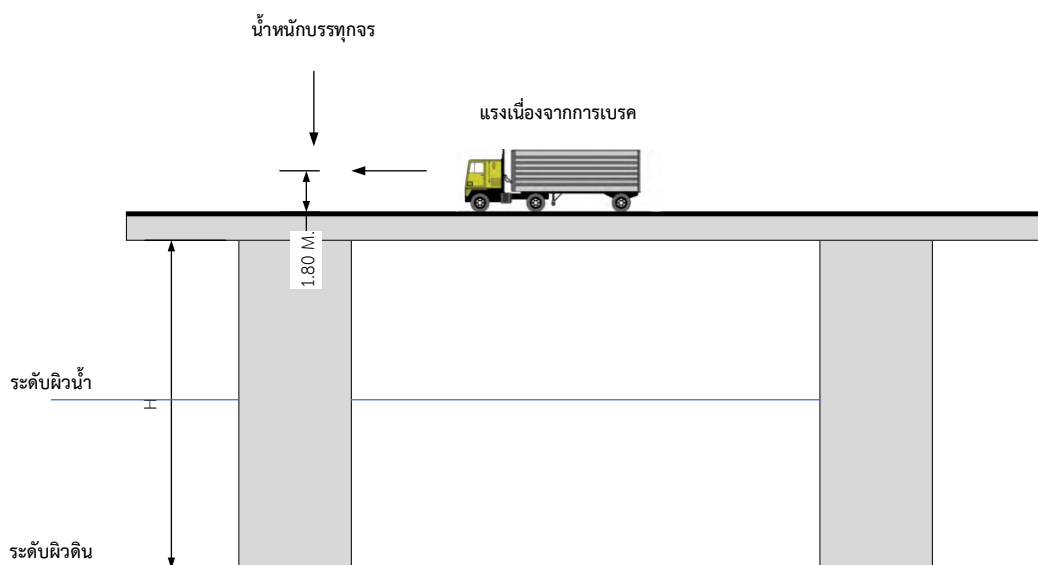
รูปที่ 8-151 แบบจำลองตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างตอม่อของสะพานโค้ง

พิจารณาแรงเนื่องจากการเบรค (Braking Force) ซึ่งหาได้จากแรงตามทิศทางการเคลื่อนตัวของน้ำหนักบรรทุกจรโดยไม่รวมแรงกระแทก กระทำที่ความสูง 1.80 เมตร จากพื้นผิวจราจรและให้แรงดังกล่าวสามารถกระทำผ่านจากโครงสร้างส่วนบนไปยังโครงสร้างส่วนล่าง คำนวณตามจำนวนช่องจราจร โดยคิดผลของการเพิ่มและลดของน้ำหนักบรรทุกจร ซึ่งคำนวณได้จากร้อยละ 5 ของน้ำหนักบรรทุกทุกและ Lane Load โดยที่แรงกระทำดังกล่าวจะถูกพิจารณาทั้งโครงสร้างตอม่อของสะพานทั่วไปและโครงสร้างตอม่อของสะพานโค้งดังแสดงในรูปที่ 8-152

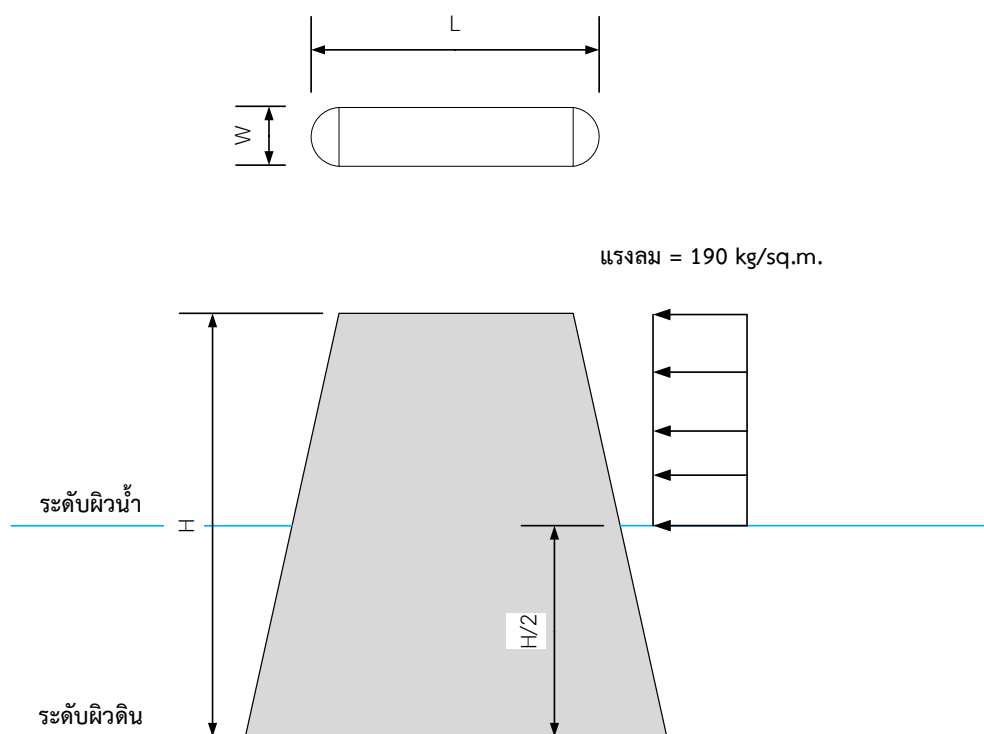
พิจารณาแรงลมที่กระทำบนโครงสร้าง (Wind Load on Structure) ตอม่อสะพาน ซึ่งใช้แรงลมขนาด 190 กิโลกรัมต่อตารางเมตร กระทำต่อโครงสร้างตอม่อในแนวราบ ทั้งตอม่อของสะพานทั่วไปและสะพานโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 8-153 โดยที่แรงกระทำดังกล่าวจะถูกพิจารณาทั้งโครงสร้างตอม่อของสะพานทั่วไปและโครงสร้างตอม่อของสะพานโค้ง



นอกเหนือจากการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างตอม่อสะพานแบบ Caisson เนื่องจากน้ำบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างตอม่อในแนวตั้งแล้ว จะทำการตรวจสอบกำลังรับแรงโครงสร้างตอม่อในแนวราบซึ่งประกอบด้วย แรงเนื่องจากกระแสน้ำ (Stream Current Force) และแรงกระแทกเนื่องจากเรือสัญจรตามแม่น้ำ (Collision from Vessel) ตามมาตรฐาน ASSHTO LRFD Bridge Design Specification



รูปที่ 8-152 ทิศทางแรงเนื่องจากการเบรคที่กระทำต่อโครงสร้างสะพาน



รูปที่ 8-153 รูปแบบการพิจารณาแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างตอม่อแบบ Caisson

แรงเนื่องจากกระแสน้ำ (Stream Current Force) จะคำนวณได้จาก

$$p = 5.14 \times 10^{-4} C_D V^2 \quad (\text{For Longitudinal})$$

$$p = 5.14 \times 10^{-4} C_L V^2 \quad (\text{For Lateral})$$

โดย p = แรงดันเนื่องจากกระแสน้ำมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล

C_D = สัมประสิทธิ์การลาก (Drag Coefficient) สำหรับตอม่อ ในกรณีนี้เป็น semicircular-nosed pier ดังนั้น $C_D = 0.7$

C_L = สัมประสิทธิ์การลากด้านข้าง (Lateral Drag Coefficient) ในกรณีของสะพานปรีดี-ช้าง กำหนดมุมของกระแสน้ำที่ทำมุมกับแกนของโครงสร้างตอม่อสะพานมากกว่า 30 องศา ดังนั้น $C_L = 1.0$

V = ความเร็วของกระแสน้ำสำหรับแม่น้ำปาสักมีความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที

ดังนั้นจะได้แรงดันเนื่องจากกระแสน้ำจากการลากและการลากด้านข้าง

$$p = 1.295 \times 10^{-4} \text{ MPa} \quad (\text{For Longitudinal})$$

$$p = 1.850 \times 10^{-4} \text{ MPa} \quad (\text{For Lateral})$$

สำหรับแรงกระแทกเนื่องจากเรือสัญจรตามแม่น้ำจะถูกคำนวณจาก

$$P_s = 1.2 \times 10^5 V (\text{DWT})^{0.5}$$

โดย P_s = แรงกระแทกเนื่องจากเรือบรรทุกสินค้าสัญจรตามแม่น้ำมีหน่วยเป็นนิวตัน

V = ความเร็วของเรือขณะชน มีค่าเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที

DWT = Deadweight tonnage of vessel สำหรับเรือขนส่งทางลำนํ้ามีค่าเท่ากับ 500 ตัน

ดังนั้นจะได้แรงกระแทกเนื่องจากเรือบรรทุกสินค้าสัญจรตามแม่น้ำ

$$P_s = 8.050 \times 10^3 \text{ kN}$$

เพื่อที่จะทำการตรวจสอบกำลังรับแรงจากกระแสน้ำและแรงเนื่องจากเรือบรรทุกสินค้าสัญจรตามแม่น้ำ แรงที่กระทำต่อโครงสร้างตอม่อจะถูกนำมาจัดตำแหน่งกระทำดังแสดงในรูปที่ 8-154 ซึ่งความสูงของตอม่อสะพานแบบ Caisson มีความสูง 13.00 เมตร และความสูงของเรือสินค้าจะมีความสูง 3.50 เมตร พิจารณาแรงที่กระทำต่อโครงสร้างตอม่อสะพานแบบ Caisson ทั้งหมด หากำลังที่หน้าตัดเสาคอนกรีตรับแรงในแนวแกนสูงสุดได้ดังรูปที่ 8-154





 บริษัท แอสโคนา เอ็ม จำกัด
ASCONA M COMPANY LIMITED

ตารางที่ 8-11 ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกและการรวมแรงมาตรฐาน AASHTO LRFD

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use One of These at a Time			
										EQ	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	γ_p	1.75	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength II	γ_p	1.35	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength III	γ_p	—	1.00	1.40	—	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Strength IV	γ_p	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	—	—	—	—	—
Strength V	γ_p	1.35	1.00	0.40	1.0	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Extreme Event I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—
Extreme Event II	γ_p	0.50	1.00	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.0	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Service II	1.00	1.30	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	—	—	—	—	—	—
Service III	1.00	0.80	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	—	—	—	—
Service IV	1.00	—	1.00	0.70	—	1.00	1.00/1.20	—	1.0	—	—	—	—
Fatigue I—LL, IM & CE only	—	1.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue I II—LL, IM & CE only	—	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ตารางที่ 8-12 การรวมแรงที่กระทำต่อโครงสร้างต่อม่อของสะพานทั่วไป

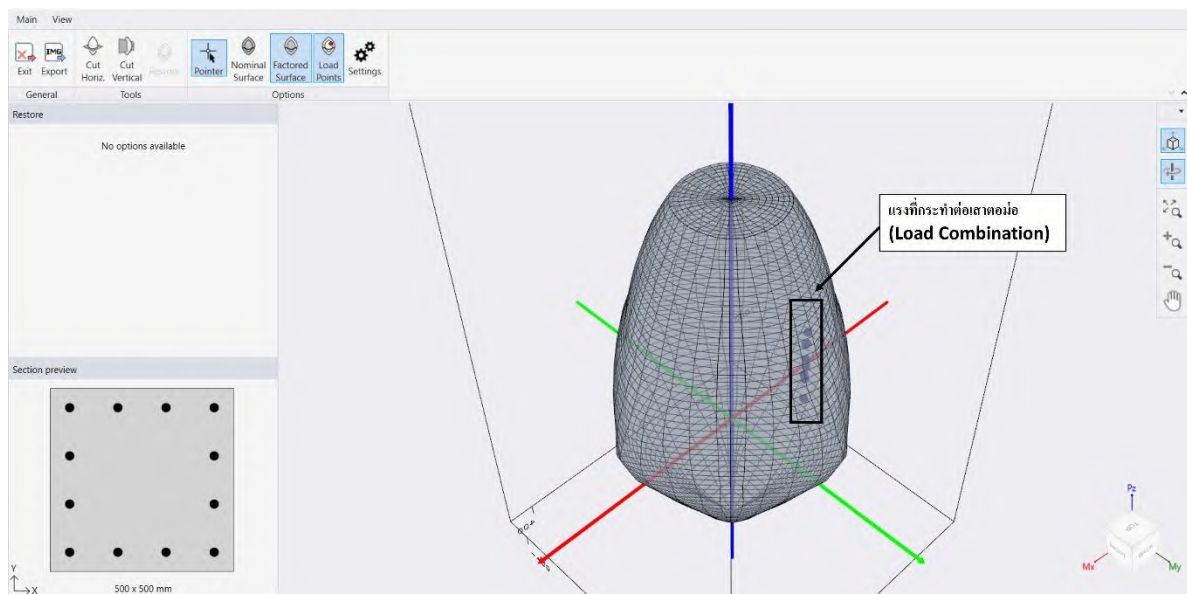
การรวมแรง (Load Combination)	Max. Axial Load (P) kN	Max. Moment (Mx) kN-m	Max. Moment (My) kN-m
1. Strength I	1,894.95	252.23	0.00
2. Strength II	1,758.61	252.23	0.00
3. Strength III	1,298.46	252.23	0.00
4. Strength IV	1,558.15	252.23	0.00
5. Strength V	1,758.61	252.23	4.75
6. Extreme Event I	1,298.46	252.23	0.00
7. Extreme Event II	1,468.89	252.23	0.00
8. Service I	1,379.62	252.23	4.75
9. Service II	1,481.87	252.23	0.00
10. Service III	1,311.45	252.23	0.00
11. Service IV	1,038.77	252.23	0.00



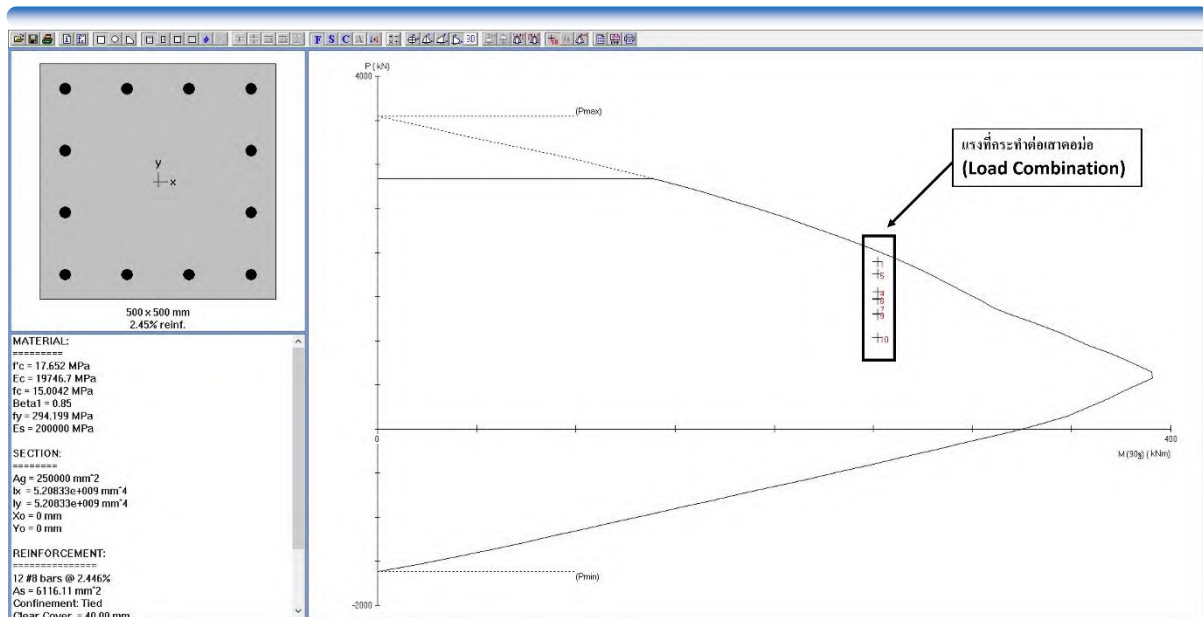
ตารางที่ 8-13 การรวมแรงที่กระทำต่อโครงสร้างตอม่อแบบ Caisson ของสะพานโค้ง

การรวมแรง (Load Combination)	Max. Axial Load (P) kN	Max. Moment (Mx) kN-m	Max. Moment (My) kN-m
1. Strength I	7,869.13	674.08	10.94
2. Strength II	7,513.22	674.08	10.94
3. Strength III	6,312.00	674.08	10.94
4. Strength IV	7,574.40	674.08	10.94
5. Strength V	7,513.22	674.08	47.99
6. Extreme Event I	6,312.00	674.08	10.94
7. Extreme Event II	6,756.90	674.08	80,510.94
8. Service I	5,939.39	674.08	47.99
9. Service II	6,206.33	674.08	10.94
10. Service III	5,761.43	674.08	10.94
11. Service IV	5,049.60	674.08	10.94

นำค่าที่ได้จากตารางมาคำนวณตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของโครงสร้างตอม่อของสะพานทั่วไปและสะพานโค้ง โดยพิจารณาตามการรวมแรงในแต่ละกรณี ซึ่งแสดงค่าได้ตาม Interaction Diagram ดังรูปที่ 8-155 และรูปที่ 8-156 สำหรับการตรวจสอบกำลังน้ำหนักของโครงสร้างตอม่อสะพานทั่วไปซึ่งพิจารณาเสาคอนกรีตตำแหน่งกึ่งกลางโครงสร้าง

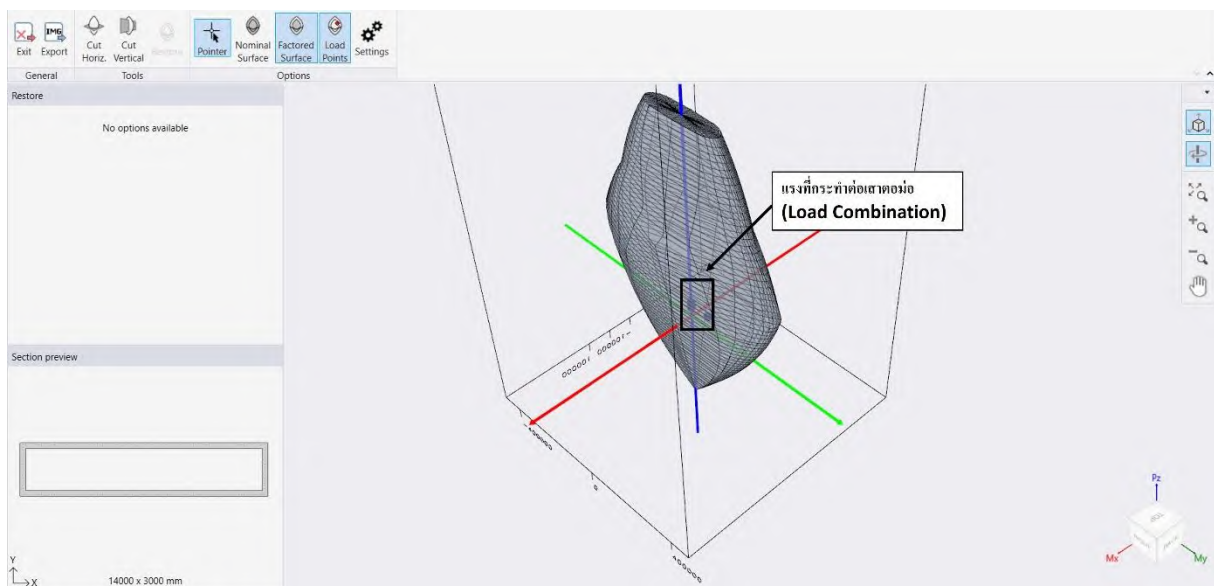


รูปที่ 8-155 3-D Interaction Diagram ของโครงสร้างตอม่อของสะพานทั่วไป



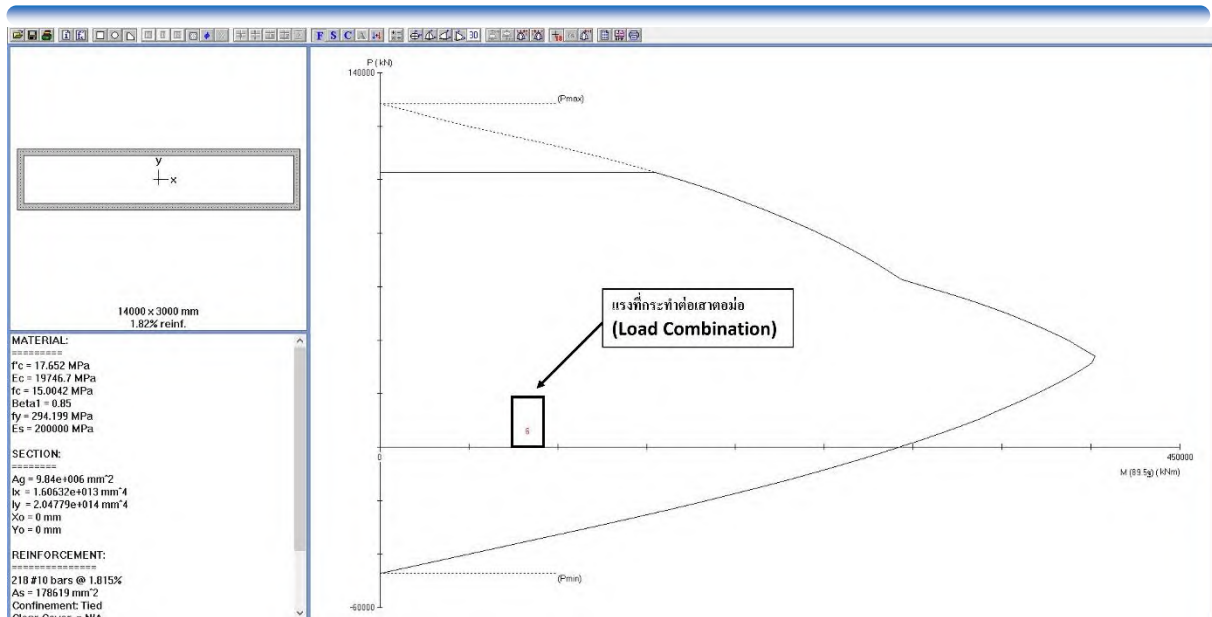
รูปที่ 8-156 P – M Interaction Diagram ของโครงสร้างตอม่อของสะพานทั่วไป

นอกเหนือจากนี้จะพิจารณาการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักกระทำต่อโครงสร้างตอม่อแบบ Caisson ของสะพานโค้ง โดยแสดง Interaction Diagram รูปที่ 8-157 รูปที่ 8-158 และรูปที่ 8-159 ตามลำดับ

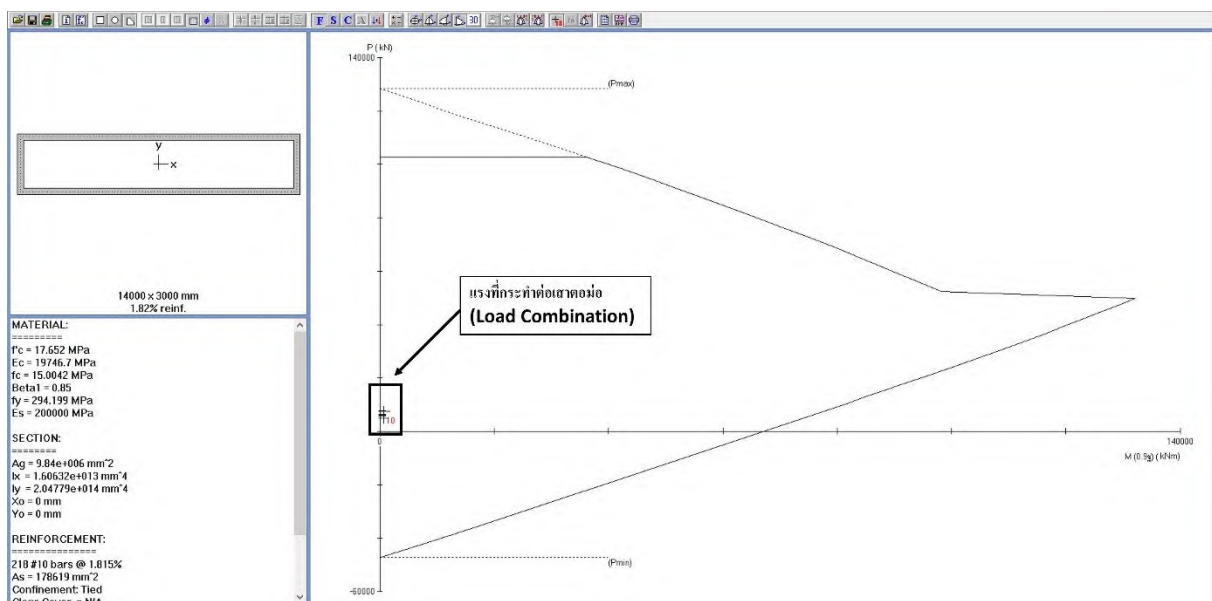


รูปที่ 8-157 3-D Interaction Diagram ของโครงสร้างตอม่อแบบ Caisson ของสะพานโค้ง





รูปที่ 8-158 P – Mx Interaction Diagram ของโครงสร้างตอม่อแบบ Caisson ของสะพานโค้ง



รูปที่ 8-159 P – My Interaction Diagram ของโครงสร้างตอม่อแบบ Caisson ของสะพานโค้ง

จากผลการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างเสาตอม่อของสะพานทั่วไปและโครงสร้างตอม่อสะพานแบบ Caisson โดยโครงสร้างตอม่อมีลักษณะเป็นโครงสร้างเสาคอนกรีตกลวงสูงสุด พบว่า ค่าแรงรวมที่กระทำต่อโครงสร้างตอม่อยังมีค่าไม่เกินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของโครงสร้างตอม่อ (แรงกระทำยังอยู่ภายใน Diagram) ดังนั้นโครงสร้างเสาตอม่อของสะพานทั่วไปและโครงสร้างตอม่อสะพานแบบ Caisson ยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อสะพานในแนวราบได้ โดยที่ยังไม่เกิดความเสียหายขึ้น

[8.16] สรุปการตรวจสอบกำลังโครงสร้างเดิมและการเสริมกำลัง

การตรวจสอบความสามารถของโครงสร้างเดิมและการออกแบบเสริมกำลังได้กระทำไว้ 2 ทางเลือก คือ (1) ออกแบบรองรับยานพาหนะขนาดเล็ก (2 เพลา 4 ล้อ ยาง 4 เส้น น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานกรมทางหลวง ไม่เกิน 9.50 ตัน) และ (2) ออกแบบรองรับยานพาหนะขนาดใหญ่ (ตั้งแต่ 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ขึ้นไป ซึ่งจะใช้รถบรรทุกพ่วงตามมาตรฐานกรมทางหลวงน้ำหนัก 50.50 ตัน เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์และออกแบบ) ผลการตรวจสอบความสามารถของสะพาน พบว่า โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) ประกอบด้วย กำแพงตอม่อ (Pier Wall) และเสาตอม่อ (Pier Column) ยังคงสามารถรองรับยานพาหนะขนาดใหญ่ได้อย่างปลอดภัย จึงไม่จำเป็นต้องออกแบบเสริมกำลัง แต่ควรซ่อมแซมให้โครงสร้างกลับมามีความแข็งแรงใกล้เคียงเดิม ผลการตรวจสอบโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) พบว่ามีชิ้นส่วนหลายชิ้นที่มีกำลังไม่เพียงพอ หรือมีสภาพเก่าและชำรุดมาก ควรได้รับการปรับปรุงให้แข็งแรงขึ้น โดยการวิเคราะห์และออกแบบเสริมกำลังของโครงสร้างส่วนบนจะแบ่งสะพานออกเป็น 2 กลุ่มลักษณะ ได้แก่ ช่วงสะพานเชิงลาด (Approach Span) และช่วงสะพานโค้ง (Arch Span) ซึ่งแต่ละกลุ่มมีชิ้นส่วนโครงสร้างและพฤติกรรมการรับแรงที่แตกต่างกัน

- ทางเลือกที่ 1: ออกแบบรองรับยานพาหนะขนาดเล็ก

- เฉพาะช่วงสะพานเชิงลาด (Approach Span) : ผลการตรวจสอบ พบว่า

- คานสะพาน (T Beam) มีความสามารถไม่เพียงพอ จึงได้ออกแบบเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้นและใส่ลวดอัดแรง พร้อมทั้งเสริมกำลังปลายคานรับแรงเฉือนด้วยเหล็กเส้นอัดแรง (PT bar)
- ปัจจุบันพื้นสะพานมีขนาดบาง สภาพเก่าและชำรุด มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ จึงแนะนำให้รื้อและก่อสร้างพื้นสะพานใหม่ (Deck Replacement) นอกจากนี้จะทำการอัดพื้นสะพานตามแนวขวางด้วยลวดขึงที่ติดตั้งเกลียวแรง (Turnbuckle) เพื่อเพิ่มความมั่นคงให้กับโครงสร้าง

- เฉพาะช่วงสะพานโค้ง (Arch Span): ผลการตรวจสอบ พบว่า

- คานสะพานรับแรงดึง (Stiffening Girder) ยังคงมีความสามารถเพียงพอ จึงไม่ต้องออกแบบเสริมกำลัง แต่ควรซ่อมให้แข็งแรงใกล้เคียงเดิม
- คานโค้ง (Arch Rib) มีความสามารถไม่เพียงพอ จึงได้ออกแบบโดยการขยายหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้น

- ปัจจุบันพื้นสะพานมีขนาดบาง สภาพเก่าและชำรุด มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ จึงแนะนำให้รื้อและก่อสร้างพื้นสะพานใหม่ (Deck Replacement) นอกจากนี้จะทำการอัดพื้นสะพานตามแนวขวางด้วยลวดขึงที่ติดตั้งเกลียวเร่ง (Turnbuckle)
- ผลการตรวจสอบลวดขึง (Hanger) พบว่า ลวดขึงเส้นที่ 1, 2, 13, และ 14 ของคานโค้งทั้ง 2 ข้าง (รวม 8 เส้น) มีสภาพหย่อน และไม่สามารถขึ้นให้ตึงได้ จึงแนะนำให้เปลี่ยนลวดขึงใหม่ทั้ง 8 เส้น โดยมีรายละเอียดตามแบบบูรณะกรณี
- ตลอดทั้งสะพาน (Approach Span + Arch Span) :
 - เนื่องจากอุปกรณ์รองคาน (Bearing) มีสภาพเก่าและชำรุด แนะนำให้เปลี่ยนอุปกรณ์รองคานใหม่ทั้งสะพาน
 - ถึงแม้ผิวทางจะมีสภาพค่อนข้างดี แต่ที่บริเวณรอยต่อพื้นสะพานมีสภาพชำรุดเกือบทั้งหมด แนะนำให้ปูผิวทางใหม่พร้อมทั้งติดตั้งรอยต่อเพื่อขยายตลอดทั้งสะพาน
- ทางเลือกที่ 2: ออกแบบรองรับยานพาหนะขนาดใหญ่
 - เฉพาะช่วงสะพานเชิงลาด (Approach Span) : ผลการตรวจสอบ พบว่า
 - คานสะพาน (T Beam) มีความสามารถไม่เพียงพอ จึงได้ออกแบบเสริมกำลังโดยการขยายหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้นและใส่ลวดอัดแรง พร้อมทั้งเสริมกำลังปลายคานรับแรงเฉือนด้วยเหล็กเส้นอัดแรง (PT bar)
 - ปัจจุบันพื้นสะพานมีขนาดบาง สภาพเก่าและชำรุด มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ จึงแนะนำให้รื้อและก่อสร้างพื้นสะพานใหม่ (Deck Replacement) นอกจากนี้จะทำการอัดพื้นสะพานตามแนวขวางด้วยลวดขึงที่ติดตั้งเกลียวเร่ง (Turnbuckle) เพื่อเพิ่มความมั่นคงให้กับโครงสร้าง
 - เฉพาะช่วงสะพานโค้ง (Arch Span): ผลการตรวจสอบ พบว่า
 - คานสะพานรับแรงดึง (Stiffening Girder) มีความสามารถไม่เพียงพอ จึงได้ออกแบบโดยการขยายหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้นและใส่ลวดอัดแรง นอกจากนี้ทำการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นอัดแรงที่จุดฝังลวดขึงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในคานสะพานรับแรงดึง เพื่อรองรับแรงดึงที่เพิ่มสูงขึ้นจากรถบรรทุกขนาดใหญ่

- คานโค้ง (Arch Rib) มีความสามารถไม่เพียงพอ จึงได้ออกแบบโดยการขยายหน้าตัดคานให้ใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) และเหล็กเส้นอัดแรง ที่จุดฝังลวดซึ่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในคานโค้ง เพื่อรองรับแรงดึงที่เพิ่มสูงขึ้นจากรถบรรทุกขนาดใหญ่
 - ปัจจุบันพื้นสะพานมีขนาดบาง สภาพเก่าและชำรุด มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ จึงแนะนำให้รื้อและก่อสร้างพื้นสะพานใหม่ (Deck Replacement) นอกจากนี้จะทำการอัดพื้นสะพานตามแนวขวางด้วยลวดซึ่งที่ติดตั้งเกลียวแรง (Turnbuckle)
 - ผลการตรวจสอบลวดซึ่ง (Hanger) พบว่ามีกำลังไม่เพียงพอในการรองรับรถบรรทุกขนาดใหญ่ตามมาตรฐานกรมทางหลวง จึงควรเปลี่ยนลวดซึ่งใหม่ทุกเส้นโดยใช้ขนาดและสเปคที่มีความสามารถสูงกว่าระบบลวดซึ่งเดิม
- ตลอดทั้งสะพาน (Approach Span + Arch Span) :
- เนื่องจากอุปกรณ์รองคาน (Bearing) มีสภาพเก่าและชำรุด แนะนำให้เปลี่ยนอุปกรณ์รองคานใหม่ทั้งสะพาน
 - ถึงแม้ผิวทางจะมีสภาพค่อนข้างดี แต่ที่บริเวณรอยต่อพื้นสะพานมีสภาพชำรุดเกือบทั้งหมด แนะนำให้ปูผิวทางใหม่พร้อมทั้งติดตั้งรอยต่อเพื่อขยายตลอดทั้งสะพาน

