



คู่มือปฏิบัติการ (Practitioner's Handbook) ด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สิงหาคม 2565

คำนำ

โครงข่ายทางหลวงหลายแห่งในพื้นที่ภาคเหนือและบางพื้นที่ในภาคใต้ประสบปัญหาดินสไลด์ คั่นทางชำรุดเสียหาย ถนนถูกตัดขาดต้องปิดเส้นทางสัญจร เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุถึงแก่ชีวิต การสูญเสียทรัพย์สินของประชาชนและงบประมาณของประเทศ ทางหลวงบางสายทางเกิดปัญหาดินสไลด์รุนแรง และหรือซ้ำซากเป็นประจำทุกปี การออกแบบแก้ปัญหาเร่งด่วนบ่อยครั้งอาจไม่สอดคล้องกับสภาพข้อเท็จจริงของพื้นที่ การเลือกรูปแบบมาตรฐานมาออกแบบปรับปรุงแก้ไขปัญหาเฉพาะจุดบ่อยครั้งใช้งบประมาณค่อนข้างสูง ไม่ได้นำวัสดุท้องถิ่นมาประยุกต์ใช้ให้เป็นประโยชน์ ด้วยเหตุผลดังกล่าว สำนักวิจัยและพัฒนางานทางกรมทางหลวง จึงได้ว่าจ้างที่ปรึกษาดำเนินโครงการศึกษาเทคโนโลยีตรวจวัด ติดตาม เตือนภัย และบริหารจัดการความเสี่ยงภัยพิบัติดินสไลด์ในโครงข่ายทางหลวง โดยผลลัพธ์หนึ่งของโครงการคือ คู่มือการทำงานภาคปฏิบัติด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง ซึ่งคณะผู้จัดทำหวังว่าจะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกร และเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานด้านวิศวกรรมเชิงลาดในพื้นที่ทางหลวงต่อไป

คณะที่ปรึกษาโครงการฯ

สิงหาคม 2565

สารบัญ

คำนำ	i
สารบัญ	ii
สารบัญรูป	iv
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 ปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง แนวทางการป้องกันและแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรม	
เชิงลาดในงานทาง.....	1-1
1.1 ปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง.....	1-1
1.2 แนวทางการป้องกันและแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง	1-5
บทที่ 2 การสำรวจสภาพภูมิประเทศและธรณีวิทยาของเชิงลาดในงานทาง	2-1
2.1 วิธีการเดินสำรวจสภาพพื้นที่ (Visual Investigation).....	2-1
2.2 วิธีการสำรวจภาพถ่ายทางอากาศโดยอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) หรือโดรน (Drone) พร้อมเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม (Real Time Kinematic: RTK)	2-1
2.3 การสำรวจธรณีวิทยาโครงสร้างและชนิดหิน	2-7
2.4 วิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์	2-14
2.4.1 การสำรวจค่าความต้านทานไฟฟ้า	2-14
2.4.2 การสำรวจโดยใช้คลื่นสั้นสะเทือน	2-16
2.4.3 วิธีการเจาะสำรวจ (Boring Log).....	2-17
2.4.4 วิธีการตอกหยั่ง (Penetration Test).....	2-18
บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง	3-1
3.1 ประเภทของความเสียหายทางด้านวิศวกรรมเชิงลาด	3-1
3.2 หลักการแก้ไขปัญหามันเบื้องต้นและแบบถาวร.....	3-2
3.2.1 การแก้ปัญหาระยะสั้น (เบื้องต้นหรือชั่วคราว).....	3-2
3.2.2 การแก้ไขปัญหาระยะยาว (ถาวร).....	3-4
3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด (Slope Stability Analysis).....	3-6
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้พรรณพืชและชีววิศวกรรมปฐพี (Bioengineering) สำหรับวิศวกรรมเชิงลาด	
ในงานทาง.....	4-1
4.1 แนวคิดและหลักการออกแบบ	4-1
4.2 การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง.....	4-6
4.2.1 การเลือกเทคนิคในการปลูกพืชด้วยวิธีชีววิศวกรรมปฐพี (Soil Bioengineering)	4-6
4.2.2 การเลือกพันธุ์พืช	4-6
4.2.3 การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ	4-7

4.3 การบำรุงรักษา.....	4-9
4.4 การติดตามพฤติกรรม ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานร่วมกับพรรณพืช และวัสดุปกคลุมหน้าดินรูปแบบต่าง ๆ	4-9
บทที่ 5 การใช้ระบบปรับปรุงเสถียรภาพเชิงลาดในงานทาง.....	5-1
5.1 กำแพงกันดิน (Retaining Wall).....	5-2
5.2 กำแพงกล่องเกเบี้ยน (Gabion Wall)	5-4
5.3 กำแพงเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Wall)	5-7
5.4 ลาดดินเสริมกำลัง (Reinforced Soil Slope).....	5-11
5.5 หมุดยึดดิน (Soil Nail).....	5-13
5.6 สมอยึดดิน (Soil Anchor).....	5-15
5.7 การตอกเสาเข็ม (Shear Pin/Micro Pile)	5-17
5.8 การพ่น Shotcrete.....	5-19
5.9 ตาข่ายกันหินร่วง (Rockfall Netting)	5-21
5.10 หมุดยึดหิน (Rock Bolt).....	5-24
บทที่ 6 การบริหารจัดการน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินสำหรับงานทาง.....	6-1
6.1 แนวคิดและหลักการออกแบบ	6-1
6.2 การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้างการบำรุงรักษา	6-2
6.3 ระบบระบายน้ำผิวดินของเชิงลาด	6-2
6.4 ระบบระบายน้ำใต้ดิน.....	6-3
6.5 การติดตามพฤติกรรมการกัดเซาะของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน	6-3
6.6 การเลือกใช้ระบบระบายน้ำชนิดต่าง ๆ	6-9
บทที่ 7 เทคโนโลยีและนวัตกรรมการตรวจวัดและติดตามพฤติกรรมด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง..	7-1
7.1 ปริมาณน้ำฝน.....	7-3
7.2 เครื่องมือความชื้นของดิน (Soil Moisture Sensor).....	7-4
7.3 เครื่องมือวัดแรงดันน้ำ (Piezometer).....	7-6
7.4 เครื่องมือวัดแรงดูดน้ำหรือเทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer).....	7-7
7.5 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน (Inclinometer/Tiltmeter).....	7-9
7.6 หลักเกณฑ์ความเสี่ยงเนื่องจากภัยพิบัติดินสไลด์.....	7-11
7.7 การดูแลรักษาอุปกรณ์ตรวจวัด.....	7-13
7.8 แผนบริหารจัดการความเสี่ยงและแผนสำรองภัยพิบัติดินสไลด์ แผนบริหารความต่อเนื่อง (Business Continuity Plan: BCP).....	7-15
7.9 ระบบ Platform แสดงผลเทคโนโลยีตรวจวัด ติดตาม เตือนภัย และบริหารจัดการความเสี่ยงภัยพิบัติ ดินสไลด์ในโครงข่ายทางหลวง.....	7-27
เอกสารอ้างอิง	8-1

สารบัญญรูป

รูปที่ 1.1	ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากน้ำกัดเซาะบริเวณปลายเชิงลาดคั่นทาง (Erosion at Toe Slope) จากกระแสน้ำในแม่น้ำ ในจังหวัดพังงา เมื่อปี พ.ศ. 2558	1-2
รูปที่ 1.2	ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากน้ำกัดเซาะบริเวณปลายเชิงลาดคั่นทาง (Erosion at Toe Slope) จากน้ำในรางระบายน้ำ (ภาพด้านบน Top View) ทางหลวงหมายเลข 1009 กม. 42 จังหวัดเชียงใหม่ ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2565.....	1-2
รูปที่ 1.3	ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากน้ำกัดเซาะบริเวณปลายลาดเหนือคั่นทาง (Toe Erosion of Back Slope) ทางหลวงหมายเลข 1192 ช่วง กม 11+500 จังหวัดเชียงใหม่ ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2565	1-3
รูปที่ 1.4	ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากน้ำกัดเซาะผิวหน้าเชิงลาดและไหล่ทาง มีสาเหตุจากน้ำผิวดิน และ น้ำท่วมทาง ทางหลวงชนบท กจ. 4088 จังหวัดกาญจนบุรี ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2565... ..	1-3
รูปที่ 1.5	ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากการเคลื่อนตัวของมวลดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำ และ/หรือ การขาดเสถียรภาพของเชิงลาด บริเวณทางหลวงหมายเลข 12 ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2565.....	1-4
รูปที่ 1.6	ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากหินร่วง บริเวณทางหลวง 2291 กม. 42 จ.สกลนคร ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2550	1-4
รูปที่ 1.7	ปัจจัยในการพิจารณาแนวทางป้องกันและแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง....	1-6
รูปที่ 2.1	ลักษณะสำคัญที่ควรสังเกตระหว่างการเดินสำรวจสภาพพื้นที่ ก) ร่องรอยการกัดเซาะ ข) การยุบตัวของดิน ค) ต้นไม้ที่คดงอไปมาแสดงถึงการเคลื่อนตัวของมวลดิน ง) การแตกร้าวและโพรงใต้ Shotcrete จ) รอยแตกร้าวบนโครงสร้าง.....	2-2
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างภาพสเก็ทซ์จากการเดินสำรวจสภาพพื้นที่.....	2-2
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างการกรอกแบบฟอร์มสำรวจประเภทการเคลื่อนตัวของมวลดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำ และ/หรือ การขาดเสถียรภาพของเชิงลาด	2-3
รูปที่ 2.4	หลักการสร้างแบบจำลองภูมิประเทศด้วย UAV.....	2-4
รูปที่ 2.5	เส้นทางการบินสำรวจด้วย UAV เพื่อสร้างแบบจำลองภูมิประเทศ เส้นทาง B สำหรับถ่ายภาพ ในแนวตั้ง และเส้นทาง A สำหรับถ่ายภาพทำมุมเอียง.....	2-5
รูปที่ 2.6	ภาพออร์โธโมเสค (ซ้าย) ภาพพอยท์คลาวด์ (ขวา)	2-5
รูปที่ 2.7	แบบจำลอง 3 มิติ	2-6
รูปที่ 2.8	แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข DSM (ซ้าย) และแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข DEM (ขวา).....	2-7

รูปที่ 2.9	แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดเชียงใหม่.....	2-8
รูปที่ 2.10	การวัดการวางตัวของชั้นหิน	2-9
รูปที่ 2.11	แผนที่แสดงค่ากำลังเฉือน c' ϕ' , เฉลี่ยโดยประมาณของดินที่ผุสลายจากหินกลุ่มต่าง ๆ ในพื้นที่ภูเขา.....	2-10
รูปที่ 2.12	ลักษณะการผุพังของหิน ก) หินแปร ข) หินแกรนิต ค) หินคาร์บอนเนต เช่น หินปูน.....	2-12
รูปที่ 2.13	ลักษณะการพิบัติของลาดในหินแปรที่ผุพัง.....	2-13
รูปที่ 2.14	ลักษณะการพิบัติของลาดในหินแกรนิตที่ผุพัง.....	2-13
รูปที่ 2.15	ลักษณะทั่วไปของการตัดลาดชั้นในหินผุ.....	2-14
รูปที่ 2.16	การติดตั้งและดำเนินการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าในสนาม.....	2-15
รูปที่ 2.17	ตัวอย่างผลการสำรวจค่าความต้านทานไฟฟ้าในสนาม.....	2-15
รูปที่ 2.18	การทดสอบ SASW.....	2-16
รูปที่ 2.19	ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากบริเวณสันเขื่อน, เขื่อนแม่จาง	2-17
รูปที่ 2.20	การเจาะสำรวจดิน ก) การเจาะแบบฉีดล้าง ข) การเจาะแบบโรตารี.....	2-17
รูปที่ 2.21	อุปกรณ์ Kunzelstab และการทดสอบ	2-19
รูปที่ 2.22	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการตอกและกำลังของดินสำหรับออกแบบฐานรากตื้น.....	2-19
รูปที่ 2.23	ตัวอย่างผลการทดสอบ Kunzelstab	2-20
รูปที่ 3.1	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด (Slope Stability Analysis) เพื่อให้ เปรียบเทียบกรณีต่าง ๆ.....	3-7
รูปที่ 3.2	แบบจำลองการพิบัติของลาด ก) ลาดดินอนันต์ (Translational Failure/Infinite Slope Model) และ ข) การพิบัติแบบหมุนหรือส่วนโค้งวงกลม (Rotational Failure /Circular Arc Model).....	3-9
รูปที่ 3.3	การวิเคราะห์ลาดดินอนันต์	3-11
รูปที่ 4.1	การกัดเซาะที่ผิวหน้าของลาดดิน ก.) บริเวณเนินนางพญา จ.จันทบุรี ข.) การกัดเซาะ ที่ลาดเหนือคันทางริมถนนในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ จ.นครราชสีมา.....	4-1
รูปที่ 4.2	แนวความคิดการประยุกต์ใช้พืชพรรณร่วมกับโครงสร้าง	4-2
รูปที่ 4.3	การพังทลายของมวลดิน (Mass Movement) (ก) ดินถล่มแบบลึก (Deep-Seated Landslide) บ้านน้ำถ้ำ จ.สุราษฎร์ธานี 2554 (มูลนิธิพลังที่ยั่งยืน) (ข) ดินถล่มแบบตื้น (Shallow Landslide) อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์	4-2
รูปที่ 4.4	การติดตั้งไม้ปักชำ (Live Stake).....	4-3

รูปที่ 4.5	แผนผังขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีชีววิศวกรรมปฐพี (Flow-Chart for Soil-Bioengineering Design).....	4-5
รูปที่ 4.6	ตัวอย่างการใช้หญ้าแฝกร่วมกับรั้วไม้ไผ่ และการปลูกแฝกแบบเป็นแนวรั้ว อ.ทองผาภูมิ จ.กาญจนบุรี	4-11
รูปที่ 4.7	การปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการปลูกพืชคลุมดินชนิดอื่น ๆ	4-12
รูปที่ 4.8	ตัวอย่างการใช้หญ้าแฝกร่วมกับหมอนกันดิน.....	4-13
รูปที่ 4.9	รายละเอียดการติดตั้งผ้าห่มดิน.....	4-14
รูปที่ 4.10	รายละเอียดติดตั้งหมอนกันดินร่วมกับผ้าห่มดิน.....	4-15
รูปที่ 4.11	การติดตั้งหมอนกันดินและผ้าห่มดินร่วมกับพืชพรรณ.....	4-16
รูปที่ 4.12	ลักษณะโดยทั่วไปของกระสอบแบบมีปีก	4-17
รูปที่ 4.13	ขั้นตอนการเรียงกระสอบแบบมีปีก.....	4-18
รูปที่ 4.14	ลักษณะการใช้ท่อนพันธุ์ร่วมกับการเรียงกระสอบแบบมีปีก.....	4-19
รูปที่ 4.15	การประยุกต์ใช้ท่อนพันธุ์ร่วมกับกระสอบแบบมีปีกที่ ทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.16+700 อ.ทองผาภูมิ จ.กาญจนบุรี ก.) 17 พฤศจิกายน 2563 ข.) 19 มิถุนายน 2564	4-20
รูปที่ 5.1	กำแพงกันดินแบบ Cantilever.....	5-3
รูปที่ 5.2	การพังทลายของกำแพงกันดินเนื่องจากปริมาณน้ำที่ประเทศมาเลเซีย.....	5-3
รูปที่ 5.3	การพังทลายของกำแพงกันดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่ประเทศไต้หวัน.....	5-4
รูปที่ 5.4	การก่อสร้างกำแพงกล่องเกเบี้ยน	5-6
รูปที่ 5.5	การกัดกร่อนของลวดกล่องเกเบี้ยน.....	5-6
รูปที่ 5.6	การโป่งออกของหินภายในกล่องเกเบี้ยน	5-6
รูปที่ 5.7	อัตราส่วนความเสียหายของกำแพงกล่องเกเบี้ยน.....	5-7
รูปที่ 5.8	กำแพงดินเสริมแรงที่ กจ.4088 กม. 8+700 จังหวัดกาญจนบุรี เมื่อแล้วเสร็จ	5-9
รูปที่ 5.9	ตัวอย่างความเสียหายของแผ่นปิดหน้า	5-9
รูปที่ 5.10	ขั้นตอนการก่อสร้างกำแพงเสริมกำลัง	5-10
รูปที่ 5.11	ตัวอย่างการตรวจวัดพฤติกรรมความชื้นในกำแพงดินเสริมแรง	5-10
รูปที่ 5.12	ลาดดินเสริมกำลัง.....	5-12
รูปที่ 5.13	การบดอัดดินด้านหน้า.....	5-12
รูปที่ 5.14	แสดงการติดตั้งกำแพง Soil Nail เพื่อการรักษาเสถียรภาพของลาดดินบริเวณต่อม่อสะพาน	5-13

รูปที่ 5.15	การก่อสร้างกำแพง Soil Nail.....	5-14
รูปที่ 5.16	แสดงการติดตั้งกำแพง Soil Anchor ที่บริเวณผิวลาดคันดิน.....	5-15
รูปที่ 5.17	แสดงลักษณะการก่อสร้างกำแพง Soil Anchor	5-16
รูปที่ 5.18	ภาพสเก็ทซ์ การใช้เสาเข็มในงานซ่อมแซมเชิงลาด.....	5-18
รูปที่ 5.19	ตัวอย่างการติดตั้ง Shear Pin	5-18
รูปที่ 5.20	การติดตั้งเสาเข็มเหล็ก.....	5-18
รูปที่ 5.21	Shot Crete งานสร้างถนนที่อยู่ใกล้บริเวณไหล่เขา.....	5-19
รูปที่ 5.22	ความเสียหายของ Shotcrete ระหว่างเกิดดินถล่มเนื่องจากแผ่นดินไหว Kumamoto a) บริเวณสะพาน Oogiribata b) เชิงลาดตุงฉาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึง Shotcrete นั้นหลุดร่วง ไป แต่ดินเกิดความเสียหายน้อย.....	5-20
รูปที่ 5.23	ตาข่ายกันหินร่วง ระบบ Drapery	5-21
รูปที่ 5.24	ตัวอย่างการป้องกันหินร่วงด้วยวิธี High Strength Netting ร่วมกับ Shotcrete	5-22
รูปที่ 5.25	ส่วนประกอบของ Rockfall Protection Fence	5-22
รูปที่ 5.26	อุโมงค์ป้องกันหินร่วง.....	5-22
รูปที่ 5.27	ความสามารถในการรับแรงของระบบป้องกันหินร่วงแบบ Passive	5-23
รูปที่ 5.28	การทดสอบความแข็งแรงของสายเคเบิลยึดสมอ.....	5-23
รูปที่ 5.29	ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบป้องกันหินร่วง	5-24
รูปที่ 5.30	ตัวอย่างการเสริมความแข็งแรงให้ดินโดยใช้หมุดยึดหิน.....	5-25
รูปที่ 5.31	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหมุดยึดหิน	5-25
รูปที่ 5.32	การเจาะหินเพื่อติดตั้ง Rock Bolt.....	5-26
รูปที่ 5.33	การวิบัติในรูปแบบต่าง ๆ.....	5-27
รูปที่ 6.1	ระบบระบายน้ำและงานป้องกันการกัดเซาะของทางหลวงบนภูมิประเทศที่เป็นภูเขา.....	6-1
รูปที่ 6.2	ตัวอย่างรางระบายน้ำที่ขาดการบำรุงรักษา.....	6-3
รูปที่ 6.3	ข้อมูลน้ำฝน 24 ชั่วโมง	6-5
รูปที่ 6.4	ลักษณะการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบ Outlet Control น้ำไหลเต็มท่อ	6-6
รูปที่ 6.5	แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย.....	6-7
รูปที่ 6.6	การเคลื่อนที่ของน้ำและอากาศในดิน ซึ่งส่งผลต่อเสียน้ำใต้ดิน	6-9
รูปที่ 6.7	ตัวอย่างผลการวัดระดับเสียน้ำใต้ดิน พื้นที่ลาดเหนือคันทางเข้าออกบ้านหน้าถ้ำ อ.กาญจนดิษฐ์ จ.สุราษฎร์ธานี	6-9
รูปที่ 6.8	Interceptor Ditch รูปตัว U.....	6-11

รูปที่ 6.9	Interceptor Ditch รูปตัว V	6-11
รูปที่ 6.10	Side Ditch	6-13
รูปที่ 6.11	Stepped Drain Chute	6-13
รูปที่ 6.12	ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ Drain Chute เนื่องจาก ก) การกัดเซาะบริเวณขอบเนื่องจาก น้ำทะลักออกจาก Chute และ ข) การกัดเซาะเนื่องจากการใช้ขนาดหินที่ไม่เหมาะสม ...	6-14
รูปที่ 6.13	การกัดเซาะบริเวณด้านข้างและบริเวณปลาย Drain Chute	6-14
รูปที่ 6.14	ท่อระบายน้ำใต้ดินแนวราบ (Horizontal Drain)	6-15
รูปที่ 6.15	รูปแบบของ Subdrain	6-17
รูปที่ 6.16	ร่องตักน้ำและระบายน้ำใต้ดิน (Subdrain) กรณีมีน้ำใต้ดินปริมาณมาก.....	6-17
รูปที่ 7.1	แผนผังขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์วัด.....	7-2
รูปที่ 7.2	อุปกรณ์วัดน้ำฝน 1) กระจบกวัดน้ำฝน 2) เกจวัดน้ำฝนแบบคานกระดก (Tipping Bucket Rain Gauge)	7-3
รูปที่ 7.3	ตัวอย่างการเตือนภัยโดย กราฟน้ำฝนวิกฤติ	7-4
รูปที่ 7.4	อุปกรณ์วัดความขึ้นดิน การสอบเทียบและติดตั้งในสนาม	7-5
รูปที่ 7.5	พิโซมิเตอร์ (Piezometer) แบบระบบเปิด ก) บ่อสังเกตการณ์ (Observation Well) ข) พิโซมิเตอร์แบบท่อเปิด (Open Standpipe Piezometer) และแบบระบบปิด ค) อิเล็กทริกพิโซมิเตอร์ (Dunnicliff, 1993) ง) เคยูพิโซมิเตอร์ พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	7-6
รูปที่ 7.6	อุปกรณ์เคยูเทนซิโอมิเตอร์ พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับวัดแรงดันน้ำค่าลบ และบวกในดิน และการติดตั้งในสนาม	7-8
รูปที่ 7.7	ตัวอย่างแรงดันน้ำในช่องว่างดินและน้ำฝนในพื้นที่ลาดชันซึ่งปลูกหญ้าแฝก จ.นครนายก ...	7-8
รูปที่ 7.8	อุปกรณ์ Tiltmeter สำหรับวัดการเคลื่อนตัวที่ผิวดิน	7-9
รูปที่ 7.9	อุปกรณ์ Inclinator สำหรับการวัดการเคลื่อนตัวของมวลดินในลาดดินที่ระดับลึก	7-9
รูปที่ 7.10	ตัวอย่างการเคลื่อนตัวของลาดจากผลการตรวจวัดด้วย Inclinator เปรียบเทียบกับ แรงดันน้ำและปริมาณน้ำฝน	7-10
รูปที่ 7.11	ระบบ GIL IoT Platform สำหรับระบบตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน.....	7-11
รูปที่ 7.12	เกณฑ์การเตือนภัยดินถล่มจากการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ภาคเหนือ	7-11
รูปที่ 7.13	ระบบเฝ้าระวังพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มล่วงหน้า โดยกรมทรัพยากรธรณี.....	7-12
รูปที่ 7.14	ระบบเตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning) สำหรับพื้นที่เสี่ยงน้ำหลาก-ดินถล่ม โดยกรมทรัพยากรน้ำ	7-12

รูปที่ 7.15	แผนภูมิวัฏจักรการบริการจัดการสาธารณภัย (Disaster Management Cycle)	7-15
รูปที่ 7.16	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการปฏิบัติงานแก้ไขปัญหาทางหลวงที่เกิดดินถล่ม	7-19
รูปที่ 7.17	แสดงหน้าที่และความรับผิดชอบของกรมทางหลวง	7-20
รูปที่ 7.18	การปฏิบัติการให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัย	7-20
รูปที่ 7.19	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform หน้าแรก	7-28
รูปที่ 7.20	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 1) Monitoring and Evaluation (M&E).....	7-29
รูปที่ 7.21	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 1) Monitoring and Evaluation (M&E).....	7-29
รูปที่ 7.22	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 2) IoT slope monitoring system.....	7-30
รูปที่ 7.23	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 2) IoT Slope Monitoring System.....	7-30
รูปที่ 7.24	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 3) คู่มือปฏิบัติการ.....	7-31
รูปที่ 7.25	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 4) สื่อการสอนอิเล็กทรอนิกส์.....	7-31
รูปที่ 7.26	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 5) VDO ประชาสัมพันธ์	7-32
รูปที่ 7.27	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 6) โปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	7-32
รูปที่ 7.28	ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 7) ข้อมูลและเอกสารประกอบอื่น ๆ	7-33

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_{SPT} และค่ามุมเสียดทาน ϕ	2-20
ตารางที่ 3.1	ประเภทและจำนวนความเสียหายเชิงลาดในจังหวัดเชียงใหม่และพิษณุโลก	3-1
ตารางที่ 3.2	ตัวอย่างการสรุปผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดโดยใช้แนวทางเสริมเสถียรภาพของลาดด้วยวิธีต่าง ๆ.....	3-7
ตารางที่ 4.1	บทบาทของพีซีในการเสริมเสถียรภาพของลาดและปรับปรุงพื้นที่.....	4-7
ตารางที่ 5.1	ความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้โครงสร้างป้องกันดินถล่มกับปัญหาเชิงลาด	5-1
ตารางที่ 6.1	เกณฑ์ในการเลือกใช้วิธีการคำนวณอัตราการใช้วัสดุสูงสุดของน้ำ.....	6-4
ตารางที่ 6.2	แนวทางการออกแบบและพิจารณาใช้งานระบบระบายน้ำใต้ดินบริเวณที่เป็นทางเขาหรือทางลาดชัน	6-10
ตารางที่ 6.3	หลักเกณฑ์การเลือกชนิดของ Interceptor บนลาดตัดเขาและช่วงถมสูง.....	6-12
ตารางที่ 7.1	ตัวอย่างสมการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความชื้นดินและความแน่นยำ สำหรับดิน Subgrade	7-5
ตารางที่ 7.2	เกณฑ์การจัดระดับความรุนแรงของภัยดินถล่ม	7-16
ตารางที่ 7.3	ตารางแสดงหน้าที่รับผิดชอบของกรมทางหลวงที่ต้องปฏิบัติที่ระดับความรุนแรงต่าง ๆ	7-17
ตารางที่ 7.4	การปฏิบัติงานของศูนย์ปฏิบัติการแขวงทางหลวง/สำนักงานบำรุงทาง กรณีเกิดภัยพิบัติดินถล่ม ระดับความรุนแรงของภัยพิบัติ : ระดับ 1	7-21

บทที่ 1 ปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง แนวทางการป้องกันและแก้ไข

ปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

1.1 ปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

โครงข่ายทางหลวงหลายแห่งในพื้นที่ภาคเหนือและภาคใต้ประสบปัญหาดินสไลด์ คั่นทางชำรุดเสียหาย ถนนถูกตัดขาดต้องปิดเส้นทางสัญจร ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการเดินทาง ความปลอดภัย การสูญเสียทรัพย์สินของประชาชนและงบประมาณของประเทศ ทางหลวงบางสายทางเกิดปัญหาดินสไลด์รุนแรง และหรือซ้ำซากเป็นประจำทุกปี การออกแบบแก้ปัญหาเร่งด่วนบ่อยครั้งอาจไม่สอดคล้องกับสภาพข้อเท็จจริงทางด้านธรณีวิทยา อุทกวิทยา ลักษณะภูมิประเทศ สภาพแวดล้อม เป็นต้น การเลือกรูปแบบมาตรฐานมาออกแบบปรับปรุงแก้ไขปัญหาเฉพาะจุดบ่อยครั้งใช้งบประมาณค่อนข้างสูง ไม่ได้นำวัสดุท้องถิ่นมาประยุกต์ใช้ให้เป็นประโยชน์ ขาดการดูแลบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากขาดความเข้าใจในสาเหตุและรูปแบบการพังทลายที่ถูกต้องทำให้การแก้ไขไม่ตรงจุด ดังนั้นบุคคลากรที่เกี่ยวข้องในงานแก้ดินสไลด์จำเป็นต้องทำความเข้าใจในรูปแบบการพังทลายของเชิงลาดอย่างถูกต้อง เพื่อให้การออกแบบแก้ไขเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

จากข้อมูลการศึกษาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทางในอดีต พบว่าการพังทลายของเชิงลาดสามารถจำแนกได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

รูปแบบที่ 1 น้ำกัดเซาะบริเวณปลายเชิงลาดคั่นทาง (Erosion at Toe Slope) มักเกิดบริเวณฐานของเชิงลาดคั่นทาง (Side Slope) เช่น คั่นทางริมแม่น้ำบริเวณโค้งน้ำที่มีกระแสน้ำรุนแรง บริเวณปลายรางระบายน้ำในลาด รวมถึงปลายลาดเหนือคั่นทาง (Back Slope) ดังรูปที่ 1.1 รูปที่ 1.2 และ รูปที่ 1.3 ตามลำดับ การกัดเซาะที่ฐานเชิงลาดนี้ส่งผลให้ลาดมีความชันมากขึ้นและมักจะนำไปสู่การเคลื่อนตัวของมวลดินขนาดใหญ่ตามรูปแบบที่ 3 ดังจะได้อธิบายต่อไป การแก้ไขทำได้ด้วยการเสริมกำแพงหรือโครงสร้างที่ปลายฐานลาดต้องใช้วัสดุที่ต้านทานการกัดเซาะได้เช่นกล่องเกเบียน หินเรียง กระสอบบรรจุดินหรือดินซีเมนต์ ฯลฯ

รูปแบบที่ 2 การกัดเซาะผิวหน้าเชิงลาดและไหล่ทางสาเหตุจากน้ำผิวดินและน้ำท่วมทาง ดังรูปที่ 1.4 มักเกิดจากปริมาณน้ำฝนที่สะสม เกิดการไหลบ่าในคุระบายน้ำและท่อระบายน้ำซึ่งเกิดการอุดตันด้วยตะกอน ทำให้น้ำไหลล้นทางระบาย (Overflow) และกัดเซาะผิวหน้าเชิงลาด ปัญหาการกัดเซาะนี้อาจเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป หากไม่ป้องกันแก้ไขอย่างทันการก็จะเกิดการเสียหายขนาดใหญ่ได้ การแก้ไขมักใช้วิธีชีววิศวกรรมปฐพี (Soil Bioengineering)

รูปแบบที่ 3 การเคลื่อนตัวของมวลดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำ และ/หรือ การขาดเสถียรภาพของเชิงลาด ดังรูปที่ 1.5 เป็นการเคลื่อนตัวของมวลดิน มีพื้นผิวการเลื่อนไถล (Slip Surface) ที่ชัดเจน มักเกิดขึ้นสืบเนื่องจากการพิบัติในรูปแบบที่ 1 การแก้ไขการเคลื่อนตัวของมวลดินนี้มักใช้วิธีเชิงวิศวกรรม เช่น เสาเข็ม หรือ Soil Nail ฝังให้ทะลุผ่านพื้นผิวการเลื่อนไถลนั้น

รูปแบบที่ 4 หินร่วงและเชิงลาดดิน-หินเคลื่อนตัว มักเกิดขึ้นตามระดับความไม่ต่อเนื่องของหิน (Rock Discontinuity) การพิบัติเป็นรูปถิ่มหรือแบบระนาบ (Wedge & Plane Slide) การล้มคว่ำ (Topple) หรือหินร่วง (Rock Fall) โดยเกิดขึ้นเฉพาะลาดเหนือคันทาง (Back Slope) ที่เป็นหิน ดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากน้ำกัดเซาะบริเวณปลายเชิงลาดคันทาง (Erosion at Toe Slope) จากกระแสน้ำในแม่น้ำ ในจังหวัดพังงา เมื่อปี พ.ศ. 2558
ที่มา: ไทยรัฐออนไลน์ (2558)



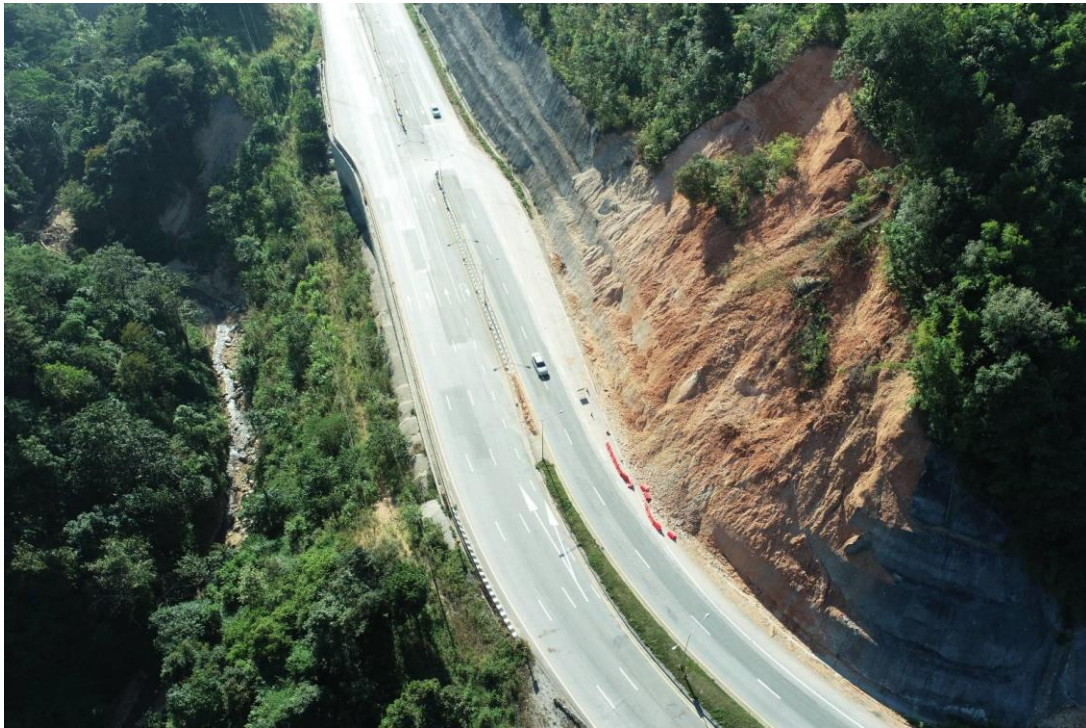
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากน้ำกัดเซาะบริเวณปลายเชิงลาดคันทาง (Erosion at Toe Slope) จากน้ำในรางระบายน้ำ (ภาพด้านบน Top View) ทางหลวงหมายเลข 1009 กม. 42 จังหวัดเชียงใหม่ ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2565



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากน้ำกัดเซาะบริเวณปลายลาดเหนือคันทาง (Toe Erosion of Back Slope) ทางหลวงหมายเลข 1192 ช่วง กม 11+500 จังหวัดเชียงใหม่ ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2565



รูปที่ 1.4 ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากน้ำกัดเซาะผิวหน้าเชิงลาดและไหลทาง มีสาเหตุจากน้ำผิวดินและน้ำท่วมทาง ทางหลวงชนบท กจ. 4088 จังหวัดกาญจนบุรี ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2565



รูปที่ 1.5 ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากการเคลื่อนตัวของมวลดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำ และ/หรือ การขาดเสถียรภาพของเชิงลาด บริเวณทางหลวงหมายเลข 12 ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2565



รูปที่ 1.6 ตัวอย่างการพังทลายเนื่องจากหินร่วง บริเวณทางหลวง 2291 กม. 42 จ.สกลนคร ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2550

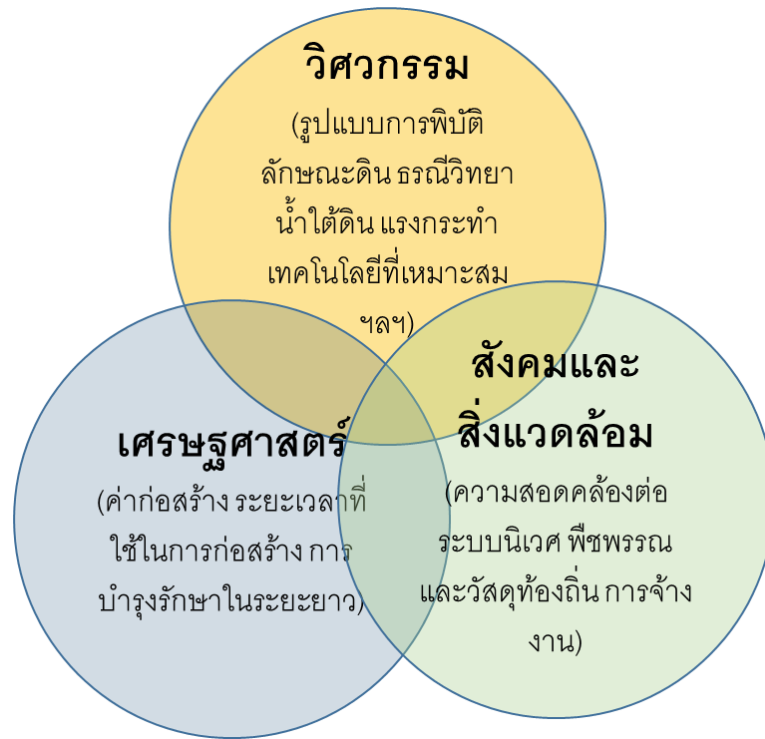
1.2 แนวทางการป้องกันและแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

การป้องกันและแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดมีหลากหลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียและความเหมาะสมตามสภาพพื้นที่ที่แตกต่างกัน จึงควรพิจารณาคัดเลือกรูปแบบการป้องกันการชะล้างพังทลายและดินถล่มให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่และงบประมาณ ประกอบไปด้วยปัจจัย 3 ประการ ดังรูปที่ 1.7 ดังนี้

1. ความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม เมื่อพิจารณารูปแบบการพิบัติทั้ง 4 รูปแบบดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 1.1 จะสามารถออกแบบวิธีการป้องกันแก้ไขให้เหมาะสมกับสภาพปัญหา อาทิ รูปแบบการพิบัติที่ 1 และ 2 ควรใช้การป้องกันการกัดเซาะโดยใช้วิธีชีววิศวกรรมปฐพี (Soil Bioengineering) และป้องกันการกัดเซาะที่ฐานของลาดสำหรับรูปแบบที่ 3 มวลดินมีการเคลื่อนตัวในระดับลึก ต้องเลือกใช้โครงสร้างที่สามารถป้องกันการเลื่อนไหลตามพื้นผิวพิบัติได้จริง สำหรับรูปแบบที่ 4 ควรประเมินสภาพธรณีวิทยาและรอยแตกของชั้นหินอย่างถูกต้อง เพื่อให้การแก้ไขปัญหานั้นไปอย่างตรงจุดและประหยัดงบประมาณ นอกจากนี้ต้องพิจารณาข้อจำกัดทางด้านเขตทาง วัสดุที่หาได้และเทคนิคการก่อสร้างที่ปฏิบัติได้จริงในพื้นที่ รวมถึงพิจารณาแรงกระทำที่อาจเกิดขึ้นทั้งในระหว่างการก่อสร้างและระหว่างการใช้งาน อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะการเลือกใช้ค่าระดับน้ำใต้ดินที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ออกแบบที่สามารถสะท้อนถึงสภาพภูมิอากาศที่รุนแรงและเปลี่ยนแปลง การพิจารณาแรงจากแผ่นดินไหว ความทนทานของวัสดุต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การกัดกร่อน ฯลฯ เพื่อให้โครงสร้างมีความเหมาะสมและมีอายุการใช้งานตามที่ได้ออกแบบไว้

2 ความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ ทั้งค่าก่อสร้างและการบำรุงรักษา เป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งในการพิจารณารูปแบบการป้องกันแก้ไขการพังทลายของลาด รวมไปถึงเทคนิคการก่อสร้างที่สามารถดำเนินการได้รวดเร็ว มีความเหมาะสมกับลักษณะพื้นที่และการใช้งาน จะส่งผลให้ราคาค่าก่อสร้างโดยรวมไม่สูงเกินไป นอกจากนี้ประสิทธิภาพของโครงสร้างป้องกันดินถล่มอาจลดลงเมื่อระยะเวลาการใช้งานเพิ่มขึ้น จากการเสื่อมสภาพของวัสดุ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงงบประมาณในการบำรุงรักษา เช่น การดูแลรักษาระบบระบายน้ำให้มีประสิทธิภาพ การป้องกันและแก้ไขปัญหามาจากการกัดกร่อน เป็นต้น

3. ผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม การก่อสร้างโครงสร้างป้องกันดินถล่มนับเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพในพื้นที่ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ สภาพการเป็นอยู่และการใช้ชีวิตของคนและสิ่งมีชีวิตในพื้นที่ อาทิ การใช้กำแพงกันดินอาจส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม การไหลของน้ำผิวดินและใต้ดิน ส่งผลให้เกิดการชะล้างพังทลายเพิ่มขึ้นในจุดที่ไม่มีการก่อสร้าง และเป็นการเปลี่ยนระบบนิเวศในพื้นที่ โดยทั่วไปการประยุกต์พืชพรรณผสมผสานกับเทคนิคทางวิศวกรรมเป็นแนวทางที่ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ อาทิ การใช้หญ้าแฝกเพื่อป้องกันการชะล้างพังทลายตามพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราชบรมนาถบพิตร และการใช้เทคนิคทางชีววิศวกรรมปฐพี (Soil Bioengineering) รวมไปถึงวัสดุท้องถิ่น ซึ่งนอกจากช่วยลดงบประมาณแล้วยังเป็นการกระจายรายได้สู่ภาคประชาสังคมได้



รูปที่ 1.7 ปัจจัยในการพิจารณาแนวทางป้องกันและแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

บทที่ 2 การสำรวจสภาพภูมิประเทศและธรณีวิทยาของเชิงลาดในงานทาง

การสำรวจสภาพภูมิประเทศและธรณีวิทยาของเชิงลาดเป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญมาก มีเป้าหมายเพื่อทำความเข้าใจลักษณะปัญหาและกลไกการชะล้างพังทลายที่เกิดขึ้น และยังรวมไปถึงการใช้ข้อมูลสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดอย่างเหมาะสม ซึ่งนำไปสู่การแก้ไขปัญหาดินสไลด์อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป การสำรวจมีหลายขั้นตอน โดยตั้งแต่ขั้นแรกถึงขั้นสุดท้ายของการสำรวจ จะเป็นการรวบรวมข้อมูล กลไกการพังทลาย ชั้นดิน หินและน้ำใต้ดินให้มีความสมบูรณ์มากขึ้นเรื่อย ๆ จึงต้องมีการสอบเทียบความถูกต้องของข้อมูลจากวิธีการสำรวจด้วยวิธีต่าง ๆ อยู่ทุกช่วงการสำรวจ

2.1 วิธีการเดินสำรวจสภาพพื้นที่ (Visual Investigation)

การเดินสำรวจสภาพพื้นที่ เป็นการสำรวจขั้นแรกสุด มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจสภาพปัญหาการพังทลาย ได้แก่ รูปแบบการพังทลาย ปริมาณความรุนแรงและความซับซ้อนของความเสียหาย การระบุตำแหน่งในลาดคันทางที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลาย ไม่ว่าจะเป็นการชะล้าง รอยกัดเซาะ รอยแตกตึง (Tension crack) หินร่วง ตาน้ำ ทิศทางการไหลของน้ำผิวดิน ฯลฯ การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของมวลดินซึ่งสังเกตได้จากลักษณะต้นไม้ที่คดง มวลดินที่ยุบตัวหรือ ปูดขึ้น ฯลฯ ดังรูปที่ 2.1 รวมไปถึงการสำรวจเพื่อการบำรุงรักษา อาทิ การตรวจสอบระบบควบคุมการไหลของน้ำบริเวณเชิงลาด ทั้งน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน การตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบป้องกันดินถล่มที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ เช่น รอยแตกร้าวของกำแพงกันดิน การเกิดโพรงใต้ตาดคอนกรีต การฉีกขาดของรั้วกันหินร่วง เป็นต้น อย่างไรก็ตามในบางกรณีที่มีการพังทลายเกิดขึ้นมากกว่า 1 ปี มักมีพืชปกคลุมขึ้นในพื้นที่ทำให้ยากต่อการสำรวจและจำเป็นต้องมีการถางพืชปกคลุมออกให้หมดก่อนจึงจะเห็นลักษณะความเสียหายที่ชัดเจน จุดที่มีความชันสูงในลาดมักจะมีพืชปกคลุมขึ้นมากกว่าจุดอื่น ๆ ผลลัพธ์จากการเดินสำรวจสภาพพื้นที่จะแสดงด้วยภาพถ่ายหรือแผนผังของพื้นที่การพังทลาย ซึ่งแสดงถึงกลไกการพังทลาย ทิศทางของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2 รวมไปถึงข้อมูลต่าง ๆ ดังแสดงในแบบฟอร์มการสำรวจการพังทลายของลาดของกรมทางหลวง ในรูปที่ 2.3

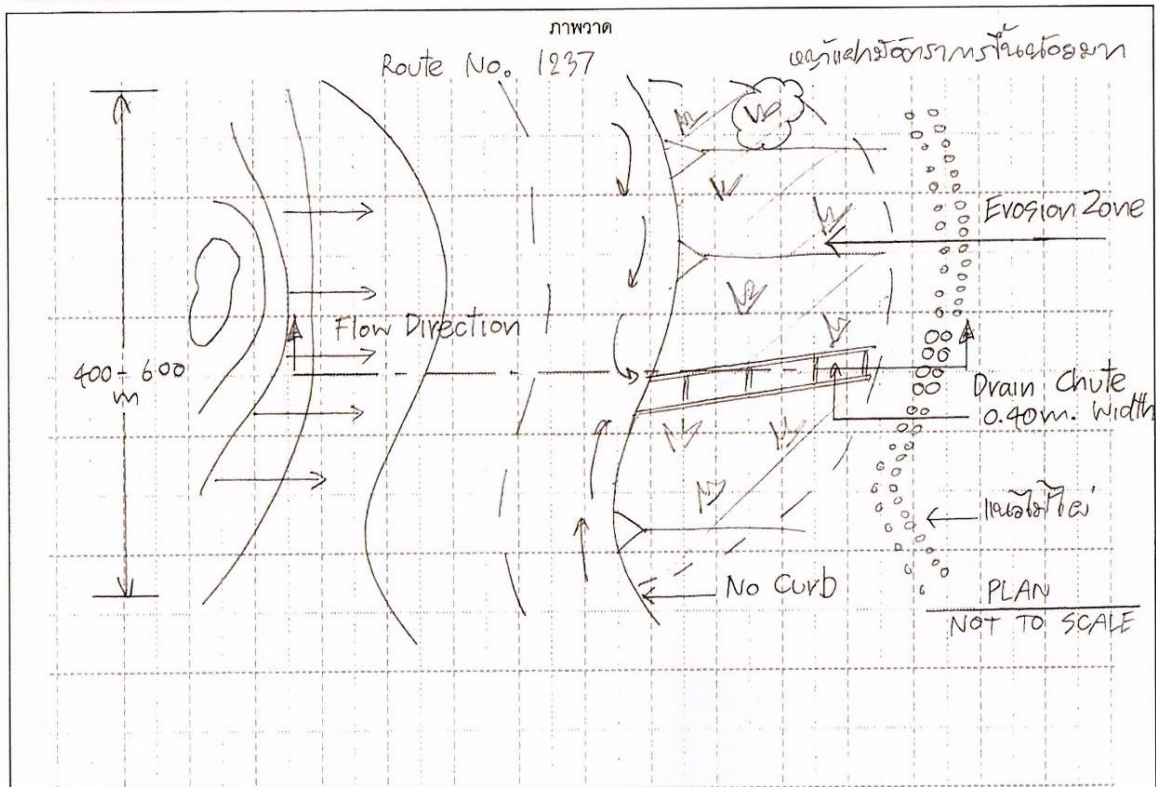
ซึ่งการเดินสำรวจสภาพพื้นที่นั้นนับเป็นสิ่งจำเป็นที่จะส่งผลต่อการจัดลำดับความสำคัญในการดำเนินการก่อสร้างแก้ไขป้องกัน การวิเคราะห์และออกแบบ การจัดสรรงบประมาณ ให้ครอบคลุมในงานส่วนนี้ทั้งหมด



รูปที่ 2.1 ลักษณะสำคัญที่ควรสังเกตระหว่างการเดินสำรวจสภาพพื้นที่ ก) ร่องรอยการกัดเซาะ
 ข) การยุบตัวของดิน ค) ต้นไม้ที่คดงอไปมาแสดงถึงการเคลื่อนตัวของมวลดิน
 ง) การแตกร้าวและโพรงใต้ Shotcrete จ) รอยแตกร้าวบนโครงสร้าง

วันที่เกิดความเสียหาย: 15, 08, 50

หน้า 3/3



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างภาพสเก็ตช์จากการเดินสำรวจสภาพพื้นที่
 ที่มา: กรมทางหลวง (2554)

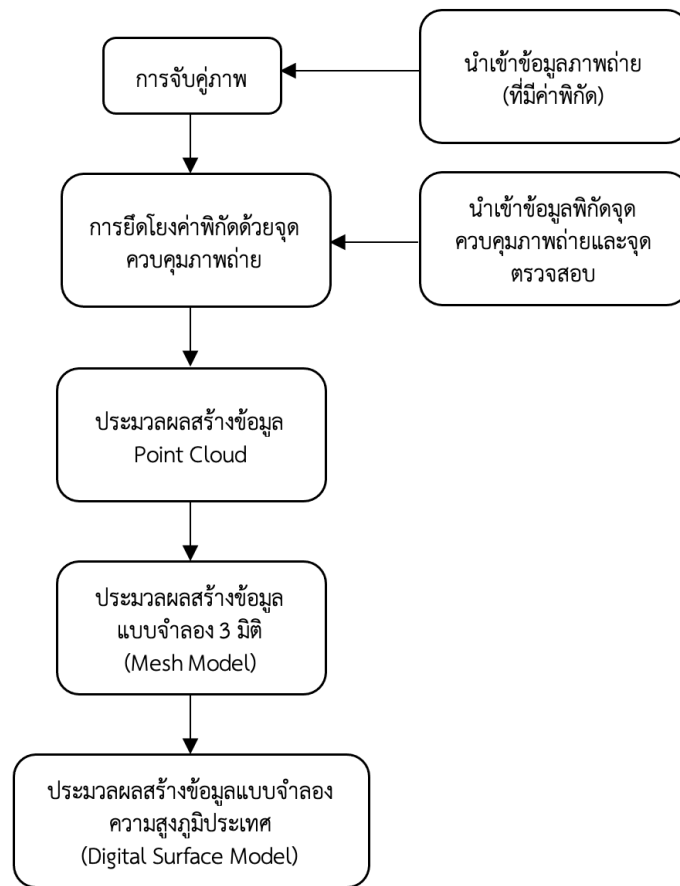
วันที่เกิดความเสี่ยงภัย: 05/09/50 หน้า 1/2

ชื่อสายทาง: พท.เขตป่าดงปรีชา - พท.1เอทีไปเชียงศรี	หลักกิโลเมตร: 121+570	วันที่ทำการสำรวจ: 06/09/50	ชื่อผู้สำรวจ: ปุณณวิฑูริ์ วัฒนวิฑูริ์
ชนิดของทาง	() หมายเลขสายทาง:12..... () ความกว้างคันทาง:10.50..... ม.	() ชนิดของผิวจราจร:102พื้นที่..... () ความกว้างผิวจราจร:9.00..... ม.	
ชนิดของเชิงลาด	() เชิงลาดธรรมชาติ () ลาดเหนือคันทาง (Back Slope) (✓) ลาดคันทาง (Side Slope)		
ความสูงของลาดคันทาง (H):2.5..... ม.	ความลาดชันของลาดคันทาง (x:1):1:1..... ตามรูป--		
คันกันดิน	(✓) ไม่มี () มี สูง ม. กว้าง ม. จำนวนชั้น		
การป้องกันผิวหน้า	() ไม่มี (✓) มี ชนิด: ระบายน้ำ		
การระบายน้ำที่ผิวหน้าเชิงลาด	() ไม่มี (✓) มี ชนิด: Drain Chute		
การระบายน้ำภายในเชิงลาด	(✓) ไม่มี () มี ชนิด:		
กระทบต่อนถนนเป็นความยาว:20..... ม.	พื้นที่เสียหาย (กว้าง x ยาว):2.7..... x80..... (ม.) (STA 121+570 ถึง STA 121+570)		
การเคลื่อนตัว	วัสดุของส่วนที่เคลื่อนตัว	() ดิน (✓) ดินปนกรวด () ดินปนหิน () หิน	
	การเคลื่อนตัวต่อเนื่อง	(✓) ไม่พบ () ยังมีอยู่	

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการกรอกแบบฟอร์มสำรวจประเภทการเคลื่อนตัวของมวลดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำ และ/หรือ การขาดเสถียรภาพของเชิงลาด
ที่มา: กรมทางหลวง (2554)

2.2 วิธีการสำรวจภาพถ่ายทางอากาศโดยอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) หรือโดรน (Drone) พร้อมเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม (Real Time Kinematic: RTK)

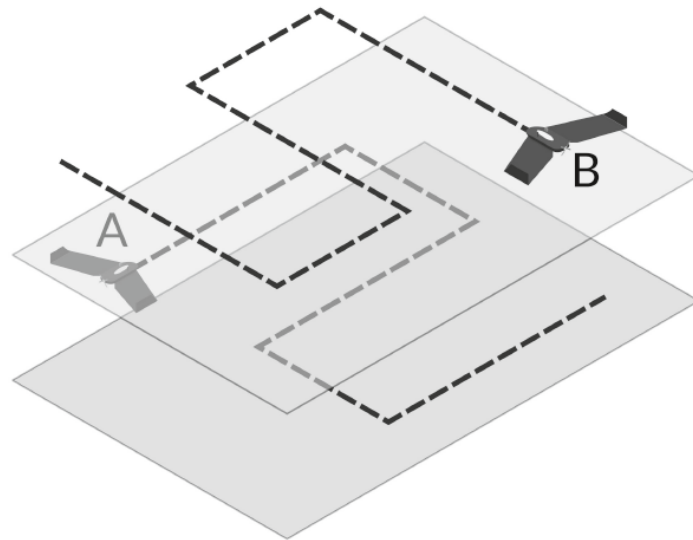
การบินสำรวจสภาพภูมิประเทศด้วย UAV นอกจากใช้สำรวจลักษณะการพังทลายของลาดเพื่อศึกษา รูปแบบการพังทลายในภาพกว้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ถึง รูปที่ 2.7 แล้ว ยังสามารถนำรูปถ่ายไปสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ความสูงภูมิประเทศ ร่วมกับการนำภาพถ่ายตั้งทางอากาศ (ออร์โทโฟโต้) มาแสดงผลร่วมกัน ทำให้สามารถมองแบบจำลอง 3 มิติ ได้เหมือนกับการมองภูมิประเทศจริง ทั้งนี้แบบจำลอง 3 มิติที่สร้างขึ้นยังสามารถวัดค่าพิกัดบนแบบจำลอง และนำไปสร้างภาพตัดสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด และคำนวณระยะทาง พื้นที่และปริมาณงบประมาณการปรับปรุงเสถียรภาพได้การสร้างแบบจำลองดังกล่าวมีหลักการคำนวณเพื่อให้ได้ข้อมูล ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 หลักการสร้างแบบจำลองภูมิประเทศด้วย UAV

หลักการพื้นฐานในการบินสำรวจเพื่อสร้างแบบจำลองภูมิประเทศมีดังนี้

- กำหนดเส้นทางการบินและถ่ายภาพให้ครอบคลุมพื้นที่ลาดชัน และให้แต่ละภาพมีการซ้อนทับกันอย่างน้อย 60% ทั้งนี้นักบินสามารถใช้ Application ในการกำหนดเส้นทางการบินได้ อย่างไรก็ตามพื้นที่พังทลายของเชิงลาดในงานทางมักมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก จึงสามารถใช้วิธีบินแบบ Manual ได้ซึ่งดำเนินการได้สะดวกกว่าในกรณีในพื้นที่ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต
- กำหนดจุดบินขึ้นในสถานที่ปลอดภัย ปราศจากสิ่งกีดขวางด้านบน เช่นเสาไฟ สายไฟฟ้า ต้นไม้ใหญ่
- บินสำรวจในระดับที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ระดับความละเอียด (Resolution) ที่จำเป็นในการวิเคราะห์เสถียรภาพ แต่ไม่บินในระดับต่ำเกินไปและระมัดระวังกิ่งไม้ขนาดเล็กบนเรือนยอดต้นไม้สูงซึ่งเซนเซอร์ตรวจจับของอากาศยานอาจไม่สามารถตรวจจับได้ทัน นำไปสู่อุบัติเหตุได้
- ควรสำรวจในช่วงที่มีเมฆมากปกคลุมท้องฟ้า (แต่ไม่บินในช่วงฝนตก) เพื่อให้แสงอ่อน ลดภาพเงาในรูปแบบหากบินในช่วงเวลา 10 -12 นาฬิกา เมื่อพระอาทิตย์อยู่เหนือศีรษะจะได้แสงที่มีความสม่ำเสมอ
- การถ่ายภาพที่หลายระดับความสูงและหลายมุมจะช่วยให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.5 เส้นทางการบินสำรวจด้วย UAV เพื่อสร้างแบบจำลองภูมิประเทศ เส้นทาง B สำหรับถ่ายภาพในแนวตั้ง และเส้นทาง A สำหรับถ่ายภาพทำมุมเอียง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจด้วย UAV ประกอบไปด้วย

ภาพออร์โธโมเสค หรือ Orthophoto คือภาพที่ได้จากการประมวลผลโดยการนำภาพถ่ายที่มีส่วนซ้อนหลายๆภาพมาต่อกัน โดยอาศัยจุดร่วม (Tie Point) ในแต่ละภาพ ข้อมูลภาพออร์โธเป็นข้อมูลดิจิทัล 2 มิติ บรรจุข้อมูลพิกัดตำแหน่งทางราบโดยอ้างอิงตามระบบพิกัดที่ใช้ประมวลผล นอกจากนั้นยังระบุค่าสีของจุดภาพที่ปรากฏ ใช้สำหรับเป็นข้อมูลตั้งต้นในการผลิตแผนที่ภูมิประเทศ ติดตามการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ หรือนำเข้าข้อมูลเชิงตำแหน่งต่าง ๆ เป็นต้น รูปแบบไฟล์เป็นรูปแบบ GeoTIFF

กลุ่มข้อมูลจุด 3 มิติ หรือ พอยท์คลาวด์ คือ กลุ่มของข้อมูลจุดที่ผลิตจากการซ้อนทับของภาพถ่ายโดยอาศัยจุดร่วม (Tie Point) สร้างขึ้นเป็นรูปร่างของวัตถุ โดยกลุ่มข้อมูลจุดจะบรรจุพิกัดทางราบและทางตั้ง (X, Y และ Z) โดยอ้างอิงตามระบบพิกัดที่ใช้ประมวลผล สามารถใช้ข้อมูลจุด 3 มิติในการวัดระยะทางราบหรือทางตั้ง หรือนำไปประยุกต์ใช้กับงานเขียนแบบ เป็นต้น รูปแบบไฟล์เป็นรูปแบบ LAS, LAZ, PLY และ XYZ



รูปที่ 2.6 ภาพออร์โธโมเสค (ซ้าย) ภาพพอยท์คลาวด์ (ขวา)

แบบจำลอง 3 มิติ (3D Textured Mesh) คือ ข้อมูลพื้นผิวที่ผลิตจากกลุ่มข้อมูลจุด 3 มิติ (Point Cloud) โดยการใช้การลากเส้นเชื่อมจุดระหว่างจุดใกล้เคียง จากนั้นจึงสร้างเป็นพื้นผิว รูปร่างของวัตถุนั้นจะมีความละเอียดตามความหนาแน่นของพอยท์คลาวด์ ตัวอย่างแบบจำลอง 3 มิติ รูปแบบไฟล์เป็นรูปแบบ PLY, FBX, DXF และ OBJ ดังแสดงดังรูป

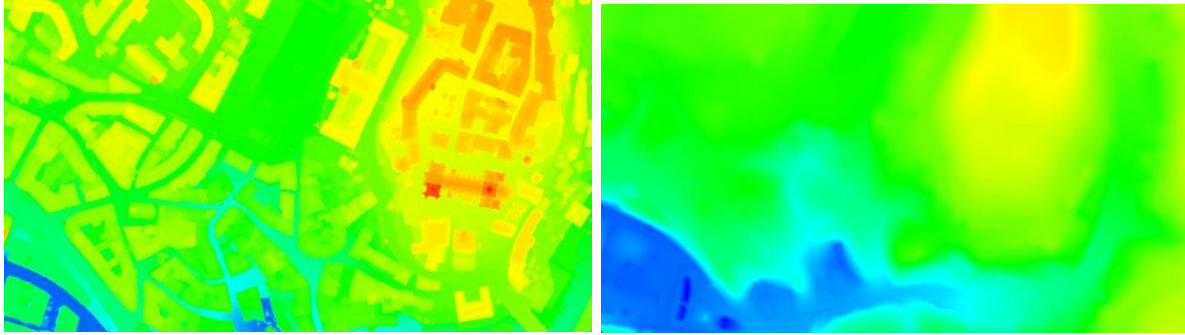


รูปที่ 2.7 แบบจำลอง 3 มิติ

แบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข คือ ข้อมูลดิจิทัล 2 มิติ แสดงระดับสูงของวัตถุบนพื้นโลก ในแต่ละจุดภาพจะบันทึกค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง (X, Y และ Z) รูปแบบไฟล์เป็นรูปแบบ GeoTIFF แบบจำลองระดับเชิงเลข หรือในทางภูมิสารสนเทศเรียกว่า Digital Elevation Model : DEM คือข้อมูลดิจิทัล 2 มิติ ที่ทำการปรับแก้จากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข (Digital surface model : DSM) โดยการตัดวัตถุที่อยู่เหนือพื้นดินออกไป ทำให้แสดงเฉพาะระดับพื้นผิวพื้นโลก ในแต่ละจุดภาพ จะบันทึกค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง (X, Y และ Z) รูปแบบไฟล์เป็นรูปแบบ GeoTIFF

ในกรณีที่ต้องการความละเอียดของตำแหน่งเพื่อใช้อ้างอิงกับสิ่งปลูกสร้างหรือพิกัดมาตรฐาน สามารถใช้เทคโนโลยี RTK (Real-Time Kinematic) GPS ในการสำรวจเพิ่มเติมเพื่อปรับเทียบ Ground Control Point ให้แบบจำลองภูมิประเทศ มีความแม่นยำในระดับ Global Accuracy มากยิ่งขึ้นในระดับเซนติเมตร อย่างไรก็ตามอากาศยานไร้คนขับซึ่งมีเซนเซอร์ RTK ติดตั้งด้วยยังมีราคาสูงมากในปัจจุบัน หากเป็นการสำรวจเพื่อวัตถุประสงค์ในการแก้ไขเสถียรภาพหรือการกัดเซาะ แบบจำลองซึ่งปราศจาก GCP ก็อาจมีความถูกต้องเพียงพอในระดับ Relative Accuracy ซึ่งไม่มีความจำเป็นต้องอ้างอิงตำแหน่งกับพิกัดภายนอก เพียงแต่ต้องการลักษณะหน้าตัดลาดและภูมิประเทศในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเบื้องต้นเท่านั้น

อย่างไรก็ดีข้อจำกัดประการหนึ่งของการใช้เทคโนโลยีนี้คือพืชปกคลุม ซึ่งหากมีต้นไม้ขึ้นหนาแน่นจะมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่อย่างไรก็ดีในพื้นที่ดินถล่มซึ่งเพิ่งเกิดขึ้นไม่นาน พื้นดินจะยังปราศจากสิ่งปกคลุมดังนั้นเทคโนโลยี Photogrammetry จึงมีความถูกต้องเพียงพอ แต่หากมีพืชปกคลุมหนาแน่นจำเป็นต้องถางพืชปกคลุมออกก่อนจึงบินสำรวจ นอกจากการสำรวจด้วยเทคนิค Photogrammetry ยังมีการสำรวจโดยใช้เทคโนโลยี Lidar หรือ 3D Laser Scanner ซึ่งสามารถสำรวจผ่านพืชปกคลุมได้ แต่วิธีดังกล่าวยังมีราคาสูงอยู่เมื่อเทียบกับงานแก้ไขดินสไลด์ขนาดเล็ก

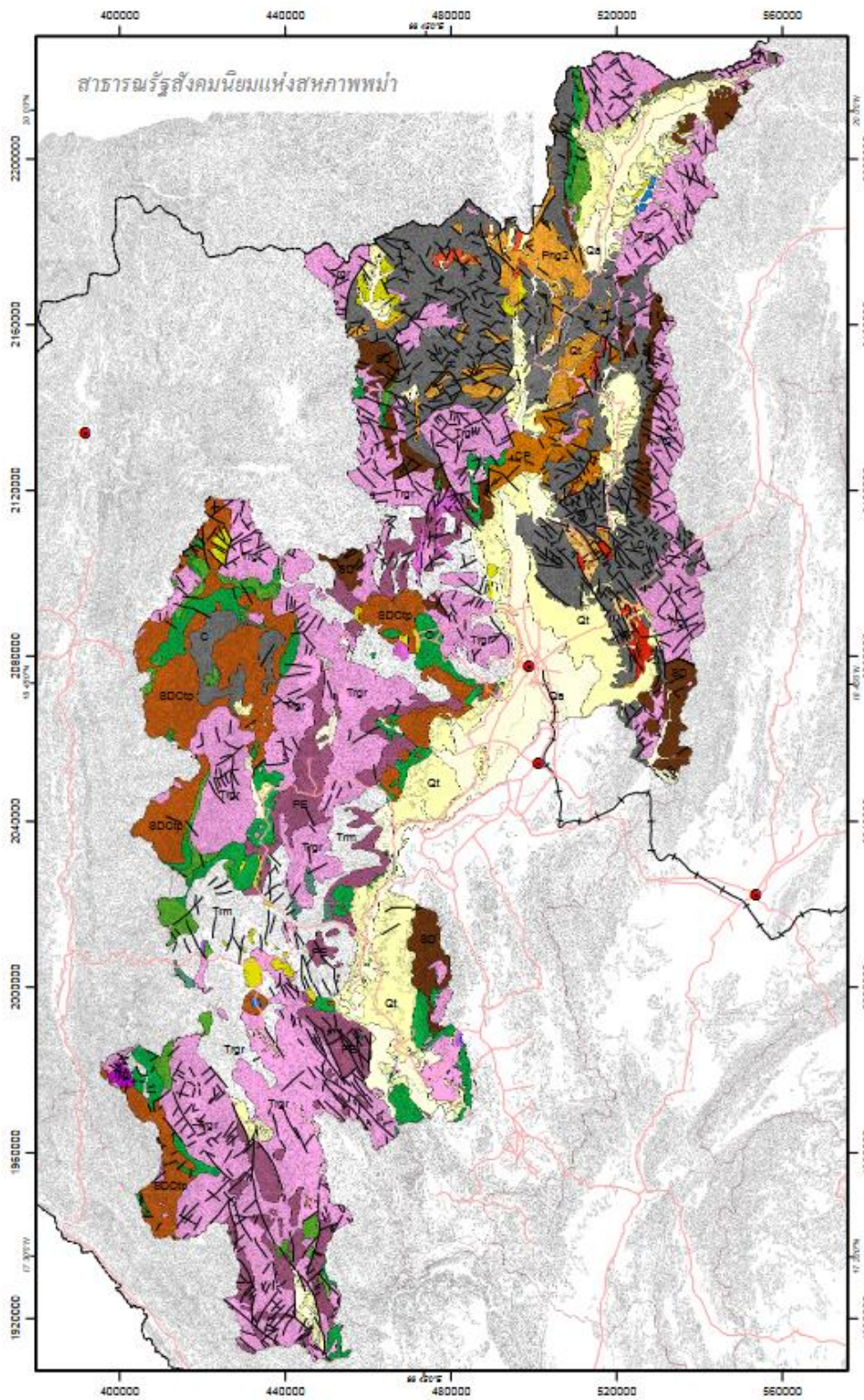


รูปที่ 2.8 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข DSM (ซ้าย)
และแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข DEM (ขวา)

2.3 การสำรวจธรณีวิทยาโครงสร้างและชนิดหิน

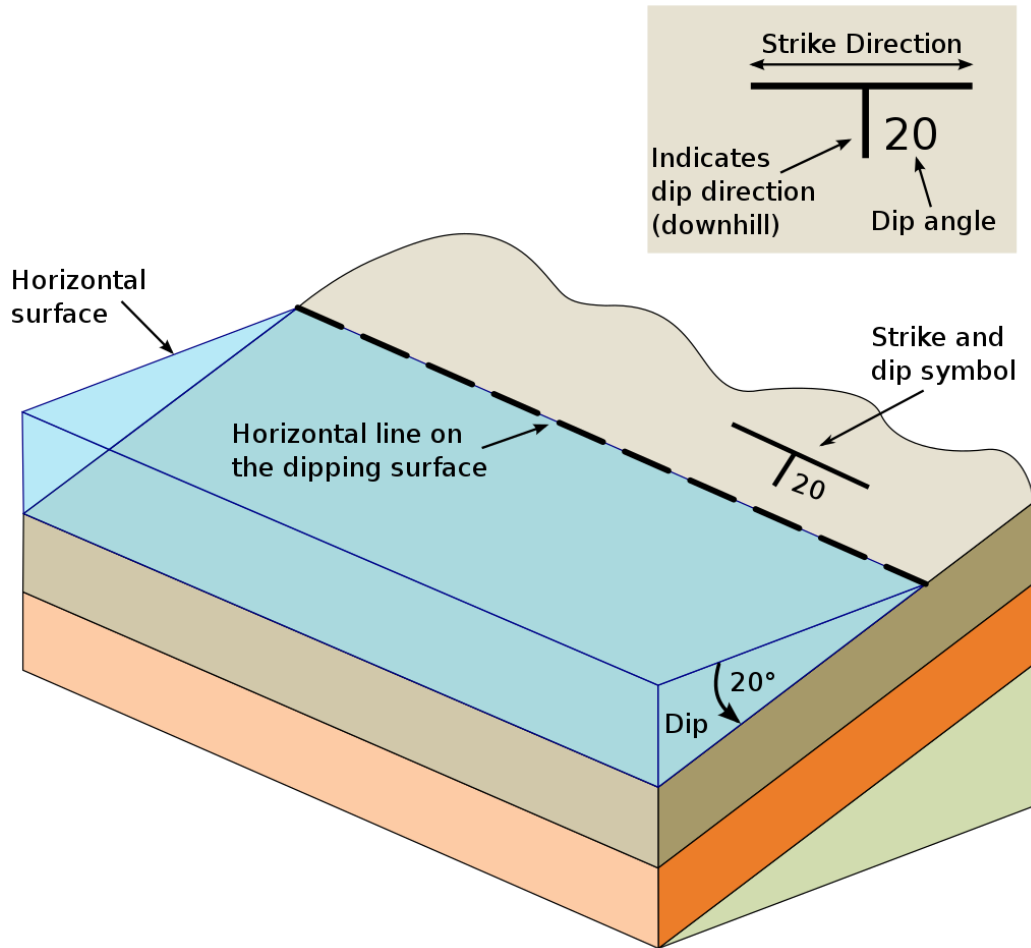
การสำรวจธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural Geology) และชนิดหินเป็นการดำเนินการเพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางธรณีวิทยา ไม่ว่าจะเป็นระดับการผุพังของหิน รอยเลื่อน รอยแยกในพื้นที่ ลักษณะ ประเภท คุณสมบัติ รวมถึงระดับและทิศทางการวางตัวของชั้นหินต่าง ๆ ในพื้นที่ ซึ่งล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อ การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาดทั้งสิ้น

ในงานวิศวกรรมเชิงลาดในงานทางนั้น โดยทั่วไปการพิบัติส่วนใหญ่มักเกิดในระดับตื้น เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะในส่วนที่เป็นดินถมใหม่ ดินคงค้างในที่ (Residual Soil) หรือตะกอนเชิงเขา (Colluvium) การศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างและชนิดหินจึงมักเป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อให้ทราบการวางตัวของชั้นดินและชั้นหินสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยใช้วิธีศึกษาชนิดหินจากแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 และเปรียบเทียบกับลักษณะหินที่พบในสนาม รวมถึงตรวจวัดการวางตัว (Strike- Dip) ของชั้นหินโผล่ที่พบ (รูปที่ 2.10) นอกจากนั้นหากทราบหินต้นกำเนิดจะสามารถคาดการณ์ชนิดของดิน และพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดินสำหรับการวิเคราะห์เบื้องต้นได้ดังรูปที่ 2.11

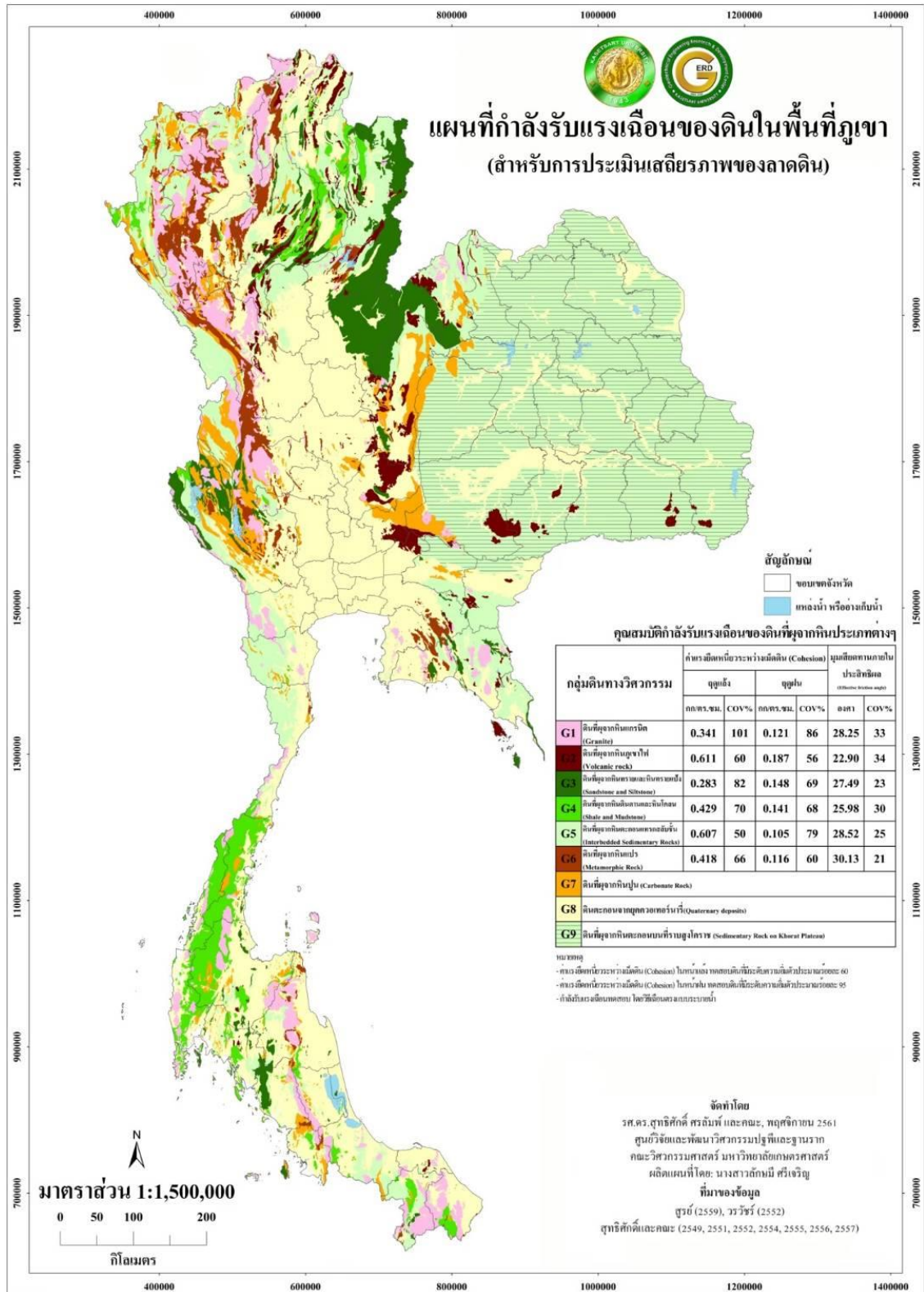


รูปที่ 2.9 แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: <http://www.dmr.go.th/download/pdf/North/Chiangmai.pdf>



รูปที่ 2.10 การวัดการวางตัวของชั้นหิน
ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Strike_and_dip



รูปที่ 2.11 แผนที่แสดงค่ากำลังเฉือน c' และ ϕ' , เฉลี่ยโดยประมาณของดินที่ผุสลายจากหินกลุ่มต่าง ๆ ในพื้นที่ภูเขาสัน
 ที่มา: ศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2561)

ลักษณะธรณีวิทยาของหินแต่ละชนิดมีแนวโน้มมีลักษณะโครงสร้าง และการผุพังให้ดินที่มีความหนา และชนิดแตกต่างกันไป จึงได้มีการจำแนกกลุ่มหินในการศึกษาด้านดินถล่ม (สุทธิศักดิ์ และคณะ 2561) เพื่อช่วยคาดการณ์การเกิดดินถล่มในหินแต่ละประเภทได้เบื้องต้น อย่างไรก็ตาม ปัจจัยอื่น ๆ เช่น สภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ พืชปกคลุม ก็สามารถส่งผลให้หินชนิดเดียวกันแต่ผุพังให้ดินที่มีความแตกต่างกันอย่างมากได้ รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการผุพังของหินประเภทต่าง ๆ ใกล้ชั้นผิวดิน หินจะผุพังมากจนกลายเป็นดิน เรียกว่า ดินค้างใน (Residual Soil) นอกจากนั้นในพื้นที่เชิงเขาซึ่งเคยมีดินถล่มในอดีต ก็อาจมีเศษหินเชิงเขา (Colluvium/Talus) ทับอยู่เหนือชั้นดิน Residual Soil อยู่ด้วยดังรูปที่ 2.13 ชั้น Colluvium นี้เป็นตะกอนดินและก้อนหินขนาดต่าง ๆ ที่ไหลมากับเหตุการณ์ชะล้างพังทลายและดินถล่มในอดีต โดยมากอยู่ในสภาวะหลวม จึงไม่มั่นคงและไหลลงมาได้ง่ายหากมีแรงดันน้ำเพิ่มสูงขึ้นหรือมีตัดดินที่เชิงเขา

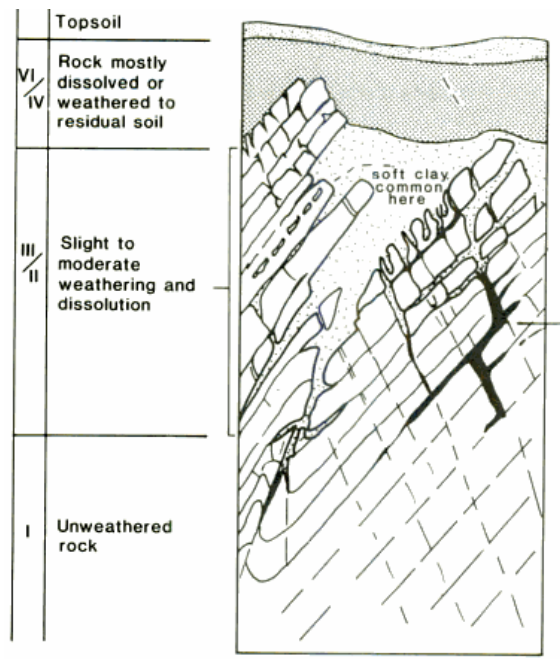
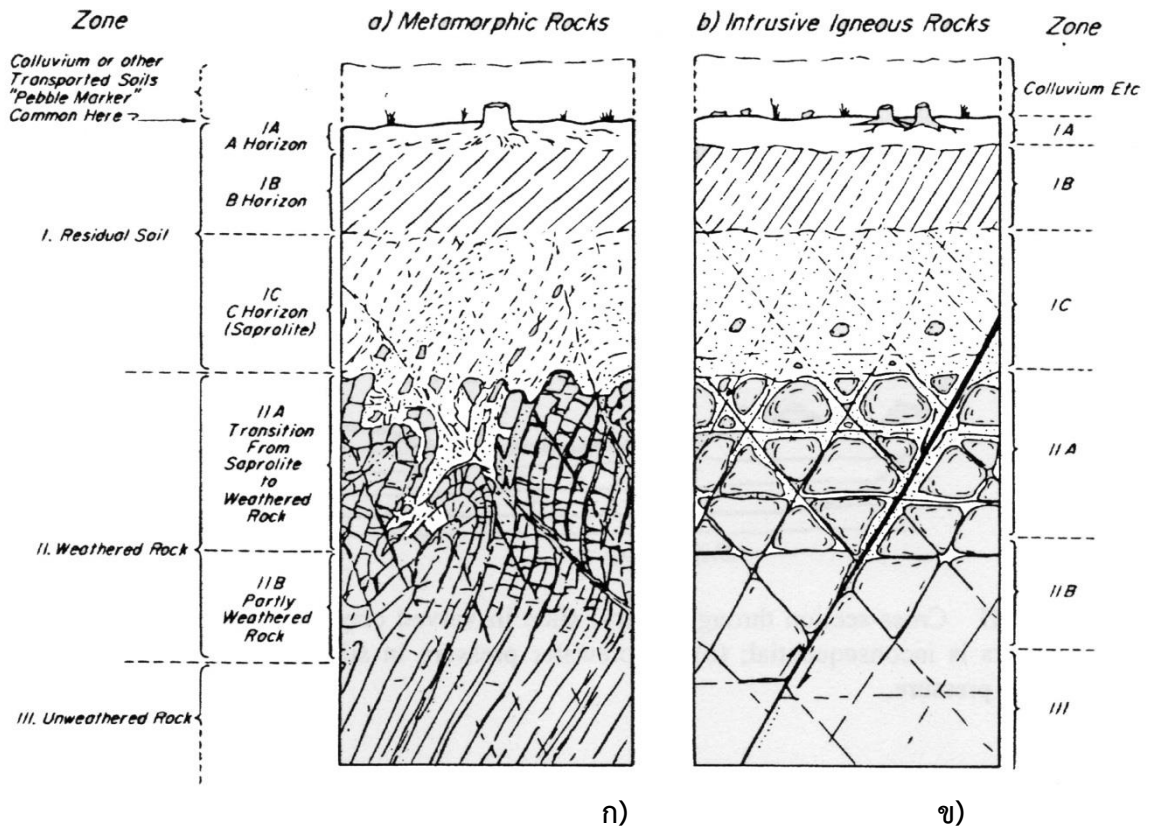
ชั้นที่อยู่ต่ำกว่า Residual Soil เรียกว่า แซโพรไลต์ (Saprolite) เป็นหินที่ผุพังจนเป็นดินแต่ยังคงโครงสร้างของหินแม่ (Parent Rock) ไว้ เช่น มีการเชื่อมประสาน (Cementation) อยู่บ้างและอาจมีรอยแตกเดิมของหินแม่ค้างอยู่ในดิน ที่เรียกว่า รอยแยกโบราณ (Relict Joint) ซึ่งเป็นระนาบที่มักเกิดการเลื่อนไถลของดินได้ ชั้น Residual Soil และ Saprolite นี้อาจมีความหนาได้ตั้งแต่ไม่กี่เซนติเมตรจนถึงหลายสิบเมตร

สำหรับหินแปร (Metamorphic Rocks) (รูปที่ 2.12ก) ความหนาชั้นดิน Residual Soil มักจะแปรปรวนได้มาก เนื่องจากอิทธิพลของการแปรสภาพหินด้วยความร้อนและความดันใต้เปลือกโลกทำให้ชั้นหินมีความไม่สม่ำเสมอ ในบริเวณรอยเลื่อน (Fault) และแนวเฉือน (Shear Zone) มักจะมีการผุพังของหินและหน้าดินมากกว่าบริเวณอื่น การไหลของน้ำใต้ดินมักถูกกำหนดโดยการวางตัวของรอยแยก หินที่บิ่น้ำหรือสายแร่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดินถล่มมีทั้งการพิบัติแบบลึก (Slide A) ในโซน Residual Soil และ Weathered Rock ซึ่งเกิดจากการตัดลาด (Cut Slope) มีรอยแตกโบราณ (Relict Joint) และมีริ้วขนานโบราณ (Relict Foliation) ที่เอื้อต่อการพังของดิน สำหรับการพิบัติแบบตื้น (Slide B) จะเกิดในโซนดิน Residual Soil (IA/IB) เนื่องจากน้ำใต้ดินที่สูงขึ้นจากปริมาณน้ำฝน นอกจากนั้นมักพบการกัดเซาะวัสดุพวก Saprolite (IC) ได้ง่าย

สำหรับหินแกรนิต หรือหินอัคนีชนิด Intrusive (รูปที่ 2.12ข และรูปที่ 2.12) การผุพังและการเกิดดินถล่มจะคล้ายคลึงกับกรณีของหินแปร คือมีทั้งการพิบัติระดับลึก และ ระดับตื้น แต่จะแตกต่างกันเล็กน้อยตรงที่ การพิบัติระดับลึก (Deep-Seated Slide) Slide B ในรูปที่ 2.12 มักเกิดผ่านรอยแยกจำพวก Joint, Faults และ Stress Relief Sheeting Joints ซึ่งมีแนวโน้มขนานไปกับผิวดิน ดินถล่มระดับลึกนี้ หากไม่เกิดทันทีภายหลังการตัดลาด ก็มักจะเกิดภายหลังเมื่อมีฝนตกหนักหรือเกิดแผ่นดินไหวขึ้น สำหรับดินถล่มระดับตื้น (Shallow Slide) หรือ Slide-A ในรูปที่ 2.12 พบได้มากที่สุด และมักเกิดจากแรงดันน้ำในดินมีค่าสูงเนื่องจากฝนตกหนักสะสมลงในดิน

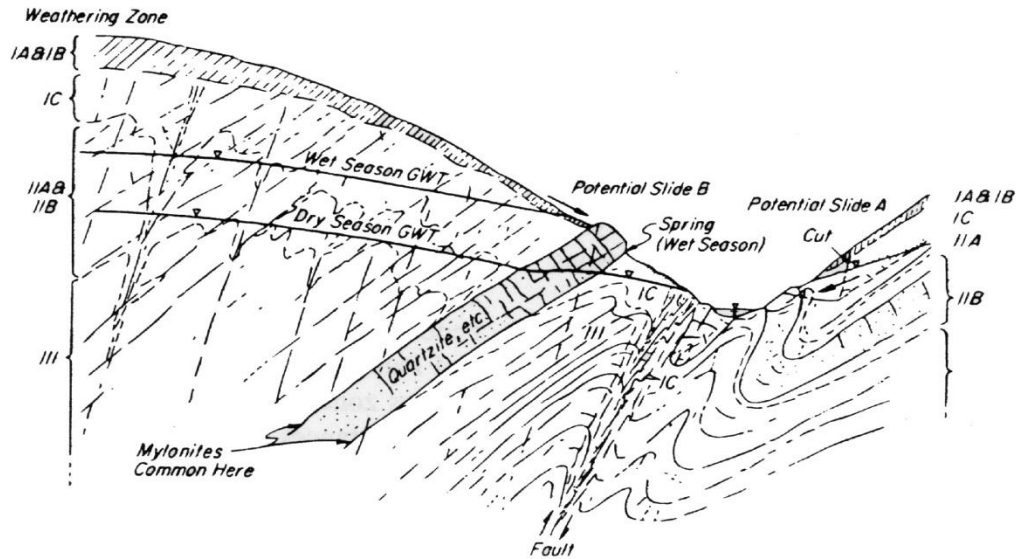
สำหรับกลุ่มหินคาร์บอเนต (Carbonate Rocks) เช่น หินปูน หินโดโลไมต์ หรือ หินอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.12ค การผุพังของหินมักเกิดจากกระบวนการละลายคาร์บอเนตด้วยน้ำที่ฤทธิ์เป็นกรด ดังนั้นดินที่ได้

จากหินกลุ่มนี้จะไม่มีโครงสร้างที่ชัดเจน และพบว่ามีส่วนประกอบของวัสดุต้นกำเนิดที่ไม่ได้ถูกละลายออกไป มักมีปริมาณแร่ดินเหนียวและมีความเป็นพลาสติกสูง รอยต่อระหว่างหินต้นกำเนิดและดินจะมีความชัดเจน (Sharp Contact) และไม่พบชั้นหินที่ค่อย ๆ ผุจากมากไปหาน้อยเหมือนหินจำพวกอื่น ๆ แต่มักพบถ้ำหรือโพรงใต้ดิน



รูปที่ 2.12 ลักษณะการผุพังของหิน ก) หินแปร ข) หินแกรนิต ค) หินคาร์บอนेट เช่น หินปูน

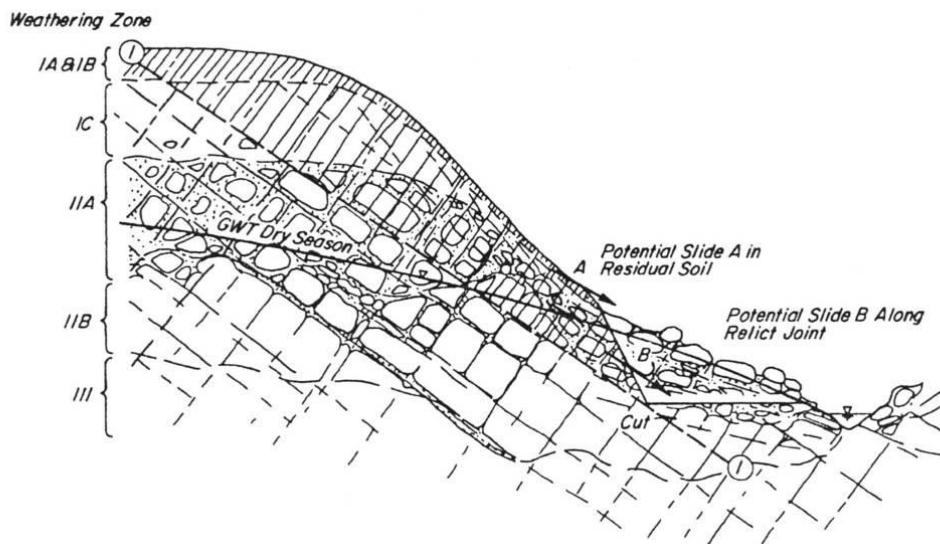
ที่มา: Terzaghi et al. (1996) และ Fookes (1997)



รูปที่ 2.13 ลักษณะการพิบัติของลาดในหินแปรที่ผุพัง

ที่มา: Deere & Patton (1971) อ้างอิงใน Terzaghi et al (1996)

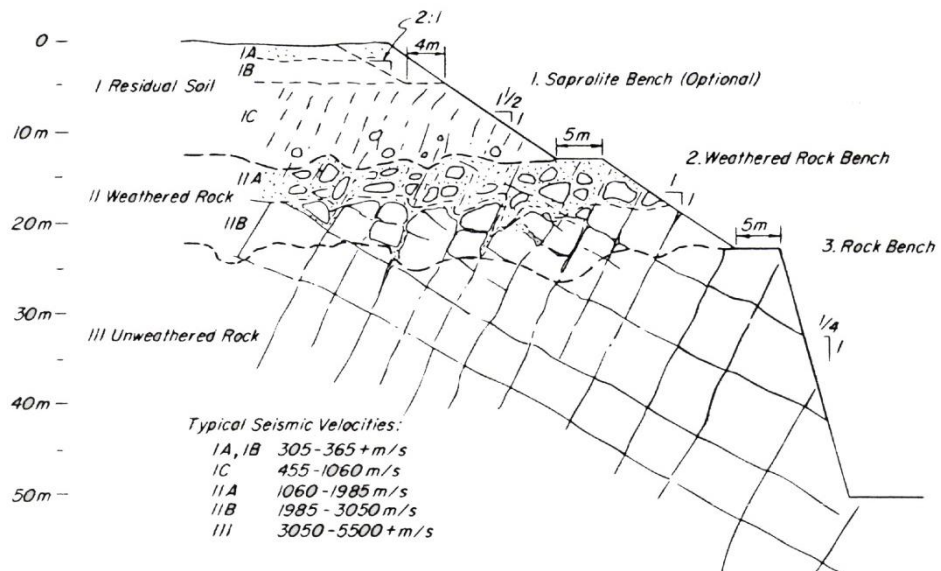
ปัญหาเสถียรภาพของลาดในหินกลุ่มคาร์บอนเนตพบว่าน้อยกว่าหินกลุ่มอื่น ๆ (Terzaghi et al., 1996) แต่การตัดลาด (Cut Slope) และการไหลของน้ำใต้ดิน ก็มักทำให้มีการยุบตัวของโพรงใต้ดิน เกิดเป็นหลุมยุบได้ และกรณีที่มีการสะสมตัวหนาของดินค้ำในที่ (Residual Soil) จากหินคาร์บอนเนต และมีฝนตกสะสมปริมาณมาก จนน้ำใต้ดินมีระดับสูงก็สามารถทำให้เกิดการพิบัติของลาดดินได้เช่นกัน



รูปที่ 2.14 ลักษณะการพิบัติของลาดในหินแกรนิตที่ผุพัง

ที่มา: Terzaghi et al. (1996)

สำหรับหินดินดาน (Shale) และหินทรายแป้ง (Siltstone) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มหินเนื้อดิน (Argillaceous Rock) เป็นหินที่มีดินเป็นส่วนประกอบสำคัญของเนื้อหิน จึงมักจะเสื่อมสภาพได้รวดเร็ว โดยเฉพาะเมื่อตัดลาดเปิดหน้าดินออกแล้วหินถูกแสงแดดสลับกับน้ำฝนหลายฤดูกาล ทำให้เกิดการกัดเซาะที่ผิวลาดคล้ายการลอกคราบของหิน (Sloughing) เมื่อเวลาผ่านไปสองสามปี และยังพบดินถล่มแบบตื้นได้บ่อยครั้ง หากมีฝนตกหนัก และแรงดันน้ำในดินเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.15 ลักษณะทั่วไปของการตัดลาดชันในหินผุ
ที่มา: Terzaghi et al. (1996)

ในกรณีที่มีการพิบัติของลาดมีระดับลึกและมีการพังทลายตามแนววางตัวของหิน หรือเป็นลักษณะหินร่วง จำเป็นต้องมีการตรวจวัดคุณภาพของมวลหิน การวางตัว (Strike และ Dip) ความถี่ของแนวความไม่ต่อเนื่องของหินในสนาม และค่ากำลังอัดของหิน การไหลซึมของน้ำ ฯลฯ เพื่อนำไปประเมินกำลังของมวลหินด้วยวิธีเชิงประสบการณ์ อาทิ Rock Mass Rating และวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดหินโดยผู้เชี่ยวชาญต่อไป

2.4 วิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์

การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์เป็นการประยุกต์ใช้คุณสมบัติทางฟิสิกส์เพื่อสำรวจคุณสมบัติของวัสดุที่อยู่ใต้ผิวดิน ซึ่งการทดสอบทางด้านธรณีฟิสิกส์นั้นสามารถจำแนกได้หลากหลายประเภทไม่ว่าจะเป็น การสำรวจโดยใช้คลื่นสั่นสะเทือน การสำรวจโดยใช้ความต้านทานไฟฟ้า การสำรวจโดยใช้สนามแม่เหล็ก เป็นต้น โดยหนึ่งในวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการสำรวจทางด้านวิศวกรรมเชิงลาดคือการสำรวจค่าความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากสามารถระบุตำแหน่งของชั้นหินที่มีความชื้นสูงได้ และหากใช้ควบคู่กับการเจาะสำรวจจะสามารถนำไปหาความแปรปรวนของชั้นหินแข็งเพื่อนำไปสร้างแบบจำลองวิเคราะห์เสถียรภาพและกำหนดความลึกของเสาเข็มได้

2.4.1 การสำรวจค่าความต้านทานไฟฟ้า

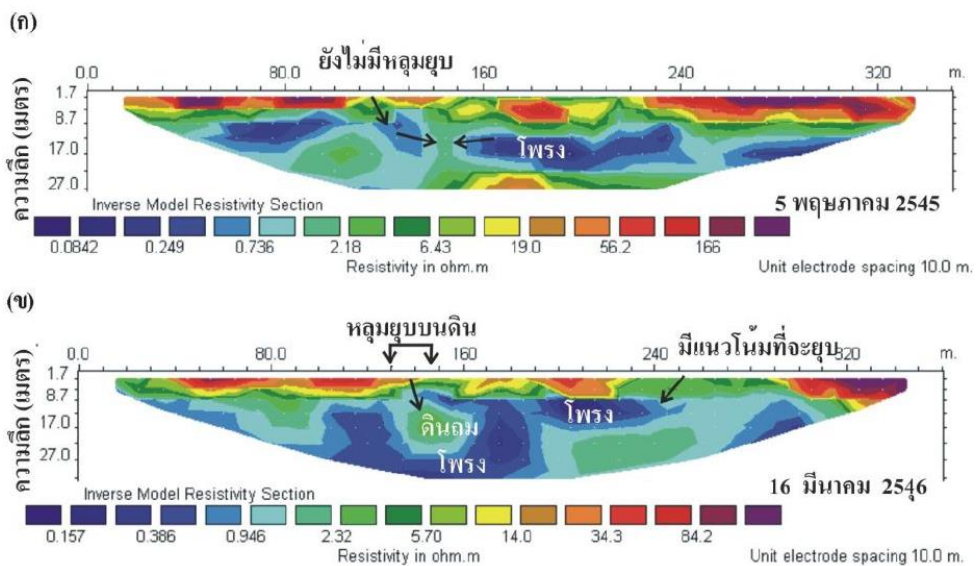
การสำรวจค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเป็นการอาศัยความแตกต่างทางด้านความต้านทานไฟฟ้าของดินในพื้นที่ โดยทั่วไปแร่ประกอบหิน/ดินมีความเป็นฉนวนไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเนื่องจากหิน/ดินมีช่องว่าง เช่น รูพรุน รอยแตก ซึ่งมีน้ำสะสมอยู่ เมื่อทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไปในพื้นที่ดิน กระแสไฟฟ้าจะสามารถไหลผ่านช่องว่างเหล่านั้นได้ การที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุได้แตกต่างกันส่งผลให้สามารถตรวจวัดปริมาณความชื้นและจำแนกประเภทและการวางตัวของชั้นดิน/หินในพื้นที่ได้

ขั้นตอนการสำรวจค่าความต้านทานไฟฟ้านั้น สามารถสรุปได้พอสังเขปดังนี้

1. กำหนดแนวการสำรวจให้ครอบคลุมพื้นที่สำรวจ ซึ่งโดยทั่วไปความลึกของการสำรวจค่าความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ 0.2 เท่าของความยาวสำรวจ
2. ติดตั้งเครื่องมือสำรวจและดำเนินการทดสอบ โดยต้องทำการออกแบบการจัดขั้วไฟฟ้าสำรวจ กำหนดระยะห่างขั้วไฟฟ้า และทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในพื้นที่ทดสอบ ดังแสดงตัวอย่างไว้ดังรูปที่ 2.16
3. การแปลผลข้อมูล โดยผลการทดสอบจะแสดงเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าตามความลึกและแนวยาวสำรวจดังแสดงตัวอย่างไว้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 การติดตั้งและดำเนินการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าในสนาม



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างผลการสำรวจค่าความต้านทานไฟฟ้าในสนาม

ที่มา: เพ็ญตา (2550)

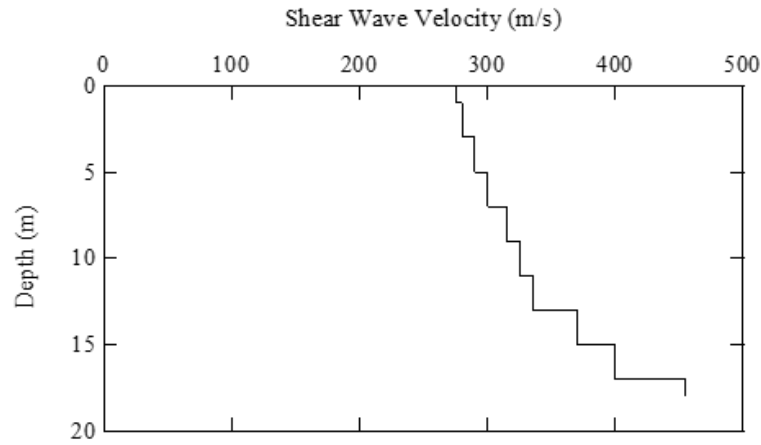
2.4.2 การสำรวจโดยใช้คลื่นสั่นสะเทือน

การสำรวจโดยใช้คลื่นสั่นสะเทือน (Stress Wave) เป็นการสำรวจที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติที่สำคัญในการวิเคราะห์ห่ออกแบบทางด้านวิศวกรรมคือค่าโมดูลัสของวัสดุ ซึ่งสามารถหาได้จากค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ตรวจวัดได้ โดยการสำรวจโดยใช้คลื่นสั่นสะเทือนนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น Spectral Analysis of Surface Waves (SASW), Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), Seismic Reflection, Seismic Refraction Cross-Hole, Down-Hole เป็นต้น โดยหลักการทั่วไปคือการสร้างคลื่นสั่นสะเทือนที่เดินทางไปในชั้นดินทดสอบ และทำการตรวจวัดค่าความเร็วคลื่นด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณ และแสดงผลเป็นค่าความเร็วคลื่นเฉือนของดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ ซึ่งแต่ละวิธีทดสอบจะมีข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดแตกต่างกัน เช่น การทดสอบ Cross-Hole หรือ Down-Hole นั้นจำเป็นต้องมีหลุมเจาะเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ ส่วน Seismic Reflection จะเหมาะกับการทดสอบระดับลึก Seismic Refraction เหมาะกับพื้นที่ที่มีชั้นดินอ่อนวางตัวอยู่บนชั้นดินแข็ง ในส่วนของการทดสอบสำหรับงานเชิงลาดนั้น การทดสอบที่ใช้คลื่นผิวดิน เช่น SASW (รูปที่ 2.18) หรือ MASW อาจจะนับว่ามีความเหมาะสม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีหลุมเจาะ สามารถดำเนินการได้รวดเร็ว และมีค่าใช้จ่ายต่ำ ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะมีความแตกต่างกันในเรื่องเครื่องมือทดสอบและวิธีการวิเคราะห์ แต่ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาแล้วนั้นไม่มีความแตกต่างกัน

ทั้งนี้ผลที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีคลื่นสั่นสะเทือนนั้น ทำให้ผู้ทดสอบสามารถทราบถึงค่าความแข็ง (ความเร็วคลื่นเฉือน) ของวัสดุที่ระดับความลึกต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ส่งผลให้สามารถประเมินความลึกของชั้นดินแข็งและนำไปใช้ในการวิเคราะห์ห่ออกแบบต่อไป



รูปที่ 2.18 การทดสอบ SASW



รูปที่ 2.19 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากบริเวณสันเขื่อน, เขื่อนแม่จาง
ที่มา: Chaiprakaikeow et al. (2016)

2.4.3 วิธีการเจาะสำรวจ (Boring Log)

การเจาะสำรวจดินเป็นการสำรวจเพื่อให้ทราบถึงการวางตัวและคุณสมบัติของชั้นดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ โดยในงานที่เกี่ยวข้องกับดินถล่มทั่วไปมักใช้วิธีการเจาะดินแบบฉีดล้าง (Wash Boring) เนื่องจากสามารถเคลื่อนย้ายเครื่องมือเข้าพื้นที่ได้โดยง่าย เมื่อทำการเจาะดินลึกไปถึงระดับที่ต้องการ สามารถทำการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) เพื่อทราบถึงความแข็งของดินพร้อมทั้งสามารถเก็บตัวอย่างประเภทถูกรบกวน (Disturbed Sample) โดยใช้กระบอกผ่า (Split Spoon Sampler) ขนาด 2 นิ้ว ทำการตอกด้วยตุ้มน้ำหนัก 140 ปอนด์ ระยะยก 30 นิ้ว และนับจำนวนครั้งการตอกที่ระยะจมเท่ากับ 12 นิ้ว เมื่อทำการทดสอบจะสามารถทราบถึงค่าความแข็งของดินด้วย SPT-Number (จำนวนครั้งการตอก/ระยะจม) เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป แสดงตัวอย่างการเจาะสำรวจดินบริเวณหน้างาน



รูปที่ 2.20 การเจาะสำรวจดิน ก) การเจาะแบบฉีดล้าง ข) การเจาะแบบโรตารี

อย่างไรก็ดี ในกรณีที่จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของชั้นหินและคุณภาพของหิน สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดหิน หรือวัดระดับน้ำใต้ดินในชั้นหินผุ จะต้องใช้วิธีการเจาะด้วยเครื่องโรตารี (รูปที่ 2.20) และเก็บตัวอย่างแท่งหิน (Rock Coring) เพื่อนำมาทดสอบกำลังอัด และระบุดัชนีคุณภาพของหิน เช่น ค่า RQD (Rock Quality Designation) และประเมินคุณสมบัติของมวลหิน (Rock Mass Rating)

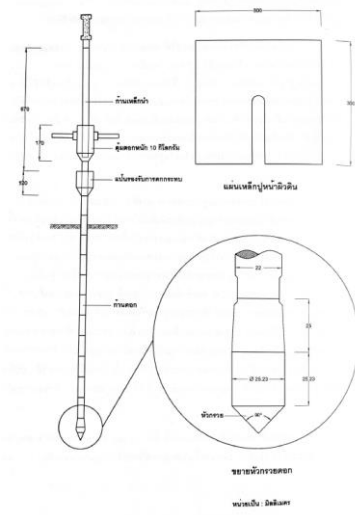
2.4.4 วิธีการตอกหยั่ง (Penetration Test)

ในการสำรวจเกี่ยวกับงานดินถมระดับพื้น มักจะใช้การทดสอบคุนเซลสแตป (Kunzelstab) หรือการทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer ในการตอกหยั่งเพื่อประเมินกำลังรับแรงแบกทานและระดับความหนาของดินหรือหินผุ เนื่องจากเครื่องมือมีน้ำหนักเบา สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย เหมาะสมกับสภาพหน้างานที่มักจะเป็นป่าและมีความลาดชันค่อนข้างสูง

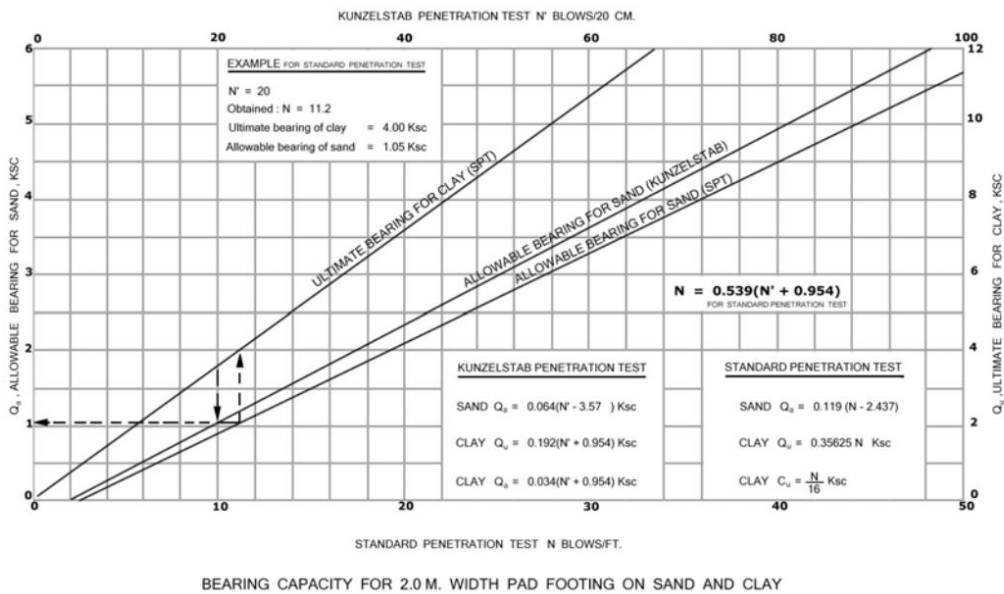
โดยการทดสอบ Kunzelstab (รูปที่ 2.21) เป็นการทดสอบเพื่อหาลำดับชั้นดินที่ปลายหัวหยั่งตามมาตรฐานประเทศเยอรมนี (DIN4094) โดยใช้หัวเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ก้านเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ตั้มน้ำหนัก 10 กิโลกรัม ใช้ระยะยก 50 เซนติเมตร เพื่อจำนวนครั้งการตอกที่ระยะจมเท่ากับ 20 เซนติเมตร ทั้งนี้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (1980) ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT, KPT และ Ultimate Bearing Capacity (Q) สำหรับการออกแบบฐานรากดินความกว้าง 2 เมตรไว้ ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งสามารถนำไปกำหนดระดับฐานรากของกำแพงกันดินได้

ส่วนการทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) เป็นการทดสอบตามมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับ Kunzelstab แต่ใช้หัวเจาะทำมุม 60 องศา และใช้ตัมน้ำหนัก 3.1 กิโลกรัม

โดยการทดสอบเหล่านี้จะได้ผลการทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดสอบ SPT ดังแสดงในรูปที่ 2.22 คือได้จำนวนตอก/ระยะจม อย่างไรก็ตามการทดสอบดังกล่าวไม่สามารถเก็บตัวอย่างขึ้นมาได้ จึงอาจจำเป็นต้องดำเนินการควบคู่ไปกับการเก็บตัวอย่างด้วยสว่านมือเพื่อทำการจำแนกประเภทของดินด้วยสายตา และทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.21 อุปกรณ์ Kunzelstab และการทดสอบ



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการตอกและกำลังของดินสำหรับออกแบบฐานรากดิน
ที่มา: EGAT (1980)

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะต้องใช้ค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดิน โดยทั่วไปสามารถแปลงผลการทดสอบ Kunzelstab เป็นค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดินได้ดังนี้

$$N_{SPT} = 0.539(N_{KPT} + 0.954) \quad (1)$$

เมื่อ N_{KPT} คือ จำนวนครั้งการตอกที่ระยะจมเท่ากับ 20 เซนติเมตรในการทดสอบ Kunzelstab

N_{SPT} คือ จำนวนครั้งการตอกตามมาตรฐานการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test)

เมื่อได้ค่า N_{SPT} แล้ว จึงนำไปทำนายค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดินดังนี้

กรณีดินเหนียว ค่ากำลังเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำ S_u (kPa) คำนวณได้ดัง สมการ (2)

$$S_u \text{ (kPa)} = 6N_{SPT} \quad (2)$$

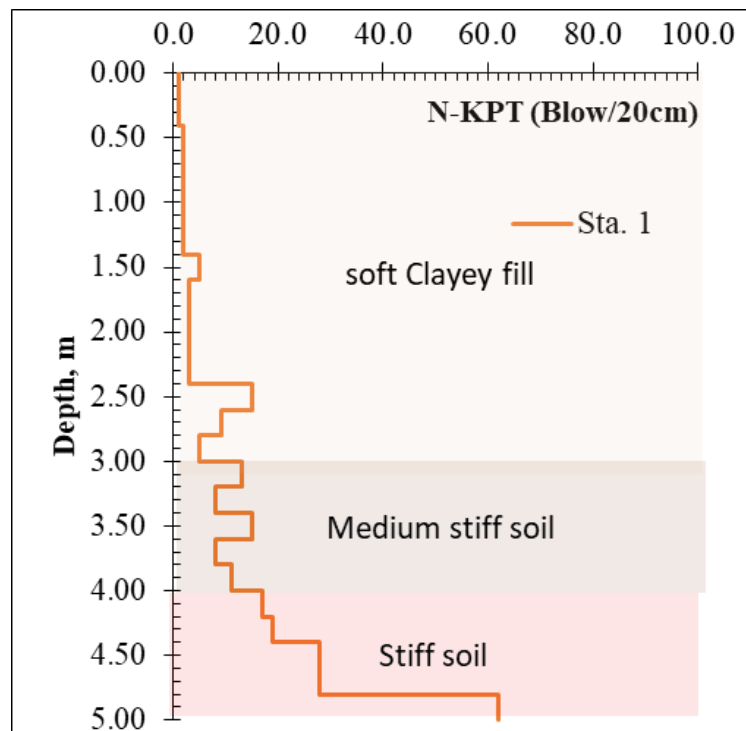
กรณีดินทราย ค่ามุมเสียดทาน ϕ สามารถประเมินได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_{SPT} และค่ามุมเสียดทาน ϕ

N_{SPT} (จำนวนครั้งตอก/30 ซม.)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)	ค่ามุมเสียดทาน ϕ (องศา)
0 ถึง 4	หลวมมาก	น้อยกว่า 28
4 ถึง 10	หลวม	28 ถึง 30
10 ถึง 30	ปานกลาง	30 ถึง 36
30 ถึง 50	แน่น	35 ถึง 41
มากกว่า 50	แน่นมาก	มากกว่า 41

ที่มา: Peck et al. (1974)

อย่างไรก็ดีค่าพารามิเตอร์ c และ ϕ จากการทดสอบ Kunzelstab นี้เป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น ในทางปฏิบัติดินมักอยู่ในสภาวะไม่อิ่มน้ำ หากทดสอบดินในช่วงฤดูแล้งก็จะมีค่ากำลังเฉือนที่สูงกว่าหากทดสอบในช่วงฤดูฝน เนื่องจากอิทธิพลจากแรงดูดในดิน และในช่วงเวลาที่เกิดการพิบัติ มักจะมีระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นสูงกว่าในช่วงที่ทดสอบในสนาม จำเป็นต้องกำหนดระดับน้ำใต้ดินในการวิเคราะห์อย่างเหมาะสม ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบกับพฤติกรรมการพิบัติจริง โดยการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) เสมอ



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างผลการทดสอบ Kunzelstab

บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

3.1 ประเภทของความเสียหายทางด้านวิศวกรรมเชิงลาด

จากการศึกษาการพังทลายเชิงลาดจำนวน 74 กรณี ในจังหวัดเชียงใหม่และพิษณุโลกของกรมทางหลวง (2551) แสดงให้เห็นถึงชนิดความเสียหายและสัดส่วนการเกิดปัญหาการพังทลายเชิงลาดทั้ง 4 รูปแบบ ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1.1 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 อย่างไรก็ตาม การพังทลายของลาดหนึ่งอาจเป็นรูปแบบผสมที่ประกอบไปด้วยรูปแบบย่อยต่าง ๆ ที่กล่าวมารวมกันมากกว่าหนึ่งรูปแบบได้ ทั้งนี้กล่าวสรุปได้ว่า น้ำเป็นปัจจัยกระตุ้นหลักที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดความเสียหายเชิงลาด (มากกว่า ร้อยละ 90 ของกรณีศึกษาทั้งหมด)

ตารางที่ 3.1 ประเภทและจำนวนความเสียหายเชิงลาดในจังหวัดเชียงใหม่และพิษณุโลก

บริเวณที่เกิดความเสียหาย	การจัดแบ่งประเภทความเสียหาย	ชนิดความเสียหาย	จำนวนกรณีศึกษา (คิดเป็นร้อยละ)
ลาดเนื้อคันทาง (Back Slope) และ/หรือ ลาดคันทาง (Side Slope)	1. น้ำกัดเซาะบริเวณปลายเชิงลาดคันทาง (Erosion at Toe Slope)	1. น้ำกัดเซาะบริเวณปลายเชิงลาดคันทาง (Erosion at Toe Slope)	20 (27%)
	2. น้ำกัดเซาะผิวหน้าเชิงลาดและไหล่ทางสาเหตุจากน้ำผิวดินและน้ำท่วมทาง (Erosion on Back Slope and Side Slope caused by Surface Water and Overflow)	2. น้ำกัดเซาะบริเวณผิวหน้า (Surface Erosion) 3. น้ำไหลท่วมกัดเซาะลาดคันทาง (Erosion by Overflow from Back Slope or Flooding)	25 (34%)
	3. การเคลื่อนตัวของมวลดินเนื่องจากอิทธิพลของน้ำ และ/หรือ การขาดเสถียรภาพของเชิงลาด (Earth Slip caused by Water and/or Unstable Slope)	4. การเคลื่อนตัวของมวลดินหรือลาดคันทางที่มีสาเหตุมาจากน้ำใต้ดิน และ/หรือ น้ำผิวดิน (Groundwater and/or Surface Water) 5. การเคลื่อนตัวของมวลดินหรือลาดคันทางที่มีสาเหตุมาจากเชิงลาดขาดเสถียรภาพ	23 (31%)

บริเวณที่เกิดความเสียหาย	การจัดแบ่งประเภทความเสียหาย	ชนิดความเสียหาย	จำนวนกรณีศึกษา (คิดเป็นร้อยละ)
		(Earth Slip caused by Unstable Slope)	
ลาดเหนือคันทาง (Back Slope)	4. หินร่วงและเชิงลาดดิน-หินเคลื่อนตัว (Rock Fall and Rock Slide)	6. หินเคลื่อนถล่มเนื่องจากรอยแตกในมวลหิน (Wedge & Plane Slide) 7. หินร่วงจากลาดเหนือคันทางที่มีก้อนหินฝังอยู่ (Boulder Rock Fall) 8. ดินปนหินเลื่อนไหลที่มีสาเหตุมาจากการกัดเซาะผิวหน้าเชิงลาด (Debris or Talus Flow caused by Surface Erosion) 9. หินร่วงจากลาดเหนือคันทางที่เป็นชั้นดิน/หินผุวางสลับชั้นหินแข็ง (Rock Fall caused by Soft and Hard Strata Interbedded)	6 (8%)
รวม			74 (100%)

ที่มา: กรมทางหลวง (2551)

3.2 หลักการแก้ไขปัญหาเบื้องต้นและแบบถาวร

การแก้ไขปัญหาเชิงลาด สามารถแบ่งตามช่วงเวลาในการดำเนินการเป็น 2 รูปแบบได้แก่ การแก้ปัญหาเบื้องต้น และการแก้ปัญหาแบบถาวร

3.2.1 การแก้ปัญหาระยะสั้น (เบื้องต้นหรือชั่วคราว)

เป็นการแก้ไขปัญหาเชิงลาดเบื้องต้นที่เน้นการแก้ปัญหาอย่างทันด่วน เพื่อให้เปิดใช้งานถนนได้เร็วที่สุดและสามารถใช้เส้นทางอย่างปลอดภัย โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การแก้ปัญหาแบบเร่งด่วนและการแก้ปัญหาแบบชั่วคราว

การแก้ปัญหาแบบเร่งด่วน หมายถึง การเข้าดำเนินการในพื้นที่เสียหายอย่างรวดเร็วเพื่อยับยั้งหรือชะลอความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่ให้ลุกลามหรือเสียหายเพิ่มเติม รวมถึงอำนวยความสะดวกและความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ทาง เช่น การเคลื่อนย้ายและเก็บเศษหินที่เคลื่อนตัวมาขวางการจราจร การติดตั้งป้ายเตือนชั่วคราว หากเส้นทางมีความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ทาง เป็นต้น

การแก้ปัญหาแบบชั่วคราว คือการดำเนินการต่อจากการแก้ไขปัญหาแบบเร่งด่วน จะใช้วิธีการที่เหมาะสมกับประเภทการพิบัติ มีจุดประสงค์เพื่อป้องกันปัญหาลุกลาม ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายที่มากขึ้น และใช้งบประมาณที่มากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ผิวทางเกิดรอยแตกร้าว (Tension Crack) เนื่องจากคันดินเคลื่อนตัว หมวด/แขวงทาง จะต้องรีบอุดรอยแตกร้าวเพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าสู่โครงสร้างชั้นทาง เนื่องจากน้ำทำให้กำลังของดินลดลงจนอาจเกิดการเคลื่อนตัวหรือเกิดความเสียหายอื่น ๆ ตามมาได้

1) การแก้ไขปัญหาเบื้องต้น (ชั่วคราว) มีหลักการพิจารณา ดังต่อไปนี้

- มีอายุการใช้งานไม่เกิน 3 ปี
- ทำงานง่าย มีความสะดวกในการดำเนินการ
- มีประสิทธิภาพที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับการลงทุน
- ใช้การประยุกต์วัสดุที่มีในท้องถิ่น
- ใช้เครื่องจักรและแรงงานคนน้อย

2) โดยพิจารณาจากจุดประสงค์ต่าง ๆ ดังนี้

- เพื่อการเปิดการจราจรให้เร็วที่สุดเมื่อมีความเสียหายที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้
- เพื่อซ่อมแซมเมื่อมีความเสียหายเพียงเล็กน้อยแต่ปัญหาสามารถขยายตัวลุกลาม และอาจเป็นสาเหตุให้ถนนไม่สามารถใช้งานได้
- เมื่อเป็นพื้นที่ ที่มีปริมาณการจราจรต่ำ
- กรณีเกิดการพิบัติที่ไม่รุนแรงและไม่ซับซ้อน
- เมื่อสามารถแก้ไขปัญหาได้โดยใช้งบประมาณต่ำ
- เมื่อพื้นที่มีแนวโน้มที่จะเกิดการพังทลายในอนาคตอันใกล้

3) เทคนิคการก่อสร้าง

เนื่องจากจุดประสงค์คือการเปิดการจราจรให้เร็วที่สุดจึงควรใช้เทคนิคที่เรียบง่าย รวดเร็ว และอาจต้องใช้แรงงานคนและวัสดุในพื้นที่เข้าจัดการแก้ไขปัญหาก่อน ทั้งนี้เป็นเพราะความเสียหายอาจทำให้เส้นทางเสียหายจนนำเครื่องจักรหรือวัสดุคุณภาพดี เข้าไปดำเนินการไม่ได้ เมื่อทำการจัดการหน่วยงานได้ระดับหนึ่งแล้ว จึงพิจารณารูปแบบการแก้ไขเชิงลาดเบื้องต้นต่อไปโดยต้องพิจารณาจาก บุคลากร เครื่องจักร และวัสดุในท้องถิ่นเป็นสำคัญ หากมีความเข้าใจในสาเหตุของปัญหาจะช่วยป้องกันการขยายตัวของความเสียหายในบางกรณีช่วยลดความจำเป็นในการแก้ไขเชิงลาดแบบถาวรได้

4) ระยะเวลาดำเนินการ

เมื่อเกิดความเสียหายขึ้น ควรดำเนินการแก้ไขโดยเร็วที่สุด และในขณะเดียวกันควรทำการสำรวจพื้นที่และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาในการหาสาเหตุและการแก้ไข ควบคู่ไปกับการอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้ทางควบคู่ไปด้วย

5) งบประมาณในการออกแบบและก่อสร้าง

เขต/แขวงการทาง ที่รับผิดชอบ ควรรับผิดชอบดำเนินการสำรวจพื้นที่เพื่อประเมินระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นเพื่อทำการเบิกจ่ายงบประมาณในการแก้ไขปัญหา ในกรณีที่ความเสียหายไม่รุนแรงและไม่ซับซ้อน สามารถให้หน่วยงานท้องถิ่นดำเนินการได้ และในกรณีที่ความเสียหายรุนแรงและซับซ้อน งบประมาณเกินระดับเขต/แขวงการทาง จำเป็นต้องใช้การเบิกงบประมาณซ่อมแซมฉุกเฉินจากส่วนกลางเพื่อนำมาใช้สำหรับการแก้ไขเร่งด่วน

6) การประยุกต์ใช้วัสดุก่อสร้างในท้องถิ่น

หน่วยงานท้องถิ่น รวมถึง เขต/แขวงการทาง ควรทำแผนการจัดการในระยะยาวและควรสำรวจและจัดทำฐานข้อมูลวัสดุในท้องถิ่น เช่น แห้งทราย ดิน หิน กรวด ไม้ และพันธุ์ไม้ เพื่อสะดวกในการใช้งานเมื่อมีความต้องการซ่อมแซมเร่งด่วน นอกจากนี้ยังควรวิจัยและพัฒนาวัสดุท้องถิ่นเพื่อใช้แก้ปัญหาและป้องกันปัญหาเชิงลาดรวมถึงการยึดอายุการใช้งาน ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อเชิงวิชาการและปฏิบัติการ และช่วยประหยัดงบประมาณแผ่นดินอีกด้วย

3.2.2 การแก้ไขปัญหาแบบระยะยาว (ถาวร)

เป็นการแก้ไขปัญหา โดยออกแบบให้มีการใช้งานลาด 10 ปีขึ้นไป และจะนำมาพิจารณาใช้เมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้แก้ปัญหาเบื้องต้นแล้ว และยังคงพบว่าจะมีความเสี่ยงในการเกิดการพิบัติ หรือจุดที่เกิดการพิบัติอยู่ในเขตทางที่สำคัญ ซึ่งส่งผลกระทบเป็นวงกว้างต่อทั้งสังคมและเศรษฐกิจ

โดยการแก้ปัญหาในระยะยาวจำเป็นต้องใช้ความรู้ทางด้านต่าง ๆ ซึ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ และออกแบบให้โครงสร้างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจำเป็นต้องใช้องค์ความรู้ด้านต่าง ๆ เช่น วิศวกรรมธรณีเทคนิค การสำรวจพื้นที่เชิงลึก การทดสอบดินทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ วัสดุเชิงสถิติ และเครื่องจักรที่ทันสมัย รวมถึงต้องคำนึงถึงความสวยงามและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยรูปแบบการแก้ไขปัญหาเชิงลาดในระยะยาวมีหลากหลายรูปแบบด้วยกันโดยพิจารณาตามรูปแบบและสาเหตุของการพังทลาย

1) ข้อพิจารณาในการแก้ไขปัญหาเชิงลาดแบบถาวร

- เทคนิคการก่อสร้าง
- ระยะเวลาดำเนินการ
- งบประมาณในการออกแบบและก่อสร้าง
- การประยุกต์ใช้วัสดุก่อสร้างในท้องถิ่น
- ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความสวยงาม

2) เทคนิคการก่อสร้าง

เทคนิคและขั้นตอนการดำเนินการเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญในการออกแบบและก่อสร้างซ่อมแซมเชิงลาดแบบถาวร เนื่องจากลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้น ลักษณะทางธรณีวิทยาข้อจำกัดของพื้นที่ทำงาน แหล่งวัสดุที่จัดหามาใช้ในการก่อสร้าง ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องคำนึงถึงหลักการก่อสร้างและความเป็นไปได้ในการปฏิบัติ แหล่งวัสดุในพื้นที่เป็นเรื่องจำเป็นที่ต้องพิจารณา หากไม่มีวัสดุที่ต้องการ จำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุท้องถิ่นให้ได้มาตรฐาน เพื่อให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง เช่น การผสมดินในแหล่งวัสดุท้องถิ่นกับซีเมนต์เพื่อให้ได้คุณภาพวัสดุตามที่ต้องการ

ในการก่อสร้างที่ซับซ้อน ต้องพิจารณาถึงการใช้เครื่องจักร และความสามารถของผู้ว่าจ้างว่าสามารถดำเนินการได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ โดยเฉพาะการก่อสร้างที่ต้องใช้ความเชี่ยวชาญ เช่น การทำ Soil Nailing, Rock Bolt, Shotcrete, Shear Pin, Screw Pile เป็นต้น

3) ระยะเวลาดำเนินการ

ปัญหาเชิงลาดมักต้องการการแก้ไขอย่างเร่งด่วน หากมีความล่าช้าในด้านงบประมาณ จำเป็นต้องใช้การแก้ปัญหาแบบชั่วคราวมาดำเนินการก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุและความเสียหายรุนแรงมากขึ้น ซึ่งเมื่อเกิดการพิบัติแล้วอาจเกิดซ้ำได้ในช่วงระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นระยะเวลาในการซ่อมแซมจะต้องดำเนินการอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ขั้นตอนสำรวจและทดสอบคุณสมบัติในสนาม การทดสอบในห้องปฏิบัติการ การออกแบบเบื้องต้นและออกแบบรายละเอียด การดำเนินงานเรื่องงบประมาณ และการสรรหาผู้รับจ้างไปจนถึงการดำเนินการก่อสร้าง การแก้ปัญหาเชิงลาดจำเป็นต้องทำอย่างรวดเร็ว แต่คุณภาพของงานก็สำคัญเทียบเท่า จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีกระบวนการควบคุมงานขณะก่อสร้างอย่างใกล้ชิด และมีการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการอย่างเคร่งครัดตามรายการข้อกำหนด

4) งบประมาณในการออกแบบและก่อสร้าง

เป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญมากในการแก้ไขปัญหาเชิงลาดทั้งในส่วนการออกแบบและก่อสร้าง และเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้การดำเนินการล่าช้าและจะส่งผลกระทบต่อในด้านอื่น ๆ ตามมา เช่น จุดที่เกิดความเสียหายเป็นเส้นทางที่สำคัญจะส่งผลต่อสภาพสังคมหรือเศรษฐกิจหากไม่ได้รับการแก้ไขปัญหาอย่างถาวร นอกจากนี้การให้ความรู้และความเข้าใจแก่บุคลากรในเขต/แขวงทาง ที่ดูแลพื้นที่เสี่ยงภัยมีความจำเป็นอย่างมาก เพราะจะช่วยให้บุคลากรที่ทำหน้าที่ได้เข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดี และแก้ปัญหาได้ตรงสาเหตุ ส่งผลให้ช่วยลดงบประมาณในการซ่อมแซมจากปัญหาเชิงลาดที่เกิดขึ้นซ้ำซาก โดยช่วยให้เจ้าหน้าที่รับผิดชอบสามารถประเมินและจำแนกความเสียหายที่เกิดขึ้นว่ามีความซับซ้อนรุนแรงอย่างไร และแจ้งปัญหาเข้าไปที่ส่วนกลางเพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ปัญหาเพื่อหาแนวทางในการซ่อมแซมแก้ไขต่อไป ซึ่งหากได้รับการสำรวจและรวบรวมข้อมูลอย่างถูกต้องและเป็นระบบรวมถึงปัญหาได้รับการแก้ไขอย่างถูกต้อง จะช่วยลดงบประมาณจากการซ่อมแซมซ้ำซากได้

5) การประยุกต์ใช้วัสดุก่อสร้างในท้องถิ่น

การประยุกต์ใช้วัสดุในท้องถิ่นถือเป็นเทคนิคการก่อสร้างอย่างหนึ่งเพราะช่วยให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุได้ โดยในขั้นตอนสำรวจควรเก็บตัวอย่างวัสดุท้องถิ่น เช่นดินในพื้นที่ และหิน เป็นต้น มาทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม เพื่อวิเคราะห์ว่าสามารถใช้เป็นวัสดุเพื่อก่อสร้างได้หรือไม่ หรือในกรณีที่วัสดุในท้องถิ่นคุณสมบัติไม่ผ่านมาตรฐาน จะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อใช้แก้ปัญหาเชิงลาดได้อย่างไร และนอกจากนี้ การบันทึกผลการทดสอบทางวิศวกรรมไว้เป็นฐานข้อมูล จะมีประโยชน์ต่อการพิจารณาเลือกใช้วัสดุในอนาคต

6) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและภูมิทัศน์

การออกแบบแก้ไขปัญหาเชิงลาด ไม่เพียงพิจารณาแต่เสถียรภาพเชิงลาดเพียงอย่างเดียว แต่ยังต้องคำนึงถึง สิ่งแวดล้อม ความยั่งยืน และความสวยงามทางภูมิทัศน์ด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะตามมาในภายหลัง นอกจากนี้ความสวยงามยังเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณา โดยเฉพาะเส้นทางที่มีความสำคัญต้องการความสวยงามเป็นพิเศษเช่น เส้นทางท่องเที่ยว เส้นทางสู่สถานที่สำคัญทางศาสนา พระตำหนัก จุดชมวิว ฯลฯ วิศวกรผู้ออกแบบอาจหารือกับภูมิสถาปนิก (Landscape Architect) ทั้งในขั้นตอนออกแบบและก่อสร้าง

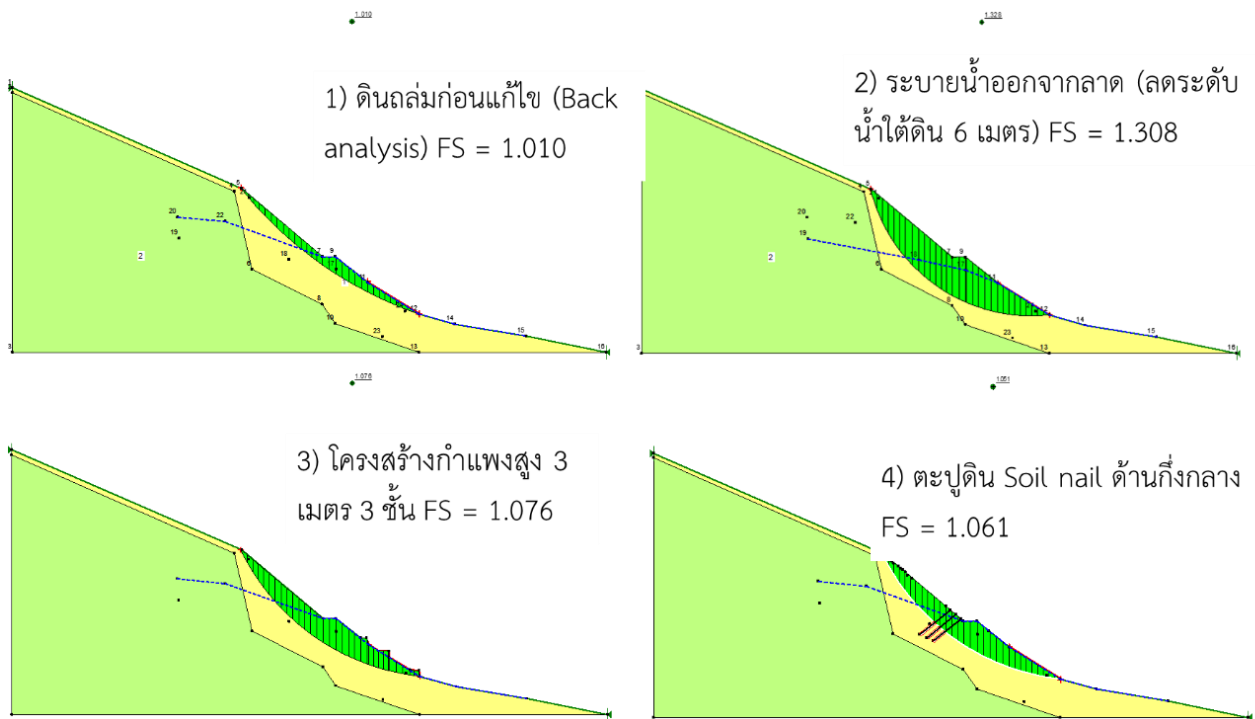
7) โดยการแก้ไขปัญหาเชิงลาดในระยะยาวจะพิจารณาจากกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- เมื่อสิ้นสุดอายุการซ่อมแซมแบบชั่วคราว
- จุดที่เกิดการพังทลายอยู่ในบริเวณโครงข่ายทางหลวงที่สำคัญ มีผลกระทบต่อสภาพเศรษฐกิจและสังคมในพื้นที่
- กรณีเกิดการพิบัติที่มีความรุนแรง และมีความซับซ้อน

3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด (Slope Stability Analysis)

1) วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด

ในการออกแบบแก้ไขเสถียรภาพของลาด ผู้ออกแบบจะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด (Slope Stability Analysis) เพื่อแสดงถึงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของลาด ทั้งในกรณีที่เกิดการพิบัติ (Failure Case) เรียกว่าการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) และวิเคราะห์กรณีที่มีการแก้ไขเสถียรภาพ (Stabilization Case) ซึ่งอาจประกอบไปด้วยการแก้ไขรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเสริมเสถียรภาพของลาดที่คาดว่าจะได้รับเมื่อเลือกใช้เทคนิคใด ๆ ก็ตาม และอาจนำไปเปรียบเทียบกับงบประมาณที่ต้องใช้เพื่อแสดงถึงความคุ้มค่าเหมาะสมของวิธีนั้น ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.1 เห็นได้ว่า การระบายน้ำออกจากลาด เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการเพิ่มค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ดังนั้นในกรณีนี้การจัดการน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน อาทิ การใช้ Horizontal Drain จะเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เป็นต้น



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด (Slope Stability Analysis) เพื่อให้เปรียบเทียบกรณีต่าง ๆ

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการสรุปผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดโดยใช้แนวทางเสริมเสถียรภาพของลาดด้วยวิธีต่าง ๆ

กรณี	อัตราส่วนความปลอดภัย Factor of Safety, FS	% ความปลอดภัย FS ที่เพิ่มขึ้น
1) ดินถล่มก่อนแก้ไข (Back Analysis)	1.010	0
2) ระบายน้ำออกจากลาด (ลดระดับน้ำใต้ดิน 6 เมตร)	1.328	31.5
3) โครงสร้างกำแพงสูง 3 เมตร 3 ชั้น	1.076	6.5
4) ตะปูดิน Soil Nail ด้านกึ่งกลาง	1.061	5.0

ที่มา: อภินิติ และคณะ (2556)

2) วิธีวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด

วิธีวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดมีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้ทั่วไปแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่คือ

1) Limit Equilibrium (LE) และ 2) Stress-Deformation Analysis หรือ Finite Element Method (FEM) สำหรับวิธี LE เป็นที่นิยมใช้เพื่อออกแบบลาดดินและคันดินทั่วไปในงานวิศวกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่คำนวณได้ง่ายกว่าและใช้ค่าพารามิเตอร์ไม่ซับซ้อนนัก อย่างไรก็ตาม วิธี LE จะไม่สามารถใช้คำนวณการเคลื่อนตัวของลาด (Slope Deformation) ได้ และไม่สามารถทำนายพฤติกรรมบางประการของลาดเช่น การพิบัติแบบก้าวหน้า (Progressive Failure) ได้อย่างถูกต้อง แต่ LE ก็เป็นวิธีที่ยังใช้อยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และสามารถวิเคราะห์ได้สะดวกรวดเร็ว

สำหรับวิธี FEM ซึ่งสามารถใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของลาดได้ จะต้องการค่าพารามิเตอร์ของดินอย่างละเอียด เช่นค่า Stiffness ในลักษณะต่าง ๆ และมีขั้นตอนการคำนวณมากยิ่งขึ้น มักใช้วิเคราะห์และออกแบบเสถียรภาพของลาดในงานที่มีความสำคัญหรือมีความซับซ้อน เช่นการเสริมเสถียรภาพโดยใช้ Soil Nail หรือเสาเข็ม Shear Pin รวมไปถึงการถมดินหรืองานขุดในเมืองที่มีสิ่งปลูกสร้างข้างเคียงอยู่มาก และการเคลื่อนตัวของลาดอาจมีผลต่อสิ่งปลูกสร้างและสาธารณูปโภคข้างเคียง

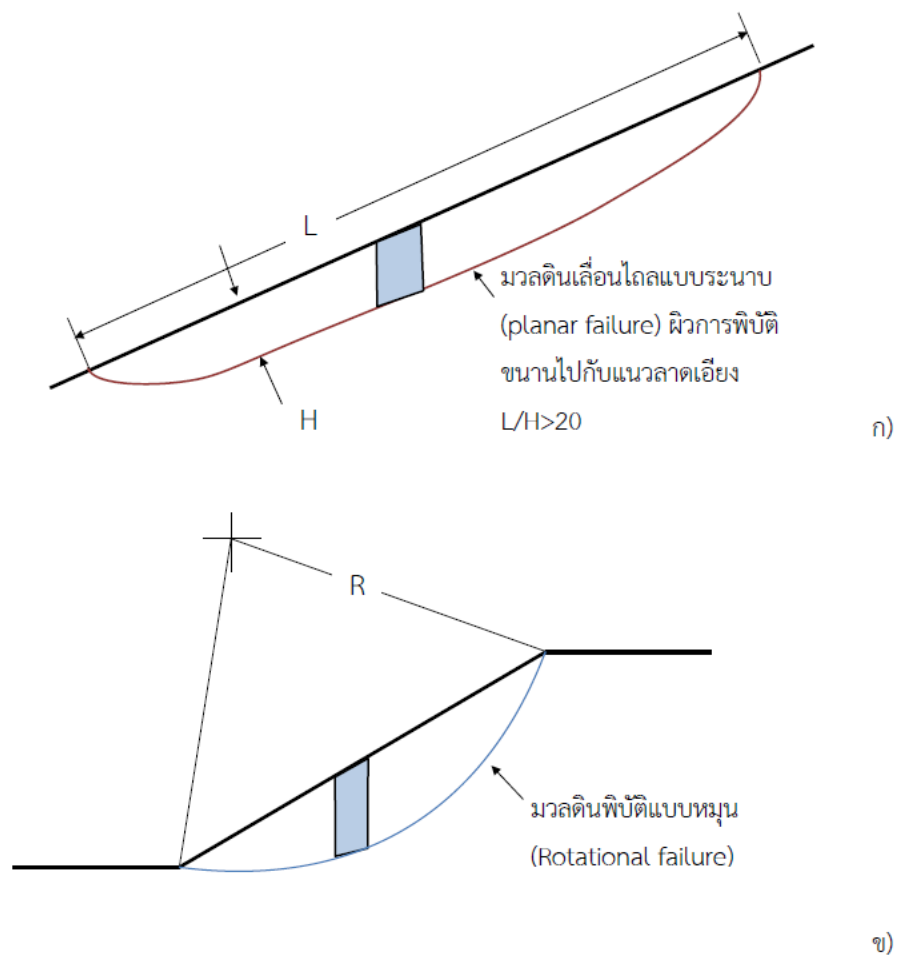
3) ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยวิธี Limit Equilibrium (LE)

ในคู่มือนี้จะอธิบายหลักการของวิธี LE ไว้พอสังเขป แม้ว่าวิธี LE จะมีสมมุติฐานในการคำนวณหลากหลาย อาทิ Modified Bishop, Janbu, Taylor, Morgenstern & Price แต่ขั้นตอนการวิเคราะห์จะเหมือนกันหมด ดังนี้

- กำหนดพื้นผิวการพังทลาย (Failure Surface) ของลาดในการวิเคราะห์ ให้สอดคล้องกับลักษณะการพิบัติจริงในสนาม เช่น ลักษณะพังทลายแบบเลื่อนบนระนาบ (Translational) แบบส่วนโค้งวงกลม (Circular) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 หรืออาจเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular) ซึ่งพบกรณีในชั้นดินไม่เป็นเนื้อเดียว
- คำนวณค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น (Driving Shear Stress หรือ Mobilized Shear Stress) ในลาดดิน โดยใช้หลักสถิตศาสตร์ (Statics) นั่นคือผลรวมของแรงและโมเมนต์เท่ากับศูนย์ ($\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M = 0$) และพิจารณาน้ำหนักกระทำจากลาดและน้ำหนักบรรทุกจากภายนอก ขั้นตอนการคำนวณมักจะแบ่งมวลดินออกเป็นชั้น ๆ หรือที่เรียกว่า Method of Slice
- ประเมินเสถียรภาพของลาด โดยใช้ค่าอัตราส่วนระหว่าง กำลังเฉือนของดิน (Shearing Resistance) ต่อ ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น (Mobilized Shear Stress) นั่นคือค่าอัตราส่วนความปลอดภัยหรือ Factor of Safety FS หากค่า $FS = 1$ นั่นคือลาดดินอยู่ในสภาวะที่ความเค้นเฉือนเท่ากับกำลังของดินที่จะต้านทานได้พอดี นั่นคือเป็นสภาวะที่เกิดการพังทลาย
- ในกรณีที่ไม่ทราบลักษณะพื้นผิวการพิบัติจริง ๆ สนาม เช่น กรณีออกแบบลาดใหม่ จะต้องคำนวณค่า FS ของวงพิบัติหลายรูปแบบให้ครอบคลุม โดยการทำซ้ำไปมา (Iteration) จนกระทั่งพบวงการพิบัติที่ให้ค่า Factor of Safety น้อยที่สุด แต่หากทราบลักษณะชั้นดินที่มีกำลังเฉือนน้อยเช่น ชั้นดินเหนียวบาง (Clay Seam) รอยแตกโบราณ (Relict Joint) ฯลฯ ซึ่งควบคุมลักษณะของ Failure Surface อยู่แล้วก็สามารถกำหนดให้วงพิบัติตัดขนานไปในชั้นดังกล่าวได้ ในทางปฏิบัติจึงมักใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณเช่น โปรแกรม KU-Slope, Slope/W ฯลฯ

ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันกับเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

- รูปทรงของลาด (Geometry) ถูกต้อง
- ค่าสมบัติต่าง ๆ ของดิน (c, ϕ, γ) ที่เลือกใช้เหมาะสมกับสภาวะระบายน้ำและการเคลื่อนตัวของลาด
- กำหนดน้ำหนักบรรทุกภายนอก (External Loads) เช่น น้ำหนักบรรทุก กองวัสดุ แผ่นดินไหว ฯลฯ ครบถ้วน
- กำหนดลักษณะน้ำใต้ดิน (Phreatic Surface) หรือแรงดันน้ำในช่องว่าง (Pore Water Pressure) ในลาดดินได้สอดคล้องกับสภาวะวิกฤติ
- เลือกใช้แบบจำลองและวิธีวิเคราะห์ที่ถูกต้อง



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการพิบัติของลาด ก) ลาดดินอนันต์ (Translational Failure/Infinite Slope Model) และ ข) การพิบัติแบบหมุนหรือส่วนโค้งวงกลม (Rotational Failure /Circular Arc Model)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Gray & Sotir (1996)

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพคือลักษณะน้ำใต้ดิน ซึ่งมีความแปรปรวนได้มากตามฤดูกาลและสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลง ในสภาวะปกติดินในพื้นที่ลาดชันจะระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึก มีแรงดันน้ำติดลบ เรียกว่าแรงดูดในดิน เมื่อฝนตกลงสู่ลาด ค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดินจะค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากน้ำฝนที่ตกลงมาสะสมและในที่สุดเมื่อมวลดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำและแรงดันน้ำมีค่าสูง ลาดจะเริ่มมีการเคลื่อนตัว ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure) เพิ่มมากขึ้นอีก แรงดันน้ำส่วนเกินนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้มวลดินกลายสภาพจากของแข็งเป็นของเหลวและนำไปสู่ดินถล่มแบบไหล (Flow)

4) การพิบัติแบบเลื่อน Translational Slope Failure

เนื่องจากการพิบัติของลาดที่พบบ่อยมักมีระดับดินและมวลดินเลื่อนไถลขนานกับผิวดิน ดังรูปที่ 3.2ก และการพิบัติชนิดนี้อยู่ในวิสัยที่จะแก้ไขได้โดยวิธีปลูกพืชร่วมกับโครงสร้าง หรือชีววิศวกรรมปลูกพืช ซึ่งสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยโดยวิธีลาดอนันต์ (Infinite Slope)

การพิบัติลักษณะ Translational Slide จะมีผิวดินและระนาบการพังที่ขนานกัน จึงเรียกว่าการพิบัติแบบลาดอนันต์ (Infinite Slope) และมีอัตราส่วนระหว่างความลึกและความยาวของดินถล่มมีค่าน้อย ($< 1/10$) ลักษณะการพิบัติแบบลาดอนันต์ที่พบจริงได้แก่

- หินผุหรือดินคงค้างในที่ (Residual Soil) วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็งในแนวเอียง
- มีระนาบชั้นหินที่ไม่แข็งแรง (Weak Rock) หรือแนวชั้นดินเหนียว (Clay Seam) วางตัวในแนวเอียงลงหาลาด
- ชั้นหินลาดเอียงที่ถูกทับถมด้วยดินตะกอนเชิงเขา (Colluvium)
- ลาดดินเนื้อเดียว (Homogeneous) จำพวกดินทราย หรือดินเนื้อหยาบอื่น ๆ เช่น เนินทราย หรือ Sand Dune, ค้นดินทรายถม ฯลฯ

สำหรับสามกรณีแรก ความลึกของแนวการพังหลายชั้นกับลักษณะชั้นดินและความลึกของชั้นหินซึ่งเป็นลักษณะทางธรณีวิทยา ในขณะที่กรณีทีสี่ (ลาดดินทรายเนื้อเดียว) เช่นดินถม ความลึกของแนวการพังหลายจะค่อนข้างตื้นเนื่องจากกำลังเฉือนของดินทรายมีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักกดทับจึงทำให้ดินมีกำลังเฉือนเพิ่มมากขึ้นตามความลึก

5) สมการเสถียรภาพของลาดดินอนันต์

ดังรูปที่ 3.3 กำหนดให้พื้นผิวดินการพิบัติ DC, ผิวดิน AB และระดับน้ำใต้ดิน (สูง h เหนือผิวพิบัติ) ขนานกัน และทำมุมเอียง β กับแนวราบ เมื่อ

γ = ความหนาแน่นรวมของดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ,

γ_w = ความหนาแน่นของน้ำ สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย F ดังสมการ (3)

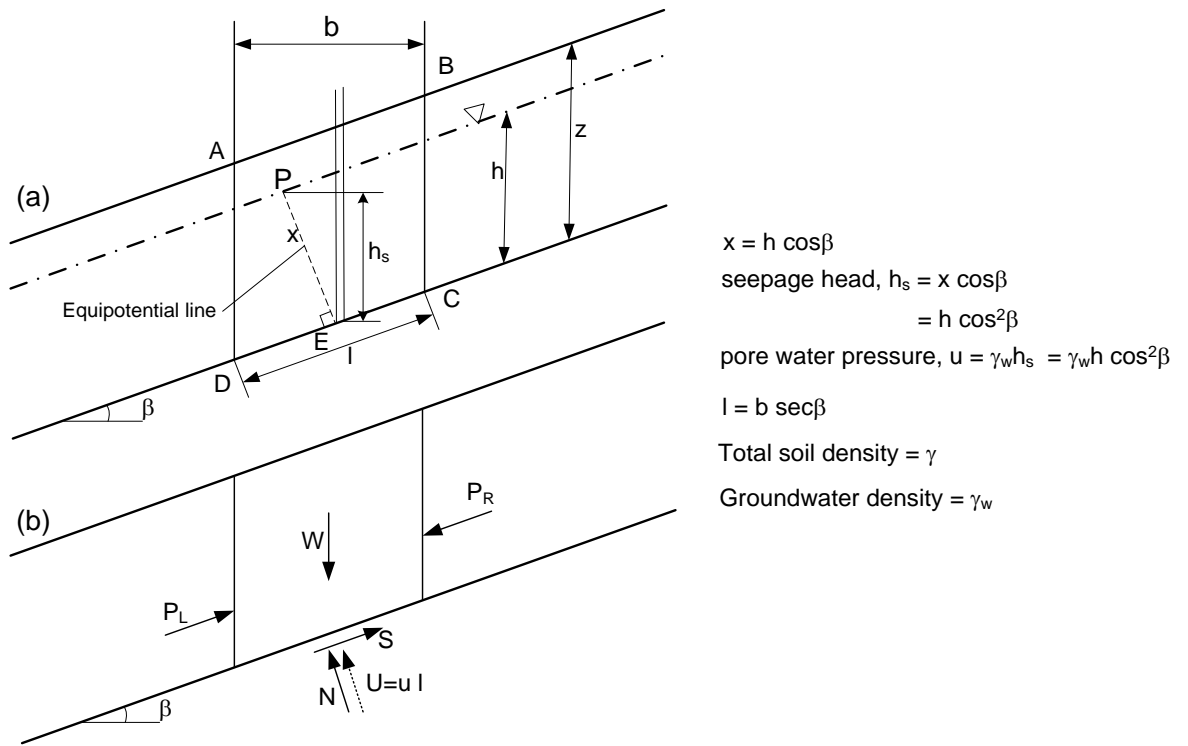
$$F = \frac{c' + (\gamma z - \gamma_w h) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (3)$$

เมื่อเกิดการพิบัติ $F = 1$ และหากกำหนดให้ค่า $c' = 0$ จะสามารถคำนวณค่ามุมเสียดทาน ϕ'

ได้ดังนี้

$$\tan\phi' = \frac{\gamma z \tan\beta}{(\gamma z - \gamma_w h)} \tag{4}$$

สมการที่ (4) ใช้สำหรับวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) เพื่อประมาณค่ามุมเสียดทาน ϕ' ของลาดที่พังทลาย



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์ลาดดินอนันต์
ที่มา: ดัดแปลงจาก Cornforth (2005)

6) อิทธิพลจากระดับน้ำใต้ดินต่อเสถียรภาพของลาดดินอนันต์

จากสมการที่ (3) สามารถสรุปค่าอัตราส่วนปลอดภัยสำหรับลาดดินที่มีน้ำใต้ดินในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

(1) ไม่มีระดับน้ำใต้ดิน $h = 0$

ให้ $h = 0$ และ $c' = 0$

$$F = \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} \tag{5}$$

ในกรณีนี้ลาดจะพังทลาย ($F=1$) เมื่อมุมเสียดทานมีค่าเท่ากับมุมเอียงของลาด เช่น กรณีลาดทรายหลวมในสภาวะแห้งเมื่อนำมากองจะตั้งได้ที่มุมเอียง ซึ่งเรียกว่า Angle of Repose และมีค่าเท่ากับมุมเสียดทานภายใน, ϕ'

เงื่อนไขนี้จะไม่เป็นจริงหากดินอยู่ในสถานะไม่อิ่มน้ำ เนื่องจากดินจะมีแรงคาปิลลารีหรือแรงดูดทำให้เกิดความเชื่อมแน่นประจักษ์ และ $c > 0$)

(2) ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน

เป็นสถานะที่ดินอิ่มน้ำเต็มที่ ระดับน้ำอยู่ที่ผิวดิน และเกิดการไหลขนานไปกับผิวลาดตลอดความลึกจนถึงระนาบพิบัติ (Failure Plane)

ให้ $h = z$ และ $c' = 0$

$$F = \frac{(\gamma - \gamma_w) \tan \phi'}{\gamma \tan \beta} \tag{6}$$

ในสถานะที่ลาดพิบัติ ($F=1$) จะได้

$$\tan \phi' = \frac{\gamma \tan \beta}{(\gamma - \gamma_w)} \tag{7}$$

ตัวอย่างที่ 1: กรณีที่ $\gamma = 1.9 \text{ T/m}^2$ และลาดมีมุมเอียง $\beta = 20^\circ$ องศา หากสมมติให้ลาดดินพิบัติในสถานะที่ $h = z$ (ซึ่งมักเกิดขึ้นในกรณีที่น้ำฝนสะสมลงในดินเป็นปริมาณมาก)

$$\begin{aligned} \tan \phi' &= \frac{1.9 \tan 20^\circ}{(1.9 - 1)} \\ \phi' &= 37.5^\circ \end{aligned}$$

สรุปได้ว่าหากระดับน้ำใต้ดินอยู่ใกล้กับผิวของลาด ลาดจะพังทลายเมื่อมุมเอียง β มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่ามุมเสียดทาน ($\beta \sim \frac{\phi'}{2}$) สำหรับกรณีที่ดินมีค่า $c' = 0$

(3) ระดับน้ำใต้ดินเปลี่ยนแปลง

จากสมการที่ (6) เห็นได้ว่าอัตราส่วนปลอดภัย F มีค่าลดลงเมื่อระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น

ตัวอย่างที่ 2:

$$\begin{aligned} \beta &= 20^\circ \\ c' &= 0, \phi' = 35^\circ \\ z &= 2 \text{ m}, \gamma = 2 \text{ T/m} \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการที่ (6) จะได้

$$F = 1.92 - 0.48h$$

ดังนั้น หาก

$$h = 1 \text{ เมตร}, F = 1.44$$

$$h = 1.5 \text{ เมตร}, F = 1.20$$

ตัวอย่างข้างต้นยังแสดงให้เห็นว่าการลดระดับน้ำใต้ดินสามารถช่วยเสริมเสถียรภาพให้เพิ่มขึ้นอย่างน้อยสำคัญ

ตัวแปรที่แสดงถึงระดับน้ำใต้ดินมีหลายรูปแบบ เช่น

- อัตราส่วน, $r = h/z$
- แรงดันน้ำในช่องว่าง, Pore Water Pressure, $u = \gamma_w h_s = h \cos^2 \beta$
- สัมประสิทธิ์แรงดันน้ำ, Pore Water Pressure Coefficient, $r_u = \frac{u}{\gamma z}$

7) การวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) และการประมาณค่ากำลังเฉือน

สมการ (7) สามารถใช้แทนค่าสำหรับวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อหาลำดับเฉือนสำหรับใช้ออกแบบเสถียรภาพของลาดได้ $F = 1$, และ $r = h/z$ เมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (7) จะได้

$$\tan\phi' = \frac{2 \tan\beta}{(2-r)} \tag{8}$$

ตัวอย่างที่ 3:

กำหนดให้ ความลึกของแนวพังทลาย $Z = 2$ เมตร

ความสูงของน้ำใต้ดินระหว่างการพังทลาย $h = 1$ เมตร

มุมเอียงของลาด $\beta = 20$ องศา

$$\tan\phi' = \frac{2 \tan 20^\circ}{(2 - 0.5)} = 0.4853$$

$$\phi' = 25.9$$

เมื่อทราบค่ามุมเสียดทาน ϕ' จากการวิเคราะห์ย้อนกลับแล้ว จะสามารถนำค่านี้ไปใช้ออกแบบแนวทางเสริมเสถียรภาพ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3 แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย F ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน โดยแทนค่า $\gamma = 2\gamma_w$, ในสมการที่ (6) จะได้

$$F = \left[1 - \frac{h}{2z} \right] \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} \tag{9}$$

ตัวอย่างที่ 4:

จากตัวอย่างที่ 3 หากเลือกใช้คูระบายน้ำ (Trench Drain) สำหรับลดระดับน้ำใต้ดินลงได้จาก $h = 1$ เมตร เป็น 0.5 เมตร จะสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนความปลอดภัยได้เป็นเท่าใด?

$$SSR = \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} = \frac{\tan 25.9^\circ}{\tan 20^\circ} = 1.333$$

$$F = \left[1 - \frac{0.5}{2 \cdot 2} \right] \cdot 1.333 = 1.17$$

ตัวอย่างที่ 5:

จากตัวอย่างที่ 3 หากต้องการให้ค่า Factor of Safety, F เพิ่มขึ้นเป็น 1.30 จะต้องลดระดับน้ำใต้ดินอีกกี่เมตร?

จากสมการ (9)

$$\frac{h}{2z} = 1 - \frac{F}{\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta} \right)} = 1 - \frac{1.30}{1.333} = 0.0248$$

$$\frac{h}{z} = 0.0495$$

$$h = 0.0495 \cdot 2 = 0.1 \text{ เมตร}$$

ดังนั้นจึงต้องลดระดับน้ำใต้ดินลง $= 1 - 0.1 = 0.9$ เมตร เพื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเป็น 1.30

ตัวอย่าง (3) ถึง (5) แสดงกระบวนการคิดเบื้องต้นสำหรับสำรวจและออกแบบเพื่อเสริมเสถียรภาพของลาดระดับต้น โดยใช้การคำนวณย้อนกลับและกำหนดให้ค่า $c' = 0$ ทั้งนี้เงื่อนไข $c' = 0$ นี้เป็นจริงสำหรับดินทรายหลวม, ดินเหนียว Normal Consolidated Clay, หรือ ดินเหนียวที่ถูกอัดเกินตัว (Overconsolidated Clay) ซึ่งมีรอยแตกร้าว (Fissured) และถูกเฉือนถึงสภาวะวิกฤติ (Critical State) หรืออ่อนตัวเต็มที่ (Fully Soften) และรวมไปถึงดินเหนียวที่ถูกเฉือนจนถึงสภาวะ Residual State

8) สำหรับการวิเคราะห์ในงานแก้ไขดินพังทลายมีประเด็นที่สำคัญดังนี้

- เนื่องจากค่าพารามิเตอร์กำลังเฉือนของดินมี 2 ส่วน คือ c' และ ϕ' เมื่อคำนวณ Back Analysis สามารถใช้ค่า c', ϕ' ได้หลายค่าเพื่อให้เงื่อนไข $F = 1$ ในการคำนวณจึงควรนำสมบัติพื้นฐานของดินและธรณีวิทยาเข้ามาพิจารณาประกอบด้วย โดยอาจกำหนดค่า ϕ' ขึ้นมาก่อนแล้วจึงคำนวณค่า c' จาก Back Analysis
- ความถูกต้องในการวิเคราะห์ย้อนกลับ ขึ้นกับระดับน้ำใต้ดินและแรงดันน้ำที่เลือกใช้เป็นอย่างมาก จากงานวิจัยในอดีต Jotisankasa et al. (2009), จิตินา และอภินิติ (2554), อรรถพล และคณะ (2555), ไกรโรจน์ (2556) พบว่าแรงดันน้ำมีการเปลี่ยนแปลงได้มากตามฤดูกาล โดยมักจะเพิ่มสูงขึ้นถึงจุดวิกฤติเมื่อปริมาณน้ำฝนมากกว่า 100 มม./วัน และจะระบายออกไปเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นการวัดค่าระดับน้ำใต้ดินในช่วงที่ฝนยังไม่ตกจนถึงจุดวิกฤติ จึงไม่อาจเป็นตัวแทนที่ดีสำหรับวิเคราะห์ย้อนกลับได้จากงานวิจัยในอดีตพบว่าค่า r_u ประมาณ 0.40-0.50 เป็นค่าวิกฤติที่ตรวจพบทั่วไปในประเทศไทย
- เนื่องจากมีความไม่แน่นอนในสมมติฐานหลายประการ ในการวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อหาค่า c', ϕ' ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบกำลังเฉือนในห้องปฏิบัติการด้วยเพื่อเปรียบเทียบกันเสมอ

สรุปได้ว่าการวิเคราะห์แบบลาดดินอนันต์ (Infinite Slope) มีความสะดวกในการคำนวณเบื้องต้นเพื่อให้ทราบแนวโน้มของเสถียรภาพของลาด ประเมินค่ากำลังเฉือนและ แนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพด้วยวิธีต่าง ๆ ในเบื้องต้น อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดี สภาพการพิบัติในสนามที่แท้จริงอาจมีลักษณะหมุน (Rotational) หรือแบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular) และมักจะมีลักษณะเป็น 3 มิติ ซึ่งในกรณีการวิเคราะห์และออกแบบลาดหรือโครงสร้างที่มีความสำคัญจะต้องใช้วิธีวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากยิ่งขึ้น

บทที่ 4 การประยุกต์ใช้พรรณพืชและชีววิศวกรรมปฐพี (Bioengineering)

สำหรับวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

4.1 แนวคิดและหลักการออกแบบ

เนื่องจาก การกัดเซาะ (Soil Surface Erosion) และ ดินถล่ม (Landslide) มีการทวีความรุนแรงมากขึ้นทั่วทุกพื้นที่ และในหลายพื้นที่ที่มีการเสียหายซ้ำซ้อนเกิดขึ้นบ่อยครั้ง จึงมีความต้องการ การปรับปรุงเสถียรภาพของลาด (Slope Stabilization) เพื่อเข้าไปซ่อมแซมและป้องกันการพังทลายที่เหมาะสมกับในแต่ละสภาพพื้นที่ และยังคงคำนึงถึง งบประมาณ และเทคโนโลยีการก่อสร้างและการบำรุงรักษาที่สามารถปฏิบัติงานได้จริง นอกจากนี้ความสวยงามและกลมกลืนเข้ากับสภาพแวดล้อมและความยั่งยืนก็เป็นเรื่องสำคัญ จึงมีการใช้พันธุ์พืชเพื่อช่วยแก้ปัญหาเชิงลาดร่วมกับโครงสร้างทางวิศวกรรม โดยเรียกว่า ชีววิศวกรรมปฐพี (Soil Bioengineering)



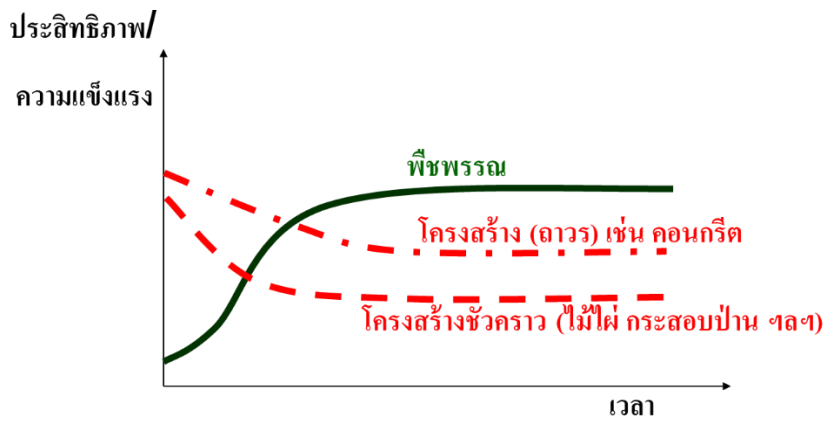
ก)



ข)

รูปที่ 4.1 การกัดเซาะที่ผิวหน้าของลาดดิน ก.) บริเวณเนินนางพญา จ.จันทบุรี ข.) การกัดเซาะที่ลาดเหนือคันทางริมถนนในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ จ.นครราชสีมา

ชีววิศวกรรมปฐพี เป็นการใช้อนุพันธุ์พืชเพื่อแก้ปัญหาเชิงลาด โดยทั่วไปแล้วจะเป็นการใช้พืชพรรณและวัสดุในพื้นที่ ช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศและภูมิประเทศที่เหมาะสม และยังช่วยลดต้นทุนการก่อสร้าง ดังนั้นการใช้ชีววิศวกรรมปฐพีในการแก้ไขปัญหาเชิงลาดมักมีราคาถูกกว่าการใช้โครงสร้างทางวิศวกรรมเพียงอย่างเดียว โดยทั่วไปแล้วพืชบนลาดดินมีแนวโน้มที่แข็งแรงขึ้นตามเวลาจากการเติบโตและรากที่ยังลึกขึ้น แต่ในทางกลับกันโครงสร้างทางวิศวกรรมจะเสื่อมสภาพไปตามระยะเวลาที่ผ่านมา ดังแนวคิดที่สรุปในรูปที่ 4.2 และนอกจากนี้ยังมีการใช้โครงสร้างที่มีอายุจำกัด (Limited Life Structure) เช่น กระสอบป่าน รั้วไม้ไผ่ ผ้าห่มดิน ฯลฯ ซึ่งจะมีอายุการใช้งานเพียงชั่วคราว โดยทั่วไปทำหน้าที่คอยอนุบาลให้พืชเติบโตในช่วงเริ่มต้น และวัสดุเหล่านี้จะย่อยสลายไปตามเวลาและพืชจะค่อย ๆ ปกคลุมแทนที่วัสดุเหล่านี้ โดยยึดตามหลักการทดแทนสังคมพืช (Plant Succession) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะพันธุ์พืชตามเวลาจนเข้าสู่ภาวะสมดุล เช่นในช่วงแรกใช้พืชเบิกนำซึ่งโตเร็ว อายุสั้น ต้องการแร่ธาตุน้อย และต้องการแสงมาก เพื่อปกคลุมลาดดินและเพิ่มแร่ธาตุและทำให้พื้นที่ที่มีสภาพเหมาะสมแก่การเติบโตของพืชมากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปจะเริ่มมีพืชท้องถิ่นเข้ามาแทนที่และหมุนเวียนจนเข้าสู่ภาวะสมดุลของระบบนิเวศบริเวณนั้น ๆ



รูปที่ 4.2 แนวความคิดการประยุกต์ใช้พืชพรรณร่วมกับโครงสร้าง
ที่มา: อภินิติ (2556)

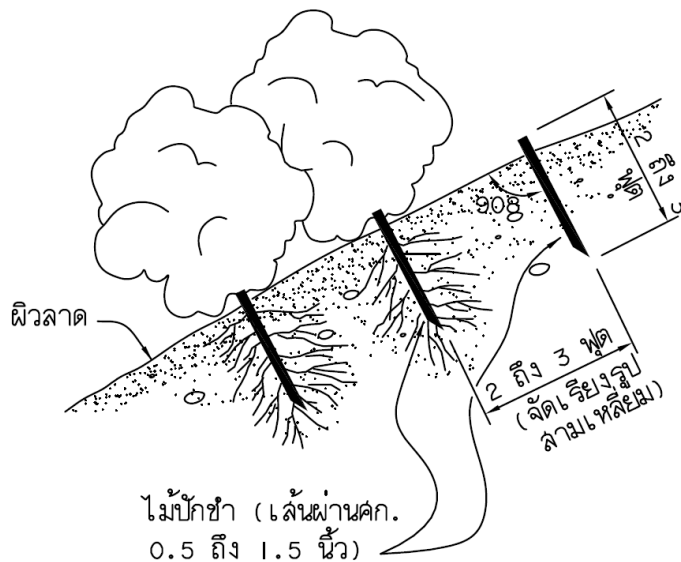
อย่างไรก็ตาม วิธีชีววิศวกรรมปฐพีจะสามารถป้องกันการกัดเซาะและดินถล่มในระดับตื้น (Shallow Landslide) ที่มีความลึกของแนวพังทลายไม่เกิน 2-3 เมตร ได้เท่านั้น และในสถานการณ์พิบัติที่มีความลึกของแนวพังทลายมากกว่า 2 เมตรขึ้นไปหรือดินถล่มชนิดลึก (Deep-Seated Landslide) การปลูกพืชเพียงอย่างเดียวจะไม่เพียงพอจำเป็นต้องใช้โครงสร้างทางวิศวกรรมร่วมด้วย



รูปที่ 4.3 การพังทลายของมวลดิน (Mass Movement) (ก) ดินถล่มแบบลึก (Deep-Seated Landslide) บ้านหน้าถ้ำ จ.สุราษฎร์ธานี 2554 (มูลนิธิพลังที่ยั่งยืน) (ข) ดินถล่มแบบตื้น (Shallow Landslide) อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์
ที่มา: อภินิติ (2556)

แนวความคิดการปลูกพืชเพื่องานวิศวกรรมจะแตกต่างจากการปลูกพืชโดยทั่วไปเนื่องจากสภาพพื้นที่ในบางกรณีจะยากต่อการปลูกพืช เช่นมีความลาดชันมากและมีการกัดเซาะมากกว่าปกติ และโดยทั่วไปการปลูกพืชอย่างเดียวมักไม่เพียงพอต่อการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพ โดยจะการใช้การปลูกพืชร่วมกับโครงสร้างอื่น ๆ เช่น การปลูกพืชด้วยวิธีต้นกล้าและเมล็ดอาจไม่สามารถต้านทานการกัดเซาะในช่วงการปลูกใหม่ อาจใช้ร่วมกับวัสดุคลุมดินอื่น ๆ ร่วมด้วยหรือใช้วิธีการปลูกพืชด้วยเทคนิคชีววิศวกรรม เช่น Live Stake เป็นต้น

ไม้ปักชำ (Live Stake) เป็นการปักชำท่อนไม้ลงไปในตลาดดินระดับลึก ทัวไปใช้ไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 – 1.5 นิ้วความยาวประมาณ 60 - 100 เซนติเมตร จัดอยู่ในจำพวกหมุดยึดดินขนาดเล็ก (Mini Soil Nail) ซึ่งสามารถเสริมกำลังลาดดินได้ตั้งแต่เริ่มปลูก ในกรณีดินอ่อนสามารถใช้ค้อนประเภท (Deadblow Hammer) ตอกไม้ปักชำลงไปได้ แต่ในกรณีมีหินปนหรือดินแข็ง ให้ใช้วิธีชูดหลุมฝังท่อนพันธุ์เพื่อหลีกเลี่ยงท่อนพันธุ์เสียหาย โดยการปักชำจะทำการฝังเป็นแนวขวางแนวลาดเอียง โดยฝังลึกประมาณ 3/4 - 4/5 ของความยาวกิ่งพันธุ์แล้วกลบดินโดยรอบให้แน่น สังเกตให้ทิศทางของกิ่งสามารถงอขึ้นด้านบนได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้แทนหมุดยึดวัสดุคลุมดิน เช่น ผ้าห่มดิน ได้เช่นกัน



รูปที่ 4.4 การติดตั้งไม้ปักชำ (Live Stake) (รากและใบที่แสดงในรูปเกิดขึ้นภายหลังการปักชำ)
ที่มา: อภินิติ (2556)

การใช้เมล็ดพันธุ์ (Seeding) นิยมใช้ในการปลูกพืชระดับต่ำเนื้ออ่อน (Herbaceous Plants) และต้นไม้ (Woody Plants) จัดว่าเป็นวิธีที่ถูกลงและสะดวก (อภินิติ, 2556) สามารถปลูกได้หลายวิธี เช่น การพ่นเมล็ด (Hydroseeding) การหยอดลงหลุม เป็นต้น แต่มีข้อเสียคือจำเป็นต้องมีการดูแลที่ดีในช่วงต้น เนื่องจากอัตราการรอดต่ำ อาจถูกพัดพา หรือถูกทำลายจากความแห้งแล้ง รวมถึงสัตว์รบกวน และยังไม่สามารถป้องกันการกัดเซาะได้ในช่วงแรกของการปลูก โดยทั่วไปแล้วจะใช้ร่วมกับวิธีทางวิศวกรรมอื่น เช่นการปลูกร่วมกับผ้าห่มดิน หรือ Geocell เป็นต้น

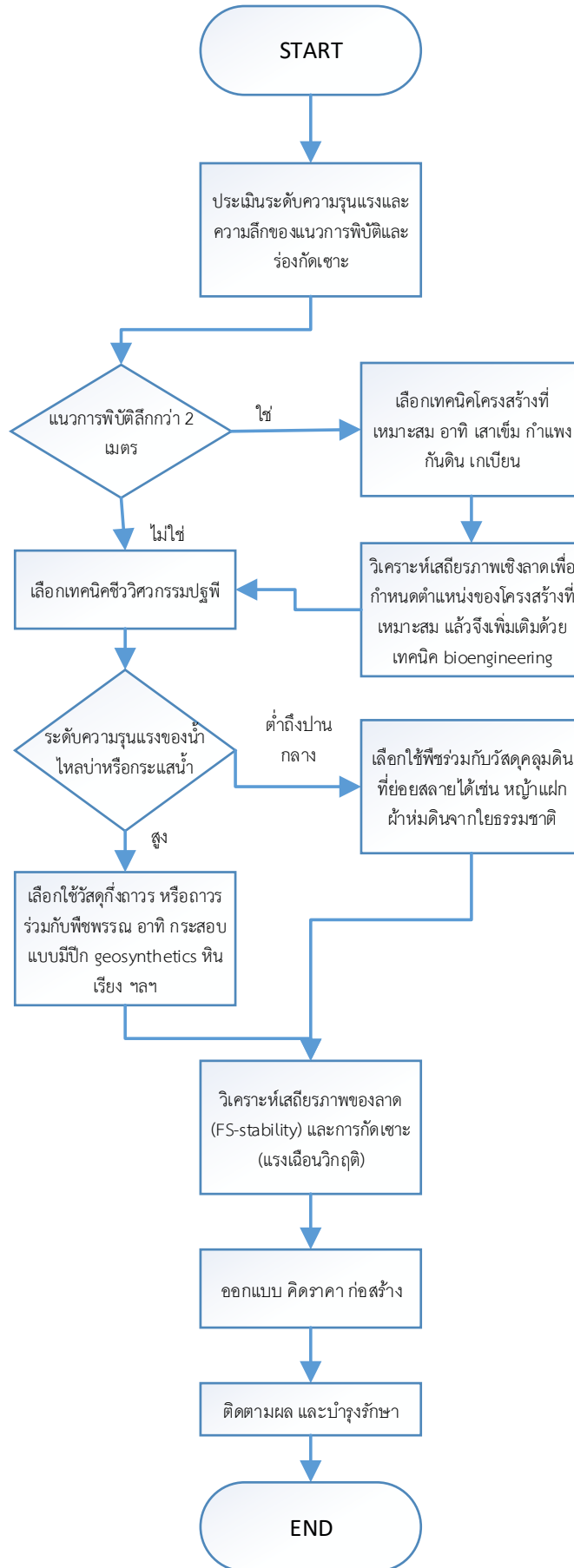
การปลูกด้วยต้นกล้า เป็นวิธีที่ปลูกต้นกล้าในโรงเรือนเพื่อให้มีความแข็งแรงประมาณหนึ่งแล้วจึงย้ายไปปลูกในจุดที่ต้องการ โดยการชำและการเคลื่อนย้ายมีหลายวิธีได้แก่ การเคลื่อนย้ายแบบต้นกล้ารากเปลือย ต้นกล้าชำแบบถุง และต้นกล้าชำในท่อซึ่งมีข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป ในแต่ละประเภทจะทำการปลูกในโรงเพาะชำ โดย

- ต้นกล้ารากเปลือย ควรมึรากที่แข็งแรงแล้วพอสมควรเนื่องจากจะมีความเสี่ยงรากแห้งตาย ขณะขนย้าย ไม่เหมาะกับต้นไม้ที่ระบบรากไม่แข็งแรง แต่มีข้อดีคือสามารถขนย้ายไปในพื้นที่สูงชันได้ ที่ละมากๆ

- ต้นกล้าชำถุง จะทำการอนุบาลจนโตในถุงดำและเคลื่อนย้ายพร้อมถุงซึ่งทำให้รากถูกรบกวนน้อยกว่าแต่มีอัตราการรอดสูงกว่า และราคาสูงกว่าเช่นกัน

- การชำในท่อ จะทำการปลูกในท่อยาวในแนวตั้งซึ่งจะช่วยให้รากเจริญเติบโตในแนวยาวซึ่งทำให้รากหยั่งลงไปได้ลึกมากขึ้น

แผนผังขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีวิศวกรรมปฐพีแสดงดัง รูปที่ 4.5 เห็นได้ว่าการประเมินระดับความรุนแรงของการพังทลายของดินมีความสำคัญมากในการเลือกวิธีวิศวกรรมปฐพีที่เหมาะสม และการเลือกวิธีทางวิศวกรรมเพื่อนำมาผสมผสานกับเทคนิคพีชในรูปแบบต่าง ๆ อย่างเหมาะสม



รูปที่ 4.5 แผนผังขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีชีววิศวกรรมปฐพี (Flow-Chart for Soil-Bioengineering Design)

4.2 การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

โดยทั่วไปแล้วจะใช้พันธุ์พืชท้องถิ่นเพื่อความเหมาะสมกับสภาพในพื้นที่ แต่นอกจากนี้ยังมีปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการปลูกพืชยกตัวอย่างเช่น สภาพภูมิอากาศ ปัจจัยเฉพาะที่ (Microsite Parameter) เช่น ชนิดของดิน ระดับความสูงของพื้นที่ ทิศทางของแสงแดด และสภาพความเป็นพิษ (Toxicity) ของดิน (อภินิติ, 2556) ดังนั้นเพื่อให้วิธีชีววิศวกรรมได้ผลดีจึงควรคำนึงถึงรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

4.2.1 การเลือกเทคนิคในการปลูกพืชด้วยวิธีชีววิศวกรรมปฐพี (Soil Bioengineering)

เทคนิคการปลูกพืชทางชีววิศวกรรมมีหลากหลายวิธีตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ซึ่งการเลือกใช้วิธีให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพควรพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (อภินิติ, 2556)

- ชนิดของลาดดิน เช่น ลาดเชิงเขา ลาดตลิ่งแม่น้ำ อ่างเก็บน้ำ ลาดดินตัด ลาดดินถม เป็นต้น
- ความชันและความสูงของลาด
- ความลึกของชั้นดิน
- ชนิดของดิน (การกัดเซาะได้ (Erodibility) และกำลังเฉือน)
- การเสริมเสถียรภาพที่ฐานลาด
- แรงดันดินด้านข้าง
- ลักษณะทางอุทกวิทยา

4.2.2 การเลือกพันธุ์พืช

ควรใช้พันธุ์พืชในท้องถิ่น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพืชบริเวณใกล้เคียงมักจะเป็นพันธุ์พืชที่เหมาะสมในการปลูกพืชทางชีววิศวกรรม ยิ่งสภาพแวดล้อมของพืชที่เลือกใช้ใกล้เคียงกับสภาพพื้นที่ก่อสร้างเท่าใดจะยิ่งเพิ่มโอกาสรอดของพืชมากขึ้นเท่านั้น ทั้งความลาดเอียง ภูมิอากาศ ระดับความสูง และชนิดของดินในพื้นที่ เป็นต้น และควรคำนึงถึงกฎระเบียบการเลือกใช้พันธุ์พืชในท้องถิ่นและนอกท้องถิ่น (Exotic Species) เนื่องจากในบางพื้นที่อาจไม่สามารถปลูกพืชบางชนิดเพราะอาจสร้างปัญหาเป็นพาหะโรคพืชหรือกลายเป็นวัชพืชหรือพืชรุกรานได้

นอกจากนี้พืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะแตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้พันธุ์พืชควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานทางวิศวกรรม โดยสามารถจำแนกคร่าว ๆ ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 บทบาทของพืชในการเสริมเสถียรภาพของลาดและปรับปรุงพื้นที่

หน้าที่	ลักษณะของพืชที่ต้องการ
<p>ดักและรั้งตะกอน</p> <p>Capture and Restrain</p>	<p>ลำต้นและก้านแข็งแรง ขึ้นเป็นกอแน่น มีความยืดหยุ่น, ก้านเติบโตเร็ว; สามารถแตกกอและโตขึ้นใหม่ได้เมื่อเสียหาย, แพร่พันธุ์ได้เร็วจากท่อนพันธุ์ (Cuttings) และหน่อ (Root Suckers)</p>
<p>ปกคลุมและกำบัง</p> <p>Cover and Armour</p>	<p>เรือนยอดอยู่ต่ำ หนาแน่น และแผ่ขยายออกด้านข้าง, การเติบโตมีลักษณะกระจายออกด้านข้าง, และ เติบโตบนผิวดิน เช่น หญ้า, พืชตระกูลถั่ว (Legumes) หรือ ไม้พุ่มเตี้ย (Forbs) รากมีลักษณะเป็นผืน</p>
<p>เสริมแรงและค้ำพุง</p> <p>Reinforcement and Support</p>	<p>รากมีความแข็งแรง หยั่งลึก และมีหลายราก, รากงอกเร็ว, อัตราส่วนระหว่างชีวมวลของรากและลำต้น Root/Shoot Biomass Ratio มีค่าสูง, การคายระเหยที่ต่ำมีค่าสูง</p>
<p>ปรับสภาพพื้นที่และนิเวศน์</p> <p>Improve Habitat</p>	<p>ช่วยอนุรักษ์ดินและน้ำ, ช่วยการพัฒนาหน้าดินจากอินทรีย์วัตถุ, ช่วยตรึงไนโตรเจน</p>

ที่มา: อภินิติ (2556)

4.2.3 การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ

ควรตรวจสอบเพื่อควบคุมคุณภาพของงานในช่วงต่าง ๆ ของการก่อสร้างดังนี้ (อภินิติ, 2556)

ก่อนการก่อสร้าง

- เลือกพันธุ์พืชให้ตรงตามข้อกำหนด และเหมาะสม
- ระบุตำแหน่งและจัดหากิ่งพันธุ์และพืชพรรณ
- กำหนดขอบเขตพื้นที่ก่อสร้าง
- ทำรั้วป้องกันในพื้นที่ ที่มีความเสียหายหรือต้องการป้องกันเป็นพิเศษ
- ตรวจสอบการเตรียมพื้นที่ดังนี้
- แผนผังพื้นที่ โดยแจกแจง Layout ในแต่ละส่วนให้ชัดเจน
- รายละเอียดงานชุด เช่น ขนาดของชั้นในงานชุด (Bench Size) รูปร่าง มุมเอียง
- การเตรียมพื้นที่ ได้แก่ การเคลียร์พื้นที่ และ ปรับความชัน
- การทิ้งวัสดุส่วนเกิน เช่น กรวด ดิน
- พิจารณาว่าจะเก็บพืชในพื้นที่ไว้หรือเคลื่อนย้ายออก
- ตรวจสอบคุณภาพของวัสดุปลูก
- การจัดเก็บกองวัสดุสำหรับการก่อสร้างที่เหมาะสม
- จัดเตรียมระบบให้น้ำแก่พืชในช่วงแรก ที่จำเป็นต้องดูแลเป็นพิเศษ

ระหว่างการก่อสร้าง

- ตรวจสอบส่วนประกอบต่าง ๆ ในการก่อสร้าง ในทุกขั้นตอนดังนี้
- มุมเอียงในการวาง วิธีการตอกและการเรียงซำกึ่ง (Live Cutting)
- คุณสมบัติและการใช้งาน วัสดุถม/หิน
- ปูย และ ไบโอชาร์ วิธีและปริมาณที่ใช้
- การจัดเก็บรักษาพีชให้พร้อมสำหรับการใช้งาน
- จัดเตรียมพอลิเมอร์อุ้มน้ำ
- การจัดเตรียมร่อง (Trench) และชั้นบันได (Bench) ในลาด ตามรายละเอียดที่
ออกแบบ
- การติดตั้งไม้ปักซำ (Staking)
- การตัดแต่ง (Pruning)
- จัดเตรียมการบำรุงรักษาทั้งระหว่างก่อสร้างและภายหลังก่อสร้างให้เพียงพอ
- ตรวจสอบเพื่อควบคุมคุณภาพประจำวัน
- ตรวจสอบไม้ปักซำที่ได้ติดตั้ง และกำจัดส่วนที่ไม่มีคุณภาพออกไป
- ตรวจสอบบริเวณที่จัดเก็บรักษาพีช
- ดูแลพีชพรรณให้สดใหม่และแข็งแรงอยู่เสมอ

ช่วงแรกของการเติบโตของพีช

- ในช่วงสองเดือนแรก ตรวจสอบทุกสองสัปดาห์ สังเกตการรบกวนโดยศัตรูพืช ความชื้นดิน
และอื่น ๆ
- ในช่วงหกเดือนถัดไป ตรวจสอบทุกเดือนและจดบันทึกบริเวณที่พีชเติบโตไม่ดี
- ในช่วง 2-5 ปีแรก จะทำการปลูกซ่อมหรือซ่อมแซมส่วนอื่น ๆ ทุก ๆ 6 เดือน
- ควรพิจารณาตรวจสอบเป็นพิเศษ ในช่วงฤดูแล้งจัด หรือช่วงฝนตกหนัก

การตรวจสอบขั้นสุดท้าย

ควรจะตรวจสอบครั้งสุดท้าย 2-5 ปีหลังจากการปลูกแล้วเสร็จ ซึ่งต้นไม้ควรจะโตขึ้นอย่าง
สมบูรณ์เต็มที่แล้วในเวลานั้น โดยมีแนวทางการประเมินความสำเร็จดังนี้

- สภาพที่เติบโตของพีชที่สมบูรณ์คิดเป็นร้อยละของพื้นที่ทั้งหมด หมายถึงพีชที่มีพัฒนาการ
ของทั้งใบและระบบรากโดยรวม Live Staking ควรจะมีอัตราการรอด 70-100%
- พีชควรจะเติบโตต่อเนื่องในพื้นที่และไม่มีช่องว่างขนาดกว้างกว่า 60 ซม. หากมีควร
ปลูกซ่อม

4.3 การบำรุงรักษา

หากมีการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพที่ดี ในสภาวะปรกติจะมีการดูแลและบำรุงรักษาไม่มากนัก อาจจะมีเพียงการกำจัดวัชพืชหรือการลิดกิ่ง (Pruning) เพียงเท่านั้น แต่ในบางกรณีก็จำเป็นต้องลดการแข่งขันของพืชเพื่อกระตุ้นให้เกิดการเติบโตขึ้นใหม่หรือเพื่อให้รับแสงแดดได้ดีขึ้น อาจต้องใช้การตัดแต่งที่มากขึ้น และในกรณีที่มีสภาวะไม่ปกติเช่น มีพายุ ฝนตกหนัก ความแห้งแล้ง หรือการรบกวนจากสัตว์ป่า ควรได้รับการแก้ไขทันที เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับลาดดิน บางกรณีการบำรุงรักษาอาจใช้เวลา 1-2 ปี กว่าพืชจะขึ้นทดแทน

แนวทางการบำรุงรักษา

- ไม้ปักชำเดิมที่ตายไปและไม่มีรากงอกแทนที่ด้วยไม้ปักชำใหม่หรือ ใช้ต้นกล้าที่มีรากแล้วจึงนำมาปลูก
- เติมดินถม กระจายดิน ที่ร่องน้ำที่ถูกกัดเซาะ Rills/Gullies
- ควบคุมแมลง โรคพืช และวัชพืช
- ทำรั้วป้องกันสัตว์ป่าหรือนุขย์เข้ามาทำลาย
- ทำแนวกันไฟ

ในบางกรณี ที่มีต้นไม้ที่มีความสูงบนลาด อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินได้ หรืออาจบดบังทิวทัศน์และทัศนวิสัยของผู้ใช้ทาง จำเป็นต้องมีการตัดแต่งหรืออาจใช้วิธีตัดให้แตกหน่อ (Coppicing) ซึ่งจะใช้ได้กับพืชที่สามารถแตกหน่อจากตอได้ เช่น อินทนิล มะคาดาเมีย พญาสัตบรรณ ราชพฤกษ์ บัวยนางพญาเสือโคร่ง ฯลฯ เป็นการลดน้ำหนักบรรทุก (Surcharge) แต่ยังคงระบบรากเดิมไว้นอกจากนี้ยังช่วยลดแรงต้านจากลม (Windthrow) ได้เช่นกัน

4.4 การติดตามพฤติกรรม ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานร่วมกับพรรณพืช และวัสดุปลูกคลุม

หน้าดินรูปแบบต่าง ๆ

การติดตามผลและการดูแลรักษาสามารถทำได้โดยการประมาณการเติบโตของพืชต่อพื้นที่ดังนี้ ช่วงแรกของการเติบโตของพืช

- ในช่วงสองเดือนแรก ตรวจสอบทุกสองสัปดาห์ สังเกตการรบกวนโดยศัตรูพืช ความชื้นดิน และอื่น ๆ
- ในช่วงหกเดือนถัดไป ตรวจสอบทุกเดือนและจดบันทึกบริเวณที่พืชเติบโตไม่ดี
- ในช่วง 2-5 ปีแรก จะทำการปลูกซ่อมหรือซ่อมแซมส่วนอื่น ๆ ทุก ๆ 6 เดือน
- ควรพิจารณาตรวจสอบเป็นพิเศษ ในช่วงฤดูแล้งจัด หรือช่วงฝนตกหนัก

การตรวจสอบขั้นสุดท้าย

- ควรจะตรวจสอบครั้งสุดท้าย 2-5 ปีหลังจากการปลูกแล้วเสร็จ ซึ่งต้นไม้ควรจะโตขึ้นอย่างสมบูรณ์เต็มที่แล้วในเวลานั้น โดยมีแนวทางการประเมินความสำเร็จดังนี้
- สภาพที่เติบโตของพืชที่สมบูรณ์คิดเป็นร้อยละของพื้นที่ทั้งหมด หมายถึงพืชที่มีพัฒนาการของทั้งใบและระบบรากโดยรวม Live Staking ควรจะมีอัตราการรอด 70-100%
- พืชควรจะเติบโตต่อเนื่องในพื้นที่และไม่มีช่องว่างขนาดกว้างกว่า 60 ซม. หากมีควรปลูกซ่อม
- ระบบหญ้าแฝก ควรขึ้นเป็นกอรั้วชัดเจน หากมีช่องว่างระหว่างกอ เรียกว่า “พื้นหลอ” ควรปลูกซ่อมก่อนเข้าฤดูฝน

การประยุกต์ใช้พืชในงานวิศวกรรมเชิงลาดมีหลายรูปแบบด้วยกัน ทั้งการปลูกพืชเป็นหลักและการใช้ร่วมกับโครงสร้างทางวิศวกรรมอื่น ๆ เช่น การใช้กระสอบแบบมีปีกร่วมกับไม้ปักชำ ผ้าห่มดินและหมอนกันดิน ร่วมกับการปลูกพืชปกคลุมดิน และการใช้หญ้าแฝกเพื่อเสริมเสถียรภาพของลาดดิน เป็นต้น

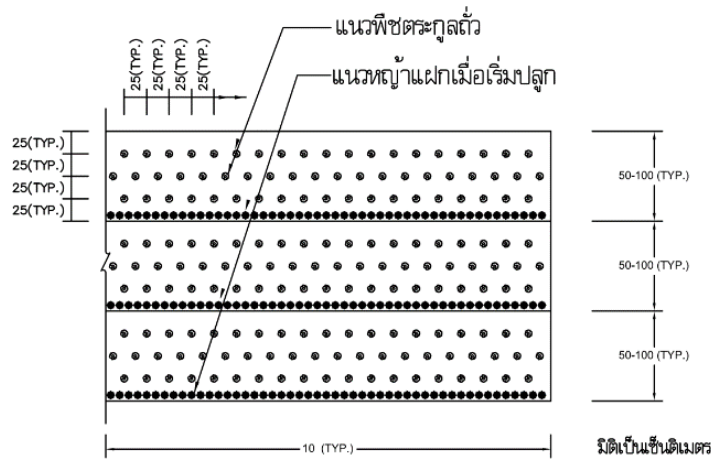
1) การปลูกหญ้าแฝกเพื่อเสริมเสถียรภาพของลาดดิน

หญ้าแฝก (ชื่อวิทยาศาสตร์ (*Chrysopogon Zizanioides* หรือชื่อวิทยาศาสตร์เดิม *Vetiveria Zizanioides*) เป็นพืชตระกูลหญ้า ที่นิยมใช้เพื่อเสริมเสถียรภาพอย่างแพร่หลายอันเนื่องจากลักษณะสำคัญคือ มีลำต้นแข็งแรงและเติบโตในแนวตั้ง ซึ่งสามารถปลูกชิดกันเป็นแนวรั้ว (Hedge) ได้ ซึ่งจะช่วยลดความแรงของน้ำไหลป่าที่ผิวดิน (Runoff) และช่วยดักตะกอนไว้ด้านหลังแนวหญ้าแฝก ซึ่งเป็นการป้องกันการเสียมวลดินไปจากลาดดินและป้องกันการกัดเซาะที่ผิวดิน (Surface Erosion) ได้ และลักษณะสำคัญอีกประการคือหญ้าแฝกมีรากฝอยแข็งแรงที่กระจายและหยั่งรากได้ลึก โดยในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสามารถหยั่งรากได้ลึกถึง 2-3 เมตรต่อปี (ดีที, 2543) จัดเป็นหญ้าที่มีรากลึกมากที่สุด (อภินิติ, 2556) ซึ่งลักษณะที่มีรากลึกนี้จะช่วยยึดเกาะเม็ดดินหรือ Root Cohesion และช่วยป้องกันดินถล่มในระดับตื้น (Shallow Landslide) ได้

การปลูกหญ้าแฝกเพื่อป้องกันการกัดเซาะและเสริมเสถียรภาพมีมากมายหลายรูปแบบด้วยกัน โดยที่นิยมมากที่สุดจะปลูกเป็นแนวรั้ว เพื่อดักตะกอนและเสริมเสถียรภาพระดับตื้นมีทั้งปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียวหรือปลูกร่วมกับวัสดุป้องกันการกัดเซาะอื่น ๆ ยกตัวอย่างเช่น การปลูกร่วมกับรั้วไม้ไผ่หรือหมอนกันดิน (Erosion Control Log) โดยรั้วและหมอนกันดินจะทำหน้าที่คอยดักตะกอนและลดความแรงของน้ำในช่วงแรกที่ยหญ้าแฝกยังเติบโตไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีการปลูกร่วมกับพืชคลุมดินประเภทอื่น ๆ โดยมากเป็นพืชตระกูลถั่วปลูกระหว่างแถวหญ้าแฝกเพื่อช่วยปกคลุมหน้าดินและยังเพิ่มแร่ธาตุในดินเมื่อมีการผลัดเปลี่ยนหมุนเวียนของพืชเป็นพืชท้องถิ่นเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการใช้หญ้าแฝกร่วมกับรั้วไม้ไผ่ และการปลูกแฝกแบบเป็นแนวรั้ว อ.ทองผาภูมิ จ.กาญจนบุรี



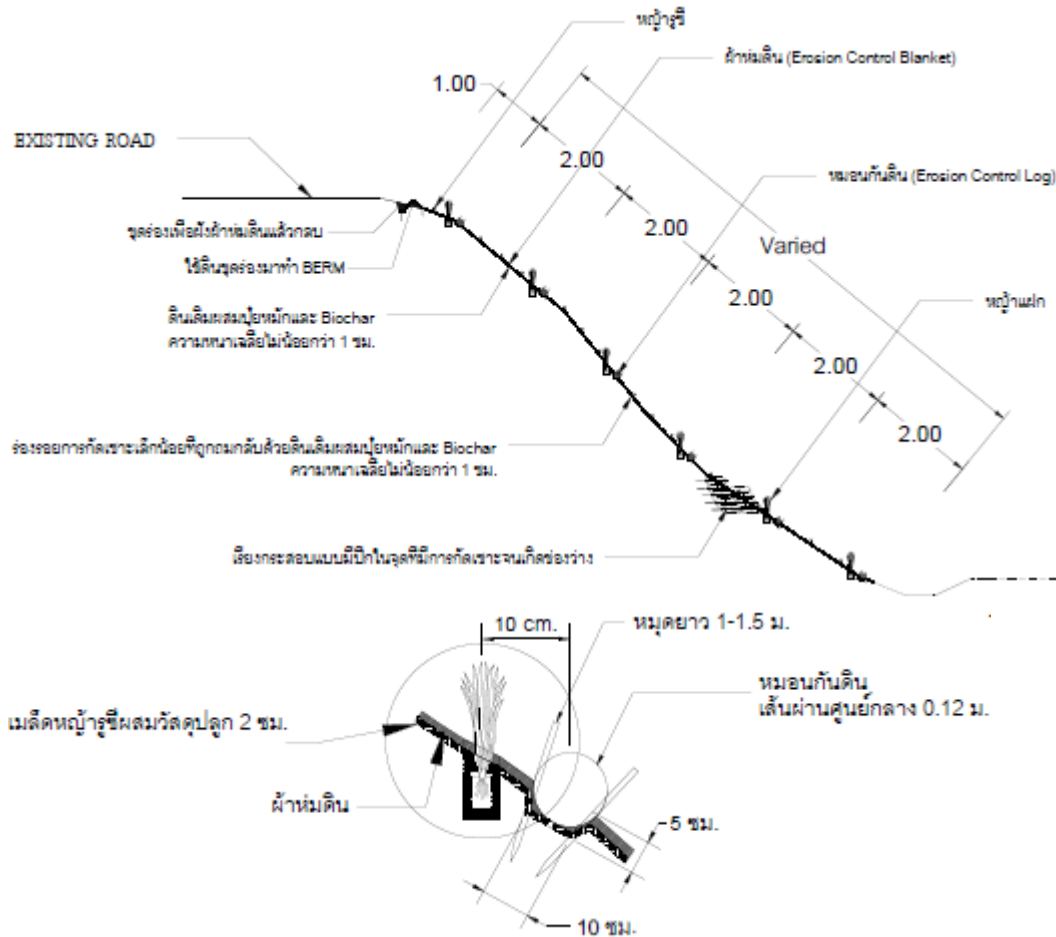
แบบการปลูกหญ้าแฝกกรณีปลูกร่วมกับพืชตระกูลถั่ว
 ARACHIS 'PINTO' (ถั่วบราซิล)
 SCALE NTS.

รูปที่ 4.7 การปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการปลูกพืชคลุมดินชนิดอื่น ๆ
 ที่มา: กรมทางหลวง (2555)

2) การใช้ผ้าห่มและหมอนกันดินร่วมกับการปลูกพืช

ผ้าห่มดิน (Erosion Control Blanket) เป็นวัสดุป้องกันการกัดเซาะแบบม้วน (Rolled Erosion Control Products, RECPs) ซึ่งผลิตจากเส้นใยธรรมชาติเช่น ไยปาล์มหรือไยมะพร้าว และถักทอร่วมกับตาข่ายวัสดุสังเคราะห์ เช่น PP หรือ HDPE เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรง โดยการใช้งานจะใช้ในการปกคลุมดินเพื่อป้องกันการปะทะระหว่างน้ำและลาดดินโดยตรง นอกจากนี้ยังนิยมใช้งานร่วมกับการปลูกพืชคลุมดินโดยใช้เมล็ด ยกตัวอย่างเช่นหญ้ารูซี่ เป็นต้น โดยผ้าห่มดินนี้จะช่วยทำหน้าที่คอยอนุบาลเมล็ดหญ้าให้สามารถเติบโตและเพิ่มอัตราการรอดได้ดียิ่งขึ้น และนอกจากนี้เมื่อหญ้าเติบโตขึ้น รากจะยึดเกาะที่ผ้าห่มดินทำให้สามารถส่งถ่ายแรงไปที่ต้นอื่น ๆ ได้ดียิ่งขึ้น และนอกจากนี้ยังช่วยให้หญ้ามีความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้นเหมือนวัสดุประกอบพื้นเดียว (Composite Material) จึงทนทานต่อกระแสน้ำไหลและการกระแทกจากเม็ดฝนได้ดีกว่าการปลูกหญ้าเพียงอย่างเดียว (อภินิติ, 2556) และในบางกรณี มีการใช้งานร่วมกับท่อนไม้ปักชำ (Live Stake) อีกด้วย และเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งแล้วเส้นใยธรรมชาติจะย่อยสลายไปและพืชคลุมดินจะเติบโตและทำหน้าที่ป้องกันการกัดเซาะแทน

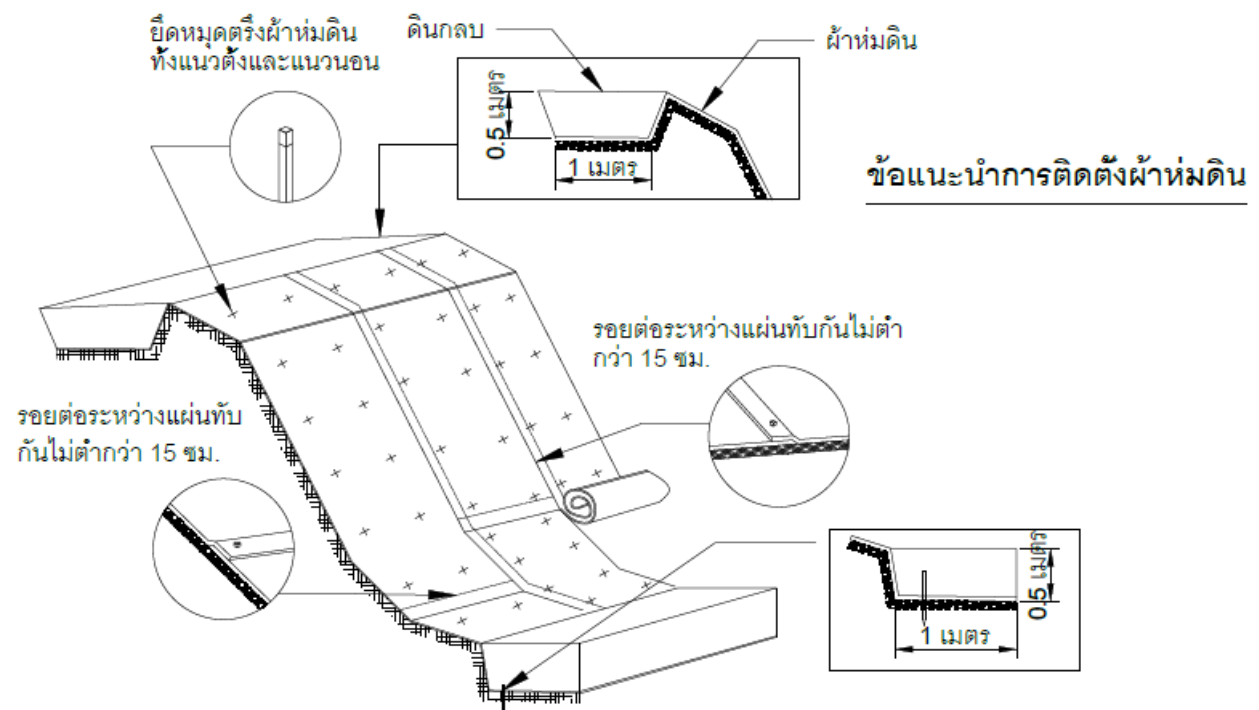
หมอนกันดิน (Erosion Control Log) เป็นวัสดุสำหรับลดทอนความเร็วของน้ำ ป้องกันการกัดเซาะและดักตะกอนดินที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลิตจากเส้นใยปาล์มหรือเส้นใยมะพร้าว และถักทอร่วมกับตาข่าย PP หรือ HDPE เช่นเดียวกับผ้าห่มดิน และโดยทั่วไปมักจะใช้งานร่วมกับผ้าห่มดิน และนอกจากนี้ยังใช้งานร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก



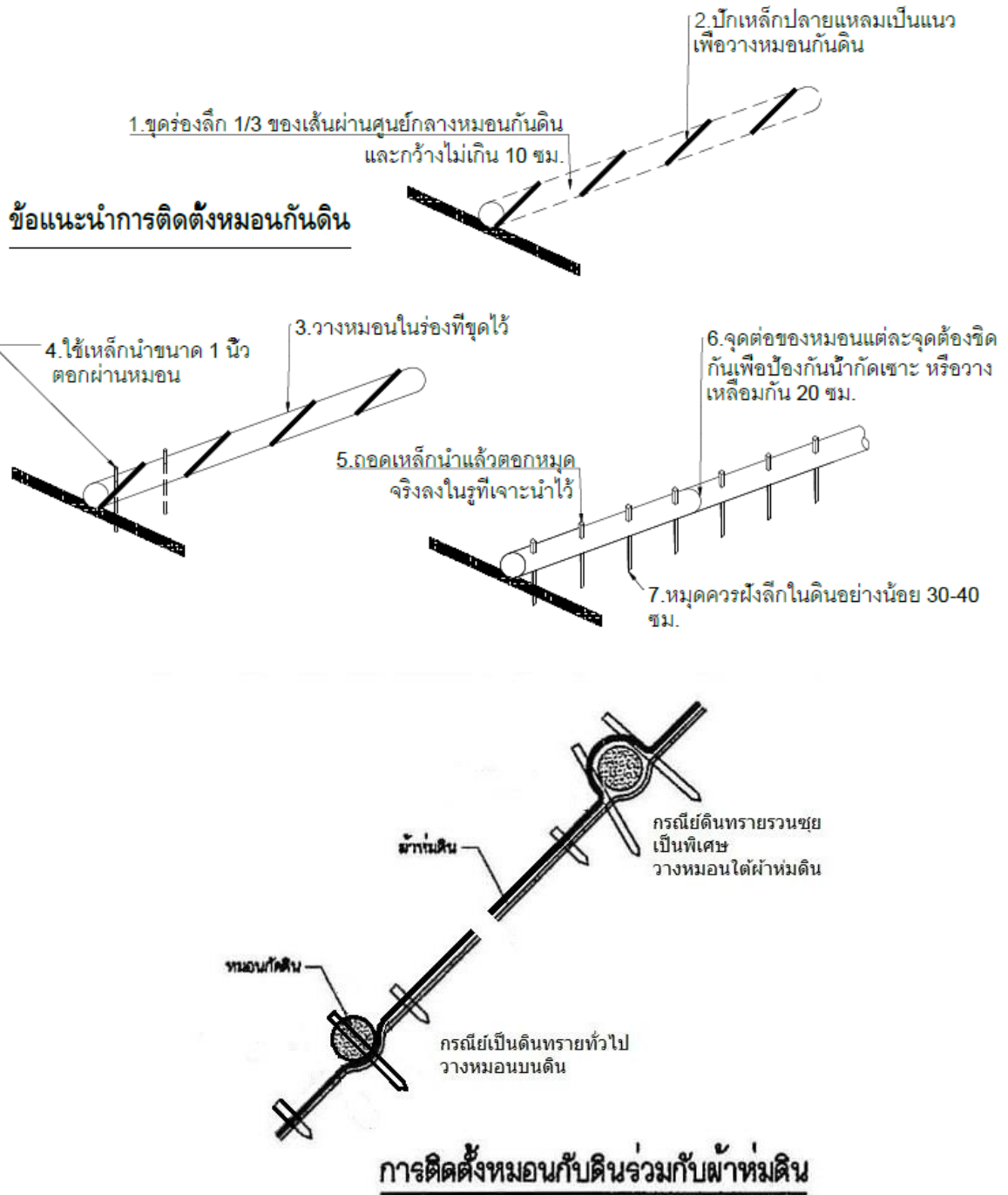
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการใช้หญ้าแฝกร่วมกับหมอนกันดิน

การติดตั้งจะทำการบุผ้าห่มดินลงไปที่ลาดดินให้แนบสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำไหลลอดใต้ผ้าห่มและเกิดการกัดเซาะ และใช้หมุดปักยึด โดยหมุดที่ใช้สามารถใช้เป็นหมุดไม้ไผ่ที่ทำได้ในท้องถิ่น ด้านบนและด้านล่างของลาดดินจะต้องทำการฝังปลายผ้าห่มดิน รอยต่อระหว่างแผ่นจะทำการทับกันประมาณ 10-15 เซนติเมตร และใช้หมุดยึดตามแนวรอยต่อให้แนบสนิทเพื่อให้ความสม่ำเสมอของวัสดุ และป้องกันไม่ให้น้ำไหลลอดและให้การติดตั้งมีความมั่นคง โดยการใช้เมล็ดพันธุ์พืชร่วมกับผ้าห่มดินจะทำการโรยไว้ที่ด้านใต้ของผ้าห่มเพื่อให้ผ้าห่มสามารถป้องกันน้ำไม่ให้พัดเมล็ดของพืชหลุดออกไปและตัวผ้าห่มยังช่วยเก็บความชื้นและป้องกันแสงแดด เพื่อให้เมล็ดพืชสามารถเติบโตได้ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ในบางกรณีสามารถใช้กล้าไม้ปลูกร่วมโดยจะทำการเจาะผ้าห่มดินและปลูกลงบนลาดดินโดยตรง และสามารถใส่ปุ๋ย ไบโอสถา และพอลิเมอร์อุ้มน้ำ เพื่อช่วยให้พืชเติบโตได้ดีขึ้น

การติดตั้งหมอนกันดินจะทำการขุดร่องลึกประมาณ 1/3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของหมอนตามแนวขวางของลาดดิน และใช้หมุดตรึงหมอนจากทั้งด้านล่างและด้านบนเพื่อไม่ให้หมอนหลุดจากตำแหน่งที่ออกแบบไว้ โดยบริเวณจุดต่อระหว่างหมอนจะทำให้เหลื่อมกันประมาณ 30 เซนติเมตร เพื่อป้องกันน้ำไหลลอดและเกิดการกัดเซาะเพิ่มเติม โดยการติดตั้งหมอนกันดินร่วมกับผ้าห่มดินมักจะทำการติดตั้งหมอนไว้ด้านล่างของผ้าห่มดินเพื่อให้มีความทนทานในการใช้งานมากขึ้น และการปลูกหญ้าแฝกร่วมกับหมอนกันดิน จะทำการปลูกไว้ที่ด้านหลังของแนวหมอนเพื่อให้หมอนคอยป้องกันไม่ให้หญ้าแฝกหลุดออกไปตามความแรงของน้ำเมื่อหญ้ายังไม่โตเต็มที่



รูปที่ 4.9 รายละเอียดการติดตั้งผ้าห่มดิน



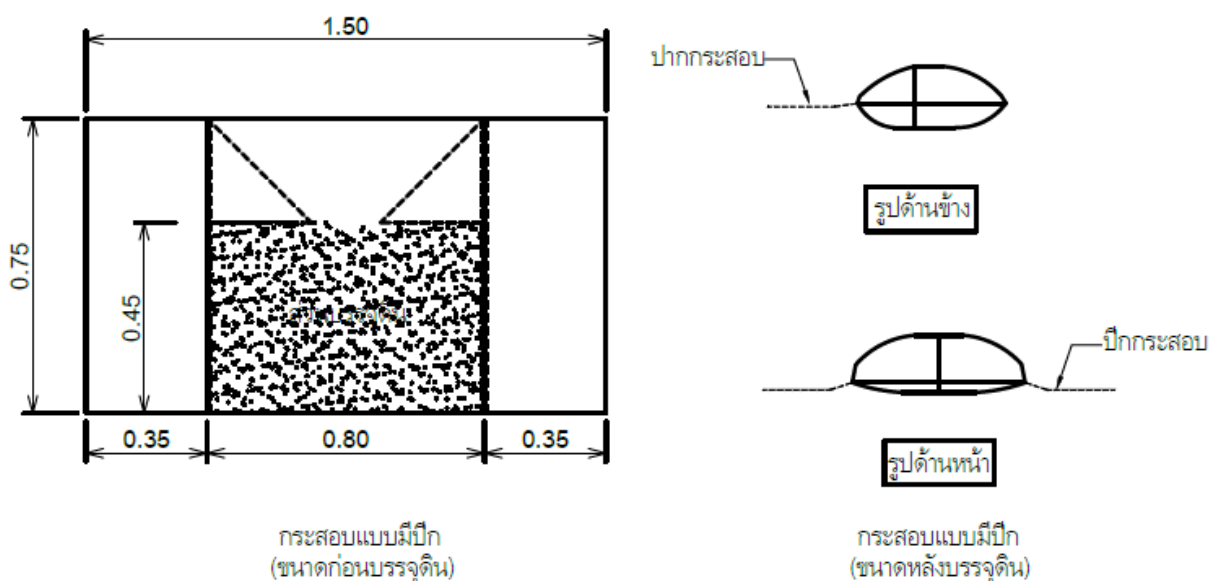
รูปที่ 4.10 รายละเอียดติดตั้งหมอนกันดินร่วมกับผ้าห่มดิน



รูปที่ 4.11 การติดตั้งหมอนกันดินและผ้าห่มดินร่วมกับพืชพรรณ

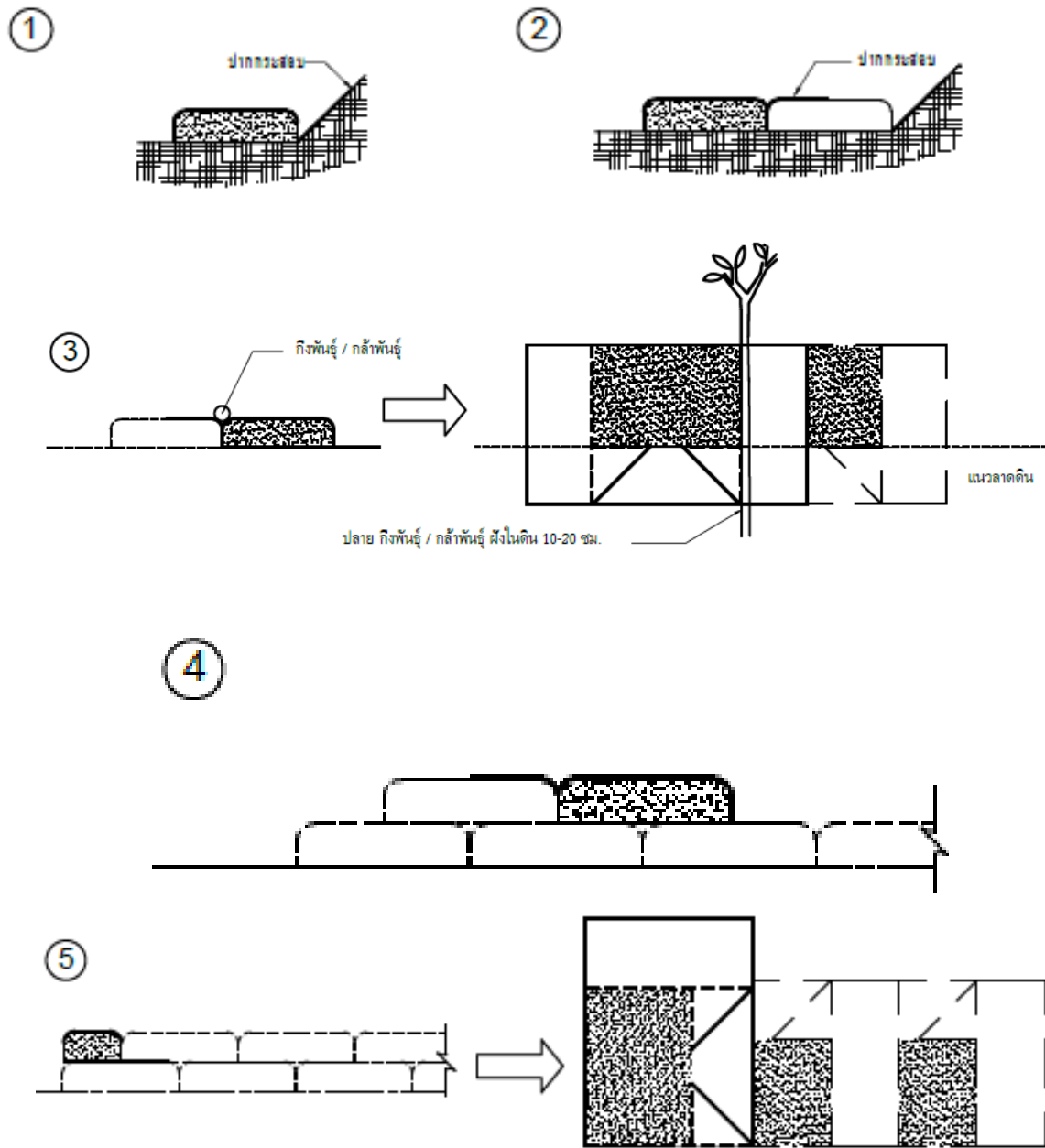
3) การใช้กระสอบแบบมีปีกร่วมกับไม้ปักชำ

กระสอบแบบมีปีกเป็นกระสอบชนิดพิเศษที่พัฒนาโดย ปตท. โกลบอลเคมีคอล ร่วมกับมูลนิธิชัยพัฒนา กรมทรัพยากรธรณี และสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) เพื่อใช้สำหรับแก้ไขปัญหาดินถล่มในหลายพื้นที่ทั่วประเทศไทย โดยตัวกระสอบแบบมีปีกมีลักษณะต่างจากกระสอบแบบทั่วไปที่ด้านข้างจะมีมีส่วนปีกกระสอบยื่นออกมา และส่วนปากกระสอบจะเป็นช่องรูปกรวยสำหรับกรอกดินและไม่ต้องมัดปากกระสอบแต่จะใช้ส่วนบรรจุดินของกระสอบใบด้านหลังทับที่ปากกระสอบแทนซึ่งจะทำให้สามารถเรียงกระสอบได้แนบชิดมากขึ้น โดยส่วนปีกกระสอบที่ยื่นออกมาจะใช้กระสอบใบถัดไปวางทับไว้ซึ่งจะส่งผลให้เสถียรภาพโดยรวมจากการเรียงกระสอบดีขึ้นกว่าการเรียงกระสอบทั่วไป โดยวัสดุที่ใช้ผลิตกระสอบจะเป็น PP และ HDPE และเคลือบสารป้องกัน UV เพื่อความทนทานในการใช้งาน อายุการใช้งานทั่วไปโดยประมาณจะมากกว่า 15 ปีขึ้นไป



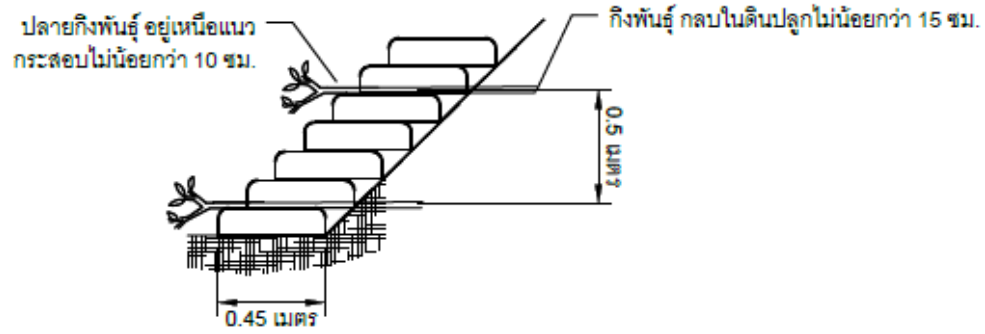
รูปที่ 4.12 ลักษณะโดยทั่วไปของกระสอบแบบมีปีก

การใช้งานกระสอบแบบมีปีกจะมีลักษณะคล้ายกับการใช้งานกระสอบแบบทั่วไป โดยสามารถเรียงเพื่อป้องกันการกัดเซาะที่หน้าดินโดยการวางพาดไปที่ลาดดิน โดยที่ก่อนจะทำการเรียงกระสอบจะต้องมีการเตรียมพื้นที่โดยการถางวัชพืชนำสิ่งกีดขวางออก โดยการเรียงกระสอบจะทำการเรียงแบบสลับระหว่างชั้นดังรูปที่ 4.13 ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างจากกระสอบ (ก้องไกร, 2557) และนอกจากนี้ยังนิยมใช้ร่วมกับการปลูกไม้ปักชำ (Live Stake) โดยจะทำการปลูกโดยเสียบไปที่ช่องว่างระหว่างกระสอบ โดยก่อนเสียบกิ่งไม้ปักชำอาจมีการใช้ท่อนเหล็กเจาะนำ และใส่ปุ๋ยหรือพอลิเมอร์อุ้มน้ำเพื่อช่วยให้พืชเติบโตได้ดีและมีโอกาสรอดมากขึ้น และโดยทั่วไปจะนำไปพร้อมกับการเรียงกระสอบ เนื่องจากความสะดวกในการทำงาน

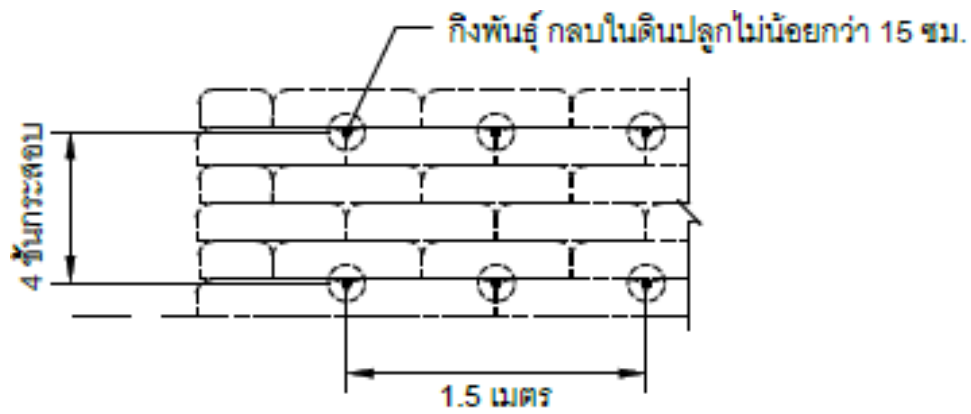


รูปที่ 4.13 ขั้นตอนการเรียงกระสอบแบบมีปีก

รายละเอียดการติดตั้งไม้ปักชำร่วมกับกระสอบมีปีก



เรียงกระสอบแบบ 1 แถว



ระยะห่างของไม้ปักชำในแต่ละทิศทาง

รูปที่ 4.14 ลักษณะการใช้ท่อนพันธุ์ร่วมกับการเรียงกระสอบแบบมีปีก



ก)



ข)

รูปที่ 4.15 การประยุกต์ใช้ท่อนพันธุ์ร่วมกับกระสอบแบบมีปีกที่ ทางหลวงชนบท กจ.4088 กม.16+700
อ.ทองพูนภูมิ จ.กาญจนบุรี ก.) 17 พฤศจิกายน 2563 ข.) 19 มิถุนายน 2564

บทที่ 5 การใช้ระบบปรับปรุงเสถียรภาพเชิงลาดในงานทาง

ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ระบบการปรับปรุงเสถียรภาพเชิงลาดเป็นจำนวนมาก ซึ่งแต่ละระบบนั้น มีข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดในการใช้งานที่แตกต่างกัน การประยุกต์ใช้การก่อสร้างรูปแบบต่าง ๆ จึงขึ้นกับรูปแบบความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น รวมถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น งบประมาณ ระยะเวลาในการก่อสร้าง รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยรายละเอียดของระบบปรับปรุงเสถียรภาพเชิงลาดแต่ละรูปแบบได้ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อถัดจากนี้ และตารางที่ 5.1 ได้สรุปความเหมาะสมในการเลือกใช้ระบบป้องกันการพังทลายกับประเภทความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติสามารถพิจารณาใช้รูปแบบผสมผสานเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ อาทิ การใช้วิธีชีววิศวกรรมปลูกพืชร่วมกับกล่องหินเกเบียน หมุดยึดดิน ไมโครไพล์ ฯลฯ

ตารางที่ 5.1 ความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้โครงสร้างป้องกันดินถล่มกับปัญหาเชิงลาด

รูปแบบระบบป้องกันการพังทลายเชิงลาด/ประเภทความเสียหาย	Erosion at Toe Slope	Erosion on Back Slope and Side Slope caused by Surface Water and Overflow	Earth Slip caused by Water and/or Unstable Slope	Rock Fall and Rock Slide
Retaining Wall			✓	
Gabion Wall	✓		✓	✓ (Used as Barrier)
MSE-Wall			✓	
Reinforced Soil Slope				
Soil Nail/Rock Bolt			✓	✓
Shear Pin			✓	
Shotcrete		✓		✓
Rockfall Netting				✓
Bioengineering	✓	✓	✓ (Only Shallow Slip)	

5.1 กำแพงกันดิน (Retaining Wall)

1) แนวคิดและหลักการออกแบบ

กำแพงกันดินเป็นโครงสร้างแข็ง (Rigid Structure) ที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการพังทลายของดิน ด้านหลังกำแพง โดยกำแพงกันดินทั่วไปนั้นมักจะมีการออกแบบเป็น Gravity Wall หรือ Cantilever Wall (รูปที่ 5.2) เป็นหลัก ซึ่งอาศัยน้ำหนักและ/หรือคุณสมบัติของกำแพงในการต้านทานการพังทลายของดิน อย่างไรก็ตามยังสามารถออกแบบให้มีการรับน้ำหนักโดยการใช้สมอยึดได้เช่นกัน ทั้งนี้ข้อดีข้อเสียและรูปแบบการใช้งานของกำแพงกันดินสามารถสรุปได้พอสังเขปดังต่อไปนี้

2) ข้อดี

- เนื่องด้วยกำแพงกันดินชนิดนี้มักเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นลักษณะการทำงานจึงมีความใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป
- กำแพงคอนกรีตมีความแข็งแรงทนทาน มีอายุใช้งานค่อนข้างนาน
- สามารถก่อสร้างให้มีความสูงและชันได้ ส่งผลให้สามารถก่อสร้างติดกับโครงสร้างทางได้
- ค่าบำรุงรักษาต่ำ

3) ข้อเสีย

- เนื่องจากกำแพงกันดินมีน้ำหนักที่ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงต้องการดินฐานรากที่มีความแข็งแรงสามารถรับน้ำหนักโครงสร้างได้โดยไม่พังทลาย
- โครงสร้างกำแพงกันดินเป็นโครงสร้างแข็ง มีความยืดหยุ่นน้อย ไม่เหมาะสมต่อการต้านทานการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกัน เช่น การเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันของดินฐานราก หรือ การต้านทานแรงแผ่นดินไหว เป็นต้น
- ต้องการระบบระบายน้ำที่ดี เนื่องจากหากมีน้ำไหลซึมเข้าสู่กำแพงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของกำแพงลดลง

4) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

- การทบทวนข้อมูลก่อนการก่อสร้าง เช่น การตรวจสอบลักษณะพื้นที่ก่อสร้าง ขั้นตอนการก่อสร้าง ข้อกำหนดที่ใช้
- การตรวจสอบคุณสมบัติและความสมบูรณ์ของวัสดุ ประกอบไปด้วย เหล็กเสริม คุณสมบัติคอนกรีต การทดสอบคุณสมบัติดินถม เช่น ขนาดคละ ความเป็นพลาสติก เป็นต้น
- การควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง ประกอบไปด้วย การควบคุมปริมาณความชื้นและคุณภาพการบดอัดดิน การจัดวางเหล็กให้เป็นไปตามแบบก่อสร้างที่กำหนด การหล่อและบ่มคอนกรีต การติดตั้งระบบระบายน้ำให้เหมาะสม

5) การบำรุงรักษา

- การตรวจสอบกำแพงกันดินสามารถทำได้โดยการสำรวจด้วยสายตา เช่น การตรวจสอบตำแหน่งที่มีน้ำไหลซึม การตรวจสอบประสิทธิภาพของรางระบายน้ำ การตรวจวัดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น การตรวจวัดระดับของกำแพงกันดินซึ่งอาจแสดงให้เห็นถึงการเสียสภาพของกำแพง เป็นต้น ในบางกรณีอาจมีการใช้เครื่องมือช่วยในการสำรวจ เช่น การตรวจวัดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวราบและแนวตั้ง การตรวจวัดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในกำแพงหรือวัสดุเสริมกำลัง การตรวจวัดความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น ทั้งนี้การพังทลายของกำแพงกันดินส่วนใหญ่มักจะเกี่ยวข้องข้องกับปริมาณน้ำหลังกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 5.2 หรืออาจเกิดขึ้นจากแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 กำแพงกันดินแบบ Cantilever
ที่มา: The Constructor (2022)



รูปที่ 5.2 การพังทลายของกำแพงกันดินเนื่องจากปริมาณน้ำที่ประเทศมาเลเซีย
ที่มา: Jeffery (2018)



รูปที่ 5.3 การพังทลายของกำแพงกันดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวที่ประเทศไต้หวัน
ที่มา: Sitar et al. (2012)

5.2 กำแพงกล่องเกเบียน (Gabion Wall)

1) แนวคิดและหลักการออกแบบ

กล่องหินเกเบียนนับเป็นโครงสร้าง Gravity Wall ประเภทหนึ่ง ประกอบไปด้วยกล่องลวดตาข่ายสำหรับใส่หิน ทำหน้าที่ป้องกันการกัดเซาะบริเวณดินเขาหรือบริเวณริมน้ำ และยังใช้ป้องกันการพังทลายของลาดดินได้เช่นกัน โดยทั่วไปกล่องเกเบียนนั้นมีหลายขนาดตั้งแต่ 1-4 เมตร และมีขนาดช่องเปิด 60-100 มิลลิเมตร โดยลวดตาข่ายนั้นจะถูกเคลือบด้วยสารกันสนิมตามมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ ในการใช้งานทั่วไปจะนำกล่องเกเบียนมาเรียงซ้อนกันเพื่อให้มีน้ำหนักมากพอที่จะต้านการเคลื่อนตัวของลาดดินได้ ในขณะที่ก้อนหินที่บรรจุอยู่ภายในกล่องนั้นยังทำหน้าที่ระบายน้ำ และป้องกันการกัดเซาะที่อาจเกิดขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ข้อดีข้อเสียและรูปแบบการใช้งานของ กล่องเกเบียนสามารถสรุปได้พอสังเขปดังต่อไปนี้

2) ข้อดี

- โครงสร้างตาข่ายมีความยืดหยุ่นจึงสามารถนำไปติดตั้งในสถานที่ต่าง ๆ ได้โดยไม่แตกหัก เมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- กล่องลวดสามารถผลิตล่วงหน้าได้ ทำให้สามารถติดตั้งได้รวดเร็วและมีการควบคุมคุณภาพที่ดี
- มีคุณสมบัติช่วยในการระบายน้ำและกรองอนุภาคดินที่ถูกพัดพาบริเวณดินลาดได้
- สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับพืชต่าง ๆ ได้โดยการวางเรียงพืชผ่านช่องว่างกล่องเข้าไปยังดินเดิมด้านหลัง โดยในระยะยาวเมื่อตาข่ายเสื่อมสภาพไปตามเวลา รากพืชและกิ่งก้านก็จะเข้ามาแทนที่จะช่วยให้กำแพงยึดเกาะกันเป็นอันหนึ่งอันเดียว และยังช่วยระบายน้ำออกจากลาดดินโดยการคายระเหยของพืช

3) ข้อเสีย

- ต้องระวังความเสียหายและการเสื่อมสภาพของกล่องลวด โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ที่มีกระแสน้ำไหลเร็ว
- ความสูงของการก่อสร้างค่อนข้างจำกัด อย่างไรก็ตามมีการนำกล่องเกเบี้ยนไปประยุกต์ใช้คู่กับวัสดุเสริมกำลังส่งผลให้สามารถก่อสร้างได้สูงขึ้นได้
- การบำรุงรักษาทำได้ค่อนข้างยาก หากกล่องตาข่ายด้านล่างชำรุดหรือวัสดุด้านล่างเกิดการเสื่อมสภาพ จำเป็นจะต้องเคลื่อนย้ายกล่องด้านบนออก

4) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

- กล่องลวดบรรจุหินต้องอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ ไม่มีรอยฉีกขาด แตกร้าว ลวดเหล็กที่นำมาใช้ต้องมีกำลังรับแรงดึงตามที่กำหนด
- การใส่หิน (รูปที่ 5.4) ต้องกระทำอย่างระมัดระวัง เนื่องจากความคมและแรงกระแทกจากหินอาจทำให้ลวดเหล็กเกิดความเสียหายได้ นอกจากนี้หินที่ใส่ควรมีการแทรกตัวของหินขนาดเล็กแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างหินใหญ่ อย่างไรก็ตามหินนั้นจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าช่องเปิดของกล่องลวดเพื่อป้องกันการหลุดไหลของหิน
- ต้องมีการปรับแต่งพื้นดินฐานรากก่อนเริ่มทำการติดตั้ง

5) การบำรุงรักษา

- ทำการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของกล่องเกเบี้ยน เช่น การเกิดสนิม การกัดกร่อน การขาดหรือการหักของกล่องลวดหรืออุปกรณ์รัด (รูปที่ 5.5) ซึ่งอาจก่อให้เกิดการขยับตัวหรือการโป่งออกของหินภายในกล่อง (รูปที่ 5.6)
- ทำการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของกำแพงกล่องเกเบี้ยน เช่น การเคลื่อนตัวด้านข้าง การทรุดตัว การบิดตัว ฯลฯ รอยแตกของดินหลังกำแพง
- นอกจากนี้ยังต้องทำการตรวจสอบดูว่ามีเศษดินติดตามกล่องเกเบี้ยนหรือไม่ เนื่องจากเศษตะกอนเหล่านี้อาจทำให้เกิดการอุดตัน ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของน้ำได้ ในบางกรณีอาจต้องตรวจสอบปริมาณการไหลของน้ำว่าไหลมากเกินไปหรือไม่
- ทั้งนี้อัตราส่วนรูปแบบความเสียหายของกำแพงกล่องเกเบี้ยนแสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.4 การก่อสร้างกำแพงล่องเกเบียน

ที่มา: State of Wisconsin Department of Transportation (2017)



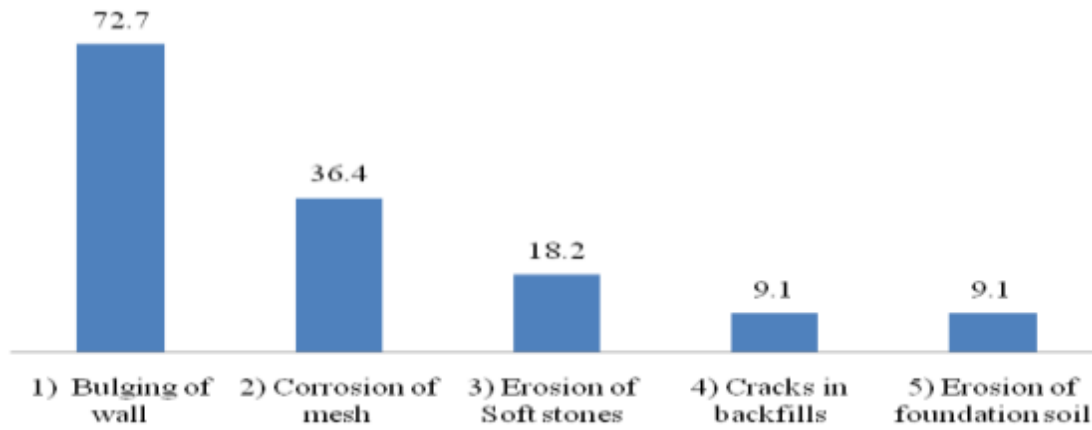
รูปที่ 5.5 การกัดกร่อนของลวดล่องเกเบียน

ที่มา: Chikute and Sonar (2019)



รูปที่ 5.6 การโป่งออกของหินภายในล่องเกเบียน

ที่มา: Chikute and Sonar (2019)



รูปที่ 5.7 อัตราส่วนความเสียหายของกำแพงก่อกองเกเบี่ยน
ที่มา: Chikute and Sonar (2019)

5.3 กำแพงเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Wall)

1) แนวคิดและหลักการออกแบบ

MSE Wall (รูปที่ 5.8) เป็นกำแพงกันดินประเภทยืดหยุ่น (Flexible Wall) ที่มีการใช้วัสดุเสริมกำลังเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ลาดดินนั้น โดยวัสดุเสริมกำลังที่ใช้มีหลากหลายไม่ว่าจะเป็น เหล็กเส้นตาข่ายเหล็ก Geogrid Geotextile เป็นต้น ทั้งนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินชนิดนี้จะต้องพิจารณาทั้งเสถียรภาพภายนอก และเสถียรภาพภายในให้มีความปลอดภัยเพียงพอ ทั้งนี้ข้อดีข้อเสียและรูปแบบการใช้งานของ MSE Wall สามารถสรุปได้พอสังเขปดังต่อไปนี้

2) ข้อดี

- เนื่องจากกำแพงชนิดนี้เป็นโครงสร้างยืดหยุ่นจึงมีความทนทานต่อการเคลื่อนตัวเนื่องจากดินฐานรากที่ไม่ดีได้ รวมทั้งยังต้านทานแผ่นดินไหวได้ดีกว่าโครงสร้างคอนกรีตแบบแข็ง
- ใช้การก่อสร้างที่ง่ายและรวดเร็ว ไม่ต้องการเครื่องจักรขนาดใหญ่ รวมทั้งไม่ต้องการทักษะหรือความสามารถพิเศษในการก่อสร้าง
- ต้องการการเตรียมพื้นที่น้อย ต้องการพื้นที่ทำงานด้านหน้าโครงสร้างขณะก่อสร้างน้อย
- โดยทั่วไปมีราคาก่อสร้างถูกกว่าโครงสร้างแข็ง
- ทางเทคนิคแล้วสามารถก่อสร้างได้สูงเกิน 30 เมตร โดยในปัจจุบันนี้มีการก่อสร้างกำแพงกันดินสูงประมาณ 46 เมตร (150 ฟุต) ที่ Seattle-Tacoma International Airport ประเทศสหรัฐอเมริกา (Stuedlein et al., 2010) และ 72 เมตร ที่สนามบิน Pakyong ประเทศอินเดีย (Maccaferri)

3) ข้อเสีย

- ต้องการพื้นที่กว้างบริเวณด้านหลังกำแพงสำหรับงานตัดหรืองานติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง โดยความกว้างหลังกำแพงโดยทั่วไปมีระยะประมาณ 70% ของความสูงกำแพง

- เนื่องจากกำแพงชนิดนี้อาศัยแรงปฏิกริยาระหว่างวัสดุเสริมกำลังและวัสดุถม ดังนั้นต้องมีการคัดเลือกใช้วัสดุถมที่มีคุณสมบัติเหมาะสม (ทั่วไปใช้ Well Graded Granular Soil) ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าใช้จ่ายโครงการ

- การออกแบบวัสดุเสริมกำลังต้องการการมีส่วนร่วมระหว่างเจ้าของงานและผู้จัดหาวัสดุ
- ต้องการระบบระบายน้ำที่ดี เนื่องจากหากมีน้ำไหลซึมเข้าสู่กำแพงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของกำแพงลดลง

4) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

- การทบทวนข้อมูลก่อนการก่อสร้าง เช่น การตรวจสอบลักษณะพื้นที่ก่อสร้าง ขั้นตอนการก่อสร้าง ข้อกำหนดที่ใช้
- การตรวจสอบคุณสมบัติและความสมบูรณ์ของวัสดุ ประกอบไปด้วย ชั้นส่วนปิดหน้าและวัสดุอุดรู (Facing Elements and Facing Joint Materials) วัสดุเสริมกำลัง (Reinforcing Elements) และวัสดุถม เช่น เกิดการฉีกขาดหรือแตกร้าวของวัสดุระหว่างการก่อสร้าง ควรมีการจัดเก็บหรือจัดวางวัสดุเหล่านี้ อย่างเหมาะสม การทดสอบคุณสมบัติดินถม เช่น ขนาดคละ ความเป็นพลาสติก เป็นต้น ทั้งนี้ตัวอย่างความเสียหายของชั้นส่วนวัสดุปิดหน้าแสดงไว้ดังรูปที่ 5.9
- การควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง ประกอบไปด้วย การทำฐานปรับระดับและการติดตั้งชั้นส่วนปิดหน้าให้ได้ตามแนว การควบคุมปริมาณความชื้นและคุณภาพการบดอัดดิน การเลือกใช้เครื่องบดที่เหมาะสม (ไม่ควรใช้เครื่องบดอัดชนิดตีนแกะ ที่อาจจะทำให้วัสดุเสริมกำลังเกิดความเสียหาย และในตำแหน่งใกล้เคียงกับชั้นส่วนปิดหน้า ควรใช้เครื่องบดอัดขนาดเล็กเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัว) การจัดวางและยึดวัสดุเสริมกำลัง (ต้องให้ได้ระยะและความยาวตามที่กำหนด ทำการยึดให้แน่นหนา) โดยตัวอย่างขั้นตอนการก่อสร้างกำแพงเสริมกำลังแสดงไว้ดังรูปที่ 5.10 การจัดวางและยึดวัสดุเสริมกำลัง (ต้องให้ได้ระยะและความยาวตามที่กำหนด ทำการยึดให้แน่นหนา) มีการติดตั้งแผ่นฟิลเตอร์เพื่อป้องกันดินไหลออกบริเวณรอยต่อ มีการติดตั้ง Free Draining Seal บริเวณรอยต่อของแผ่นปิดหน้าเพื่อระบายน้ำและป้องกันการเติบโตของพืช
- ต้องระมัดระวังเรื่องการขุดดิน ถมดิน หรือการวางน้ำหนักในบริเวณก่อสร้างและบริเวณใกล้เคียง เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวหรือการทรุดตัวของกำแพงระหว่างการก่อสร้าง

5) การบำรุงรักษา

การบำรุงรักษาสามารถทำได้โดยการสำรวจด้วยสายตา เช่น การตรวจสอบตำแหน่งที่มีน้ำไหลซึม การตรวจสอบประสิทธิภาพของรางระบายน้ำ การตรวจวัดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น เป็นต้น ในบางกรณีอาจมีการใช้เครื่องมือช่วยในการสำรวจ เช่น การตรวจวัดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวราบและแนวตั้ง การตรวจวัดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในกำแพงหรือวัสดุเสริมกำลัง การตรวจวัดความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ดังแสดงในรูปที่ 5.11 เป็นต้น



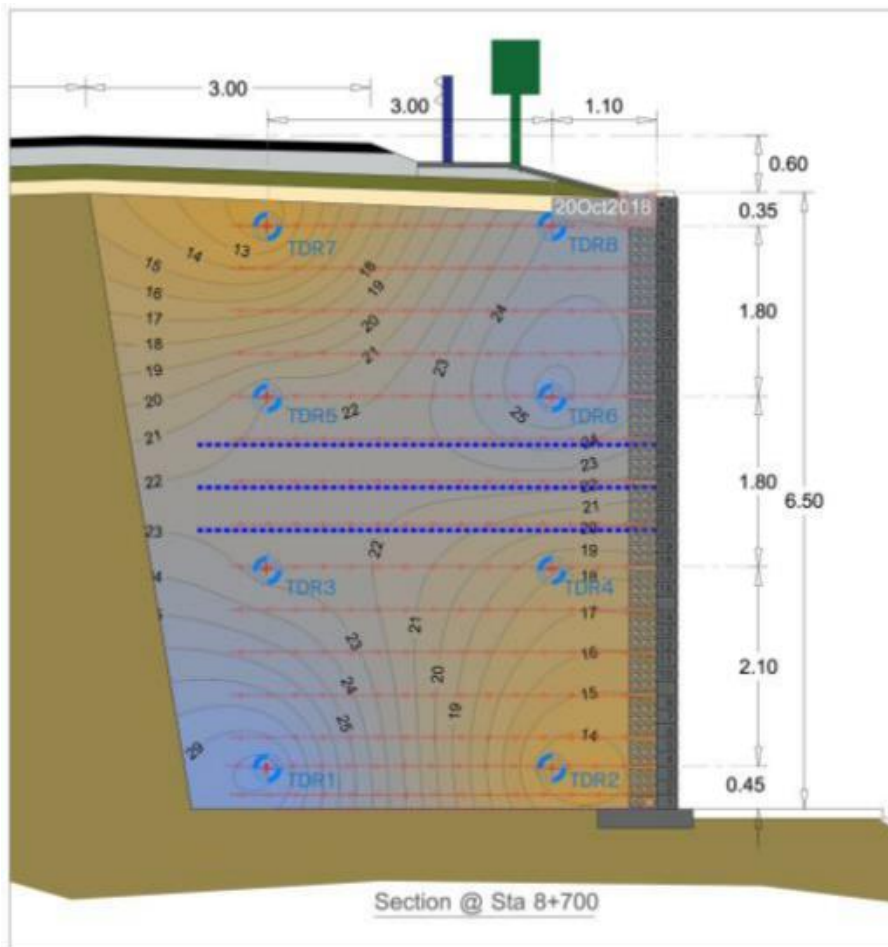
รูปที่ 5.8 กำแพงดินเสริมแรงที่ กจ.4088 กม. 8+700 จังหวัดกาญจนบุรี เมื่อแล้วเสร็จ
ที่มา ประกิจ และคณะ (2562)



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างความเสียหายของแผ่นปิดหน้า
ที่มา: FDOT State Construction Office (2020)



รูปที่ 5.10 ขั้นตอนการก่อสร้างกำแพงเสริมกำลัง
ที่มา: LaRiMiT (2022)



รูปที่ 5.11 ตัวอย่างการตรวจวัดพฤติกรรมความชื้นในกำแพงดินเสริมแรง
ที่มา เสวก และคณะ (2562)

5.4 ลาดดินเสริมกำลัง (Reinforced Soil Slope)

1) แนวคิดและหลักการออกแบบ

ในกรณีที่มีเขตทางเพียงพอและต้องการประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง MSE Wall สามารถพิจารณาการก่อสร้างโดยใช้ลาดดินเสริมกำลัง (รูปที่ 5.12) ได้ โดยลาดดินเสริมกำลังประกอบไปด้วย การเสริมกำลังให้แก่ลาดดินด้วยวัสดุเสริมกำลังในระนาบเกือบแนวนอนเพื่อดำเนินงานการเคลื่อนที่ของมวลดินเสริมกำลังนั้น ๆ นอกเหนือจากนั้นยังมีการปรับปรุงคุณภาพด้านหน้าด้วยการปลูกพืชหรือใช้วัสดุป้องกันแบบ ยึดหยุ่นเพื่อป้องกันการกัดเซาะและการพังทลายของหน้าดิน ทั้งนี้โดยทั่วไปลาดดินเสริมกำลังมักจะมี อัตราส่วนความชันน้อยกว่าและมีค่าก่อสร้างต่ำกว่ากำแพงเสริมกำลัง

2) ข้อดี

- มีความปลอดภัยมากกว่าและก่อสร้างได้สูงกว่าลาดดินแบบไม่เสริมกำลัง
 - สามารถปรับลดคุณภาพของวัสดุที่ต้องการในการก่อสร้างได้ เช่น ในกรณีที่ต้องการซ่อมแซมลาดดินที่เกิดการพังทลายสามารถใช้วัสดุที่เกิดจากดินถมแทนที่จะต้องส่งวัสดุจากพื้นที่อื่นเข้ามา
 - ประหยัดเขตทาง
 - มีราคาถูกกว่ากำแพงกันดินหรือกำแพงเสริมกำลัง
 - สามารถประยุกต์ใช้กับงานชีววิศวกรรมปฐพี พื้นที่ก่อสร้างมีความกลมกลืนไปกับธรรมชาติ
- รอบข้าง

3) ข้อเสีย

- ต้องใช้พื้นที่ในการก่อสร้าง โดยเฉพาะบริเวณด้านหลังเชิงลาดเพื่อติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง
- ต้องการวัสดุถมที่มีคุณภาพ (ข้อกำหนดของวัสดุถมสำหรับลาดดินเสริมกำลังยังต่ำกว่าข้อกำหนดของกำแพงเสริมกำลัง)
- การออกแบบต้องการความร่วมมือกันระหว่างผู้จัดหาวัสดุและเจ้าของงาน

4) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้างของลาดดินเสริมกำลังค่อนข้างคล้ายคลึงกับกำแพงเสริมกำลัง คือ

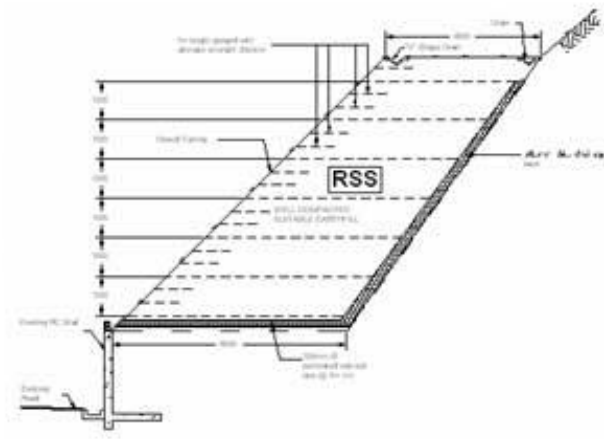
การทบทวนข้อมูลก่อนการก่อสร้าง เช่น การตรวจสอบลักษณะพื้นที่ก่อสร้าง ขั้นตอนการก่อสร้าง ข้อกำหนดที่ใช้

การตรวจสอบคุณสมบัติและความสมบูรณ์ของวัสดุ ประกอบไปด้วย วัสดุเสริมกำลัง (Reinforcing Elements) และวัสดุถม เช่น เกิดการฉีกขาดหรือแตกร้าวของวัสดุระหว่างการก่อสร้าง การทดสอบคุณสมบัติดินถม เช่น ขนาดคละ ความเป็นพลาสติก เป็นต้น

การควบคุมคุณภาพขณะก่อสร้าง ประกอบไปด้วย การควบคุมปริมาณความชื้นและคุณภาพการบดอัดดิน การเลือกใช้เครื่องบดที่เหมาะสม (ไม่ควรใช้เครื่องบดอัดชนิดตีนแกะ ที่อาจทำให้วัสดุเสริมกำลังเกิดความเสียหาย และในตำแหน่งใกล้เคียงกับชั้นส่วนปิดหน้า ควรใช้เครื่องบดอัดขนาดเล็กเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.13)

5) การบำรุงรักษา

การบำรุงรักษาสามารถทำได้โดยการสำรวจด้วยสายตา เช่น การตรวจสอบตำแหน่งที่มีน้ำไหลซึม การตรวจสอบประสิทธิภาพของรางระบายน้ำ การตรวจวัดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น เป็นต้น ในบางกรณีอาจมีการใช้เครื่องมือช่วยในการสำรวจ เช่น การตรวจวัดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวราบและแนวตั้ง การตรวจวัดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในกำแพงหรือวัสดุเสริมกำลัง การตรวจวัดความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น



รูปที่ 5.12 ลาดดินเสริมกำลัง
ที่มา: Soil & Slope Sdn. Bhd. (2022)

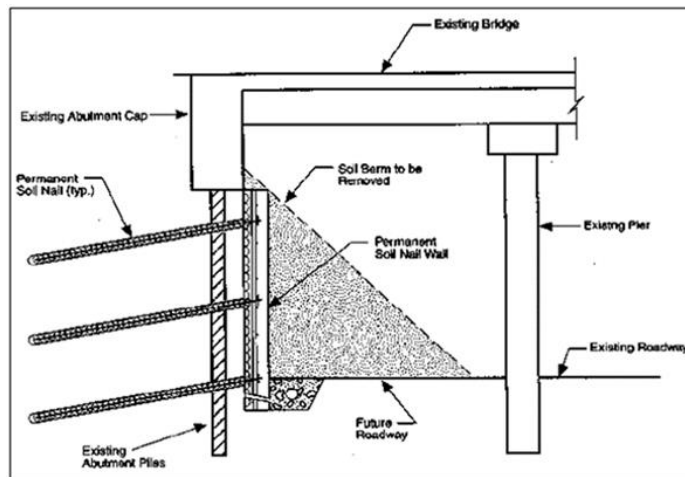


รูปที่ 5.13 การบดอัดดินด้านหน้า
ที่มา: Miller (2017)

5.5 หมุดยึดดิน (Soil Nail)

1) แนวคิดและหลักการออกแบบ

ในงานที่เกี่ยวข้องกับการขุด หรืองานที่เกี่ยวข้องกับการมีเสถียรภาพของลาดดิน ไม่ว่าจะเป็นส่วนของการขุดเพื่อขยายถนน หรืองานที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินต่าง ๆ จะมีการที่เกี่ยวข้องหลากหลายวิธีด้วยกัน โดยอีกหนึ่งวิธีที่นิยมมีการใช้มากที่สุดอีกวิธีหนึ่งได้แก่วิธี Soil Nail (รูปที่ 5.14) เนื่องจากเป็นวิธีการเสริมเสถียรภาพให้ลาดดินที่สามารถดำเนินการก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้นั้นเป็นวัสดุที่ค่อนข้างพื้นฐานในงานก่อสร้างโดยมีแนวคิด คือเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงให้กับลาดดินโดยการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเนื่องจากการใช้หลักการยึดหมุดเข้ากับผิวหน้าดินและเป็นวิธีการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้นั้นเป็นวัสดุที่ค่อนข้างพื้นฐานในงานก่อสร้าง โดยหลักการของ Soil Nail คือ การใช้วัสดุเสริมกำลังแบบ Passive Reinforcement ซึ่งยึดดินโดยอาศัยแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมแรงเนื่องจากการเคลื่อนตัวของมวลดิน โดย Soil Nail จะมีลักษณะเป็นแท่งเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วย Cement Grout เพื่อเป็นการช่วยลดการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับเนื้อเหล็กและเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายแรงลงสู่เนื้อดิน วิธีการ Soil Nail เป็นที่นิยมใช้มากเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วและประหยัดโดยจะใช้เพื่อการเพิ่มเสถียรภาพของงานขุดและลาดดินเป็นหลัก



รูปที่ 5.14 แสดงการติดตั้งกำแพง Soil Nail เพื่อการรักษาเสถียรภาพของลาดดินบริเวณตอม่อสะพาน
ที่มา: กรมทางหลวง (2553)

2) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

ในส่วนของการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง และตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างของกำแพง Soil Nail ซึ่งเป็นกิจกรรมที่สำคัญมากในการทำให้การก่อสร้างของกำแพง Soil Nail เป็นไปตามแผนการและข้อกำหนดของการก่อสร้าง การตรวจสอบการก่อสร้างถ้าทำอย่างถูกต้องจะเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการได้กำแพง Soil Nail ที่มีคุณภาพดี การตรวจสอบการก่อสร้างได้แก่ (i) ความถูกต้องของวัสดุ, (ii) ความถูกต้องของวิธีการก่อสร้าง, (iii) พฤติกรรมระยะสั้น เช่น Load Test และการเคลื่อนตัว, และ (iv)

พฤติกรรมระยะยาว (การเคลื่อนตัว) ตัวแทนของเจ้าของงาน, ผู้รับจ้าง, หรือทั้งคู่สามารถทำการตรวจสอบการก่อสร้างขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญา อย่างไรก็ตามการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างโดยทั่วไปจะทำ โดยตัวแทนของเจ้าของงาน สำหรับสัญญาแบบ Method Approach การตรวจสอบการก่อสร้างจะทำโดยตัวแทนผู้รับจ้างตามข้อกำหนดของวัสดุและวิธีการก่อสร้างที่กำหนดในแผนงานและข้อกำหนดที่ให้โดยเจ้าของงาน ความรับผิดชอบของผู้รับจ้างคือทำตามแผนงานและข้อกำหนด การตรวจสอบการก่อสร้างและการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างถาวรที่ควบคุมโดยสัญญาแบบ Performance Specification โดยก่อนการก่อสร้างวิศวกรผู้ตรวจสอบควรทราบเกี่ยวกับ แผนงาน ข้อกำหนด และการทดลองที่ต้องการ สภาพสถานที่ก่อสร้าง สภาพวัสดุก่อสร้างที่ต้องการ และ ขั้นตอนการก่อสร้าง โดยตัวอย่างการก่อสร้าง Soil Nail แสดงไว้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 การก่อสร้างกำแพง Soil Nail
ที่มา: Bachy Soletanche (2016)

3) การบำรุงรักษา

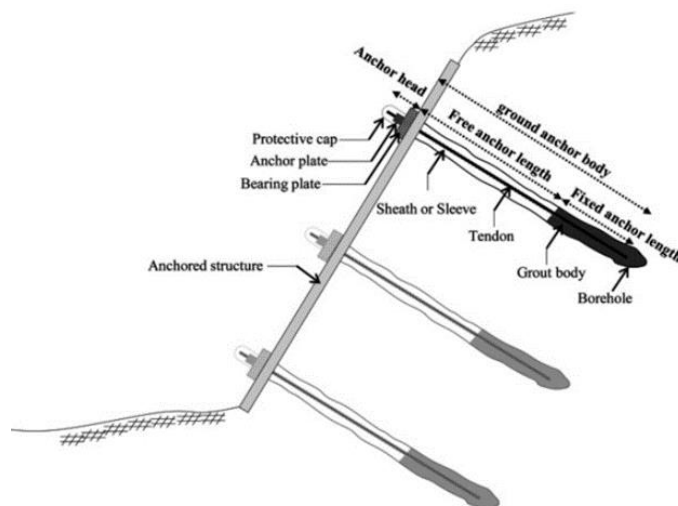
ข้อกำหนดในการบำรุงรักษาสำหรับระบบตอกตะปูบนดิน (Soil Nail) นั้นจะทำได้โดยการตรวจสอบโดยใช้ระบบความถี่ในการตรวจสอบเป็นรอบเวลา โดยจะทำการตรวจสอบโดยแบ่งเป็นความถี่ทุก ๆ 5-10 ปี โดยแบ่งตามระดับความลาดชัน (Geoguide 5 : Guide to Slope Maintenance) โดยในการสำรวจความเสียหายที่เกิดขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของระบบตะปูดิน หรือ Soil Nail เป็นโครงสร้างที่ฝังตัวลึกลงไปในดิน ดังนั้นในการบำรุงรักษาจะอาศัยการสังเกตจากสิ่งที่พบได้จากภายนอก โดยจะดูจากระบบระบายน้ำ (Water Drainage) ทำงานเป็นปกติหรือไม่ หรือรอยแตกร้าวเสียหายที่เกิดบริเวณผิวลาดของโครงสร้าง โดยหากประสิทธิภาพของทางลาดที่ตอกตะปูดินได้รับการยืนยันว่าเป็นที่น่าพอใจโดยการตรวจสอบหลังการก่อสร้าง ความถี่ของการตรวจสอบวิศวกรเพื่อการบำรุงรักษาอาจลดลงตามความเหมาะสม

5.6 สมอยึดดิน (Soil Anchor)

1) แนวคิดและหลักการออกแบบ

ในส่วนของการออกแบบ Soil Anchor (รูปที่ 5.16) หรือ สมอยึดดิน จะมีแนวคิดในการออกแบบที่คล้ายคลึงกับแนวคิดการออกแบบ Soil Nail นั่นคือเพื่อเสริมเสถียรภาพและเสริมความมั่นคงให้กับลาดดิน และเนื่องจากเป็นวิธีการออกแบบและก่อสร้างที่ทำได้ง่ายหากเทียบกับการก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างจำพวกที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธีอื่น อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการก่อสร้างโครงสร้างชนิดอื่น จึงเป็นที่นิยมเลือกใช้สำหรับการป้องกันหน้าดิน ทั้งแบบถาวรและชั่วคราว

ในส่วนของหลักการในการออกแบบก็จะมีคล้ายคลึงกับการออกแบบ Soil Nail ในส่วนของการเจาะสำรวจดิน และการวางแผนการออกแบบหลุมเจาะตามแนวที่ต้องการทำการก่อสร้าง รวมไปถึงขั้นตอนในการควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง และการบำรุงรักษา โดยจะสามารถยึดหลักการที่ใช้ออกแบบร่วมกับวิธีการที่ใช้กับ Soil Nail ได้



รูปที่ 5.16 แสดงการติดตั้งกำแพง Soil Anchor ที่บริเวณผิวลาดคันดิน

ที่มา: Se Woon Choi et al. (2013)

2) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

ในส่วนของการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง ของการก่อสร้างสมอยึดดิน (Soil Anchor) ซึ่งจัดเป็นอีกหนึ่งเป็นกิจกรรมที่สำคัญมากในการทำให้การก่อสร้างของกำแพง Soil Anchor ซึ่งต้องเป็นไปตามแผนการและข้อกำหนดของการก่อสร้าง การตรวจสอบการก่อสร้างถ้าทำอย่างถูกต้องจะเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการได้โครงสร้าง ที่มีคุณภาพดี โดยในการตรวจสอบจะต้องคำนึงถึงหลักการ การตรวจสอบการก่อสร้างได้แก่ ความถูกต้องของวัสดุ, ความถูกต้องของวิธีการก่อสร้าง, และ พฤติกรรมของ ตัวสมอยึดดินหลังและระหว่างการก่อสร้าง โดยหลักการโดยทั่วไปจะเป็นไปตามกลไกของการควบคุมตรวจรับ งานก่อสร้างทั่ว ๆ ไป คือในส่วนของตัวแทนของเจ้าของงาน, ผู้รับเหมา, หรือทั้งคู่สามารถทำการตรวจสอบการ ก่อสร้างขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญา อย่างไรก็ตามการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างโดยทั่วไปจะทำ โดยตัวแทนของเจ้าของงาน ซึ่งก็มักจะเป็นที่ปรึกษาด้านงานก่อสร้างเฉพาะทางที่มีความรู้ความชำนาญในงาน ทางด้านนี้โดยเฉพาะ สำหรับสัญญาแบบ Method Approach การตรวจสอบการก่อสร้างจะทำโดยตัวแทน ผู้รับเหมาตามข้อกำหนดของวัสดุและวิธีการก่อสร้างที่กำหนดในแผนงานและข้อกำหนดที่ให้โดยเจ้าของงาน ความรับผิดชอบของผู้รับเหมาคือทำตามแผนงานและข้อกำหนดได้ผลงานตามที่ตกลงกันไว้ในสัญญา ซึ่งจะมี ความคล้ายคลึงกับการตรวจอบงานก่อสร้าง Soil Nail หรือไม่ว่าจะเป็นการตรวจรับงานและควบคุมงานของ การก่อสร้างพื้นฐานทั่ว ๆ ไปโดยจะประกอบไปด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้ แผนงาน ข้อกำหนด การทดลองที่ ต้องการ สภาพสถานที่ก่อสร้าง สภาพวัสดุก่อสร้างที่ต้องการ และ ขั้นตอนการก่อสร้าง เป็นต้น โดยตัวอย่าง การก่อสร้าง Soil Anchor แสดงไว้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 แสดงลักษณะการก่อสร้างกำแพง Soil Anchor

ที่มา: India Mart , 2015

3) การบำรุงรักษา

เนื่องจากการก่อสร้าง Soil Anchor เป็นการก่อสร้างที่มีความคล้ายคลึงกับการก่อสร้าง Soil Nail ดังนั้นในขั้นตอนของการบำรุงรักษาจึงใช้ข้อกำหนดเดียวกันกับการบำรุงรักษาสำหรับระบบ Soil Nail นั่นคือจะมีการตรวจสอบโดยใช้ระบบความถี่ในการตรวจสอบเป็นรอบเวลา ทุก ๆ 5-10 ปี หรือต่ำกว่านั้น หากในขั้นตอนของการก่อสร้างได้ยืนยันผลการตรวจสอบว่ามีประสิทธิภาพน่าพึงพอใจ โดยใน

การสำรวจความเสียหายที่เกิดขึ้น จะอาศัยการสังเกตจากความเสียหายที่สามารถพบเห็นได้ด้วยตาเปล่าก่อน (ระบบระบายน้ำ, ความเสียหายที่บริเวณผิว) แล้วจึงลงลึกถึงการสำรวจตรวจสอบความเสียหายที่พบ โดยละเอียดต่อไป

5.7 การตอกเสาเข็ม (Shear Pin/Micro Pile)

1) แนวคิดและหลักการออกแบบ

เสาเข็ม เป็นโครงสร้างเสริมกำลังที่ติดตั้งผ่านชั้นดินที่ไม่แข็งแรงเพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ลาดดิน (รูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19) โดยเสาเข็มที่นำมาใช้นั้นมีหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นเสาเข็มตอก เสาเข็มเจาะ เสาเข็มเกลียว ส่วนวัสดุที่ใช้ก็นั้นก็สามารถเป็นได้ทั้งคอนกรีต เหล็ก (รูปที่ 5.20) หรือแม้แต่ไม้ ซึ่งเสาเข็มแต่ละประเภทมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน อาทิ เช่น การควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง การติดตั้ง ระยะเวลาดำเนินการ ราคา เป็นต้น อย่างไรก็ตามเสาเข็มเหล่านี้ต้องมีความแข็งแรงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนหรือแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการพังทลายของลาดดินได้ (กรณีที่เป็นกรณีการเลื่อนไถลของหินจะถูกควบคุมโดยแรงเฉือน กรณีที่เป็นดินมักจะถูกควบคุมโดยแรงดัด) โดยทั่วไปการติดตั้งเสาเข็มสามารถดำเนินการได้ทั้งในแนวตั้งและแนวเอียง (Batter) ซึ่งส่งผลต่อรูปแบบการพังทลายของเสาเข็มนั้น ส่วนขนาดที่ใช้จะขึ้นกับการออกแบบ โดยทั่วไปมักกำหนดให้ปลายเสาเข็มฝังมีระยะฝังที่เพียงพอลึกลงไปในพื้นที่ชั้นแข็งเพื่อเป็นจุดยึดในการต้านทานการเลื่อนไถล ระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีค่าประมาณ 3-5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มักจะใช้อัตราส่วนความปลอดภัยประมาณ 1.3-1.5 และต้องพิจารณาถึงการเคลื่อนตัวในแนวราบที่เกิดขึ้นเช่นกัน

2) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

ต้องมีการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างเสาเข็มให้เป็นไปตามที่กำหนด ถ้าหากเป็นเสาเข็มที่ผลิตจากโรงงาน ต้องตรวจสอบเอกสารรับรองคุณภาพเสาเข็มให้ถูกต้อง

กำหนดตำแหน่งการก่อสร้างเสาเข็ม ตรวจสอบแนวตั้งทั้งในแกน X และแกน Y ให้ถูกต้อง

ในการก่อสร้างต้องมั่นใจว่าเสาเข็มมีความยาวเกินกว่าชั้นดินอ่อนที่เกิดการเลื่อนไถล และมีระยะฝังลึกเพียงพอตามที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดการตอกเสาเข็มจนกระทั่งเสาเข็มหักหรือแตก

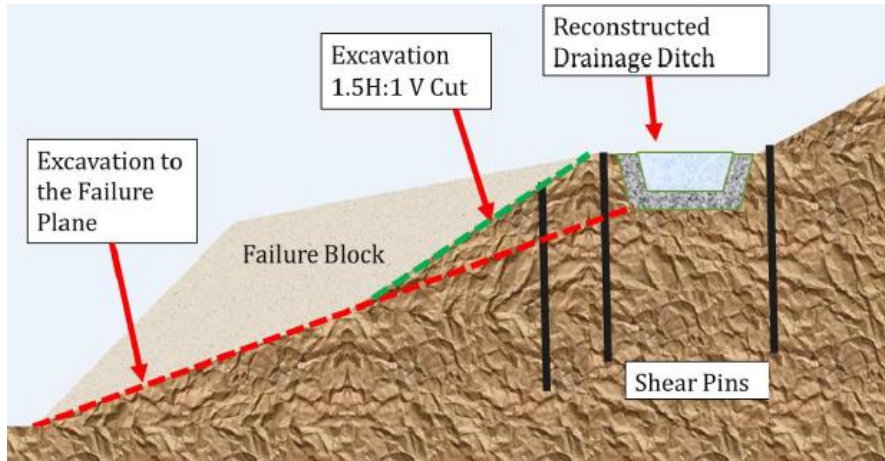
ควรหลีกเลี่ยงการเลือกใช้เสาเข็มที่ต้องมีการเชื่อมต่อระหว่างท่อน หรือถ้าหากจำเป็นต้องใช้ ควรพิจารณาให้รอยต่ออยู่นั้นไม่อยู่ในระนาบการเคลื่อนตัวของมวลดินหรือหิน ทั้งจำเป็นต้องควบคุมความแข็งแรงและคุณภาพของรอยต่อให้สามารถรับแรงด้านข้างได้ตามที่ต้องการ

3) การบำรุงรักษา

เนื่องจากเสาเข็มเป็นโครงสร้างที่ถูกฝังลงไปในพื้นที่ดิน การตรวจสอบและบำรุงรักษาสามารถทำได้โดยการสังเกตถึงสภาพภายนอกที่เกิดขึ้น เช่น ควรมีการตรวจสอบสภาพความสมบูรณ์ของเสาเข็มไม่ว่าจะเป็น การแตกหัก การเกิดสนิมในกรณีที่เป็นเสาเข็มเหล็ก หรือแม้แต่ประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำ

เป็นต้น ถ้าหากพบเจอความเสียหาย ควรต้องมีการบำรุงรักษาซ่อมแซมเพื่อให้เสาะเข้มนั้นกลับมาสู่สภาพสมบูรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้

นอกจากการประเมินด้วยสายตาแล้ว ยังสามารถดำเนินการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดการเอียง และการทรุดตัวของเสาะเข้มนั้น เพื่อป้องกันการโก่งเดาะและการเคลื่อนตัวของเสาะเข้มนั้นได้เช่นกัน



รูปที่ 5.18 ภาพสเก็ทซ์ การใช้เสาะเข้มนในงานซ่อมแซมเชิงลาด
ที่มา: Lobo-Guerrero (2019)



รูปที่ 5.19 ตัวอย่างการติดตั้ง Shear Pin
ที่มา: D.J. Scheffler & Nye, Inc. (2022)



รูปที่ 5.20 การติดตั้งเสาะเข้มนเหล็ก

5.8 การพ่น Shotcrete

1) แนวคิดและการออกแบบ

ชอตกรีต (Shotcrete) คือ การพ่นมอร์ตาร์ผ่านหัวพ่นโดยใช้ความดันลมความเร็วสูงไปยังพื้นผิวที่ต้องการ การพ่นคอนกรีตลงบนผิวความหนา 7.5 - 15 เซนติเมตร ใช้งานสำหรับความหนาไม่มากและเสริมเหล็กค่อนข้างน้อย เพื่อป้องกันการกัดเซาะบริเวณผิวหน้าของเชิงลาดทั้งป้องกันการเคลื่อนตัวและพังทลายของหน้าดิน โดยคอนกรีตพ่นมี 2 แบบ แบบแห้ง (Dry Mix) แบบเปียก (Wet Mix) ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น รายละเอียดการทำงาน ความเหมาะสมของวัสดุผสมรวม การบำรุงรักษาเครื่องจักร ค่าใช้จ่ายในการลงทุน ฯลฯ (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2562) โดยงานพ่น Shotcrete จะพบเห็นได้มากในงานสร้างถนนที่อยู่ใกล้บริเวณไหล่เขาและงานอุโมงค์ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.21 อย่างไรก็ตามไม่นิยมใช้ Shotcrete ในพื้นที่ที่มีน้ำไหลผ่านผิวดิน หรือในบางกรณีที่มีน้ำใต้ดินซึ่งก่อให้เกิดแรงดันน้ำในดินสูงขึ้น อาจส่งผลให้คอนกรีตที่พ่นไว้เกิดการแตกร้าวได้ นอกจากนี้ในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว ถ้าหากไม่มีการใช้สลักยึดหินและระบบระบายน้ำ อาจทำให้เกิดความเสียหายได้ดังแสดงในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.21 Shot Crete งานสร้างถนนที่อยู่ใกล้บริเวณไหล่เขา

ที่มา: <https://www.civilclick.com/guniting>

2) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

ควรตรวจสอบคุณภาพวัสดุที่นำมาผสม เช่น ปูนซีเมนต์ วัสดุผสมรวม น้ำ หรือแม้แต่เหล็กเสริมหรือลวดตาข่าย ให้มีคุณสมบัติตามที่กำหนด ทั้งนี้ในการใช้งาน Shotcrete จะทำการทดสอบส่วนผสมก่อนการใช้งานจริง โดยการนำวัสดุผสมแล้วสุ่มเก็บตัวอย่างลูกปูน กดลูกปูนเพื่อดูกำลังอัด ว่าเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ และการนำวัสดุผสมและพ่นใส่กระบะ ให้ได้ความหนา 15-20 ซม. และทำการเจาะ (Coring) ขนาด 4-6 นิ้ว เป็นการเก็บตัวอย่าง งานปริมาณ 30 ตร.ม. จะสุ่มเก็บตัวอย่าง 1 ชุด หรือแล้วแต่ผู้ควบคุมงานกำหนด

3) การบำรุงรักษา

เนื่องจากคอนกรีตที่พ่นไว้จะจะมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน ทั้งยังถูกกัดกร่อนตามสภาพภูมิอากาศ จึงควรมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาตามอายุการใช้งานโดย

สังเกตหรือเสริมสร้างคอนกรีตเพื่อตรวจสอบชั้นหรือพื้นที่ที่บกพร่อง

ขจัดคอนกรีตที่อ่อนแอด้วยค้อนตัดมือหรือค้อนน้ำแรงดันสูงพิเศษเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่ไม่จำเป็นของคอนกรีตพื้นฐานและเสริมเหล็ก ขจัดวัสดุที่หลวมหรือแตกออก

แทนที่หรือเสริมเหล็กเส้นที่เสียหายถ้าจำเป็น ปรึกษาผู้ออกแบบสำหรับขนาดและระยะห่างที่ต้องการ แยกข้อต่อทับซ้อนกันในเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเพื่อความสะดวกในการวางวัสดุซ่อมแซม

ห้ามวางเหล็กใหม่โดยตรงหลังหรือด้านหน้าของบาร์ที่มีอยู่ ฉีดน้ำบนพื้นผิวของเหล็กและพื้นที่ที่จะซ่อมแซมเพื่อลบสิ่งใด ๆ ที่ปนเปื้อน และสเปรย์บนพื้นผิวด้วยน้ำและปล่อยให้แห้งกลับสู่สภาวะที่พื้นผิวแห้ง (SSD) อิมิตัว



รูปที่ 5.22 ความเสียหายของ Shotcrete ระหว่างเกิดดินถล่มเนื่องจากแผ่นดินไหว Kumamoto a) บริเวณสะพาน Oogiribata b) เซึ่งลาดตั้งฉาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึง Shotcrete นั้นหลุดร่วงไป แต่ดินเกิดความเสียหายน้อย

ที่มา: Katsuichiro et al. (2017)

5.9 ตาข่ายกันหินร่วง (Rockfall Netting)

1) แนวคิดและหลักการออกแบบ

ตาข่ายกันหินร่วง (Rockfall Netting) เป็นตาข่ายกำลังสูงที่ติดตั้งในพื้นที่เสี่ยง เช่น พื้นที่ภูเขา หรือพื้นที่ลาดชัน เพื่อป้องกันไม่ให้หินร่วงหล่นลงมาสู่พื้นที่ด้านล่าง อันอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้คน อาคาร หรือแม้กระทั่งโครงสร้างทางที่อยู่ด้านล่าง โดยตาข่ายนั้นสามารถประยุกต์ใช้ได้กับเชิงลาดทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นเชิงลาดดินปนหิน หรือเชิงลาดหิน ทั้งนี้ในการก่อสร้างนั้นมีหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการยึดตาข่ายบริเวณขอบคล้ายผ้าม่าน (Drapery System, รูปที่ 5.23) หรือในกรณีที่ต้องการปรับปรุงหน้าเชิงลาดอาจมีการใช้หมุดยึดหรือใช้วัสดุประเภท High Energy Absorption (HEA) รวมทั้งอาจมีการฉีดพ่นคอนกรีตร่วมด้วยได้ (รูปที่ 5.24) ทั้งนี้ในการสร้างตาข่ายคลุมลาด (Slope Coverage) พื้นที่ครอบคลุมจะถูกกำหนดจากการประเมินทางธรณีวิทยา หรือธรณีเทคนิคของพื้นที่ที่มีการเกิดหินตก และขยายขอบเขตออกไปนอกพื้นที่หินตกชั้นต่ำประมาณ 3-4 เมตร อาจมีการขยายพื้นที่บริเวณด้านบนของลาดดิน หากตรวจสอบพบว่ากำลังของหินด้านบนมีสภาพเสื่อมลง

นอกเหนือจากนี้ยังมีการใช้รั้วป้องกันหินร่วง (Rockfall Protection Fence) แบบ Passive ซึ่งมีลักษณะเป็นรั้วตาข่ายยืดหยุ่นไว้รับหิน (Flexible Catching Fence) โดยใช้ตาข่าย โครงสร้างเสาเหล็ก และลวดเหล็กรับแรงดึงเพื่อดำเนินงานแรงกระทำเนื่องจากหินร่วง พร้อมป้องกันไม่ให้ก้อนหินหล่นสู่พื้นที่ด้านล่าง โดยในปัจจุบันมีการรั้วป้องกันหินร่วงหลายแบบ ทั้งแบบรั้วหรือแบบอุโมงค์คังแสดงในรูปที่ 5.25 และรูปที่ 5.26 ตามลำดับ หรือบางกรณีอาจพิจารณาใช้โครงสร้างแข็ง (Rigid) ในการต้านแรงได้ขึ้นกับแรงกระทำที่ออกแบบไว้ (รูปที่ 5.27)



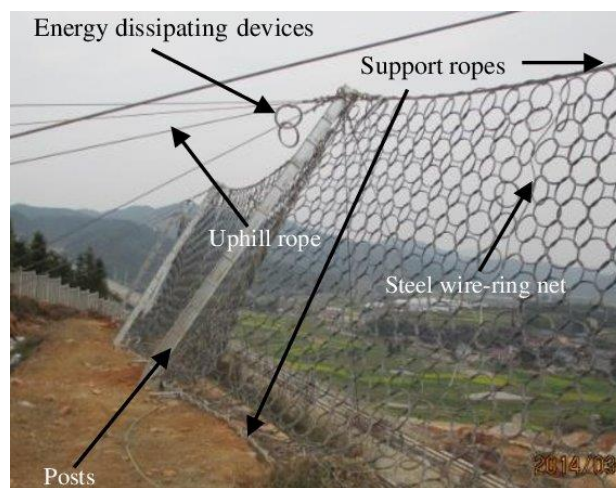
รูปที่ 5.23 ตาข่ายกันหินร่วง ระบบ Drapery

ที่มา: Indian Railways Institute of Civil Engineering (2022)



รูปที่ 5.24 ตัวอย่างการป้องกันหินร่วงด้วยวิธี High Strength Netting ร่วมกับ Shotcrete

ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง (2562)



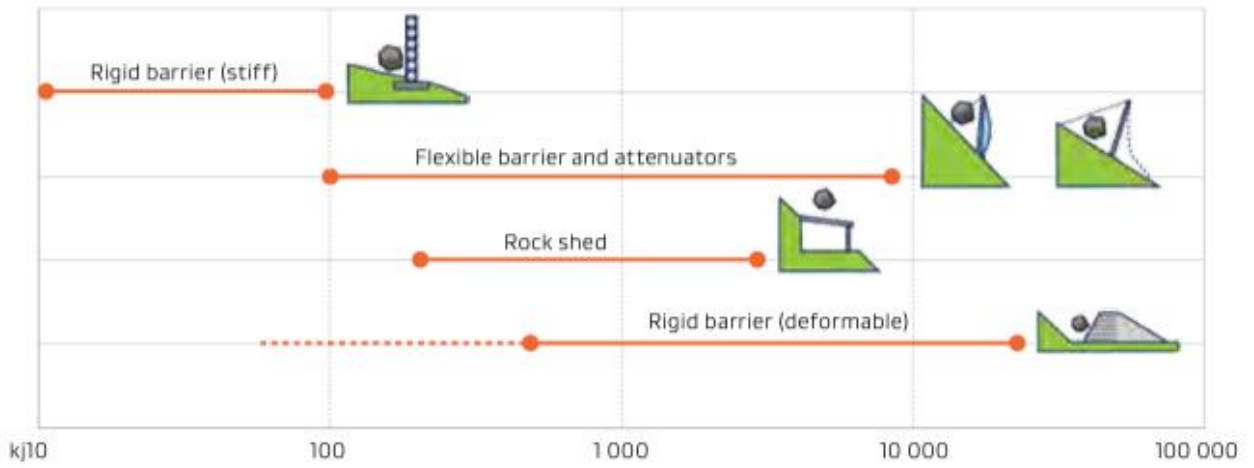
รูปที่ 5.25 ส่วนประกอบของ Rockfall Protection Fence

ที่มา : X. Qi et al. (2017)



รูปที่ 5.26 อุโมงค์ป้องกันหินร่วง

ที่มา: GEOTECH (2022)



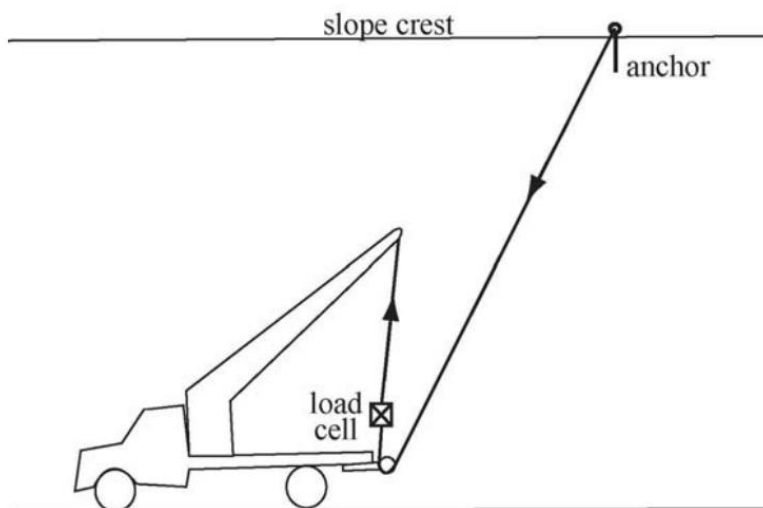
รูปที่ 5.27 ความสามารถในการรับแรงของระบบป้องกันหินร่วงแบบ Passive

ที่มา: Ministry of Business, Innovation & Employment (MBIE) (2016)

2) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

ต้องมีการตรวจสอบแบบและข้อมูลก่อสร้าง เช่น ข้อมูลของเชิงลาด คุณภาพหิน ฐานราก ระบบยึดรั้ง พื้นที่ก่อสร้าง เป็นต้น

ต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุ เช่น การติดตั้งสายเคเบิลหรือเชือกค้ำที่ยึดกับสมอ โดยการทดสอบแรงดึงโดยวิธี Load Cell (รูปที่ 5.28) ให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ตรวจสอบหมดยึดตาข่าย ไบร่รับรองคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ ฯลฯ หรือแม้แต่ขั้นตอนการติดตั้งให้เป็นไปตามที่กำหนด



รูปที่ 5.28 การทดสอบความแข็งแรงของสายเคเบิลยึดสมอ

ที่มา : B.Muhunthan et al. (2005)

3) การบำรุงรักษา

ในงานบำรุงรักษาทั่วไป ควรมีการกำจัดเศษซากดินหรือพืชพรรณที่สะสม ตรวจสอบส่วนประกอบทางกล เช่น เสา สายเคเบิล ตาข่าย ฯลฯ ตรวจสอบการป้องกันการกัดกร่อน และตรวจสอบและทำความสะอาดงานระบายน้ำ รูปที่ 5.29 แสดงตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบป้องกันหินร่วง

สำหรับการตรวจสอบหลังเกิดเหตุการณ์หินร่วงนั้น ควรมีการตรวจสอบส่วนประกอบทั้งหมดที่อาจเกิดความเสียหาย ทำความสะอาดเศษซาก ซ่อมแซมหรือเปลี่ยนส่วนประกอบที่เสียหายจากหินร่วง ทั้งนี้ระบบป้องกันหินร่วงแบบ Passive ควรกลับสู่สภาพที่มีความสามารถตามที่ออกแบบไว้หลังการบำรุงรักษา

นอกจากนี้ควรมีการตรวจสอบด้วยสายตา เพื่อประเมินโอกาสการเกิดหินร่วงว่ามีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปหรือไม่ เช่น มีการคลายตัวหรือการเคลื่อนที่ของบล็อกหิน เป็นต้น



รูปที่ 5.29 ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบป้องกันหินร่วง

ที่มา: Arndt et al. (2015)

5.10 หมุดยึดหิน (Rock Bolt)

1) แนวคิดและหลักการออกแบบ

การทำสลักยึดหิน (Rock Bolt) ใช้หลักการเดียวกันกับการทำหมุดยึดดิน (Soil Nail) ซึ่ง Soil Nail ใช้สำหรับยึดดิน ส่วน Rock Bolt ใช้สำหรับยึดดินปนหิน หรือหิน อย่างเดียว โดยใช้เหล็กเส้นที่มีความยาวและกำลังพอที่จะช่วยเพิ่มแรงต้านทานการเลื่อนตัวและเพิ่มกำลังให้กับแนวรอยเลื่อน

Rock Bolt (รูปที่ 5.30) คือ เหล็กข้ออ้อยรับแรงดึงที่ทำการตรึงด้วยแรงดึงในระหว่างติดตั้งปลายด้านในยึดติดกับหิน ส่วนปลายด้านหนึ่งมีแผ่นเหล็กรับแรง และนอตยึดติดกับคอนกรีตพันไว้ การออกแบบ Rock Bolt เพื่อเพิ่มความมั่นคงของลาดเขาต้องมีข้อกำหนดในการออกแบบดังนี้

คุณสมบัติพื้นฐานของ Rock Bolt และหลุมเจาะ ควรคำนึงถึงความยาวของ Rock Bolt และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะให้มีความเหมาะสม

คำนวณแรงดึงสูงสุดของ Rock Bolt เลือกค่าน้อยระหว่าง แรงดึงปลอดภัย, แรงยึดเกาะระหว่างหินกับคอนกรีต และแรงยึดเกาะระหว่างเหล็กกับคอนกรีตที่ Rock Bolt สามารถรับได้

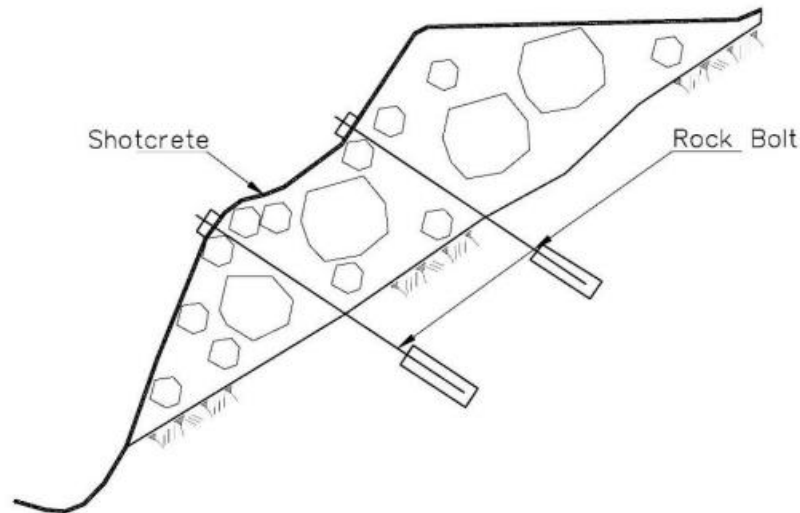
คำนวณความยาว พื้นที่ และน้ำหนักของผิวการพิบัติ

คำนวณแรงดึงที่ต้องการ

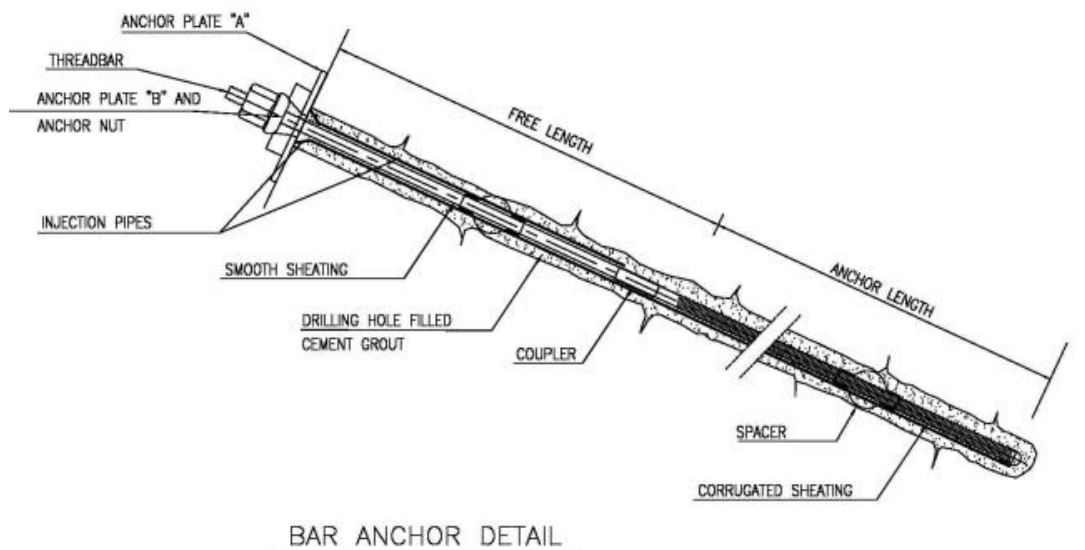
คำนวณระยะห่างของ Rock Nail

สิ่งที่ต้องคำนึงถึง

1. ขนาดความยาวของ Rock Bolt ต้องยาวมากกว่าขอบเขตวงพิบัติจึงจะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรง
2. ต้องมีระบบระบายน้ำใต้ดิน เช่น Weep Hole เพื่อช่วยระบายน้ำออกจากมวลหิน



รูปที่ 5.30 ตัวอย่างการเสริมความแข็งแรงให้ดินโดยใช้หมุดยึดหิน
ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2562)



รูปที่ 5.31 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหมุดยึดหิน
ที่มา: https://www.larimit.com/mitigation_measures/992/

2) การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้าง

1. วัสดุ

- เหล็กสลัก (Bolt) ทำด้วยเหล็กข้ออ้อยชุบกำลวานไนท์
- ขนาดและรูปร่างของแผ่นเหล็กรับแรง (Bearing Plate) ทั้งแผ่นเหล็กรับแรงแหวนรองและน็อต ซึ่งต้องสัมผัสอากาศตลอดเวลาในนั้นต้องชุบด้วยกำลวานไนท์เพื่อป้องกันการผุกร่อน
- มอร์ตาร์จะประกอบด้วย ทรายละเอียด ปูนซีเมนต์ และน้ำที่ผสมกันเป็นเนื้อเดียวกัน

2. การทดสอบ Rock Bolt

- ก่อนเริ่มต้องทำการทดลองติดตั้งและดึง Rock Bolt เพื่อตรวจสอบว่าเป็นไปตามที่กำหนดในการออกแบบหรือไม่ โดย Rock Bolt ที่ทดลองต้องติดตั้งในสภาพหินที่เหมือนกับ Rock Bolt ที่จะทำการติดตั้งในบริเวณมวลหินที่จะปรับปรุงเสถียรภาพต่อไป

- การทดสอบ Pullout Tests ของ Rock Bolt จะดำเนินการหลังจากติดตั้งแล้ว 28 วัน

3. การติดตั้ง Rock Bolt

- ต้องดำเนินการติดตั้ง Rock Bolt ทันทีหลังจากขุดหินที่ผุและขนย้ายหินเสร็จแล้ว
- ต้องเจาะรูให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักได้ไม่น้อยกว่า 44 มิลลิเมตร เช่น เมื่อใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร จะต้องใช้ขนาดรูเจาะไม่น้อยกว่า 76 มิลลิเมตร ความลึกและตำแหน่งตามที่ออกแบบ และก่อนที่จะทำการติดตั้งสลักยึดหินต้องทำความสะอาดรูเจาะด้วยแรงดันลม และ/หรือน้ำภายใต้แรงดันก่อน
- ก่อนติดตั้ง Rock Bolt ต้องทำความสะอาดเหล็กยึดให้ปราศจากสนิมคราบสะเก็ด คราบน้ำมัน หรือสิ่งอื่นใดที่เคลือบอยู่ให้หมด
- วิธีการอัดฉีดมอร์ตาร์ให้สามารถอุดช่องว่างระหว่าง Rock Bolt กับผิวหน้าหินได้อย่างสมบูรณ์ ตลอดความยาวของ Rock Bolt



รูปที่ 5.32 การเจาะหินเพื่อติดตั้ง Rock Bolt

ที่มา: https://www.larimit.com/mitigation_measures/992/

3) การบำรุงรักษา

การบำรุงรักษาและป้องกันการกัดกร่อนของสมอยึดจะช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของส่วนประกอบอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน การบำรุงรักษา Rock Bolt ควรทำการตรวจสอบและบำรุงรักษาอยู่เสมอไม่เฉพาะเมื่อเกิดความเสียหาย เนื่องจากโดยทั่วไปจะทำการสังเกตด้วยตาเปล่าในการสำรวจเพื่อบำรุงรักษา แต่ในบางกรณี อาจไม่มีความเสียหายที่แสดงอย่างชัดเจน โดย Pavements and Geotechnical Unit (2021) ได้แนะนำให้พิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

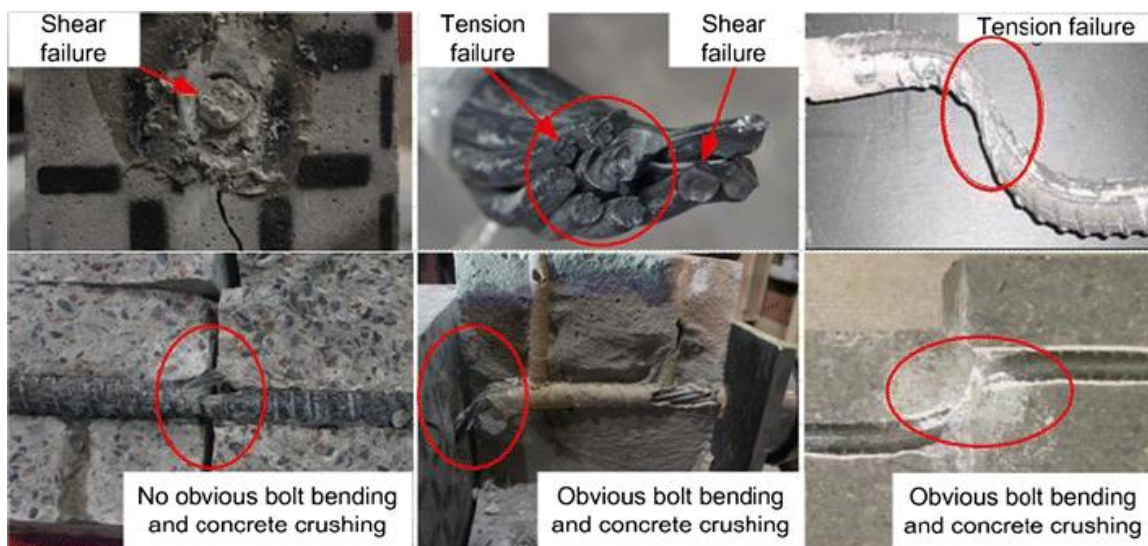
ความเสียหายและการเคลื่อนตัวของสมอยึด หากมีการเคลื่อนตัวของสมอยึด สามารถเป็นการบ่งชี้ได้ว่าเส้นลวดมีความเสียหาย หรือฉีกขาด หรือในบางกรณี มีการเลื่อนหลุดเฉพาะสมอยึด

ความเสียหายบริเวณคอนกรีตยึดหัว อาจเกิดรอยแตก หรือความเสียหายอื่น ๆ จากปัจจัยภายนอก และนอกจากนี้ความเสียหายที่คอนกรีตยึดหัวสามารถบ่งชี้ได้ถึงส่วนประกอบด้านในที่อาจเกิดสนิมขึ้นได้

การเคลื่อนตัวของรอบบริเวณหัวยึด จะเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีการเคลื่อนตัวของสมอยึด นอกจากนี้ยังรวมถึงมีการเปลี่ยนแปลงสภาพบริเวณโดยรอบสมอยึด เช่น หากมีการซึมของน้ำฝนหรือน้ำใต้ดินผ่านทางช่องหรือรอยแตกของหิน อาจทำให้เกิดการเติบโตของพืชบริเวณโดยรอบสมอยึด หรือมีการซึมของส่วนประกอบที่เกิดจากการกัดกร่อนออกมาที่สมอยึด ซึ่งสภาพภายนอกที่เปลี่ยนแปลงไปนี้สามารถบ่งชี้ได้ถึงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างได้

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเสริม เช่น เหล็กเสริมหรือคานคอนกรีตยึด (Grid Beam) สามารถเกิดจากการเคลื่อนตัวของมวลดินบนลาดดิน

การติดตั้งอุปกรณ์วัดเพื่อสังเกตการณ์เคลื่อนตัวและแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง เช่น Load Cell และ อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวต่าง ๆ

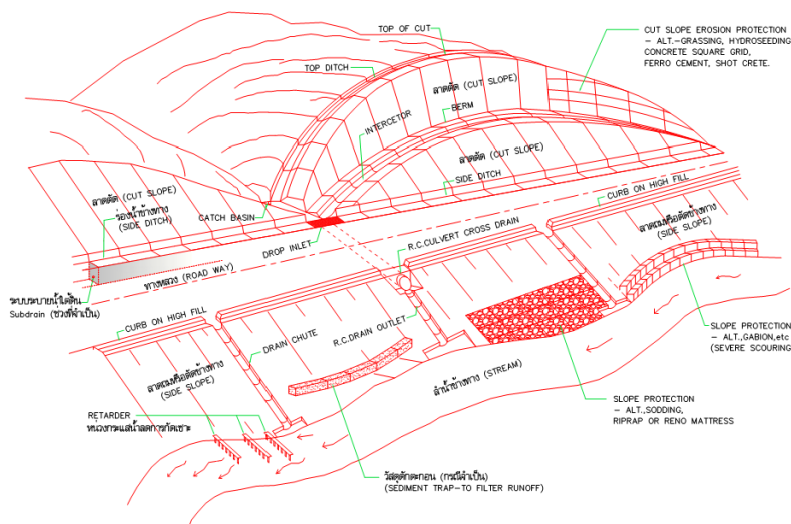


รูปที่ 5.33 การวิบัติในรูปแบบต่าง ๆ
ที่มา: Xuwei Li et al. (2016)

บทที่ 6 การบริหารจัดการน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินสำหรับงานทาง

6.1 แนวคิดและหลักการออกแบบ

ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตัดถนนผ่านที่ลาดชันหรือภูเขาคือปัญหาเนื่องจากการก่อสร้างถนนนั้นไปขัดขวางเส้นทางการไหลของน้ำใต้ดินในธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปนั้นน้ำจะไหลจากพื้นที่ที่มีศักยภาพของน้ำสูงไปสู่พื้นที่ที่มีศักยภาพของน้ำต่ำกว่า เมื่อมีถนนไปตัดผ่านพื้นที่บริเวณภูเขา ส่งผลให้ชั้นโครงสร้างทางนั้นอยู่ภายใต้แรงกระทำของน้ำ เกิดการกัดเซาะของชั้นดิน/หินบริเวณผิว นอกจากนี้ปัญหาจากระดับน้ำใต้ดินที่นับว่ามีความสำคัญเนื่องจากการเพิ่มสูงขึ้นของระดับน้ำใต้ดินนั้นส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุมีค่าลดลง ส่งผลต่อเสถียรภาพและอาจนำไปสู่การพิบัติของลาดดินนั้น ๆ ได้ ดังนั้นการก่อสร้างลาดดินหรือโครงสร้างป้องกันดินถล่มนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงระบบระบายน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินที่มีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นการก่อสร้างระบบระบายน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำไหลเข้าสู่โครงสร้าง เช่น การออกแบบระดับความลาดชันตามขวาง (Cross Slope) และตามยาว (Longitudinal Slope) การฉาบผิวเพื่ออุดรอยแตกและรอยต่อ ฯลฯ การออกแบบเลือกใช้วัสดุชั้นโครงสร้างทางเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากน้ำ เช่น การใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ การใช้วัสดุที่สามารถระบายน้ำได้ดี ฯลฯ หรือแม้แต่การใช้ระบบระบายน้ำใต้ดินเพื่อเร่งระบายน้ำที่ไหลเข้าสู่โครงสร้างพร้อมทั้งลดระดับน้ำใต้ดินในโครงสร้าง ชั้นระบายน้ำใต้ดิน (Drainage Layer หรือ Blanket) ร่องดักน้ำและระบายน้ำใต้ดิน (Subdrain หรือ Underdrain) การเจาะและวางท่อระบายน้ำใต้ดินแนวราบ (Horizontal Drain) ฯลฯ รูปที่ 6.1 แสดงระบบระบายน้ำและงานป้องกันการกัดเซาะของทางหลวงบนภูมิประเทศที่เป็นภูเขา ทั้งนี้การออกแบบนั้นจะต้องพิจารณาให้ครอบคลุมปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็นปริมาณน้ำที่ต้องระบายออกจากพื้นที่ จุดระบายน้ำออกจากพื้นที่ สภาพลักษณะของพื้นที่นั้น ๆ รวมทั้งสภาพและขีดความสามารถการระบายน้ำในปัจจุบัน



รูปที่ 6.1 ระบบระบายน้ำและงานป้องกันการกัดเซาะของทางหลวงบนภูมิประเทศที่เป็นภูเขา

ที่มา: กรมทางหลวง (2555)

6.2 การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพระหว่างก่อสร้างการบำรุงรักษา

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเชิงลาดมักมีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นการบำรุงรักษาระบบระบายน้ำ ทั้งผิวดินและใต้ดินให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง หากพบว่าระบบ ควบคุมการไหลของน้ำไม่ดีหรือไม่เพียงพอให้รับดำเนินการแก้ไขหรือก่อสร้างเพิ่มเติมทันที ทั้งยังต้อง ดำเนินการบำรุงรักษาเชิงลาดทางทั้งในลักษณะของแบบบำรุงปกติ (Routine Maintenance) และแบบ ป้องกัน (Preventive Maintenance) อย่างเคร่งครัด โดยกรมทางหลวง (มปป) ได้เสนอแนวทางในการ บำรุงรักษาระบบระบายน้ำไว้ดังนี้

6.3 ระบบระบายน้ำผิวดินของเชิงลาด

ในส่วนของระบบระบายน้ำผิวดินของเชิงลาด ทั้งรางระบายน้ำส่วนบน (Crest Ditch) รางระบายน้ำ บริเวณ Berm (Interceptor) รางระบายน้ำเหนือกำแพงกันดิน, Side Ditch, Drain Chute จะต้องมีการ ตรวจสอบว่า เกิดช่องว่าง (Gap) ระหว่างรางกับดินหรือไม่ เพราะช่องว่าง หรือ Gap ดังกล่าวนี้อาจเป็นสาเหตุ ให้น้ำไหลเข้าไปในช่องดังกล่าวได้

องค์ประกอบ ทางด้านสิ่งแวดล้อม สภาพภูมิประเทศ และกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การตัดไม้ทำลาย ป่า, การทำลายร่องน้ำธรรมชาติ สิ่งเหล่านี้จะเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้การไหลของน้ำมีความรุนแรง ทำให้เชิงลาดเกิดความเสียหายและพังทลายได้

การกัดเซาะผิวหน้าเชิงลาดเป็นการสะท้อนถึงความไม่สมบูรณ์ของระบบระบายน้ำ เช่น ขนาดไม่ เพียงพอของรางระบายน้ำ การวางตำแหน่งไม่ถูกต้องเหมาะสม แนวการวางบางช่วงเป็นแบบหักศอก รวมทั้ง ขนาดของบ่อรับน้ำ (Catch Pit) ไม่เหมาะสมกับปริมาณน้ำ จะทำให้เกิดการเอ่อล้น จะทำให้เกิดการกัดเซาะ หรือซึมนลงไปในดินได้ ดังนั้น การซ่อมบำรุงเพื่อการป้องกัน อาทิ การเพิ่มขนาดของรางระบายน้ำ และขนาด ของบ่อรับน้ำ รวมทั้งการปรับปรุงแนวการวางไม่ให้มีลักษณะการหักศอก และหรือก่อสร้าง Ditch Check ให้ เหมาะสม หากพบร่องรอยให้ รีบดำเนินการซ่อมแซมโดยการอุดช่องว่างดังกล่าว

สำหรับพื้นที่บริเวณที่มีพื้นที่รับน้ำ (Catchment Area) ขนาดใหญ่ให้ทำการวางระบบรางระบายน้ำ ให้เป็นไปในลักษณะกระจาย โดยการแบ่งส่วนของพื้นที่รับน้ำให้เล็กลง เพื่อจะลดขนาดความกว้างและความ ลึกของรางระบายน้ำ

ข้อแนะนำในการแก้ไขป้องกันปัญหาและความเสียหายจากระบบระบายน้ำผิวดิน คือ ควรจะให้ ดำเนินการตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบระบายน้ำในช่วงขณะฝนตกหนักเพื่อจะได้เห็นสภาพการไหล และ ปริมาณน้ำที่แท้จริง ซึ่งหมวดการทาง ควรจะได้ดำเนินการในลักษณะนี้ มีการบันทึกถ่ายรูป (ตัวอย่างดังแสดง ในรูปที่ 6.2) หรือ Sketch ภาพประกอบ และจัดทำรายงานให้ผู้อำนวยการแขวงทางหรือผู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อ จะได้แก้ไขและออกแบบปรับปรุงได้อย่างถูกต้องเหมาะสมต่อไป

6.4 ระบบระบายน้ำใต้ดิน

การไหลซึมของน้ำใต้ดิน ทั้งทางลาดดินตัดและลาดดินถม จะเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่จะทำให้เชิงลาดเกิดความเสียหาย และพังทลายได้ การออกแบบติดตั้งระบบป้องกันความเสียหาย ที่มีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นระบบ Horizontal Drain, Subdrain หรือ Weephole รวมทั้งการก่อสร้างที่ถูกต้องเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยป้องกันความเสียหายดังกล่าว ดังนั้น เชิงลาดใดที่มีการก่อสร้างติดตั้งระบบระบายน้ำใต้ดินที่มีคุณภาพเหมาะสมแล้ว หน้าที่สำคัญของหมวดการทางหรือผู้ที่เกี่ยวข้องในการบำรุงรักษาจะต้องหมั่นตรวจสอบประสิทธิภาพ การทำงานของระบบระบายน้ำใต้ดิน ไม่ว่าจะ เป็น Horizontal Drain, Subdrain หรือ Weephole ให้ทำหน้าที่ได้ดีอยู่เสมอ และในกรณีที่ส่วนใดที่ไม่มีระบบดังกล่าวนี้ ในส่วนของเชิงลาดที่ได้ก่อสร้างไปแล้ว หมั่นตรวจสอบและทำบันทึกการไหลซึมของน้ำใต้ดิน Sketch ภาพ หรือถ่ายภาพประกอบเพื่อรายงานผู้อำนวยการ แขวงทางหลวง เพื่อจะได้วินิจฉัยการแก้ไขป้องกันความเสียหายต่อไป



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างรางระบายน้ำที่ขาดการบำรุงรักษา
ที่มา: กรมทางหลวง (2554)

6.5 การติดตามพฤติกรรมการกัดเซาะของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน

1) การพิจารณาลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา (Hydrogeology)

ในงานออกแบบระบบระบายน้ำนั้นจะพิจารณาศาสตร์ทางด้านอุทกวิทยาและชลศาสตร์ควบคู่กันไป โดยทางด้านอุทกวิทยานั้นเกี่ยวข้องกับการเกิดฝนและการเคลื่อนตัวของน้ำท่า (Rainfall and Runoff) ส่วนทางด้านชลศาสตร์นั้นเกี่ยวข้องกับการไหลในทางน้ำ นอกเหนือจากศาสตร์ทั้งสองนั้นควรพิจารณาถึงสภาพทางธรณีวิทยาในพื้นที่เช่นกัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบระบบระบายน้ำ ประกอบไปด้วย

อุทกวิทยา

ข้อมูลลุ่มน้ำ (Basin or Watershed or Catchment) โดยผู้ออกแบบต้องทราบรูปร่างลักษณะของพื้นที่รับน้ำที่แตกต่างกันซึ่งจะส่งผลต่อระดับน้ำท่วมที่แตกต่างกัน ต้องทราบข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำเพื่อพิจารณาข้อมูลการไหลของน้ำ นอกจากนี้ยังต้องทราบข้อมูลภูมิประเทศ เช่น ความยาวความลาดเอียงของลำน้ำ ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำ

ข้อมูลฝน (Rain) เช่น ลักษณะการเกิดฝนในแต่ละพื้นที่ ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงบนพื้นที่ ความเข้มของฝน เพื่อไปออกแบบระบบระบายน้ำให้สามารถรองรับอัตราการไหลสูงสุดที่เกิดจากฝนตกสูงสุดในรอบปีที่กำหนดได้ (Return Period) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถหาได้ทั้งจาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิต กรมชลประทาน สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) เป็นต้น โดยตัวอย่างข้อมูลน้ำฝน 24 ชั่วโมงแสดงไว้ดังรูปที่ 6.3

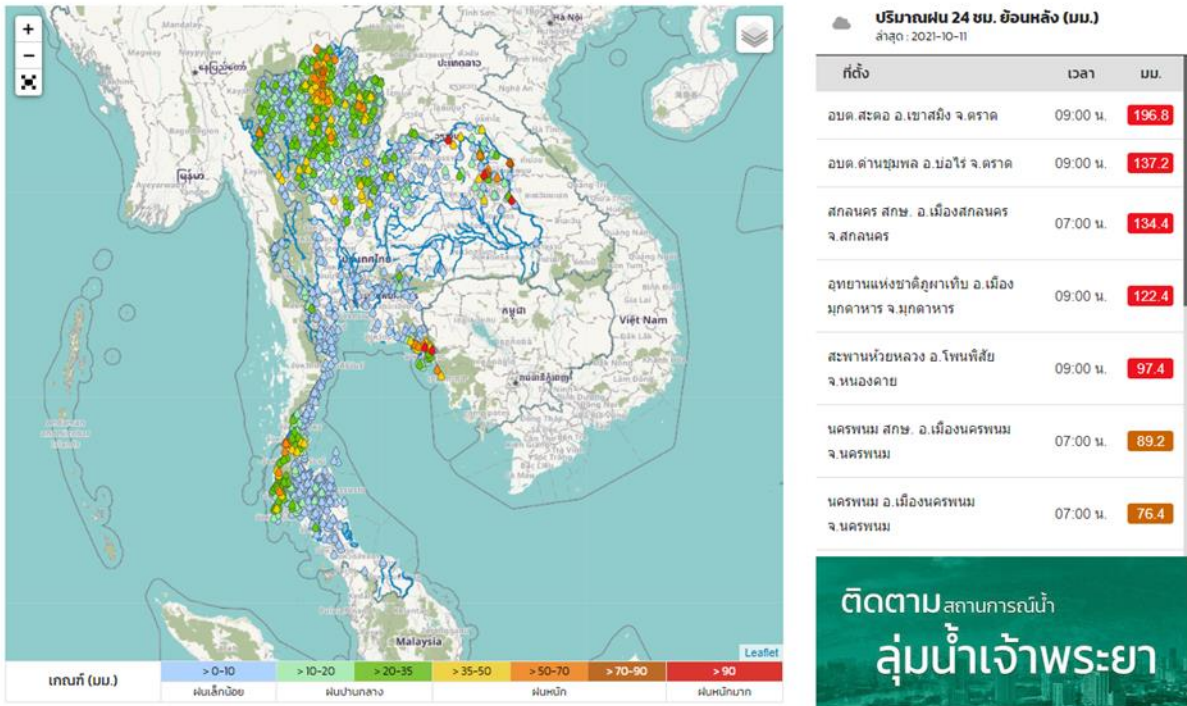
ข้อมูลน้ำท่า (Stream Flow or Runoff) หรือข้อมูลการไหลของน้ำในลำน้ำ ไม่ว่าจะ เป็นระดับน้ำ ความเร็วการไหล เพื่อให้สามารถคำนวณอัตราการไหลสูงสุดสำหรับใช้ในการออกแบบช่องเปิดให้สามารถระบายน้ำในรอบปีเกิดซ้ำที่กำหนดโดยไม่ก่อให้เกิดน้ำท่วมได้ โดยเกณฑ์ในการเลือกใช้วิธีการคำนวณอัตราการไหลสูงสุดของน้ำ แสดงไว้ดังตารางที่ 6.1 อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากการคำนวณหาค่าอัตราไหลสูงสุดแล้ว ยังสามารถหาข้อมูลอัตราไหลได้จากสถานีวัดน้ำใกล้เคียง หรือข้อมูลระดับน้ำสูงสุด ข้อมูลน้ำท่วมจากการบันทึกของหน่วยงาน ชาวบ้านในพื้นที่ หรือแม้แต่คราบระดับน้ำ หรือข้อมูลการระบายน้ำของอาคารระบายน้ำเดิมเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาได้

ตารางที่ 6.1 เกณฑ์ในการเลือกใช้วิธีการคำนวณอัตราการไหลสูงสุดของน้ำ

วิธีการคำนวณอัตราการไหลสูงสุด	ขนาดพื้นที่รับน้ำฝน (กม.) (A)	ข้อมูลที่จำเป็น
1. Rational Formula	$A \leq 25$	IDF Curve, ข้อมูลกายภาพของพื้นที่รับน้ำ เช่น รูปร่าง, ความลาดชัน, Land Used, ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า
2. กราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า	$25 \leq A \leq 1000$	- กราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่าของลุ่มน้ำ (Unit Hydrograph) - ข้อมูลน้ำฝน
3. กราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่าสังเคราะห์ ตามวิธี Snyder	$25 \leq A \leq 1000$	- ข้อมูลกายภาพของพื้นที่รับน้ำ - ข้อมูลน้ำฝน
4. กราฟความถี่น้ำท่วมเชิงภูมิภาค Regional Flood Frequency Analysis	$A \geq 25$	- ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ หรือ กราฟความถี่น้ำท่วมเชิงภูมิภาคของลุ่มน้ำ

ที่มา: กรมทางหลวง (2554)

☔️ แผนที่ฝน 24 ชม. ย้อนหลัง

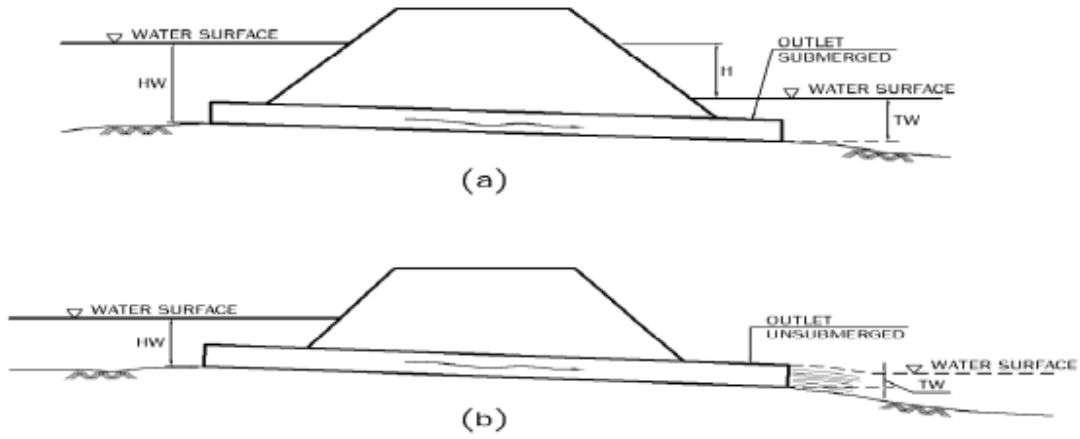


รูปที่ 6.3 ข้อมูลน้ำฝน 24 ชั่วโมง
ที่มา: <https://www.thaiwater.net>

2) ขลศาสตร์การไหล

การไหลในรางเปิด (Open Channel) เป็นการไหลที่ผิวน้ำสัมผัสกับอากาศตลอด เช่น แม่น้ำลำคลอง รางระบายน้ำแบบเปิด หรือการไหลในท่อที่ระดับน้ำไม่เต็มท่อ ซึ่งสามารถใช้สมการของแมนนิง (Manning’s Equation) ในการคำนวณหาขนาดความจุอัตราการไหลของหน้าตัดอาคารระบายน้ำได้ ทั้งนี้หน้าตัดทางขลศาสตร์ที่ดีที่สุด (หน้าตัดขวางน้อยที่สุด มีอัตราการไหลของน้ำตามต้องการ และมีเส้นขอบเปียกน้อยที่สุด) อาจไม่ใช่หน้าตัดที่ดีที่สุดในทางปฏิบัติ ขึ้นกับความยากง่ายและราคาในการก่อสร้าง

การไหลผ่านท่อลอด สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Inlet Control ซึ่งปริมาณน้ำที่ไหลผ่านท่อขึ้นอยู่กับสภาพที่ปากทางเข้าเท่านั้น ซึ่งลักษณะการไหลแบบ Inlet Control นี้ น้ำจะไหลไม่เต็มท่อ มีลักษณะความลาดเอียงมาก และประการสุดท้ายระดับน้ำปลายท่อ (Tail water) จะไม่สูงท่วมหลังท่อ ส่วน Outlet Control (รูปที่ 6.4) นั้นปริมาณน้ำที่ไหลจะขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ความลาดเอียงของท่อ ความหยาบผิว ความแตกต่างของระดับน้ำปากท่อและปลายท่อ รวมถึงลักษณะขอบปากท่อ ทั้งนี้การออกแบบท่อลอดจะต้องอาศัยวิธีการสมมุติค่า และทดสอบ (Trial and Error) คือเลือกขนาดท่อขนาดหนึ่งแล้วตรวจสอบดูว่าน้ำจะสามารถไหลผ่านได้ ตามอัตราที่กำหนดไว้หรือไม่ ปัญหาที่เกิดขึ้นในวิธีการเช่นนี้คือ ในขั้นแรกเราไม่ทราบว่าลักษณะการไหลจะเป็นแบบ Inlet Control หรือ Outlet Control โดยทั่วไปถ้าความลาดเอียงของท่อเท่ากับหรือมากกว่า 1% การไหลจะเป็นแบบ Inlet Control ถ้าน้อยกว่า 0.5% จะเป็นแบบ Outlet Control แต่เพื่อความแน่นอนจะต้องทดสอบลักษณะการไหลเสมอ

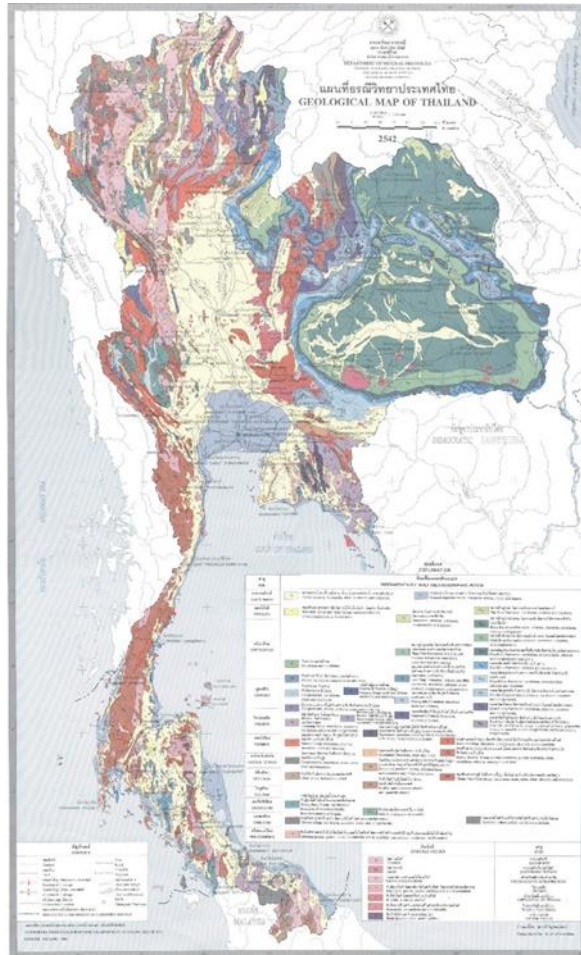


รูปที่ 6.4 ลักษณะการไหลของน้ำผ่านท่อลอดแบบ Outlet Control น้ำไหลเต็มท่อ
ที่มา: กรมทางหลวง (2555)

3) ธรณีวิทยา

ลักษณะภูมิประเทศ ส่งผลต่อลักษณะการไหลของน้ำ เนื่องจากโดยทั่วไปน้ำจะไหลจากที่ค้ำยกสูงไปสู่ที่ค้ำยกต่ำ ถ้าหากลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ลาดชันมาก การไหลของน้ำก็จะมีความเร็ว มีความรุนแรง อาจมีสิ่งของไหลตามน้ำ และก่อให้เกิดการกัดเซาะอย่างรุนแรงได้

ธรณีวิทยาโครงสร้างและชนิดดิน/หิน ลักษณะธรณีวิทยาของหินแต่ละชนิดมีแนวโน้มของลักษณะโครงสร้าง และการผุพังให้ดินที่มีความหนาและชนิดแตกต่างกันไป ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเม็ดดินและแรงต้านทานการไหลของดินล้วนแตกต่างกัน เมื่อมีน้ำไหลผ่านอาจก่อให้เกิดการกัดเซาะ หรือเกิดดินถล่มส่งผลต่อระบบระบายน้ำที่สร้างไว้ให้เกิดความเสียหาย หรือใช้ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังต้องระมัดระวังเรื่องน้ำใต้ดินที่อาจส่งผลต่อเสถียรภาพเชิงลาดเช่นกัน ทั้งนี้แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทยแสดงไว้ในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย
ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (มปป)

4) การใช้เทคโนโลยีเพื่อตรวจหาน้ำใต้ดิน

วิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ (Geophysical Method)

การทดสอบทางด้านธรณีฟิสิกส์ที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ตรวจหาน้ำใต้ดิน ได้แก่ การทดสอบ Resistivity Survey เนื่องจากแร่ประกอบดินและหินนั้นมีความเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ดินหินเหล่านี้เมื่อมีรอยแตกรอยแยก ก็มักจะมึน้ำซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสะสมอยู่ภายใน ดังนั้นการทดสอบหาค่าความต้านทานไฟฟ้าจึงสามารถตรวจวัดหาปริมาณความชื้นในดินและหินได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ขั้นตอนการสำรวจหาค่าความต้านทานไฟฟ้า ได้สรุปไว้ในหัวข้อ 2.4

การฟังเสียงน้ำใต้ดินด้วยอุปกรณ์ Groundwater Aeration Sound (GAS)

เทคโนโลยีสำรวจการไหลซึมน้ำใต้ดินด้วยเสียง (Groundwater Aeration Sound-GAS Survey) ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งในการออกแบบและติดตั้งระบบระบายน้ำใต้ดินในงานวิศวกรรมเชิงลาด คือ การระบุตำแหน่งวิกฤติในลาดซึ่งมีน้ำไหลซึมใต้ดินสูงได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากการไหลของน้ำใต้ดินมักมีรูปแบบไม่สม่ำเสมอ เรียกว่าการไหลลักษณะนิ้วมือ (Finger Flow) ทำให้ในบางกรณีท่อระบายน้ำใต้ดินอาจติดตั้งไม่ตรงกับตำแหน่งที่มีการไหลซึมสูง ดังนั้นเพื่อให้การติดตั้งระบบระบายน้ำใต้ดินมีประสิทธิภาพ จึงได้มี

การพัฒนาเทคโนโลยีสำรวจการไหลซึมน้ำใต้ดินด้วยเสียง หรือที่เรียกว่า Groundwater Aeration Sound (GAS) ในประเทศญี่ปุ่นเมื่อไม่นานมานี้ (Tada, 2012) และได้เริ่มนำมาประยุกต์ในงานด้านเสถียรภาพของลาดในประเทศไทย โดย อภินิติ และคณะ (2558), Jotisankasa et al. (2015) โดยเทคนิค GAS เป็นการประยุกต์เซนเซอร์วัดความเร่งที่มีความละเอียดสูง เพื่อวัดการสั่นสะเทือนหรือเสียงที่เกิดจากน้ำไหลผ่านโพรงดินและผลึกฟองอากาศออก เกิดเป็นเสียงแตกตัวของฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 6.6 และแปลงค่าสั่นสะเทือนจากหน่วยความเร่งเป็นหน่วยระดับความดังของเสียงที่เป็นดัชนี เรียกว่าค่า D ซึ่งกำหนดโดยผู้ผลิต ตัวอย่างผลการสำรวจการไหลซึมด้วยเสียงในพื้นที่ลาดเหนือคั่นทางบ้านหน้าถ้ำ อ.กาญจนดิษฐ์ จ.สุราษฎร์ธานี พบว่าตำแหน่งที่มีระดับเสียงน้ำดัง (ค่าการสั่นสะเทือนหรือ ค่า D สูง) สอดคล้องกับตำแหน่งดินถล่มในอดีต ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ควรมีการติดตั้งระบบระบายน้ำใต้ดิน และอย่างไรก็ดีค่า D ที่วัดได้นี้ยังไม่มีความสัมพันธ์กับแรงดันน้ำในดิน และระดับเสียงน้ำใต้ดินอย่างชัดเจน เนื่องจากปัญหาเสียงรบกวนพื้นหลัง แต่ก็สามารถนำไปประเมินตำแหน่งที่มีการไหลซึมมากกว่าจุดอื่น ๆ ในลาดได้ สามารถสรุปจุดแข็งและจุดอ่อนของเทคโนโลยี GAS ได้ดังนี้

จุดแข็ง Strengths

- การแปรผลรวดเร็ว ทราบตำแหน่งการไหลซึมได้ทันที
- อุปกรณ์น้ำหนักเบาสะดวกต่อการสำรวจบนลาดชัน
- สามารถหาดำแหน่งน้ำไหลแบบนิ้วมือ (Finger Flow) ได้แม่นยำกว่าวิธีจีโอฟิสิกส์แบบอื่น

จุดอ่อน Weakness

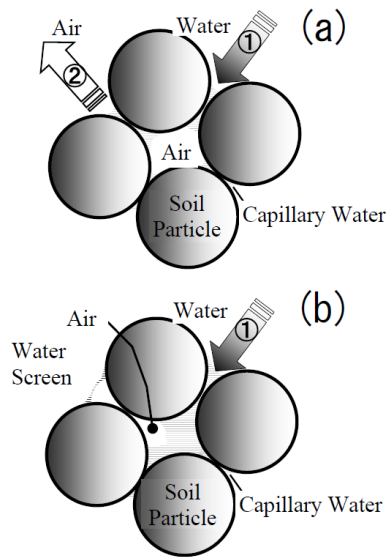
- ด้วยความละเอียดในปัจจุบัน วัดน้ำใต้ดินได้แม่นยำเฉพาะที่ระดับไม่ลึกมาก (< 10 เมตร)

โอกาส Opportunities

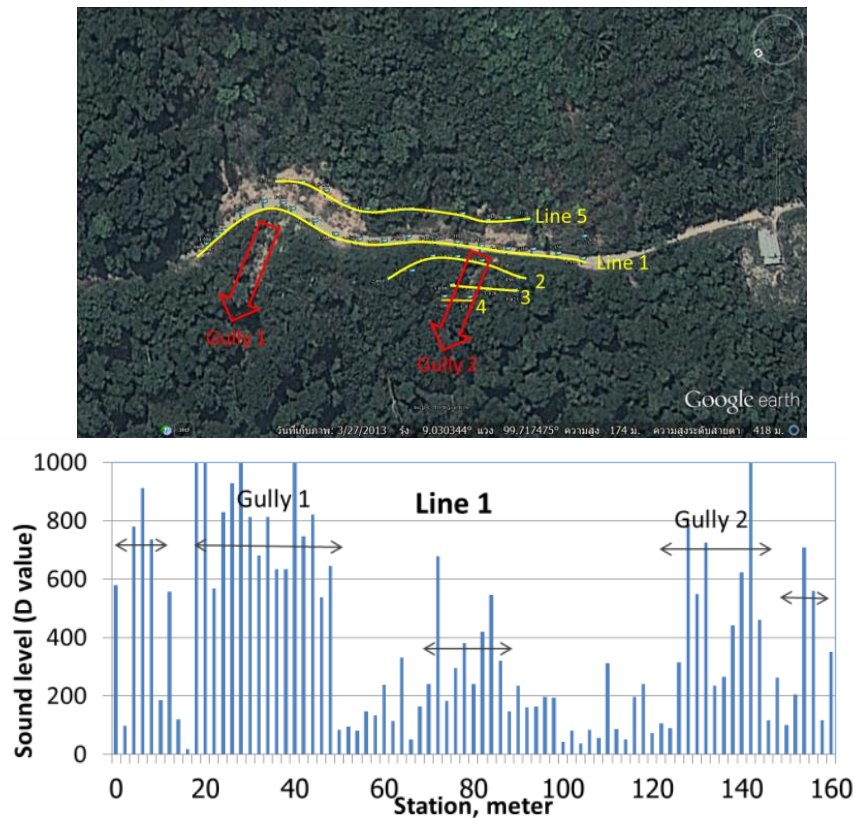
- เหมาะกับงานซึ่งต้องการความรวดเร็วในการระบุตำแหน่งน้ำใต้ดิน เช่น การกำหนดจุดติดตั้งระบบระบายน้ำระหว่างการก่อสร้าง การกำหนดจุดติดตั้งพีโซมิเตอร์
- เมื่อกำหนดจุดที่มีน้ำไหลซึมได้แม่นยำจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบระบายน้ำในงานเสถียรภาพลาด เช่น Horizontal Drain
- หากใช้ควบคู่กับวิธีวัดความต้านทานไฟฟ้าของดิน จะสามารถยืนยันตำแหน่งการไหลของน้ำได้โดยละเอียด
- สามารถใช้หาดำแหน่งจุดบ่อน้ำต้น เพื่อพัฒนาแหล่งน้ำบนที่สูงได้

อุปสรรค Threats

- อุปกรณ์ไม่สามารถใช้งานได้ในเวลาฝนตกหรือพื้นที่ซึ่งมีการจราจรคับคั่ง



รูปที่ 6.6 การเคลื่อนที่ของน้ำและอากาศในดิน ซึ่งส่งผลต่อเสียงน้ำใต้ดิน
ที่มา: Tada (2012)



รูปที่ 6.7 ตัวอย่างผลการวัดระดับเสียงน้ำใต้ดิน พื้นที่ลาดเหนือคั่นทางเข้าออกบ้านหน้าถ้ำ อ.กาญจนดิษฐ์
จ.สุราษฎร์ธานี
ที่มา: อภินิติ และคณะ (2558)

6.6 การเลือกใช้ระบบระบายน้ำชนิดต่าง ๆ

ในงานเชิงลาดนั้น การป้องกันไม่ให้น้ำเข้าสู่โครงสร้างและการระบายน้ำออกจากโครงสร้างนับว่าเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากปริมาณน้ำไม่ว่าจะเป็นปริมาณน้ำป่า น้ำฝน หรือแม้แต่ น้ำใต้ดินล้วนส่งผลกระทบต่อ

ต่อเสถียรภาพเชิงลาดทั้งสิ้น ด้วยเหตุนี้ความเข้าใจถึงข้อมูล สภาพลักษณะ รวมถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ในพื้นที่จึงส่งผลต่อการพิจารณารูปแบบระบบระบายน้ำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้ กรมทางหลวง (2554) ได้สรุปแนวทางการออกแบบและพิจารณาใช้งานระบบระบายน้ำใต้ดินบริเวณที่เป็นทางเขาหรือทางลาดชันไว้ดังตารางที่ 6.2 และรายละเอียดของระบบระบายน้ำแต่ละชนิดแสดงไว้ดังต่อไปนี้

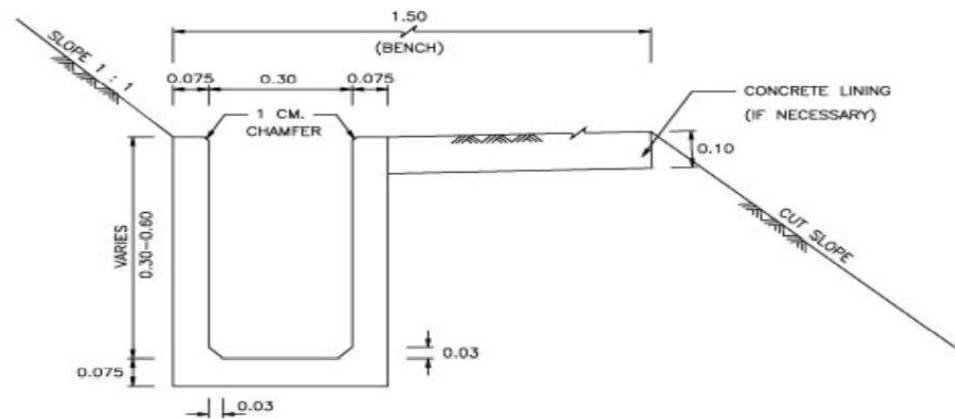
ตารางที่ 6.2 แนวทางการออกแบบและพิจารณาใช้งานระบบระบายน้ำใต้ดินบริเวณที่เป็นทางเขาหรือทางลาดชัน

ชนิดของระบบระบายน้ำใต้ดิน	วัตถุประสงค์	ข้อควรพิจารณาใช้งาน
1. ร่องตักน้ำและระบายน้ำใต้ดิน (Subdrain)	เพื่อตัดเส้นทางการไหลซึมและลดระดับน้ำใต้ดิน (Groundwater Table)	- ในกรณีตัด/ถมถนนบนภูเขาที่มีระดับน้ำใต้ดินสูงกว่าระดับถนน - ในกรณีตรวจพบน้ำใต้ดินปริมาณมาก ที่ระดับความลึกไม่เกิน 2.5 ม. ใต้ผิวดิน
2. การเจาะและวางท่อระบายน้ำใต้ดิน (Horizontal Drain)	เพื่อลดแรงดันน้ำใต้ดิน ลดระดับน้ำใต้ดิน และระบายน้ำใต้ดิน	- ในกรณีตัด/ถมถนนบนภูเขาที่มีระดับน้ำใต้ดินสูงกว่าระดับถนน - ในกรณีตรวจพบน้ำใต้ดินปริมาณมากไหลซึมจากเชิงลาด
3. ชั้นระบายน้ำใต้ดิน (Drainage Layer/Blanket)	เพื่อเร่งระบายน้ำใต้ดิน ลดแรงดันน้ำใต้ดิน และควบคุมน้ำใต้ดิน	- ในกรณีที่ตรวจพบน้ำซึมขังภายในชั้นทางหรือคันทาง (วัสดุอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ) และการระบายน้ำลงสู่ชั้นดิน Subgrade ไม่ดี - ในกรณีที่ประสบปัญหาน้ำใต้ดินใต้แก้ม จุดที่เป็นแอ่ง (Sag) หรือระดับเกรดของถนนมากกว่า 2 % จุดที่มีน้ำใต้ดินไหลมาบรรจบกัน จุดที่เป็นทางโค้ง จุดที่พบน้ำใต้ดินผุดขึ้นมา เป็นต้น - ในกรณีตัดถนนผ่านภูเขา

ที่มา: กรมทางหลวง (2554)

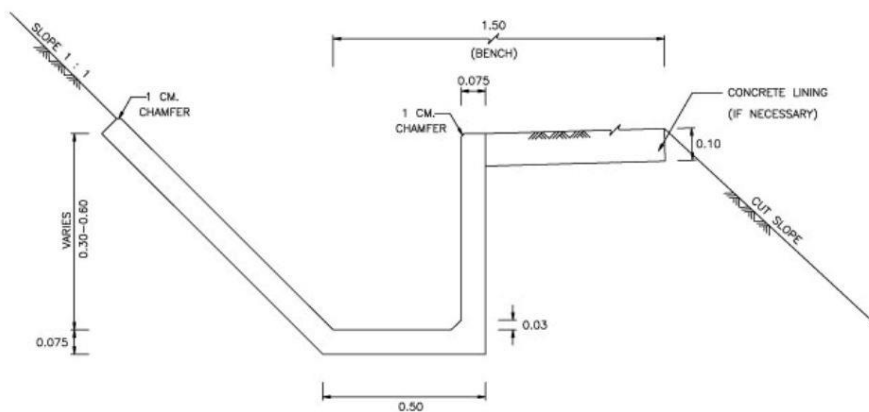
1) Interceptor Drain

ในช่วงที่มีการถมสูงหรือลาดดินตัดที่มีช่วงชานพัก (Bench) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของลาดคันทาง หากไม่มีการควบคุมน้ำบริเวณหน้าลาดคันทางจะทำให้เกิดการกัดเซาะบริเวณดังกล่าวหากปล่อยทิ้งไว้ให้เกิดความรุนแรงมากขึ้นในบริเวณช่วงชานพักจะต้องก่อสร้างทางระบายน้ำ เพื่อทำหน้าที่รวบรวมน้ำในแต่ละช่วงความสูงระบายน้ำลงสู่ระบบระบายน้ำตามลาดคันทางซึ่งระบบระบายน้ำนี้เรียกว่า Interceptor ทำให้สามารถช่วยควบคุมน้ำบริเวณหน้าลาดคันทางซึ่งทำให้เกิดการกัดเซาะบริเวณเชิงลาดได้ โดยทั่วไปนิยมใช้ Interceptor รูปตัว U (รูปที่ 6.8) กว้าง 30 เซนติเมตร ความหนา 7.50 เซนติเมตร ความลึกมีขนาดระหว่าง 30-60 เซนติเมตร และมี Shear Key ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร หรือรูปตัว V (รูปที่ 6.9) ปรับเอียงตามเชิงลาด โดยหลักเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกใช้แสดงไว้ดังตารางที่ 6.3 ทั้งนี้ต้องระวังปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งส่วนมากมักเกิดจากการกัดเซาะบริเวณกันราง Interceptor ทำให้เกิดความเสียหายและการพังทลายของลาดดินตัดหรือดินถมตามมาในภายหลัง



DETAIL OF CONCRETE INTERCEPTOR

รูปที่ 6.8 Interceptor Ditch รูปตัว U
ที่มา: กรมทางหลวง (2555)



DETAIL OF CONCRETE INTERCEPTOR

รูปที่ 6.9 Interceptor Ditch รูปตัว V
ที่มา: กรมทางหลวง (2555)

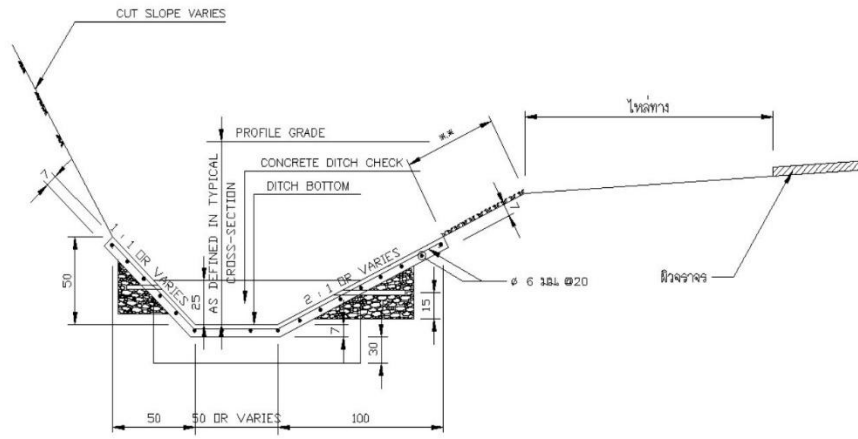
ตารางที่ 6.3 หลักเกณฑ์การเลือกชนิดของ Interceptor บนลาดตัดเขาและช่วงถมสูง

ลักษณะงาน	ความสูงคันทางกับดินเดิมที่ ต้องก่อสร้างอย่างน้อย (ม.)	ระบบระบายน้ำอื่น ที่ใช้ร่วม	หมายเหตุ
ลาดตัดคันทาง	9	- Cut of Ditch - Stepped Drain Chute	- Cut of Ditch จะต้องตรวจสอบความ สูงและสภาพยอดเนิน พร้อมจุดระบายน้ำ หาก ความสูงสูงกว่าที่แนะนำ ควรเพิ่มขึ้นในการตัด Back Slope
ลาดดินถม	≥ 9		- ก่อสร้าง Interceptor ตัวแรกมีความสูงจาก ระดับก่อสร้าง 5.00 ม. - Interceptor Ditch หรือ U-Ditch สามารถ ก่อสร้างบริเวณบนไหล่ ทางได้ ซึ่งสามารถใช้ ร่วมกับ Curb ดักน้ำและ อุปกรณ์ป้องกันอันตราย เช่น Guardrail หรือ Concrete Barrier ตาม สภาพพื้นที่

ที่มา: กรมทางหลวง (2555)

2) Side Ditch

ในกรณีที่เป็นงานตัดหรือคันทางต่ำสำหรับถนนนอกเมืองส่วนใหญ่ จะต้องทำการขุดร่องน้ำเปิดข้างทาง (Side Ditch, แสดงดังรูปที่ 6.10) เพื่อรับน้ำจากผิวจราจรที่ไหลลงข้างทาง เพื่อกักน้ำจากพื้นที่ประชิดข้างทางที่สูงกว่าถนนและเพื่อป้องกันให้น้ำเอ่อซึ่งอยู่ข้างทางในระดับสูงจนจะทำอันตรายให้กับตัวคันทางและชั้นทางในกรณีที่มีการกัดเซาะเกิดขึ้นในร่องน้ำหรือในกรณีที่ต้องการรักษาสภาพของร่องน้ำให้ใช้งานได้ดีก็จะต้องทำการลาดผิวด้วยคอนกรีต (Lining), หินเรียงยาแนว, หินเรียงยาแนว, ฟันยางแอสฟัลท์ทับหรือฉาบทับหน้าด้วยดินเหนียว และปลุกหญ้า



รูปที่ 6.10 Side Ditch
ที่มา: กรมทางหลวง (2555)

3) Drain Chute

Drain Chute คือช่องทางที่ออกแบบให้น้ำไหลบ่าลงมาจากตามทางลาด และปล่อยน้ำให้ออกไปสู่บริเวณทางระบาย โดยไม่ก่อให้เกิดการกัดเซาะบริเวณเชิงลาด โดย Drain Chute นั้นสามารถก่อสร้างโดยใช้หิน คอนกรีต ฝิว แอสฟัลต์ หรือแม้แต่ท่อทรงกระบอกผ่าครึ่งก็ได้ ทั้งนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเป็นการก่อสร้างเป็นขั้น ๆ (รูปที่ 6.11) ใช้ร่วมกับบ่อดักตะกอน เป็นต้น โดยทั่วไปความชันของ Drain Chute นั้นจะมีค่าประมาณ 2:1 (ระยะราบ:ระยะตั้ง) หรือมากกว่า และต้องออกแบบให้ครอบคลุมต่อปริมาณน้ำสูงสุดในรอบปีออกแบบ และครอบคลุมพื้นที่รับน้ำที่กำหนดไว้

โดยทั่วไป Drain Chute นั้นมักจะก่อสร้างบนดินบดอัด จำเป็นจะต้องมีการสัมผัสที่ดีระหว่างโครงสร้างและวัสดุมวลรวมเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังต้องป้องกันการกัดเซาะที่อาจเกิดขึ้นกับ Drain Chute (รูปที่ 6.12 และ รูปที่ 6.13) เช่นกัน ทั้งนี้เมื่อก่อสร้างเสร็จจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาเป็นระยะเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น



รูปที่ 6.11 Stepped Drain Chute
ที่มา: วรัช และคณะ (2556)



รูปที่ 6.12 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ Drain Chute เนื่องจาก ก) การกัดเซาะบริเวณขอบเนื่องจากน้ำทะลักออกจาก Chute และ ข) การกัดเซาะเนื่องจากการใช้ขนาดหินที่ไม่เหมาะสม

ที่มา: Environmental Section of the Idaho Transportation Department (2011)



รูปที่ 6.13 การกัดเซาะบริเวณด้านข้างและบริเวณปลาย Drain Chute

ที่มา: กรมทางหลวง (2555)

4) Horizontal Drain

ท่อระบายน้ำใต้ดินแนวนอน (Horizontal Drain, รูปที่ 6.14) เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งบริเวณฐานเชิงลาดหรือตำแหน่งอื่นที่เหมาะสมเพื่อลดระดับและแรงดันน้ำใต้ดิน วิธีการนี้จะเหมาะสมในกรณีที่เชิงลาดเกิดความเสียหายเป็นวงกว้าง และแนวการวิบัติกินลึกเข้าไปในชั้นดินฐานราก อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินอีกวิธีหนึ่ง

การติดตั้งโดยทั่วไปมักใช้ท่อ PVC หรือท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 38-40 มิลลิเมตร เจาะรูพรุนเป็นแบบช่องกลม (Perforate) หรือแบบเจาะร่อง (Slot) สอดเข้าไปในช่องที่เจาะเตรียมไว้ที่ผิวหน้าเชิงลาดด้วยเครื่องเจาะเฉพาะ (Boring Auger Machine) และเพื่อให้การระบายน้ำภายในท่อเป็นไปอย่างมี

ประสิทธิภาพ ควรเจาะให้มีความลาดประมาณ 5 องศา และหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ป้องกันการอุดตันนอกจากนี้ควรเผื่อความยาว (L) ให้มากกว่าระนาบการเคลื่อนตัว (Failure Plane) ออกไปประมาณ 5-20 เมตร ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ($L = 10.0$ เมตร สำหรับดิน และ $L = 3.0$ เมตร สำหรับหิน) เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถดักน้ำใต้ดินไหลเข้ามาในบริเวณเชิงลาดได้จริง และควรทิ้งช่วงปลายท่อปล่อยน้ำให้มีความยาวประมาณ 3 เมตร โดยไม่ต้องเจาะรูพรุน เพื่อให้ น้ำระบายออก อย่างไรก็ดีในการออกแบบจำเป็นต้องทราบระดับน้ำใต้ดินให้แน่ชัด โดยอาจติดตั้งบ่อสังเกตระดับน้ำ (Observation Well) ไปตามระดับความลาดชันของเชิงลาด ทั้งนี้ระดับน้ำที่แน่นอนอาจต้องใช้เวลาตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายวันถึง 1 สัปดาห์

งานตรวจสอบและบำรุงรักษาท่อระบายน้ำใต้ดินแนวราบเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่ออายุการใช้งาน เมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่ง วัสดุเม็ดละเอียดและวัชพืชอาจไปอุดตันภายในท่อเจาะได้ วิธีการทำความสะอาดสามารถทำได้โดยการฉีดน้ำด้วยแรงดันสูง นอกจากนี้ปลายท่อเจาะอาจมีวัชพืชหรือต้นไม้ขึ้นปกคลุมและอุดตันการระบายน้ำได้ การบำรุงดูแลรักษาอย่างสม่ำเสมอจะช่วยให้ท่อระบายน้ำใต้ดินแนวราบอยู่ในสภาพใช้งานได้ดีตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 6.14 ท่อระบายน้ำใต้ดินแนวราบ (Horizontal Drain)
ที่มา: กรมทางหลวง (2555)

5) Subdrain

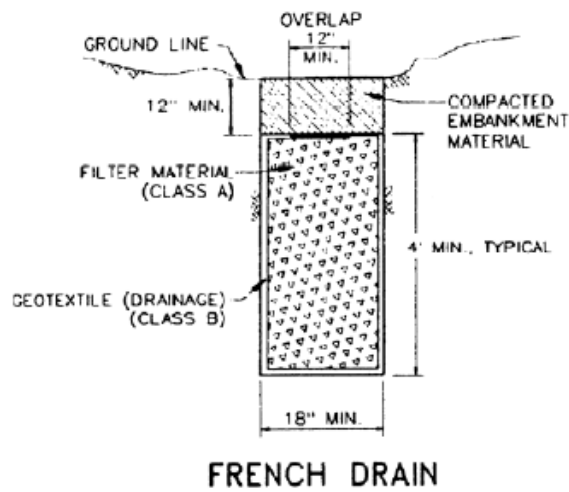
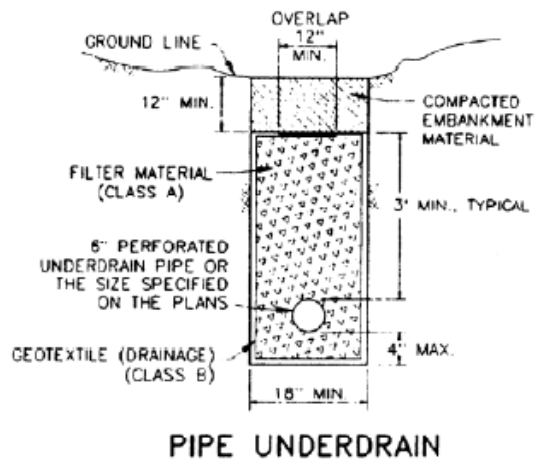
การไหลซึมผ่านของน้ำใต้ดินก่อให้เกิดปัญหาด้านความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทางและเสถียรภาพของคันทาง สภาวะดังกล่าวอาจทำให้โครงสร้างชั้นทางเกิดการชำรุดเสียหาย คันทางเกิดการวิบัติและพังทลายออกไปจากแนวเส้นทาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบระบบระบายน้ำใต้ดินเพื่อดักน้ำดังกล่าว ร่องดักน้ำและระบายน้ำใต้ดิน (Subdrain) ที่ออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกต้อง จะช่วยควบคุมการไหลซึมของ

น้ำใต้ดินได้ โดยการตัดเส้นทางไหลซึมและลดระดับน้ำใต้ดินก่อนไหลซึมสู่ชั้นโครงสร้างทาง Subdrain โดยทั่วไปจะประกอบด้วยท่อเจาะรูพรุนโดยรอบและถมกลบล้อมรอบด้วยวัสดุที่มีขนาดละเอียดเหมาะสมที่จะไม่ทำให้เกิดการอุดตันในระบบระบายน้ำใต้ โดยเกณฑ์การเลือกวัสดุกรองน้ำ (Filter Requirements) มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ ได้แก่ 1) เพื่อให้สามารถระบายไหลผ่านไปได้ และ 2) เพื่อป้องกันเม็ดดินขนาดเล็กไหลหลุดออกไป ทั้งนี้วัสดุที่ใช้เป็นตัวกรองส่วนใหญ่จะเป็นทรายหรือกรวด

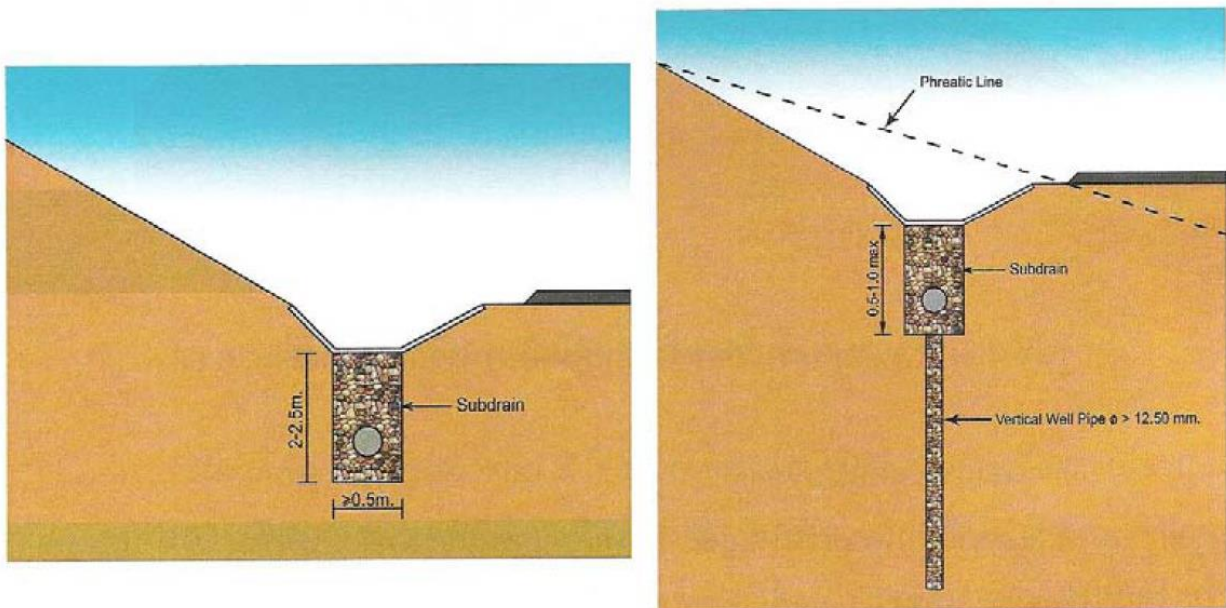
ท่อพรุนที่ใช้เป็น Subdrain เพื่อระบายน้ำออกไปจากระบบ อาจใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ϕ 3-4 นิ้ว เจาะรูโดยรอบหรือครึ่งหนึ่งของเส้นรอบวง แล้วฝังในทรายหยาบหรือกรวด วางเหนือห้องร่อง Subdrain โดยทั่วไปมักใช้แผ่นวัสดุใยสังเคราะห์กรองน้ำ (Filter Fabric) พันท่อ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการระบายน้ำอุดตัน ท่อพรุนมี 2 ชนิด คือ ท่อพรุนเจาะรูเป็นแบบช่องกลม (Perforated Pipe) และท่อพรุนเจาะรูเป็นแบบเจาะร่อง (Slotted Pipe) ทั้งนี้ข้อกำหนดของขนาดรูเจาะ มีดังนี้ อนึ่ง Subdrain ยังพิจารณาใช้ได้ 2 รูปแบบ คือ แบบฝังท่อพรุน (Pipe Underdrain) และแบบไม่ฝังท่อพรุน (French Drain) ดังแสดงในรูปที่ 6.15

การออกแบบท่อรวมน้ำ (Collector Pipe) เมื่อทราบค่าอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน ขนาดของท่อรวมน้ำต้องมีความเหมาะสมกับอัตราการไหล ทั้งนี้ขนาดของท่อรวมน้ำที่เป็นท่อ PVC ผิวเรียบ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 3 นิ้ว สำหรับท่อชนิดอื่นต้องไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว นอกจากนี้สำหรับท่อผิวเรียบควรมีความลาดในการวางท่อไม่น้อยกว่า 1% ส่วนท่อที่เป็นลูกฟูกต้องไม่น้อยกว่า 2% ปัจจุบันมีการใช้วัสดุสังเคราะห์ Geocomposite ซึ่งมีแกนกลาง (Core) เป็นแผ่นพลาสติกห่อหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile Filter Fabric) เนื่องจากการติดตั้งใช้งานได้สะดวกรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ดี วัสดุดังกล่าวมีโอกาสเกิดการอุดตันได้ง่ายและยุ่งยากต่อการบำรุงรักษา ดังนั้นจึงไม่แนะนำให้ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าดินในพื้นที่ก่อสร้างมีส่วนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เกิน 15% และสุดท้ายคือท่อทิ้งน้ำ (Outlet Pipe) ต้องออกแบบเพื่อรวบรวมน้ำและระบายน้ำลงสู่ระบบระบายน้ำบนผิวดิน ขนาดของท่อทิ้งน้ำต้องไม่เล็กกว่าขนาดของท่อรวมน้ำ (Collector Pipe) ระยะห่างระหว่างท่อทิ้งน้ำไม่ควรเกิน 90 เมตร มีระดับความลาดชันไม่น้อยกว่า 3% วางอยู่เหนือระดับน้ำสูงสุดในรอบ 10 ปี หากเป็นไปได้ควรมีตะแกรงป้องกันสัตว์ขนาดเล็กเข้าไปภายในท่อ นอกจากนี้ควรออกแบบให้มี Headwalls เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้งานได้ ในกรณีที่มีปริมาณน้ำใต้ดินค่อนข้างมาก สามารถพิจารณาติดตั้งท่อลงไปในชั้นดินลึก ดังแสดงในรูปที่ 6.16

อนึ่ง งานตรวจสอบและบำรุงรักษาท่อทิ้งน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อให้ระบบระบายน้ำทำหน้าที่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้นจำเป็นต้องตรวจสอบท่อทิ้งน้ำอย่างน้อยปีละครั้งหรือภายหลังฝนตกหนัก



รูปที่ 6.15 รูปแบบของ Subdrain
ที่มา: กรมทางหลวง (2554)



รูปที่ 6.16 ร่องตักน้ำและระบายน้ำใต้ดิน (Subdrain) กรณีมีน้ำใต้ดินปริมาณมาก
ที่มา: กรมทางหลวง (2555)

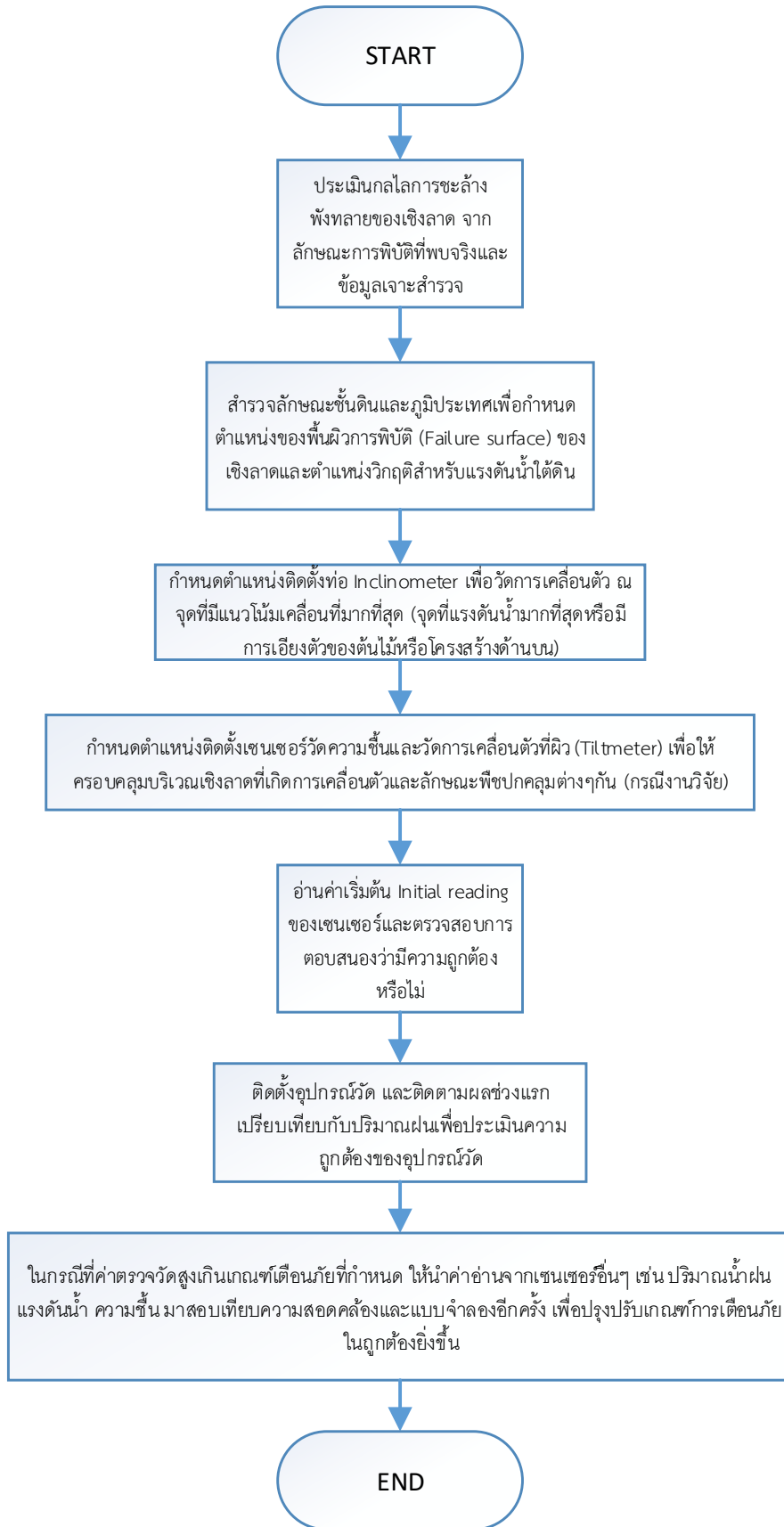
บทที่ 7 เทคโนโลยีและนวัตกรรมการตรวจวัดและติดตามพฤติกรรมด้านวิศวกรรม

เชิงลาดในงานทาง

นวัตกรรมการตรวจวัดและติดตามพฤติกรรมของเชิงลาดในงานทางปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมาก ประกอบด้วยเซนเซอร์และอุปกรณ์วัดหลายรูปแบบ สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of Things, IOT) นำค่าที่วัดได้ไปคำนวณและแสดงผลการตรวจวัดในลักษณะรูปแบบกราฟฟิกและแจ้งเตือนภัยผ่านระบบอินเทอร์เน็ตและโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้อย่างทันทีทันใด การตรวจวัดในงานวิศวกรรมปฐพีและวิศวกรรมเชิงลาดมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้ (Dunnicliff, 1993)

- เพื่อความปลอดภัย (Safety) ของเชิงลาด โดยใช้ค่าที่ตรวจวัดได้สำหรับระบบเตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning System) อาทิ ปริมาณน้ำฝน แรงดันน้ำใต้ดิน การเคลื่อนตัวของเชิงลาด เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้ทาง
- เพื่อควบคุมการก่อสร้างด้วยวิธีสังเกต (Observational Method) ซึ่งเป็นการนำค่าที่ตรวจวัดได้ เช่น การเคลื่อนตัวของลาด ไปใช้ตรวจสอบการออกแบบและขั้นตอนการก่อสร้าง และสามารถนำค่าที่ตรวจวัดได้ไปปรับแก้การออกแบบให้เหมาะสมได้ตามสภาพหน้างานหรือพฤติกรรมจริงที่ตรวจวัดได้ อาทิ การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของลาดระหว่างการขุดหรือถมดิน
- เพื่อการคุ้มครองทางกฎหมาย (Legal Protection) สามารถใช้เพื่อป้องกันข้อพิพาท การฟ้องร้องอันอาจเกิดจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากงานก่อสร้างและเสถียรภาพของลาด
- การประชาสัมพันธ์ (Public Relations) เพื่อให้ประชาชนหรือผู้เกี่ยวข้องได้ทราบถึงกิจกรรมขององค์กร สร้างความเข้าใจอันดีจากประชาชนผู้ได้รับผลกระทบจากเชิงลาดซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของโครงการ
- เพื่อความก้าวหน้าในงานวิจัยและพัฒนา (Advancing the State of the Art (R&D) อันจะนำไปสู่การพัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยีการวิเคราะห์ออกแบบและก่อสร้างด้านวิศวกรรมเชิงลาดที่ก้าวหน้ายิ่งขึ้น

ในงานวิศวกรรมเชิงลาด การพิบัติของลาดและการเสียหายของชั้นทาง มักเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำฝนเป็นปัจจัยกระตุ้นสุดท้าย น้ำฝนส่วนหนึ่งจะซึมลงสู่ดิน ทำให้ความชื้นในดินเพิ่มมากขึ้น หากฝนตกสูงเกินกว่าความสามารถในการรับน้ำของดินจะเกิดการไหลบ่าและอาจส่งผลให้เกิดการกัดเซาะของผิวดิน น้ำที่ไหลซึมลงดินยังไปลดค่าแรงดูดในดิน (Soil Suction) ซึ่งช่วยรักษาเสถียรภาพของลาดชั้นไว้ลดลง และทำให้แรงดันน้ำในดินและระดับน้ำใต้ดินยกตัวสูงขึ้น จนนำไปสู่การเคลื่อนตัวของดินในที่สุด การติดตั้งอุปกรณ์วัดเป็นการตรวจวัดพฤติกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ แผนผังขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์สามารถแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แผนผังขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์วัด

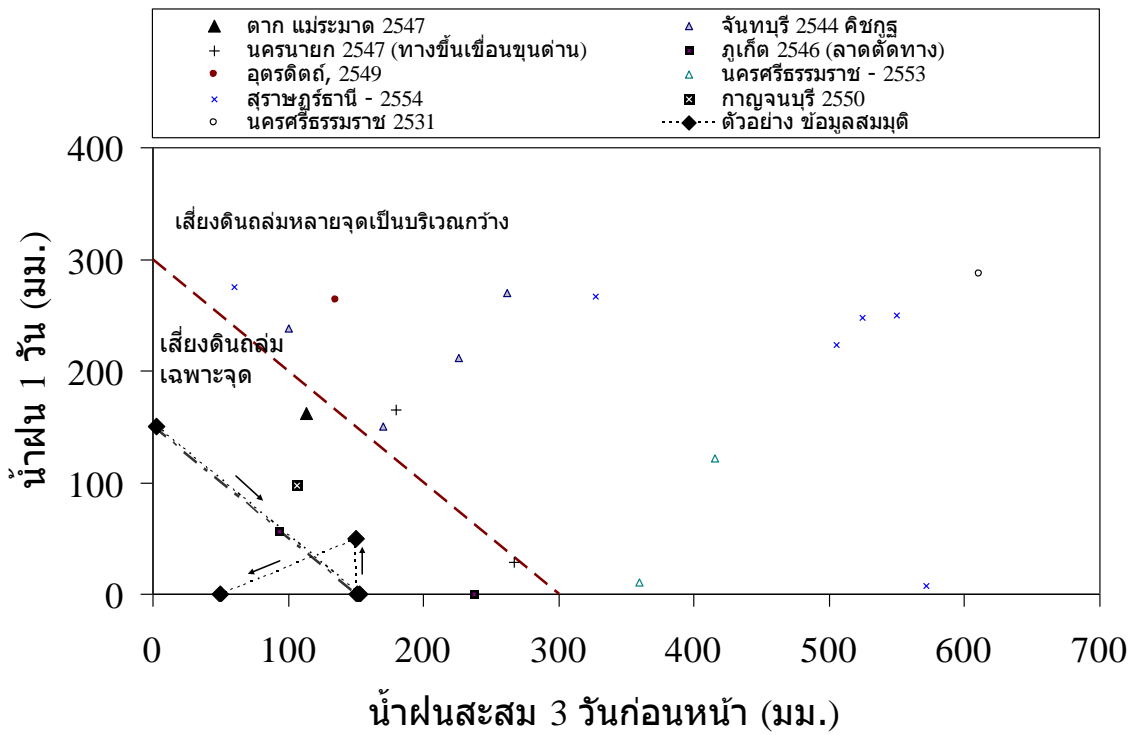
7.1 ปริมาณน้ำฝน

วิธีการวัดปริมาณน้ำฝนอย่างง่ายคือ การวัดปริมาณน้ำฝนที่ตกสะสมในแต่ละวันด้วยกระบอกวัด (รูปที่ 7.2ก) ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง และหากค่าน้ำฝนสูงกว่าค่าวิกฤติ เช่น 100 ถึง 150 มม.ต่อวัน ก็จะมีการแจ้งเตือนภัยหรือเฝ้าระวังตามแต่ระดับความเสี่ยงที่กำหนดไว้ ค่าน้ำฝนวิกฤติขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดดิน ธรณีวิทยา พืชปกคลุม ภูมิประเทศ ฯลฯ ซึ่งต้องอาศัยการศึกษาวิจัยและสถิติในพื้นที่ในการระบุค่าน้ำฝนวิกฤติที่เหมาะสมในแต่ละท้องถิ่น ในบางกรณีแม้ปริมาณน้ำฝนรายวันจะมีค่าน้อยมาก หรือไม่มีฝนตกเลย แต่ก็อาจเกิดดินถล่มขึ้นได้หากปริมาณน้ำฝนที่ตกสะสมมาก่อนหน้านี้มีปริมาณมากเพียงพอ จึงต้องมีการคำนวณค่าปริมาณน้ำฝนสะสมก่อนหน้า (Antecedent Rainfall) ซึ่งในประเทศไทยจะใช้น้ำฝนสะสมก่อนหน้า 3 วัน พิจารณาควบคู่กับน้ำฝนหนึ่งวัน ในการประเมินความเสี่ยง ดังรูปที่ 7.3

อย่างไรก็ดีการใช้กระบอกวัดน้ำฝนปกติดังรูปที่ 7.2ก สามารถวัดค่าน้ำฝนได้สูงสุดในช่วงเวลาหนึ่งวันเท่านั้น และไม่สามารถส่งข้อมูลเตือนภัยผ่านเครือข่ายไร้สายได้ จำเป็นต้องใช้เกจวัดน้ำฝนแบบคานกระดก (Tipping Bucket Rain Gauge) ดังรูปที่ 7.2ข ซึ่งอาศัยคานกระดกซึ่งจะมีการกระดกหนึ่งครั้งเมื่อน้ำฝนตกลงในกระบอกวัดเท่ากับ 0.2 มม. และส่งสัญญาณการนับครั้งไปยังอุปกรณ์บันทึกข้อมูล จึงสามารถบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำฝนได้อย่างต่อเนื่อง สามารถอ่านความเข้มน้ำฝนได้ละเอียดถึง มม.ต่อ 5 นาที หรือ 15 นาที แล้วแต่ความต้องการ และสามารถนำข้อมูลน้ำฝนไปใช้คำนวณความเสี่ยงภัยดินสไลด์ได้โดยหลักการกราฟน้ำฝนวิกฤติ (Critical Rainfall Envelope) ได้ทันที



รูปที่ 7.2 อุปกรณ์วัดน้ำฝน 1) กระบอกวัดน้ำฝน 2) เกจวัดน้ำฝนแบบคานกระดก (Tipping Bucket Rain Gauge)



รูปที่ 7.3 ตัวอย่างการเตือนภัยโดย กราฟน้ำฝนวิกฤติ

7.2 เครื่องมือวัดความชื้นของดิน (Soil Moisture Sensor)

เครื่องมือวัดความชื้นโดยทั่วไปจะวัดค่าเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของน้ำในดินต่อปริมาตรดิน (cm^3/cm^3) เรียกว่า ความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content) โดยอาศัยหลักการที่คุณสมบัติด้าน Dielectric constant ของดินจะเปลี่ยนไปเมื่อความชื้นเปลี่ยนไป หรือความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของดินจะเปลี่ยนไปตามความชื้น เป็นหลักการของอุปกรณ์ประเภท Time Domain Reflectometry (TDR) ค่า Dielectric Constant เป็นค่าอัตราส่วนของค่าความจุทางไฟฟ้าของวัสดุใด ๆ กับค่าความจุของตัวเก็บประจุที่เป็นอากาศ จึงมีค่าความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความชื้นในดินโดยปริมาตร โดยมีหลักการทำงาน คือ อาศัยการส่ง-รับคลื่นไฟฟ้าผ่านแท่งโลหะที่เป็นคู่ขนาน (Rods) ซึ่งเสียบหรือฝังไว้ในดิน สัญญาณจะถูกส่งกลับไปยังตัวรับและแปลงผลออกมาในรูปของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วจึงนำมาแปลงค่าเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินโดยปริมาตร (Volumetric Moisture Content) ซึ่งต้องมีการสอบเทียบกับดินชนิดต่าง ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 7.4

ข้อควรระวังในการติดตั้งเซนเซอร์วัดความชื้นจะต้องมั่นใจว่าตัวเซนเซอร์สัมผัสกับผิวดินอย่างดี ในกรณีที่เป็นดินเหนียวซึ่งมีการยึดหดตัวอาจประสบปัญหาเซนเซอร์ไม่สัมผัสกับดินได้ในช่วงฤดูแล้งซึ่งมีการหดตัวของดิน



รูปที่ 7.4 อุปกรณ์วัดความชื้นดิน การสอบเทียบและติดตั้งในสนาม

จากงานวิจัยโดยสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ร่วมกับมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2563) แสดงตัวอย่างระดับค่าความแม่นยำ ของเซนเซอร์วัดความชื้นดินในการใช้งานกับวัสดุ Subgrade ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ตัวอย่างสมการสอบเทียบเซนเซอร์วัดความชื้นดินและความแม่นยำ สำหรับดิน Subgrade

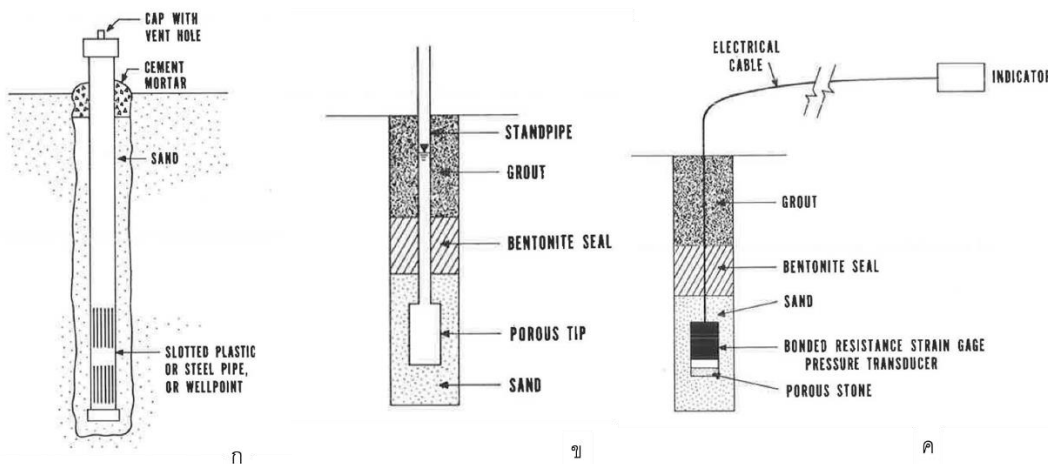
	Calibration Equation	R ²	Accuracy (%)		Precision (%)		Reproducibility (%)		Resolution (%)	
			θ	w	θ	w	θ	w	θ	w
MS1	$\theta = -10.848V + 48.721$	0.908	0.72	1.29	1.22	0.58	0.30	0.17	0.03	0.01
MS2	$\theta = -9.621V + 45.280$	0.870	0.84	1.29	0.57	0.27	0.30	0.17	0.01	0.01
MS3	$\theta = -8.934V + 43.247$	0.855	0.93	1.29	1.07	0.51	0.30	0.17	0.04	0.02
MS4	$\theta = -9.066V + 43.764$	0.934	0.73	1.29	1.09	0.52	0.30	0.17	0.04	0.02
Generalized Calibration Curve	$\theta = -9.500V + 44.934$	0.850	0.81	1.29	1.30	0.62	-	-	-	-
Average of all sensors	-	-	0.81	1.29	0.99	0.47	-	-	-	-

ที่มา: กรมทางหลวง (2564)

ทั้งนี้ในการเตือนภัยดินถล่ม สามารถใช้ค่าความชื้นที่จุดอิมตัว เป็นระดับการเตือนภัยได้ โดยค่าความชื้นที่จุดอิมตัวนี้จะมีค่าเท่ากับค่าความพรุน (Porosity) ของดิน เนื่องจากเมื่อดินอยู่ในสถานะอิมตัวด้วยน้ำจะมีแนวโน้มที่ค่าแรงดันน้ำมีค่าสูงขึ้นได้อย่างรวดเร็วหากมีปริมาณน้ำฝนตกลงมาเพิ่มเติม แต่อย่างไรก็ดีค่าความชื้นในดินก็ไม่อาจนำไปใช้ประเมินค่าแรงดันน้ำได้โดยตรง

7.3 เครื่องมือวัดแรงดันน้ำ (Piezometer)

ค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดิน (Pore-Water Pressure) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากที่สุดค่าหนึ่งในการตรวจวัดทางวิศวกรรมปฐพีและวิศวกรรมเชิงลาด เนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) ค่ากำลังเฉือนของดินและเสถียรภาพของลาด รวมไปถึงการอัดตัวคายน้ำของดิน อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดินเรียกว่าพิโซมิเตอร์ แบ่งได้เป็นสองลักษณะ คือ แบบระบบเปิด (Open System) (รูปที่ 7.5ก และรูปที่ 7.5ข) เช่น (Standpipe หรือ Cassagrande Piezometer) และแบบระบบปิด (Close System) (รูปที่ 7.5ค และง) เช่น Electric Piezometer, Vibrating Wire Piezometer เป็นต้น พิโซมิเตอร์แบบระบบเปิด จะอาศัยการวัดระดับน้ำใต้ดินซึ่งไหลซึมเข้ามาสู่ท่อกรงุ้มผ้าจีโอเทกซ์ไทล์, ทราย หรือวัสดุกรอง (Filter) ที่ปลายซึ่งฝังลงในชั้นดินหรือหินที่ต้องการตรวจวัดแรงดันน้ำ และมีการใช้วัสดุเกรทด้านบน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลซึมจากชั้นดินอื่นเข้ามาปะปน พิโซมิเตอร์ระบบเปิดนี้จะมีพฤติกรรมหน่วงเวลาหรือ Time Lag ในการวัด แต่พิโซมิเตอร์ระบบปิด ซึ่งใช้อุปกรณ์วัดแรงดันโดยตรง เช่น ระบบไฮดรอลิกซ์, Vibrating Wire หรือเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์จำพวก MEMs ซึ่งมีขนาดเล็กและสามารถติดตั้งไปที่ปลายหลุมได้ จะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำที่ไวกว่าแบบระบบเปิด



รูปที่ 7.5 พิโซมิเตอร์ (Piezometer) แบบระบบเปิด ก) บ่อสังเกตการณ์ (Observation Well)

ข) พิโซมิเตอร์แบบท่อเปิด (Open Standpipe Piezometer) และแบบระบบปิด ค) อิเล็กทริกพิโซ

มิเตอร์ (Dunnicliff, 1993) ง) เคอูพิโซมิเตอร์ พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

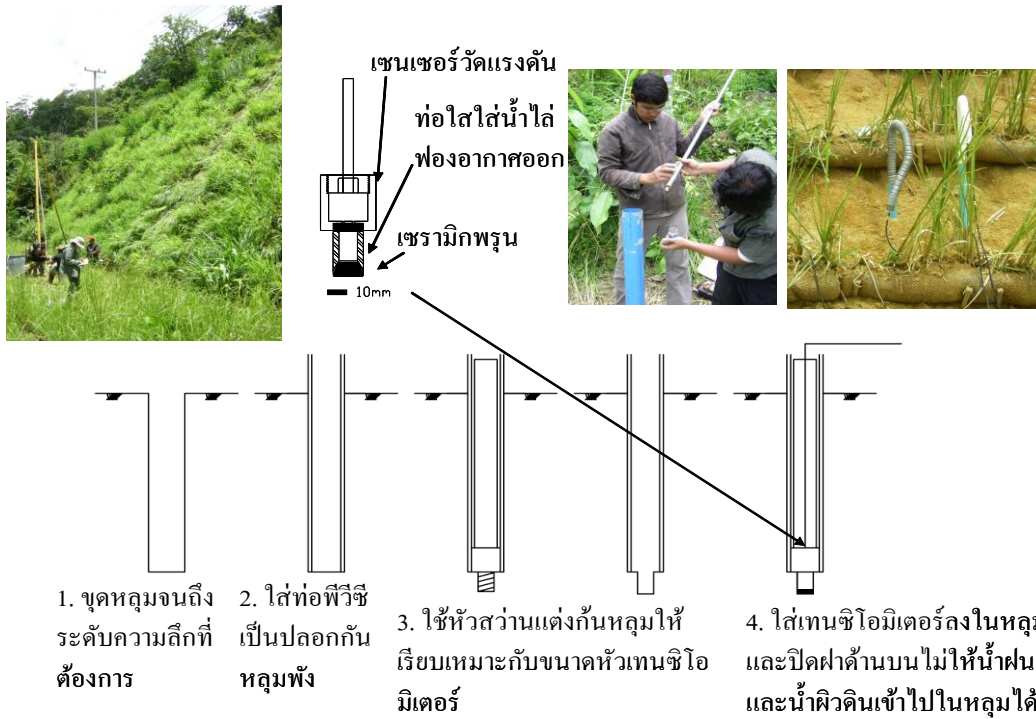
อย่างไรก็ดีพีโซมิเตอร์ทั่วไปจะใช้วัสดุกรองประเภททรายซึ่งอากาศเข้าได้ง่าย เรียกว่า Low Air-Entry Filter ซึ่งไม่สามารถใช้วัดค่าแรงดันน้ำช่วงติดลบ (Negative Pore Water Pressure) หรือค่าแรงดูดในดินซึ่งมักพบในเชิงลาดได้ โดยปกติแล้วในพื้นที่ลาดชัน น้ำที่ไหลซึมลงสู่ดินจะระบายออกอย่างรวดเร็ว ดินจึงอยู่ในสภาวะไม่อิ่มน้ำและมีแรงดันน้ำติดลบ

7.4 เครื่องมือวัดแรงดันน้ำหรือเทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer)

การตรวจวัดแรงดันน้ำด้านลบ (Negative Pore Water Pressure หรือ Tension) สามารถใช้เครื่องมือซึ่งเรียกว่าเทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer) ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกับพีโซมิเตอร์ (Piezometer) แต่สามารถวัดแรงดันน้ำด้านลบได้ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ 1) หินพรุนชนิด High-Air-Entry 2) กะเปาะรับน้ำซึ่งต้องมีน้ำอยู่เต็มช่องว่าง และ 3) อุปกรณ์วัดแรงดัน ทั้งนี้ได้มีการนำ Tensiometer มาประยุกต์ใช้ในลักษณะเดียวกับ Piezometer ในหลายประเทศโดยเฉพาะในงานเสถียรภาพของลาดดิน (Rahardjo et al., 2007, Mairaing et al., 2009)

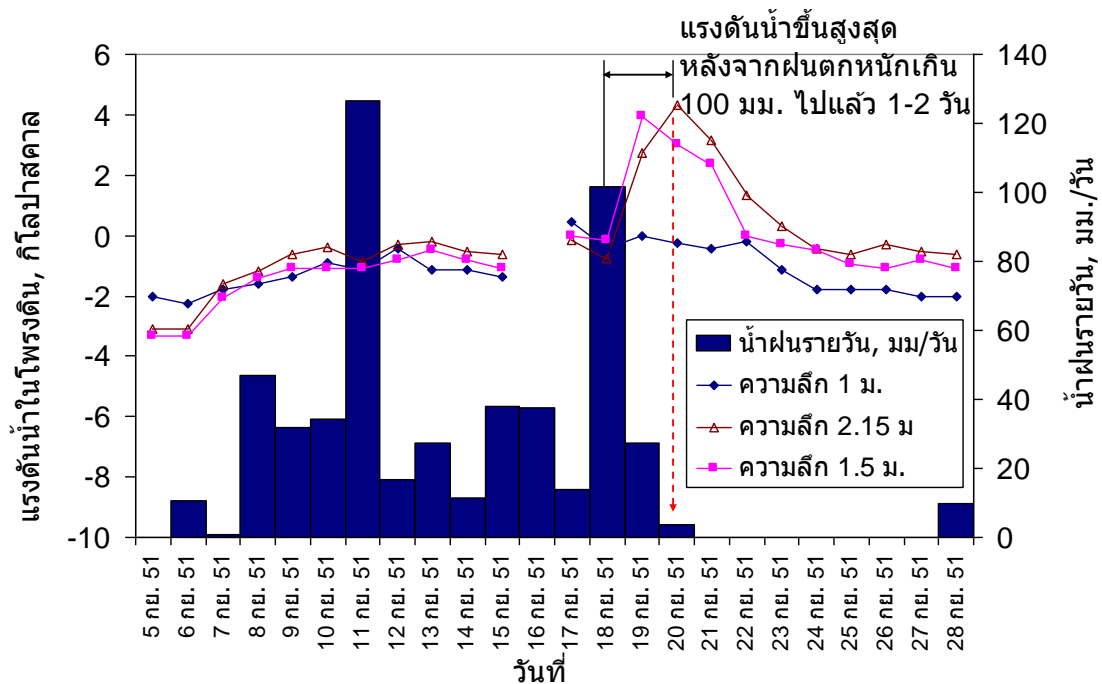
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดย Jotisankasa et al. (2007), อภินิติและวิญญพงศ์ (2551) ได้พัฒนาเครื่องมือวัดแรงดันน้ำทั้งด้านลบและบวกโดยอาศัยเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์จุลภาค (MEMS) วัดค่าได้ในช่วงแรงดันน้ำเท่ากับ -80 ถึง 700 kPa ดังแสดงในรูปที่ 7.6 รูปที่ 7.5 ซึ่งสามารถใช้งานได้เป็นทั้งพีโซมิเตอร์ (วัดแรงดันน้ำค่าบวก) และ เทนซิโอมิเตอร์ (วัดแรงดันน้ำค่าลบ) โดยอุปกรณ์เดียว ได้นำไปใช้งานวิจัยด้านเสถียรภาพของเชิงลาดในงานทาง รวมไปถึงใช้เป็นอุปกรณ์เพื่อศึกษาและเตือนภัยดินถล่มทั้งในประเทศไทย อินโดนีเซีย และศรีลังกา

ในการใช้งานอุปกรณ์ Tensiometer จะต้องทำให้กะเปาะรับน้ำและเซนเซอร์ เต็มด้วยน้ำโดยปราศจากอากาศ เนื่องจากฟองอากาศจะทำให้การวัดค่าแรงดูดคลาดเคลื่อนได้ สามารถใช้ปั๊มสุญญากาศดูดอากาศออกจากน้ำในกะเปาะเซรามิคและเซนเซอร์ ซึ่งเรียกว่าการทำให้อิ่มน้ำ (Saturation) และเมื่อได้เทนซิโอมิเตอร์ซึ่งเติมน้ำเรียบร้อยแล้วจึงสามารถติดตั้งในพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 7.6 ทั้งนี้ทั่วไปในช่วงฤดูแล้ง น้ำในกะเปาะของเทนซิโอมิเตอร์จะแห้งจนหมดไปจากกะเปาะได้ ดังนั้นจึงต้องมีการนำเซนเซอร์ออกมาบำรุงรักษาโดยการเติมน้ำเข้าไปอีกครั้งอย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง แต่ในทางปฏิบัติอาจทำได้ยากเนื่องจากขาดบุคคลากรที่มีความชำนาญในการบำรุงรักษา จึงมักติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์ควบคู่กับเซนเซอร์วัดความชื้นเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำและความชื้นดิน ดังนั้นจึงสามารถนำค่าความชื้นดินที่วัดได้ไปทำนายค่าแรงดันน้ำในดินต่อไปได้ ภายหลังจากน้ำในกะเปาะเทนซิโอมิเตอร์แห้งไปแล้ว



รูปที่ 7.6 อุปกรณ์เคยูเทนซีโอมิเตอร์ พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับวัดแรงดันน้ำค่าลบและบวกในดิน และการติดตั้งในสนาม

ตัวอย่างการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำในดินแสดงดังรูปที่ 7.7 แสดงค่าแรงดันน้ำติดลบมีค่าอยู่ในช่วง -4 ถึง 0 kPa และมีค่าแรงดันน้ำเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 4 kPa ภายหลังจากฝนตกหนักเกิน 100 มม.ไปแล้ว 1-2 วัน



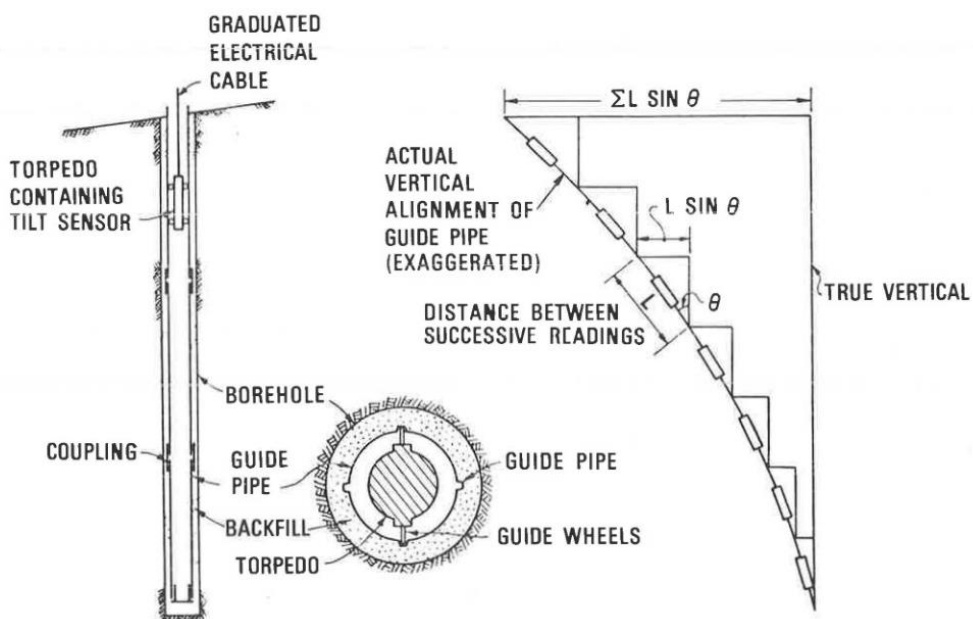
รูปที่ 7.7 ตัวอย่างแรงดันน้ำในช่องว่างดินและน้ำฝนในพื้นที่ลาดชันซึ่งปลูกหญ้าแฝก จ.นครนายก

7.5 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน (Inclinometer/Tiltmeter)

ในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเชิงลาด สามารถวัดได้ทั้งการเคลื่อนตัวที่ผิวดิน (Tiltmeter) (รูปที่ 7.8) และมวลดินในระดับลึก (Inclinometer) (รูปที่ 7.9) ซึ่งทั้งสองรูปแบบจะอาศัยเซนเซอร์สำหรับการเอียงตัว โดย ทิลท์มิเตอร์ (Tiltmeter) จะติดตั้งกับท่อเหล็กซึ่งตอกไว้ที่ผิวดินที่ความลึกไม่เกิน 1 เมตรสามารถวัดการเคลื่อนตัวของลาดที่ผิวดินระดับตื้น และอินคลิโนมิเตอร์ (Inclinometer) จะติดตั้งไว้ในท่อแนวตั้งเพื่อวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของมวลดิน (Lateral Movement) ดังแสดงในรูปที่ 7.9



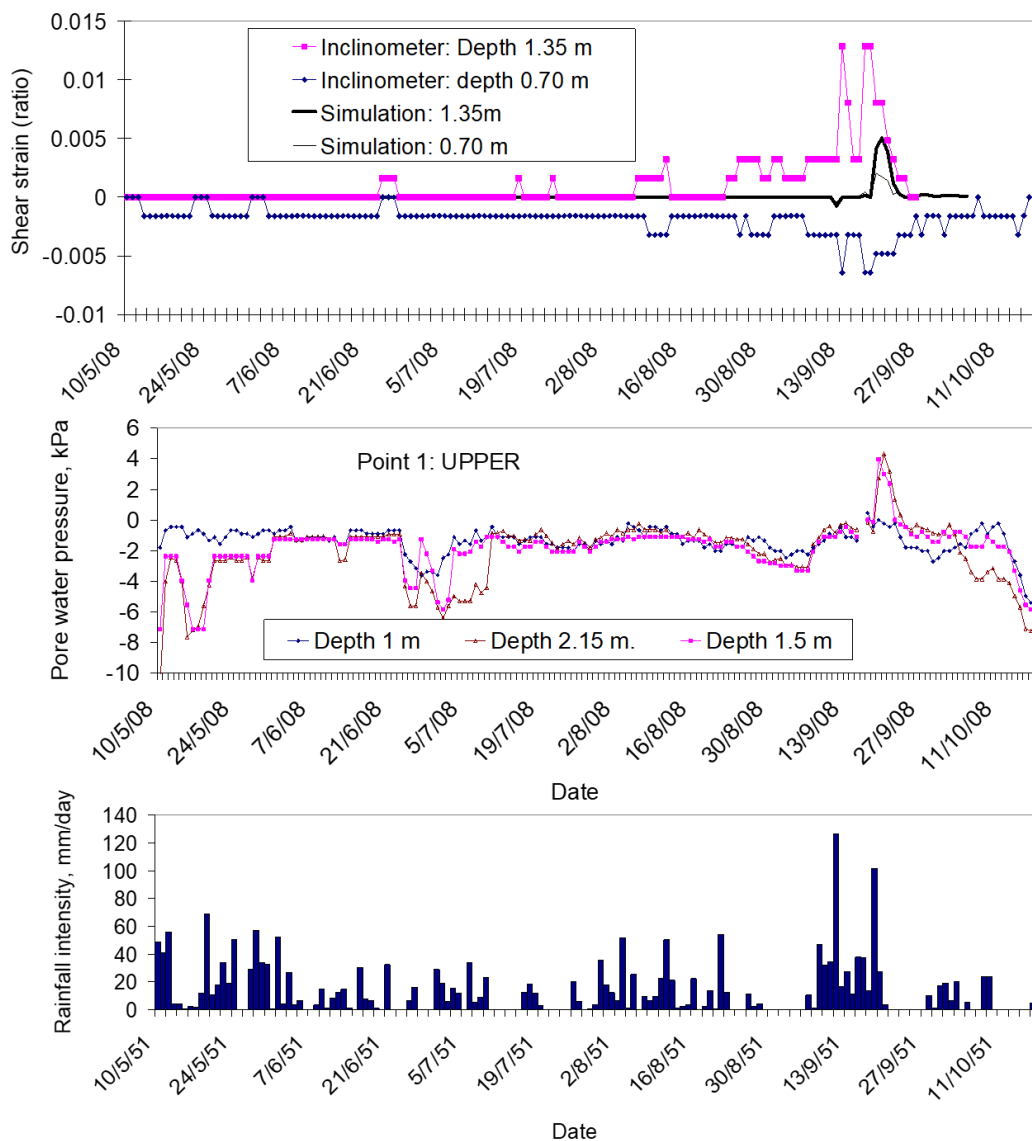
รูปที่ 7.8 อุปกรณ์ Tiltmeter สำหรับวัดการเคลื่อนตัวที่ผิวดิน



รูปที่ 7.9 อุปกรณ์ Inclinometer สำหรับการวัดการเคลื่อนตัวของมวลดินในลาดดินที่ระดับลึก

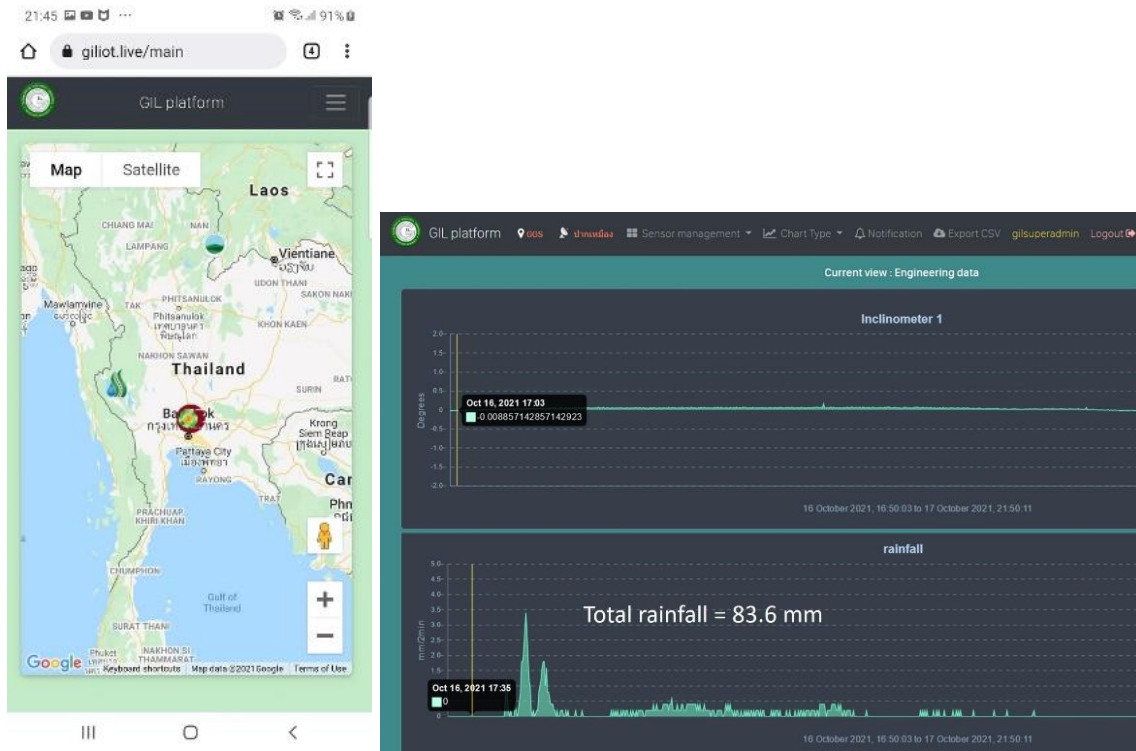
ที่มา: Dunnycliff (1993)

การเคลื่อนตัวของลาดดินมักเกิดขึ้นภายหลังจากฝนตกหนัก ซึ่งส่งผลให้แรงดันน้ำสูงขึ้น และลดค่าหน่วยแรงประสิทธิผลจนดินอ่อนตัว มีความสัมพันธ์กันดังตัวอย่างในรูปที่ 7.10 แสดงการเอียงตัวของท่ออินคลิโนมิเตอร์ สัมพันธ์กับแรงดันน้ำที่สูงขึ้นในช่วงฝนตกหนักมากกว่า 100 มม. ดังนั้นการตรวจวัดแบบ Manual โดยการหย่อนหัววัด Inclinator ไปทุกครั้งที่ต้องการอ่านค่า อาจไม่สามารถดำเนินการได้ทันทั่วถึงเพื่อเตือนภัยในช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงดินถล่ม นั่นคือช่วงที่มีฝนตกหนักและแรงดันน้ำในดินมีค่าสูง ในกรณีดังกล่าวควรเลือกใช้ระบบ In-place Inclinator ติดตั้งไว้ในหลุมแบบถาวรและส่งสัญญาณเข้ามาที่อุปกรณ์บันทึกค่าหรือ Datalogger โดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ดำเนินการพัฒนาอุปกรณ์ KU-Inplace Inclinator (อยู่ระหว่างการเตรียมยื่นจดสิทธิบัตร) ซึ่งสามารถส่งสัญญาณผ่านระบบ IoT ได้เป็นผลสำเร็จ ดังแสดงในรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.10 ตัวอย่างการเคลื่อนตัวของลาดจากผลการตรวจวัดด้วย Inclinator เปรียบเทียบกับแรงดันน้ำ และปริมาณน้ำฝน

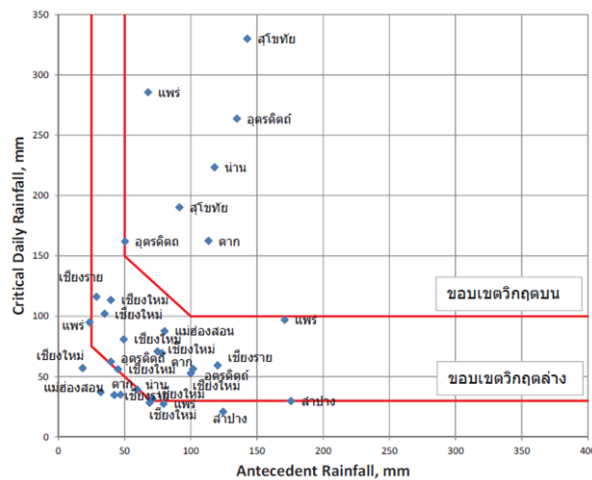
ที่มา: Jotisankasa et al (2008)



รูปที่ 7.11 ระบบ GIL IoT Platform สำหรับระบบตรวจวัดพฤติกรรมของลาดดิน

7.6 หลักเกณฑ์ความเสี่ยงเนื่องจากภัยพิบัติดินสไลด์

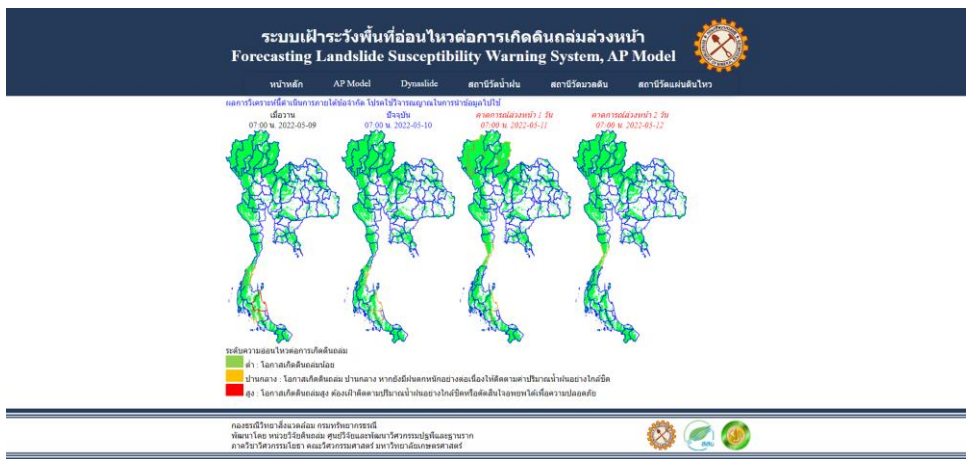
เกณฑ์ปริมาณน้ำฝนวิกฤต (Rainfall Threshold) คือระดับวิกฤติ (น้อยหรือมากที่สุด) ของปริมาณน้ำฝนซึ่งเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดดินถล่มในแต่ละพื้นที่ (Reichenbach et al., 1998) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 7.12 โดยเกณฑ์วิกฤตินั้นสามารถใช้ปริมาณความชื้นในดินหรือลักษณะทางอุทกวิทยาได้ แต่โดยทั่วไปมักจะนิยมใช้เกณฑ์จากปริมาณน้ำฝนเนื่องจากสามารถรวบรวมข้อมูลได้ง่ายกว่า ถ้าหากในพื้นที่นั้น ๆ มีปริมาณน้ำฝนเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ก็จะมีโอกาสเกิดดินถล่มได้



รูปที่ 7.12 เกณฑ์การเตือนภัยดินถล่มจากการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ภาคเหนือ
ที่มา: สันติ และคณะ (2556)

สำหรับหลักเกณฑ์ความเสี่ยงเนื่องจากภัยพิบัติดินสไลด์ในประเทศไทยนั้น หน่วยวิจัยดินถล่ม ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้จัดทำระบบเฝ้าระวังพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มล่วงหน้า 3 วัน ทำการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ เช่น ความลาดชัน กลุ่มชุดหิน และข้อมูลคาดการณ์ปริมาณน้ำฝนล่วงหน้า 3 วัน เทียบกับเกณฑ์ปริมาณน้ำฝนวิกฤตของแต่ละพื้นที่ ซึ่งข้อมูลเฝ้าระวังนี้สามารถเข้าถึงได้ทาง <http://gerdmodel.ku.ac.th/dmrweb/index.php> ดังแสดงในรูปที่ 7.13 นอกจากนี้ กรมทรัพยากรน้ำ ได้จัดทำระบบเตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning) สำหรับพื้นที่เสี่ยงน้ำหลาก-ดินถล่ม โดยอาศัยข้อมูลน้ำฝนหรือข้อมูลน้ำท่า เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงที่อาจเกิดเหตุการณ์ขึ้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถเข้าถึงได้ทาง <http://ews.dwr.go.th/ews//index.php> ดังแสดงในรูปที่ 7.14

เจ้าหน้าที่ทางหลวง สามารถติดตามเฝ้าระวังและเตรียมแผนตอบโต้ต่อเหตุการณ์ดินถล่มที่อาจเกิดขึ้นในแนวทางหลวงต่าง ๆ ผ่านเว็บไซต์ดังกล่าว



รูปที่ 7.13 ระบบเฝ้าระวังพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มล่วงหน้า โดยกรมทรัพยากรธรณี
ที่มา: <http://ap.dmr.go.th/dmrweb/>



รูปที่ 7.14 ระบบเตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning) สำหรับพื้นที่เสี่ยงน้ำหลาก-ดินถล่ม โดยกรมทรัพยากรน้ำ
ที่มา: <http://ews.dwr.go.th/ews/index.php>

7.7 การดูแลรักษาอุปกรณ์ตรวจวัด

ข้อแนะนำ ข้อควรระวัง และการดูแลรักษา ระบบอุปกรณ์ตรวจวัดในสนาม (Monitoring System) สรุปได้ดังนี้

1. อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor)

1.1. เครื่องมือตรวจวัดแรงดันน้ำในดิน (Tensiometer and Piezometer)

1.1.1. ขณะติดตั้งหัวเซ็นเซอร์ลงในหลุมเจาะให้ใช้น้ำหนักกดเล็กน้อย เพื่อให้ปลายหินปูนแนบสนิทกับดิน

1.1.2. ภายหลังการติดตั้งเซ็นเซอร์ให้ทำการวัดและบันทึกค่าเริ่มต้น (Initial Value) ของเซ็นเซอร์แต่ละตัวที่ในสนาม

1.1.3. ควรจัดเก็บสายไฟของเซ็นเซอร์ให้เป็นระเบียบเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหาย

1.1.4. หลังจากติดตั้งและใช้งานให้ตรวจสอบว่าค่าที่อ่านได้เกินค่าสูงสุดที่เซ็นเซอร์วัดได้หรือไม่ (กรณีเกิดแรงดูด ค่าที่วัดได้ไม่เกิน 80 kPa)

1.1.5. กรณีเซ็นเซอร์วัดค่าเกินค่าสูงสุดที่วัดได้ ควรนำเซ็นเซอร์มาตรวจสอบว่าเกิดฟองอากาศขึ้นภายในกระเปาะหรือไม่ หากเกิดฟองอากาศจำเป็นต้องนำเซ็นเซอร์ไปไล่อากาศออกจนหมดเสียก่อนแล้วจึงนำกลับมาใช้งานได้

1.2. เครื่องมือตรวจวัดความชื้นของดิน (Moisture Sensor)

1.2.1. การติดตั้งควรระมัดระวังการแตกหักของตัวเซ็นเซอร์ โดยใช้ดินเม็ดละเอียดล้อมรอบเซ็นเซอร์ในกรณีติดตั้งในชั้นดินหรือหินที่มีความแหลมคมหรืออาจสร้างความเสียหายแก่เซ็นเซอร์ได้

1.2.2. ตรวจสอบสายไฟของเซ็นเซอร์ ให้ม้วนเก็บอย่างเป็นระเบียบและเก็บไว้เหนือพื้นดินเพื่อป้องกันการฉีกขาดและเสื่อมสภาพ

1.3. เครื่องมือวัดการเอียงตัวที่ผิวดิน (Tiltmeter)

1.3.1. ควรติดตั้งเซ็นเซอร์ให้อยู่แนวระนาบมากที่สุด ควรใช้ฟองน้ำปรับระดับประกอบในการติดตั้งและยึดกับหลักให้มั่นคง ไม่เคลื่อนไหวจากปัจจัยภายนอก

1.3.2. ความเอียงของเซ็นเซอร์เมื่อเริ่มติดตั้งไม่ควรเกินค่าที่วัดได้ (วัดค่าความเอียงตัวได้ในช่วง ± 15 องศา)

1.3.3. เมื่อติดตั้งแล้วควรวัดค่าเริ่มต้นของเซ็นเซอร์แต่ละจุด เพื่อนำไปคำนวณเป็นค่าความเอียงตัวที่เกิดขึ้นจริงของมวลดิน

1.3.4. ระวังมิให้มิถุนหรือเศษวัสดุมาทับเซ็นเซอร์ เนื่องจากอาจก่อให้เกิดความเสียหายและความคลาดเคลื่อนได้

1.4. เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน (Inclinometer)

- 1.4.1. รั้วไม้ระวางไม่ให้น้ำไหลเข้าสู่ท่อเซ็นเซอร์ทั้งก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์
- 1.4.2. การติดตั้งต้องให้เซ็นเซอร์หันไปในทิศทางที่ถูกต้องและทิศทางเดียวกันทั้งท่อ
- 1.4.3. เมื่อติดตั้งแล้วควรปิดผนึกที่ฝาป้องกันน้ำและสัตว์เข้าสู่ท่อเซ็นเซอร์

1.5. วัดปริมาณน้ำฝน (Rain Gauge)

1.5.1. ต้องติดตั้งให้อยู่แนวระนาบเพื่อความสมดุลของระบบกระเดื่อง โดยใช้ฟองน้ำปรับระดับในการติดตั้ง

1.5.2. ติดอุปกรณ์กันนกเพื่อป้องกันความเสียหายจากนก

1.5.3. หมั่นตรวจสอบและทำความสะอาดสิ่งกีดขวางในกรวยรับน้ำทุก 3 เดือน หรือจนกว่าค่าที่อ่านได้มีความผิดปกติ

2. ชุดกล่องบันทึกข้อมูล (Data Logger Set)

2.1. กล่องบันทึกข้อมูล Data Logger

2.1.1. ใส่สารกันชื้น (Silica Gel) ในกล่องบันทึกข้อมูลเพื่อป้องกันความชื้น

2.1.2. ป้องกันมดทำรังในกล่องโดยใช้สารที่มีกลิ่นฉุน (สมุนไพรที่มีกลิ่นฉุน, ลูกเหม็น)

2.1.3. จัดเรียงสายไฟในกล่องให้เรียบร้อย เพื่อความสะดวกในการทำงานและซ่อมบำรุง

2.1.4. ตรวจสอบข้อมูลจากใน Platform ว่ามีความผิดปกติหรือสัญญาณหายหรือไม่ หากสัญญาณหายหรือไม่เสถียร ต้องเข้าไปตรวจสอบความเหมาะสมของย่านความถี่ของสัญญาณอีกครั้ง และทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ส่งสัญญาณ

2.1.5. ทำความสะอาดและตัดหญ้าบริเวณโดยรอบของกล่องบันทึกข้อมูลเพื่อความสะดวกในการทำงานและซ่อมบำรุง รวมถึงเป็นการป้องกันแมลงที่อาจเข้าไปทำรังในกล่องบันทึกข้อมูลได้

2.2. แบตเตอรี่ (Battery)

2.2.1. เปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก ๆ 2 ปี หรือมีอาการ Voltage ตก

2.3. อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Solar Charger Controller)

2.3.1. ขณะทำการติดตั้งและการใช้งานให้ทำตามคู่มือของอุปกรณ์โดยเคร่งครัด โดยการเชื่อมต่อเริ่มจาก แบตเตอรี่ แผงโซลาร์เซลล์ และอุปกรณ์ที่จะใช้งาน ตามลำดับ

2.4. โซลาร์เซลล์ (Solar Cell)

2.4.1. ก่อนการติดตั้งตรวจสอบสถานที่และทิศทางให้สามารถรับแดดได้มากที่สุดและระยะเวลาที่นานที่สุด โดยหลีกเลี่ยงจุดที่เกิดร่มเงาที่มาบดบังแผงโซลาร์เซลล์

2.4.2. ตรวจสอบและทำความสะอาดแผงทุก 6 เดือน เพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นหรือวัสดุต่าง ๆ บดบังแผงและเพื่อให้สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ

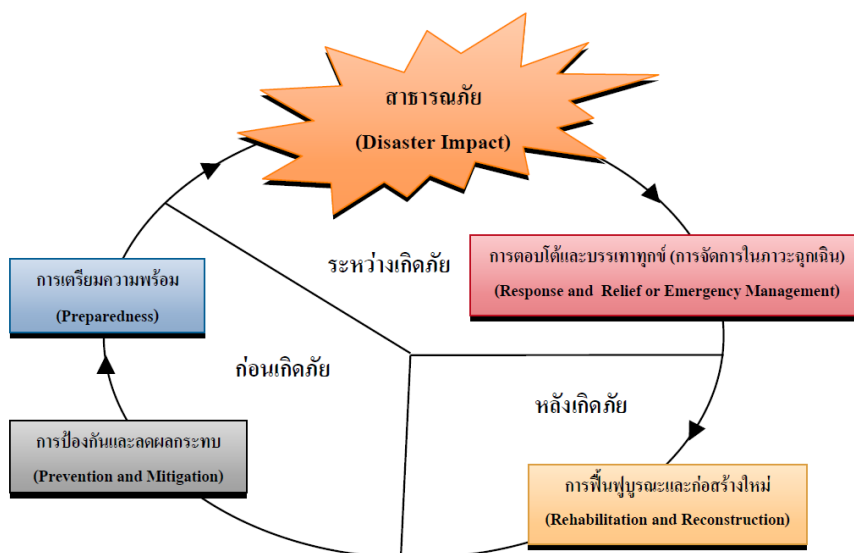
7.8 แผนบริหารจัดการความเสี่ยงและเฝ้าระวังภัยพิบัติดินสไลด์ แผนบริหารความต่อเนื่อง (Business Continuity Plan: BCP)

หลักการการเตรียมความพร้อมในภาวะวิกฤตตามพระราชกฤษฎีกาว่าด้วยหลักเกณฑ์และวิธีการบริหารกิจการบ้านเมืองที่ดี พ.ศ. 2546 คือการที่ส่วนราชการสามารถนำบทเรียนสถานการณ์ความรุนแรงสำคัญที่ผ่านมา มาปรับกระบวนการทำงานใหม่ โดยเฉพาะในเรื่องการบริการประชาชน เพื่อให้มั่นใจว่าภารกิจหลักของราชการ หรืองานบริการประชาชนที่สำคัญสามารถดำเนินงาน หรือให้บริการได้อย่างต่อเนื่องไม่สะดุดหยุดลงแม้ว่าจะประสบกับวิกฤตการณ์ หรือภัยพิบัติต่าง ๆ ซึ่งที่ประชุมคณะรัฐมนตรีเมื่อวันที่ 24 เมษายน 2555 ได้มีมติเห็นชอบกรอบแนวทางการดำเนินการเตรียมความพร้อมต่อสภาวะวิกฤต 4 ขั้นตอน คือ

- 1) การสร้างความรู้ความเข้าใจให้กับส่วนราชการ
- 2) การเตรียมความพร้อมของส่วนราชการในการจัดทำแผนรองรับการดำเนินภารกิจการให้บริการประชาชนได้อย่างต่อเนื่อง (Business Continuity Plan)
- 3) การซักซ้อมแผนและนำไปปฏิบัติได้จริง
- 4) การส่งเสริมให้มีการบริหารจัดการอย่างยั่งยืน ในสภาวะวิกฤต

การบริหารจัดการองค์การในสภาวะวิกฤต/เหตุการณ์ฉุกเฉิน/สถานการณ์ภัยพิบัติ โดยทั่วไปจะแบ่งวงจรการบริหารจัดการออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

- 1) การป้องกันและลดผลกระทบ
- 2) การเตรียมพร้อมรับภัย
- 3) การจัดการในภาวะฉุกเฉิน
- 4) การจัดการหลังเกิดภัย



รูปที่ 7.15 แผนภูมิวัฏจักรการบริหารจัดการสาธารณภัย (Disaster Management Cycle)

ที่มา: กรมทางหลวง (2553)

ระดับความรุนแรงของภัยพิบัติแบ่งออกเป็น 4 ระดับ

ระดับ 1 หมายถึง สาธารณภัยที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปหรือมีขนาดเล็ก ผู้รับผิดชอบได้แก่ ผู้อำนวยการท้องถิ่น ผู้อำนวยการอำเภอ และ หรือผู้ช่วยผู้อำนวยการกรุงเทพมหานคร กรมทางหลวง ผู้รับผิดชอบ ได้แก่ ศูนย์ปฏิบัติการแขวงทางหลวง/สำนักงานบำรุงทาง

ระดับ 2 หมายถึง สาธารณภัยขนาดกลาง ผู้รับผิดชอบ ได้แก่ ผู้ว่าราชการจังหวัด และหรือ ผู้อำนวยการกรุงเทพมหานคร กรมทางหลวงผู้รับผิดชอบ กรณีที่ศูนย์ปฏิบัติการแขวงทางหลวง/สำนักงานบำรุงทาง ไม่สามารถควบคุมสถานการณ์และจัดการระงับได้ตามลำพัง ต้องให้ศูนย์อำนาจการสำนักทางหลวง/สำนักงานทางหลวง เข้าควบคุมดำเนินการช่วยเหลือ

ระดับ 3 หมายถึง สาธารณภัยขนาดใหญ่ที่มีผลกระทบรุนแรงกว้างขวางหรือสาธารณภัยที่จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญหรืออุปกรณ์พิเศษ ผู้รับผิดชอบได้แก่ ผู้อำนวยการกลาง และ/หรือ ผู้บัญชาการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยแห่งชาติ กรมทางหลวง ผู้รับผิดชอบ ได้แก่ ศูนย์บัญชาการกรมทางหลวง

ระดับ 4 หมายถึง สาธารณภัยขนาดใหญ่ที่มีผลกระทบร้ายแรงอย่างยิ่ง ผู้รับผิดชอบ ได้แก่ นายกรัฐมนตรีหรือรองนายกรัฐมนตรีที่นายกรัฐมนตรีมอบหมาย

การกำหนดระดับความรุนแรงของการเกิดดินถล่ม ตามงานวิจัย บุญชัย และวารการ (2547) ได้แบ่งระดับความรุนแรง จากร่องรอยดินถล่ม ปริมาณพื้นที่ที่เกิดความเสียหาย จำนวนผู้เสียชีวิต และเขตการปกครองที่มีผลกระทบ ได้ดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 เกณฑ์การจัดระดับความรุนแรงของภัยดินถล่ม

ระดับความรุนแรง	ร่องรอยดินถล่ม	พื้นที่ที่เกิด (ตร.กม.)	จำนวนผู้เสียชีวิต (คน)	เขตการปกครองที่มีผลกระทบ
1. ความรุนแรงน้อยมาก	ร่องรอยดินถล่มน้อยกว่า 5 แห่ง	น้อยกว่า 5	ไม่มี	ระดับตำบล
2. ความรุนแรงน้อย	ร่องรอยดินถล่ม 5-50 แห่ง	5-30	1-5	หนึ่งอำเภอ
3. ความรุนแรงปานกลาง	ร่องรอยดินถล่ม 50-500 แห่ง	30-100	5-35	หลายอำเภอ
4. ความรุนแรงมาก	ร่องรอยดินถล่มมากกว่า 500 แห่ง	มากกว่า 100	มากกว่า 35	หลายจังหวัด

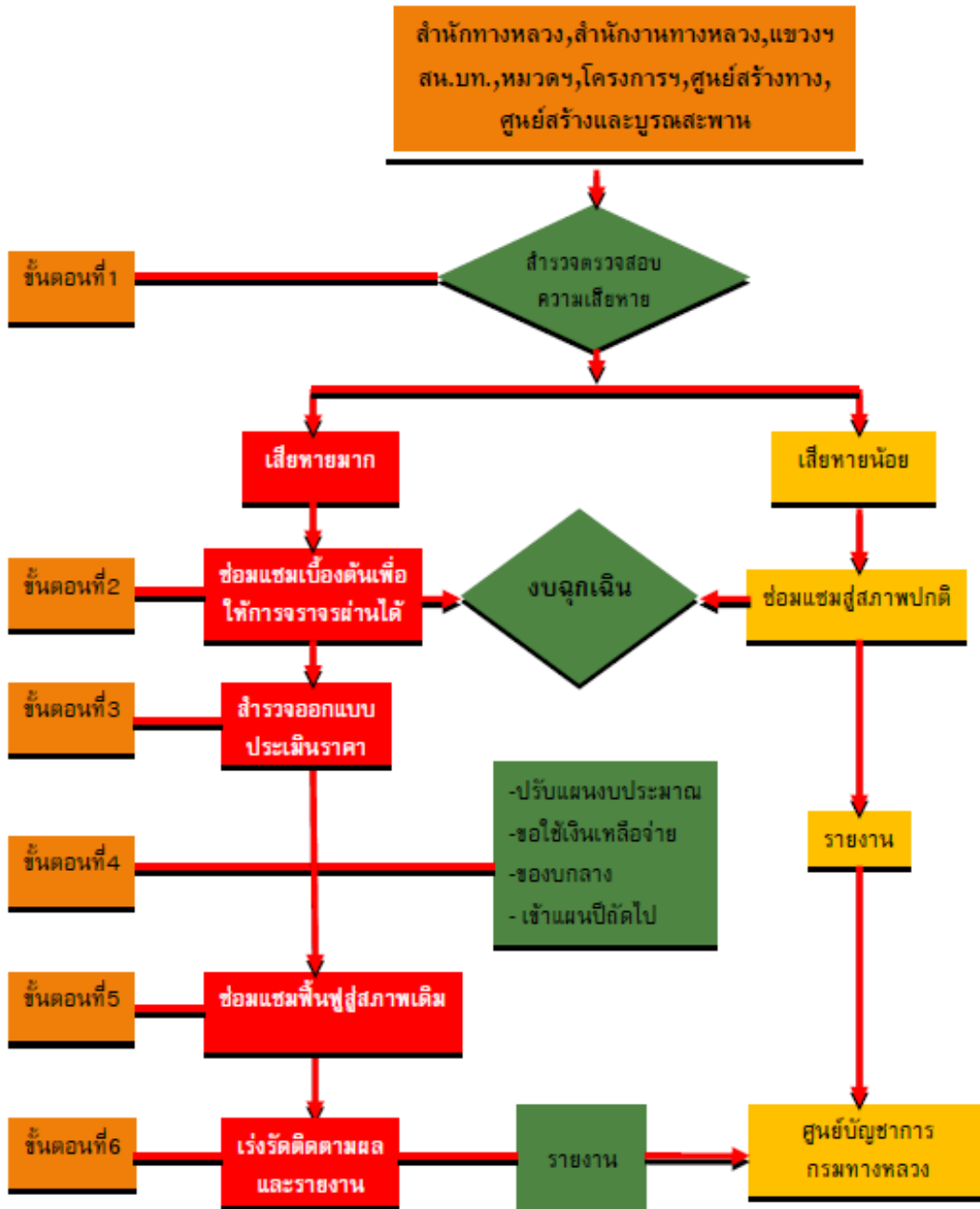
ที่มา: บุญชัย และวารการ (2547)

ตารางที่ 7.3 ตารางแสดงหน้าที่รับผิดชอบของกรมทางหลวงที่ต้องปฏิบัติที่ระดับความรุนแรงต่าง ๆ

ระดับความรุนแรง	หน้าที่รับผิดชอบที่ต้องปฏิบัติ		
	ก่อนเกิดภัยพิบัติ	ขณะเกิดภัยพิบัติ	หลังเกิดภัยพิบัติ
ระดับ 4		- สาธารณภัยขนาดใหญ่ที่มีผลกระทบร้ายแรงอย่างยิ่ง ผู้รับผิดชอบ ได้แก่ นายกรัฐมนตรีหรือรองนายกรัฐมนตรีที่นายกรัฐมนตรีมอบหมาย	- สาธารณภัยขนาดใหญ่ที่มีผลกระทบร้ายแรงอย่างยิ่ง ผู้รับผิดชอบ ได้แก่ นายกรัฐมนตรีหรือรองนายกรัฐมนตรีที่มอบหมาย
ระดับ 3	<ol style="list-style-type: none"> กำหนดนโยบายเกี่ยวกับการป้องกันภัยพิบัติ วางแผนหลักในการป้องกันภัยพิบัติ กำหนดวิธีตรวจสอบติดตามการประเมินผลตามแผนหลักการป้องกันภัยพิบัติ วางระเบียบแนวทางการปฏิบัติงานเกี่ยวกับ ค่าตอบแทนค่าทดแทน ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ กรณีเกิดภัยพิบัติ พิจารณาและกำหนดกิจการอื่น ๆ เกี่ยวกับการป้องกันภัยพิบัติ 	<ol style="list-style-type: none"> ติดตามสถานการณ์ อำนวยการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในทุกกรณี รายงานสถานการณ์ ข้อมูลเสนอ อทล.และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ติดตามประสานงานเกี่ยวกับการจัดงบประมาณเพื่อให้ความช่วยเหลือทุกขั้นตอนจนเสร็จการ ประสานงานคณะกรรมการป้องกันฝ่ายพลเรือนแห่งชาติ พิจารณา และกำหนดกิจการอื่นที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันภัยพิบัติทุกระดับ 	<ol style="list-style-type: none"> สรุปสถานการณ์หลังเกิดภัยพิบัติเสนอ อทล. และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องติดตามและประสานงานการอนุมัติงบประมาณ เพื่อการฟื้นฟู พิจารณาทบทวนหรือปรับปรุงแผนหลักตามกิจการ หรือระยะเวลาที่เหมาะสม ศึกษา ค้นคว้า และวิจัยทางด้านวิชาการตลอดจนเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับการป้องกันภัยพิบัติให้กับบุคลากรของกรมทางหลวง ประสานงาน ติดตามผล และประเมินผล ตลอดจนสนับสนุนการปฏิบัติงานตามแผนการป้องกันภัยพิบัติ ปฏิบัติการอื่นตามที่ผู้บังคับบัญชาระดับสูงกำหนด
ระดับ 2	<ol style="list-style-type: none"> รับฟังข่าวสาร ติดตาม และเฝ้าระวังสถานการณ์ ตรวจสอบความพร้อมของศูนย์ปฏิบัติการของแขวงทางหลวง/สำนักงานบำรุงทาง ศูนย์สร้างทาง และศูนย์สร้างและบูรณะสะพานในการให้ความช่วยเหลือกรณีเกิดภัยพิบัติ 	<ol style="list-style-type: none"> รายงานข้อมูลการเกิดภัยพิบัติต่อศูนย์บัญชาการกรมทางหลวงและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง บริหารจัดการแบบบูรณาการ พิจารณาระดับความรุนแรงของภัยพิบัติเพื่อเสนอศูนย์บัญชาการกรมทางหลวง หรือเพื่อขอรับการสนับสนุนจากหน่วยงานอื่น 	<ol style="list-style-type: none"> รายงานผลการปฏิบัติงานต่อศูนย์บัญชาการกรมทางหลวง พิจารณาสนับสนุนผลการปฏิบัติงานของศูนย์ปฏิบัติการแขวงทางหลวง/สำนักงานบำรุงทาง ศูนย์สร้างทางและศูนย์สร้างและบูรณะสะพานด้านบุคลากร บริหารจัดการ เครื่องจักร

ระดับ ความ รุนแรง	หน้าที่รับผิดชอบที่ต้องปฏิบัติ		
	ก่อนเกิดภัยพิบัติ	ขณะเกิดภัยพิบัติ	หลังเกิดภัยพิบัติ
	3. กำหนดยุทธศาสตร์เพื่อสนับสนุนศูนย์สร้างทาง ศูนย์สร้างและบูรณะสะพานแขวงฯและ สำนักงานบำรุงทางด้านบุคลากรบริหารจัดการเครื่องจักรและยานพาหนะงบประมาณ และด้านประชาสัมพันธ์ 4. จัดทำแผนปฏิบัติการกรณีเกิดภัยพิบัติ	4. ควบคุม ดูแล กำกับ แก้ไขปัญหาภัยพิบัติให้เกิดผลสัมฤทธิ์ 5. ประเมินความเสียหายเพื่อขอรับงบประมาณเพิ่มเติม	ยานพาหนะ และแผนงาน/งบประมาณ 3. ติดตามและประเมินผลการปฏิบัติงานงบประมาณ 4. วิเคราะห์สรุปผลและเสนอแนวทางการแก้ไขแบบยั่งยืน
ระดับ 1	1. รับฟังข่าวสาร ติดตาม และเฝ้าระวังสถานการณ์ 2. เตรียมความพร้อมของศูนย์ปฏิบัติการฯ 3. ประชาสัมพันธ์เชิงรุก	1. คำเนินการแก้ไข/ช่วยเหลือทันทีเมื่อเกิดภัยพิบัติ 2. ประสานหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 3. จัดทำรายงานสถานการณ์ต่อศูนย์อำนวยการสำนักทางหลวง/สำนักงานทางหลวงและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 4. พิจารณาระดับความรุนแรงของภัยพิบัติเพื่อเสนอศูนย์อำนวยการสำนักทางหลวง/สำนักงานทางหลวงหรือเพื่อขอรับการสนับสนุนจากหน่วยงานอื่น 5. ประเมินความเสียหายเพื่อขอรับงบประมาณ 6. ประชาสัมพันธ์อย่างต่อเนื่อง 7. บริหารจัดการแบบบูรณาการ	1. รายงานและสรุปผลการปฏิบัติงานเสนอศูนย์อำนวยการสำนักทางหลวง/สำนักงานทางหลวงและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 2. ติดตามและ ประเมินผลการปฏิบัติงาน 3. สรุปผลความเสียหาย พร้อมเสนอแผนงานเพื่อขอรับงบประมาณฉุกเฉิน 4. จัดทำแผนฟื้นฟูเสนอศูนย์อำนวยการสำนักทางหลวง/สำนักงานทางหลวง เพื่อขอรับงบประมาณ

ที่มา: กรมทางหลวง (2553)

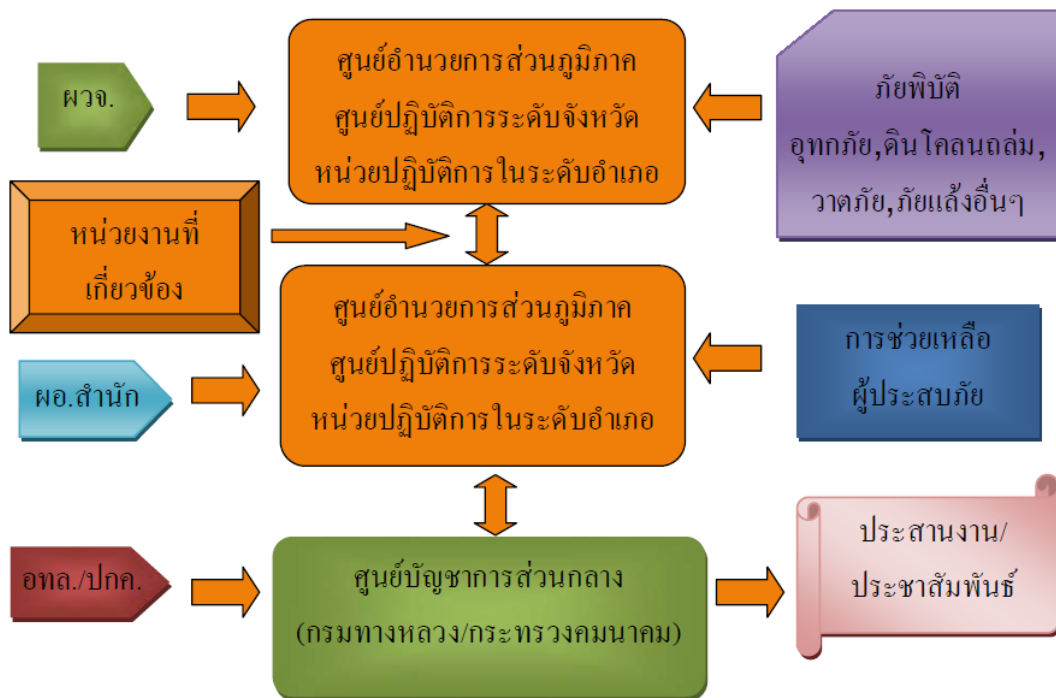


รูปที่ 7.16 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการปฏิบัติงานแก้ไขปัญหาลูกทางหลวงที่เกิดดินถล่ม
ที่มา: กรมทางหลวง (2553)



รูปที่ 7.17 แสดงหน้าที่และความรับผิดชอบของกรมทางหลวง
ที่มา: กรมทางหลวง (2553)

การปฏิบัติการให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัย



รูปที่ 7.18 การปฏิบัติการให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัย
ที่มา: กรมทางหลวง (2553)

การปฏิบัติงานของกรมทางหลวงกรณีเกิดภัยพิบัติ

ตารางที่ 7.4 การปฏิบัติงานของศูนย์ปฏิบัติการแขวงทาง/สำนักงานบำรุงทาง กรณีเกิดภัยพิบัติดินถล่ม
ระดับความรุนแรงของภัยพิบัติ : ระดับ 1

ก่อนเกิดภัยพิบัติ	ขณะเกิดภัยพิบัติ	หลังเกิดภัยพิบัติ
<p>1. ผู้อำนวยการแขวงทาง/ ผู้อำนวยการสำนักงานบำรุงทาง</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์ 2. ให้สำรวจและบันทึกข้อมูลทางหลวงที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัย 3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร 4. จัดตั้งศูนย์เฉพาะกิจการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการป้องกันและแก้ไขปัญหาอุทกภัย วาตภัย และโคลนถล่ม 5. สั่งการให้สำรวจสะพาน ท่อระบายน้ำ และร่องน้ำข้างทาง และให้ทำการขุดลอกเพื่อให้น้ำไหลผ่านได้สะดวก 6. สั่งการให้สำรวจเส้นทางสำรองเพื่อใช้เป็นเส้นทางทดแทน 7. สั่งการให้เตรียมพร้อมด้านกำลังคน เครื่องจักร ยานพาหนะ วัสดุอุปกรณ์ เครื่องสูบน้ำ และ สิ่งอำนวยความสะดวก 8. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 9. ติดตามสถานการณ์ รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ และประเมินสถานการณ์ 10. ให้ความรู้ความเข้าใจในการปฏิบัติงาน 11. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. สั่งการ และให้ความช่วยเหลือเบื้องต้น 2. ประสานงานกับศูนย์อำนาจการสำนักงานแขวง/สำนักงานทางหลวง 3. ติดตามสถานการณ์ รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และ ประเมินสถานการณ์ 4. ประชาสัมพันธ์อย่างต่อเนื่อง 5. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 6. ควบคุม ดูแล การปฏิบัติงานให้แล้วเสร็จและ บรรลุวัตถุประสงค์ 7. ให้ความช่วยเหลือตามที่ได้รับกรร้องขอ 8. ให้บันทึกภาพเหตุการณ์ 9. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา 10. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. รายงานผลการสำรวจสภาพ ความเสียหายในชีวิตและทรัพย์สิน 2. ประเมินการ ค่าบูรณะซ่อมแซมทรัพย์สินที่เสียหายให้อยู่ในสภาพเดิม 3. เร่งรัดดำเนินการซ่อมให้ การจราจรผ่านได้และคืนสู่สภาพเดิม 4. ให้ความช่วยเหลือตามที่ได้รับ การร้องขอ 5. จัดทำหรือเสนอแผนฟื้นฟูเพื่อการแก้ไขที่ยั่งยืน 6. ประชาสัมพันธ์ผลการ ปฏิบัติงาน 7. ประเมินและติดตามผลการ ปฏิบัติงาน
<p>2. รองผู้อำนวยการแขวงทาง ฝ่ายวิศวกรรม รองผู้อำนวยการสำนักงานบำรุงทาง ฝ่ายวิศวกรรม</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์ 2. สำรวจข้อมูลทางหลวงที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัย 3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร 4. ให้สำรวจสะพาน ท่อระบายน้ำ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. สั่งการ และให้ความช่วยเหลือเบื้องต้น 2. ติดตามสถานการณ์ รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และ ประเมินสถานการณ์ 3. ออกตรวจพื้นที่ที่เกิดภัยพิบัติ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. รายงานผลการสำรวจสภาพ ความเสียหาย ในชีวิตและ ทรัพย์สินต่อ ผู้อำนวยการศูนย์ปฏิบัติการแขวงทาง/สำนักงานบำรุงทาง

ก่อนเกิดภัยพิบัติ	ขณะเกิดภัยพิบัติ	หลังเกิดภัยพิบัติ
<p>ร่องน้ำข้างทาง และให้ทำการขุดลอก เพื่อให้น้ำไหลผ่านได้สะดวก</p> <p>5. ให้สำรวจเส้นทางสำรองเพื่อใช้เป็นเส้นทางทดแทน</p> <p>6. ร่วมพิจารณาการกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัย</p> <p>7. ให้จัดเตรียมกำลังคน เครื่องจักร ยานพาหนะ วัสดุอุปกรณ์ และ สิ่งอำนวยความสะดวก</p> <p>8. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตลอดจนซักซ้อมความเข้าใจกับ ผู้ปฏิบัติงานทุกคน</p> <p>9. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>4. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง</p> <p>5. ให้คำปรึกษากับหน่วยบำรุงทางเคลื่อนที่ หน่วยปรับซ่อม และหน่วยจราจรสงเคราะห์</p> <p>6. ร่วมปฏิบัติงานในสนาม</p> <p>7. ควบคุม ดูแลให้การจราจรผ่านได้</p> <p>8. ให้ความช่วยเหลือตามที่ได้รับ การร้องขอ</p> <p>9. บันทึกภาพเหตุการณ์</p> <p>10. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา</p> <p>11. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>2. ประเมินการ ค่าบูรณะซ่อมแซมทรัพย์สินที่เสียหายให้อยู่ในสภาพเดิม</p> <p>3. จัดทำแผนงานเพื่อของบประมาณฉุกเฉิน</p> <p>4. เร่งรัดดำเนินการซ่อมให้ การจราจรผ่านได้และคืนสู่สภาพเดิม</p> <p>5. ให้ความช่วยเหลือตามที่ได้รับ การร้องขอ</p> <p>6. จัดทำหรือเสนอแผนฟื้นฟูเพื่อ การแก้ไขที่ยั่งยืน</p> <p>7. ประชาสัมพันธ์ผลการ ปฏิบัติงาน</p>
<p>3.รองผู้อำนวยการแขวงทางหลวงฝ่ายปฏิบัติการ/รองผู้อำนวยการสำนักงานบำรุงทาง ฝ่ายปฏิบัติการ</p> <p>1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์</p> <p>2. ร่วมตรวจสอบกับหมวดการทางในพื้นที่เสี่ยงภัย</p> <p>3. ร่วมจัดทำแผนปฏิบัติการป้องกัน และ แก้ไขปัญหาทุกภัย วาตภัย และโคลนถล่ม</p> <p>4. ติดตามข้อมูลข่าวสาร</p> <p>5. เร่งรัดให้หมวดการทางสำรวจ สะพานท่อระบายน้ำ ร่องน้ำข้างทาง และ ให้ดำเนินการขุดลอก หรือทำความสะอาด ให้น้ำไหลผ่านได้สะดวก</p> <p>6. ให้สำรวจเส้นทางสำรองเพื่อใช้เป็นเส้นทางทดแทน</p> <p>7. ให้จัดเตรียมกำลังคน เครื่องจักร ยานพาหนะ วัสดุอุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวก</p> <p>8. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตลอดจนซักซ้อมความเข้าใจกับ ผู้ปฏิบัติงาน</p> <p>9. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมายทุกคน</p>	<p>1. เฝ้าระวังในจุดที่เกิดเหตุร่วมกับหมวดการทาง โดยการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ วางกระสอบทรายทำคันดินกันน้ำ ติดตั้งป้ายเตือนป้ายแนะนำเครื่องหมายและสัญญาณไฟจราจร ฯลฯ</p> <p>2. ติดต่อประสานงานกับหัวหน้างานบริหารงานทั่วไป เพื่อให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องภัยพิบัติ</p> <p>3. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง</p> <p>4. สั่งการให้ขนย้ายสิ่งกีดขวางออกจากพื้นผิวจราจร</p> <p>5. สั่งการให้ซ่อมทางหลวงให้การจราจรผ่านได้อย่างรวดเร็ว</p> <p>6. ให้ความช่วยเหลือตามที่ได้รับ การร้องขอ</p> <p>7. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา</p> <p>8. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>1. เร่งสำรวจ และประเมินความเสียหายเพื่อเสนอขอของงบประมาณ</p> <p>2. เร่งรัดดำเนินการซ่อมให้คืนสู่สภาพเดิม</p> <p>3. ให้ความช่วยเหลือตามที่ได้รับ การร้องขอ</p> <p>4. ประชาสัมพันธ์ผลการ ปฏิบัติงาน</p>

ก่อนเกิดภัยพิบัติ	ขณะเกิดภัยพิบัติ	หลังเกิดภัยพิบัติ
<p>4. สารวัตรสถานีตำรวจทางหลวง</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์ 2. มอบหมายนโยบายการให้ความช่วยเหลือ แก่ผู้ได้บังคับบัญชา 3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร 4. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตลอดจนซักซ้อมความเข้าใจกับผู้ปฏิบัติงานทุกคน 5. เตรียมความพร้อมด้านยานพาหนะ เครื่องมือสื่อสาร กำลังพล รถพยาบาล ฯลฯ 6. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. อำนวยความสะดวก จัดการจราจร แนะนำเส้นทางสำรอง 2. ให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัยทันที 3. ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือผู้ใช้รถ ให้เดินทางโดยปลอดภัย 4. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 5. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. อำนวยความสะดวก จัดการจราจร แนะนำเส้นทางสำรอง 2. ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือผู้ใช้รถ ให้เดินทางโดยปลอดภัย 3. ให้ความช่วยเหลือตามที่ได้รับ การร้องขอ 4. ประเมินเหตุการณ์ และรายงานผู้บังคับบัญชาตามลำดับชั้น
<p>5. หัวหน้าหมวดการทาง</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์ 2. ร่วมจัดทำแผนปฏิบัติการป้องกัน และ แก้ไขปัญหาทุกภัย วาตภัย และโคลนถล่ม 3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร 4. ตรวจสอบข้อมูลทางหลวงที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัย 5. ตรวจสอบ สะพาน ท่อระบายน้ำ ร่องน้ำ ข้างทาง และดำเนินการขุดลอก หรือทำความสะอาดให้น้ำไหลผ่านได้สะดวก 6. ตรวจสอบเส้นทางสำรองเพื่อใช้เป็นเส้นทางทดแทน 7. จัดเตรียมความพร้อมของกำลังคน เครื่องจักร ยานพาหนะ วัสดุอุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวก 8. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตลอดจนซักซ้อมความเข้าใจกับผู้ปฏิบัติงานทุกคน 9. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. จัดตั้งศูนย์เฉพาะกิจในพื้นที่ ที่เกิดภัยพิบัติและประชาสัมพันธ์ 2. จัดเจ้าหน้าที่ เครื่องจักร อุปกรณ์ต่าง ๆ ให้ปฏิบัติงานทันทีที่ได้รับรายงาน/การร้องขอ 3. รายงานรองผู้อำนวยการศูนย์ฯ ทันทีที่เกิดภัยพิบัติ 4. ติดตั้งเครื่องหมายจราจร อุปกรณ์อำนวยความสะดวกและแนะนำเส้นทางสำรองเพื่อหลีกเลี่ยงพื้นที่ประสบภัย 5. ซ่อมแซม แก้ไข ให้การจราจรผ่านได้โดยสะดวกและปลอดภัย 6. บันทึกภาพเหตุการณ์ 7. รายงานผลการปฏิบัติงานต่อผู้อำนวยการศูนย์ฯ 8. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 9. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา 10. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ตรวจสอบสภาพความเสียหายและจัดทำแผนเสนอของบประมาณ 2. เร่งรัดดำเนินการซ่อมให้ การจราจรผ่านได้และคืนสู่สภาพเดิม 3. ประชาสัมพันธ์เชิงรุก 4. ตรวจสอบ อุปกรณ์อำนวยความสะดวกที่นำไปใช้ใน งานสนามให้พร้อมใช้งานได้ทันที
<p>6. หัวหน้าหน่วยบำรุงทางเคลื่อนที่</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์ 2. รวบรวมข้อมูลทางหลวงที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัย 3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เฝ้าระวังในจุดที่เกิดเหตุร่วมกับหมวดการทาง โดยการติดตั้งเครื่องสูบน้ำ วางกระสอบทรายทำคันดินกันน้ำ ติดตั้งป้ายเตือน ป้ายแนะนำเครื่องหมายและสัญญาณไฟจราจร ฯลฯ 2. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ตรวจสอบสภาพความเสียหายและจัดทำแผนเสนอของบประมาณ 2. เร่งรัดดำเนินการซ่อมให้ การจราจรผ่านได้และซ่อมให้คืนสู่สภาพเดิม

ก่อนเกิดภัยพิบัติ	ขณะเกิดภัยพิบัติ	หลังเกิดภัยพิบัติ
<p>4. ประสานงานกับหมวดการทางสำรวจสะพาน ท่อระบายน้ำ ร่องน้ำข้างทาง และดำเนินการขุดลอก หรือทำความสะอาดให้น้ำไหลผ่านได้สะดวก</p> <p>5. จัดเตรียมความพร้อมของกำลังคน เครื่องจักร ยานพาหนะ วัสดุอุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวก</p> <p>6. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตลอดจนซักซ้อมความเข้าใจกับผู้ปฏิบัติงานทุกคน</p> <p>7. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>3. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	
<p>7. หัวหน้างานจราจรสงเคราะห์</p> <p>1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์</p> <p>2. จัดเตรียมความพร้อมของกำลังคน เครื่องจักร ยานพาหนะ วัสดุอุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวก</p> <p>3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร</p> <p>4. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตลอดจนซักซ้อมความเข้าใจกับผู้ปฏิบัติงาน</p> <p>5. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมายทุกคน</p>	<p>1. ติดตั้งป้ายเตือน ป้ายแนะนำ เครื่องหมายสัญญาณไฟจราจรฉุกเฉิน และอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกและปลอดภัยแก่ผู้ใช้เส้นทาง</p> <p>2. ให้ความช่วยเหลือตามที่ได้รับแจ้งร้องขอ</p> <p>3. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา</p> <p>4. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>1. ติดตั้งป้ายเตือน ป้ายแนะนำ เครื่องหมายสัญญาณไฟจราจรฉุกเฉิน และ อุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกและปลอดภัยแก่ผู้ใช้เส้นทาง</p> <p>2. ซ่อมแซมวัสดุจราจรที่เสียหายเพื่อแก้ไขปัญหาเบื้องต้น</p>
<p>8. หัวหน้างานปรับซ่อม</p> <p>1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์</p> <p>2. ตรวจสอบสภาพเครื่องจักร ยานพาหนะเครื่องมือ ให้พร้อมปฏิบัติงานได้ทันที</p> <p>3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร</p> <p>4. ประชุมมอบหมายหน้าที่ตลอดจนซักซ้อมการปฏิบัติงานในสถานการณ์จำลองรูปแบบต่าง ๆ ของภัยพิบัติ</p> <p>5. สำรวจและเสนอความต้องการด้านเครื่องจักร ยานพาหนะ เครื่องมือ อุปกรณ์เพิ่มเติมในส่วนที่ขาดแคลน เพื่อให้ สามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ</p> <p>6. วางแผนพร้อมจัดตั้งหน่วยเฉพาะกิจ</p>	<p>1. จัดเจ้าหน้าที่เข้าปฏิบัติงานทันทีที่เกิดภัยพิบัติโดยประสานงานกับเจ้าหน้าที่สนามเกี่ยวกับเครื่องจักร ยานพาหนะ และอุปกรณ์ช่วยเหลือต่าง ๆ ที่จำเป็น</p> <p>2. ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือหมวดการทางในพื้นที่ที่เกิดภัยพิบัติทั้งด้านเครื่องจักร อุปกรณ์ และกำลังคน</p> <p>3. จัดชุดซ่อมบำรุงเคลื่อนที่เพื่อให้การสนับสนุนหน่วยงานภาคสนามที่เกิดภัยพิบัติ</p> <p>4. รายงานการปฏิบัติงาน ข้อมูลการใช้เครื่องจักรอุปกรณ์สนับสนุนต่าง ๆ เสนอผู้อำนวยการศูนย์ฯ</p> <p>5. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา</p> <p>6. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>1. สรุปและรวบรวมข้อมูลรายงานผลการปฏิบัติงานของเครื่องจักร ยานพาหนะ ที่ร่วมปฏิบัติการต่อผู้อำนวยการศูนย์ฯ</p> <p>2. จัดทำแผนการซ่อมบำรุงเครื่องจักร ยานพาหนะเพิ่มเติมเพื่อขอรับการสนับสนุนงบประมาณ</p> <p>3. จัดหน่วยซ่อมบำรุงเคลื่อนที่เพื่อซ่อมแซมเครื่องจักร ยานพาหนะ อุปกรณ์ที่ชำรุดตามหมวดการทางหลังจากที่เหตุการณ์กลับเข้าสู่สภาวะปกติ</p> <p>4. ตรวจสอบและจัดซ่อมเครื่องจักรยานพาหนะ เครื่องมือ</p>

ก่อนเกิดภัยพิบัติ	ขณะเกิดภัยพิบัติ	หลังเกิดภัยพิบัติ
<p>เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานได้ทันทีที่เกิดภัยพิบัติ</p> <p>7. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>		<p>อุปกรณ์ ที่ชำรุดเสียหายในส่วนความรับผิดชอบให้อยู่ในสภาพที่สามารถปฏิบัติงานได้ตามปกติ</p>
<p>9. รองผู้อำนวยการแขวงทางหลวงฝ่ายบริหาร</p> <p>1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์</p> <p>2. ทำหน้าที่เลขานุการศูนย์ฯ พร้อมกำกับดูแลเจ้าหน้าที่ติดตามข้อมูลข่าวสาร</p> <p>4. ตรวจสอบรายงานข้อมูลทางหลวงที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยเสนอศูนย์อำนาจการสำนักทางหลวง/สำนักงานทางหลวง</p> <p>5. ประชาสัมพันธ์รับทราบภารกิจของแขวงทางหลวง/สำนักงานบำรุงทาง</p> <p>6. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>1. ประชาสัมพันธ์สภาพทางหลวงให้ผู้ใช้เส้นทางทราบอย่างต่อเนื่อง</p> <p>2. ดำเนินการตามที่ได้รับมอบหมาย</p> <p>3. ประสานงานกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง</p> <p>4. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา</p> <p>5. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>1. ประสานงานการให้ความช่วยเหลือตามที่ได้รับการร้องขอ</p>
<p>10. หัวหน้างานสถิติ</p> <p>1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์</p> <p>2. รวบรวมสถิติข้อมูลพื้นที่เสี่ยงภัยเสนอศูนย์ปฏิบัติการแขวงทางหลวง/สำนักงานบำรุงทาง</p> <p>3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร</p> <p>4. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>1. รวบรวมและรายงานข้อมูลพื้นที่ที่เกิดภัยเสนอศูนย์อำนาจการสำนักทางหลวงสำนักงานทางหลวง</p> <p>2. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา</p> <p>3. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>1. สรุปรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการเกิดภัยพิบัติ เสนอศูนย์อำนาจการสำนักทางหลวง/สำนักงานทางหลวง</p>
<p>11. หัวหน้างานพัสดุและสัญญา</p> <p>1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์</p> <p>2. ตรวจสอบวัสดุคงคลัง เช่น หิน ทราย น้ำมันเชื้อเพลิง ฯลฯ ให้พร้อมใช้ปฏิบัติงานได้ทันที</p> <p>3. จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนสะพานเบลิยี่ กระสอบทราย หิน ทราย น้ำมันเชื้อเพลิง ฯลฯ ให้เพียงพอและสามารถนำไปใช้งานได้ทันที</p> <p>ติดตามข้อมูลข่าวสาร</p> <p>ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>1. จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นโดยด่วนที่สุด</p> <p>2. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา</p> <p>3. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย</p>	<p>1. จัดซื้อจัดจ้างวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อดำเนินการซ่อมแซมทางหลวงที่ชำรุดเสียหาย</p> <p>2. จัดซื้อจัดจ้างวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ กรณีที่ผูกพันไปก่อนแล้ว</p>
<p>12. หัวหน้างานการเงินและบัญชี</p> <p>1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์</p>		

ก่อนเกิดภัยพิบัติ	ขณะเกิดภัยพิบัติ	หลังเกิดภัยพิบัติ
2. ตรวจสอบงบประมาณเพื่อทราบสถานะการเงินให้เป็นปัจจุบัน 3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร 4. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย	1. จัดทำและแนะนำวิธีการใช้งบประมาณ 2. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา 3. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย	1. เมื่อได้รับอนุมัติเงินงบประมาณให้เร่งรัดการเบิกจ่ายโดยเร็ว
13. หัวหน้างานสารบรรณ 1. รับฟังข่าวสาร เฝ้าระวังสถานการณ์ 2. ประชาสัมพันธ์ให้ประชาชนทราบ 3. ติดตามข้อมูลข่าวสาร 4. จัดเตรียมเจ้าหน้าที่ประจำเครื่องมือสื่อสาร, โทรสาร, วิทยุสมัครเล่น 5. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย	1. รายงานสถานการณ์ต่อผู้อำนวยการศูนย์ปฏิบัติการแขวงทาง/สำนักงานบำรุงทางเป็นระยะ ๆ 2. ประชาสัมพันธ์ให้ประชาชนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทราบเป็นระยะ ๆ 3. จัดเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานตลอด 24 ชั่วโมง 4. จัดเจ้าหน้าที่รับ - ส่งข้อมูลข่าวสารตลอดเวลา จนกว่าเหตุการณ์จะเป็นปกติ 5. อยู่ปฏิบัติงานตลอดเวลา 6. ปฏิบัติงานอื่นตามที่ได้รับมอบหมาย	1. สรุปรายงานสถานการณ์ต่อผู้อำนวยการศูนย์ปฏิบัติการแขวงทาง/สำนักงานบำรุงทาง 2. ประชาสัมพันธ์สภาพการจราจรให้ประชาชนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทราบเป็นระยะ ๆ

ที่มา: กรมทางหลวง (2553)

กล่าวโดยสรุประบบตรวจวัดและติดตามพฤติกรรมซึ่ง สามารถติดตามค่าตรวจวัดได้แบบทันทีทันใด (Real Time) สามารถนำไปใช้ส่งข้อมูลเตือนภัยให้เจ้าหน้าที่ผู้ดูแลพื้นที่ อาทิ เจ้าหน้าที่หมวดทางหลวง แขวงทางหลวง ฯลฯ สามารถได้รับข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว (ภายในระยะเวลาไม่เกิน 5 นาที ภายหลังมีสัญญาณแจ้งเหตุ) ดังนั้นเจ้าหน้าที่จะสามารถแจ้งเตือนให้ประชาชนที่สัญจรผ่านจุดเสี่ยงได้รับทราบอย่างทันท่วงที นอกจากนั้นเมื่อทราบระดับความเสี่ยงภัยดินถล่มในพื้นที่ทางหลวง ก็จะสามารถนำไปกำหนดตำแหน่งที่มีความเสี่ยงสูงและจัดสรรลำดับพื้นที่ซึ่งควรได้รับงบประมาณการซ่อมบำรุงได้อย่างถูกต้องและตรงจุดมากยิ่งขึ้น

7.9 ระบบ Platform แสดงผลเทคโนโลยีตรวจวัด ติดตาม เตือนภัย และบริหารจัดการความเสี่ยงภัยพิบัติดินสไลด์ในโครงข่ายทางหลวง

ผลการศึกษาในโครงการนี้จะรวบรวมข้อมูลผ่านทางระบบแสดงผลเทคโนโลยีตรวจวัด ติดตาม เตือนภัย และบริหารจัดการความเสี่ยงภัยพิบัติดินสไลด์ในโครงข่ายทางหลวง สำนักวิจัยและพัฒนาทาง หรือ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการเรียกใช้งาน ระบบแพลตฟอร์มประกอบด้วย 7 เมนูย่อยดังนี้

1) หน้าจอแสดงผลการติดตามและประเมินความเสี่ยงของแปลงศึกษา หรือ Monitoring and Evaluation (M&E) Dashboard

2) ระบบแสดงกราฟข้อมูลการตรวจวัดของแปลงศึกษา IoT Slope Monitoring System

3) คู่มือปฏิบัติการ หรือ Practitioner's Handbook

4) สื่อการสอนอิเล็กทรอนิกส์

5) VDO ประชาสัมพันธ์

6) โปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพ

7) ข้อมูลและเอกสารประกอบอื่น ๆ

การใช้งานผู้ใช้สามารถเข้าไป login ที่ <https://www.giliot.live/main> โดยใช้ Username และ Password ที่ให้ไว้ จากนั้นหน้าเว็บจะแสดงหน้าแรก Home Page ดังรูปที่ 7.19 ผู้ใช้สามารถเลือกคลิกที่ ไอคอนทั้ง 7 โมดูลย่อย เพื่อเข้าสู่เมนูย่อยดังอธิบายไว้ด้านบน

โมดูลที่ 1 Monitoring and Evaluation (M&E) Dashboard ดังรูปที่ 7.20 และ รูปที่ 7.21 ผู้ใช้จะเข้าสู่หน้าจอสรุปผลการติดตามและประเมินความเสี่ยงของแปลงศึกษา ซึ่งสามารถเห็นภาพรวมของ สถานการณ์ทุกแปลงศึกษาได้ทันที ได้แก่ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย ระดับปริมาณน้ำฝน ค่าการเคลื่อนตัว ฯลฯ

โมดูลที่ 2 IoT Slope Monitoring System ดังรูปที่ 7.22 และรูปที่ 7.23 ผู้ใช้จะเข้าสู่ระบบแสดง กราฟข้อมูลการตรวจวัดของแปลงศึกษา ซึ่งเป็นข้อมูลการตรวจวัดในรายละเอียด สำหรับจัดทำรายงานการ ติดตามผลในรายแปลง หรือสำหรับวิศวกรและนักวิจัยที่ต้องการดาวน์โหลดข้อมูลเพื่อนำไปศึกษาเชิงลึกต่อไป

โมดูลที่ 3 คู่มือปฏิบัติการฯ หรือ Practitioner's Handbook ดังรูปที่ 7.24 เมื่อคลิกเข้าไปที่ไอคอนนี้ ผู้ใช้จากสามารถดาวน์โหลดคู่มือ ปฏิบัติการการแก้ไขดินสไลด์ (ไฟล์ PDF) เพื่อศึกษาในรายละเอียดได้ต่อไป

โมดูลที่ 4 สื่อการสอนอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 7.25 เมื่อคลิกเข้าไปที่ไอคอนนี้ผู้ใช้จะเข้าสู่หน้าเว็บซึ่งเป็นสื่อการสอนอิเล็กทรอนิกส์ ที่เข้าใจได้ง่ายโดยเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงาน

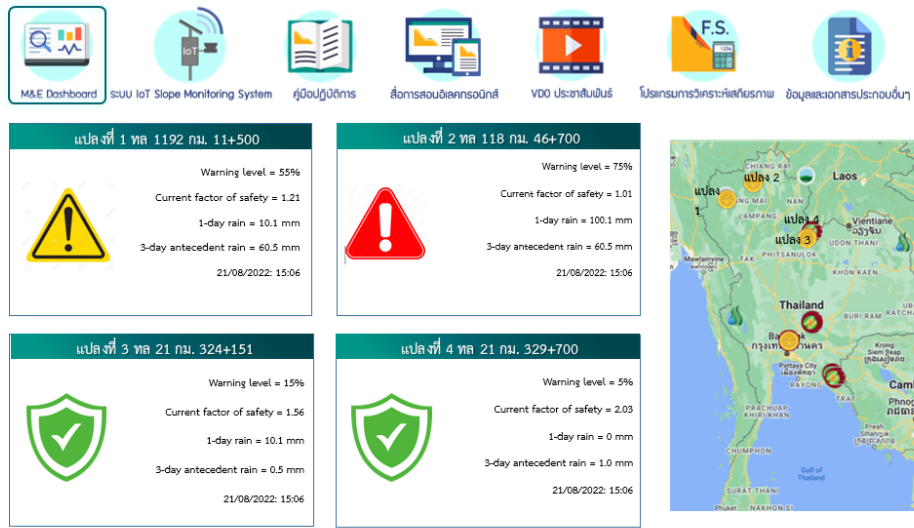
โมดูลที่ 5 VDO ประชาสัมพันธ์ ดังรูปที่ 7.26 เมื่อคลิกเข้าไปที่ไอคอนนี้ ผู้ใช้สามารถเข้าสู่คลิปวิดีโอทัศน์ประชาสัมพันธ์โครงการฯ เพื่อให้เห็นภาพรวมของปัญหา แนวทางศึกษาและผลการศึกษาที่ได้จากโครงการนี้อย่างเห็นภาพมากยิ่งขึ้น

โมดูลที่ 6 โปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังรูปที่ 7.27 ผู้ใช้สามารถคลิกไปที่ไอคอนนี้เพื่อเข้าไปสู่ไฟล์โปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพอย่างง่ายโดยแบบจำลองลาดดินอนันต์ (Infinite Slope Mode) เพื่อใช้ประเมินเสถียรภาพของลาดได้ในเบื้องต้น

โมดูลที่ 7 ข้อมูลและเอกสารประกอบอื่น ๆ ดังรูปที่ 7.28 ผู้ใช้สามารถคลิกไปที่ไอคอนนี้เพื่อเข้าไปดาวน์โหลดไฟล์เอกสารประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิ แบบแปลนศึกษา รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ (Material Specification) ฯลฯ



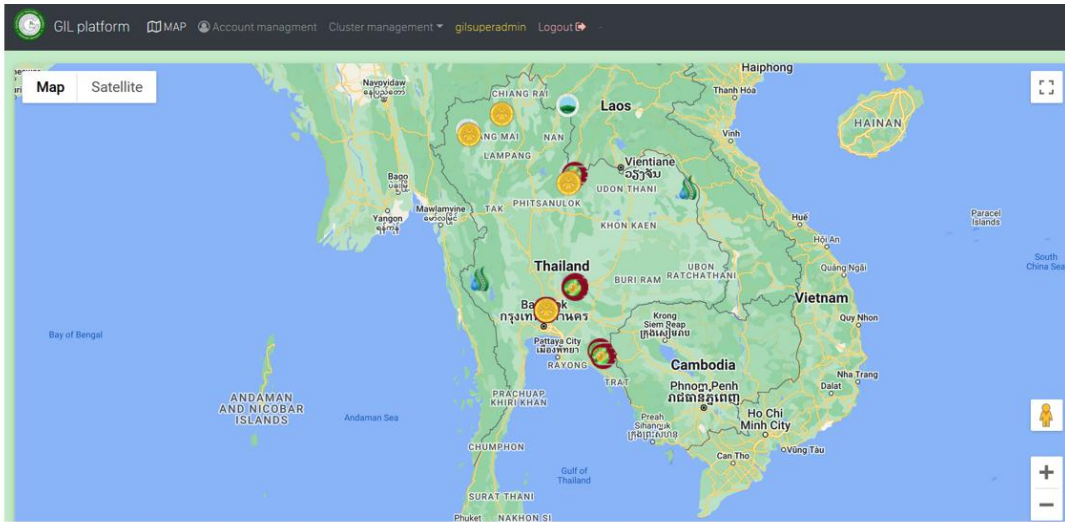
รูปที่ 7.19 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform หน้าแรก



รูปที่ 7.20 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 1) Monitoring and Evaluation (M&E)



รูปที่ 7.21 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 1) Monitoring and Evaluation (M&E)



รูปที่ 7.22 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 2) IoT slope monitoring system



รูปที่ 7.23 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 2) IoT Slope Monitoring System



บทที่ 1 ปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง แนวทางการป้องกันและแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

1.1 ปัญหาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

โครงข่ายทางหลวงส่วนใหญ่เป็นที่ยึดเกาะดินและภาคใต้ประเทศได้ประสบปัญหาดินสไลด์ ศิวทางชำรุดเสียหาย ถนนลูกรังชำรุดเสียหาย สัญญาณจราจร ส่อผลกระทบต่อระยะเวลาเดินทาง ความปลอดภัย การสูญเสียทรัพย์สินของประชาชนและงบประมาณของประเทศ ทางหลวงบางสายทางภาคใต้มีปัญหาดินสไลด์รุนแรง หรือชำรุดจนเป็นประจำทุกปี การออกแบบแก้ปัญหาทางฝั่งบ่อหรืออาจไม่สอดคล้องกับสภาพจริงจึงจำเป็นต้องหาวิธีการ ภูมิศาสตร์ ศึกษาและอุปสรรค สภาพแวดล้อม เป็นต้น การเลือกูปแบบมาตรฐานการออกแบบปรับปรุงเชิงลาดตามจุดจุดยึดยึดซึ่งงบประมาณค่อนข้างสูง ไม่ได้มีวัตถุประสงค์ให้มาประยุกต์ใช้ให้เป็นประโยชน์ หากการดูแลบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากขาดความเข้าใจในสาเหตุและรูปแบบการพังทลายที่เกิดขึ้นทำให้การแก้ไขไม่ตรงจุด ดังนั้นบุคลากรที่เกี่ยวข้องจึงจำเป็นต้องมีองค์ความรู้ที่เพียงพอที่จะสามารถเข้าใจรูปแบบการพังทลายของเชิงลาดอย่างถูกต้อง เพื่อให้การออกแบบแก้ไขเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จากข้อมูลการศึกษาด้านวิศวกรรมเชิงลาดในงานทางในอดีต พบว่าการพังทลายของเชิงลาดสามารถจำแนกได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

รูปพื้นที่ 1 น้ำที่ซบเซาบริเวณปลายเชิงลาดชันทาง (Erosion at toe slope) มีลักษณะบริเวณของเชิงลาดชันทาง (Side slope) จะเห็นความชื้นแฉะบริเวณใต้เท้าชันและน้ำนอง บริเวณปลายธารระบายน้ำในลาด รวมถึงลาดชันเอียงชันทาง (Back slope) ดังรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 ตามลำดับ การศึกษาพื้นฐานเชิงลาดมีลักษณะความชันกว้างและมีการนำไปใช้การเคลื่อนตัวของมวลดินขนาดใหญ่ตามรูปพื้นที่ 3 ดังจะได้กล่าวต่อไป การแก้ไขทำได้โดยการเสริมกันและกันหรือโครงสร้างรับลาดชันลาดชันหรือตัดหน้าลาดชันจะช่วยให้ชันอ่อนโยนขึ้น หรือ กระสอบบรรจุหินหรือหินซีเมนต์ ฯลฯ

รูปพื้นที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของน้ำที่ซบเซาและไหลตามลาดชันที่ชันและน้ำท่วมทาง ดังรูปที่ 4.4 มีลักษณะบริเวณน้ำที่ซบเซา บริเวณลาดชันและไหลตามลาดชันที่ชันการดูแลรักษาเบื้องต้นทำให้น้ำไหลลงตามลาดชัน (Over-slow) และศึกษาเชิงลาดชันทาง ปัญหาการศึกษาเชิงลาดชันอย่างละเอียดเป็นต่อไป หากไม่ป้องกันแก้ไขอย่างมีประสิทธิภาพจะเกิดการเสียหายขนาดใหญ่ได้ การแก้ไขได้มี 2 วิธี

รูปพื้นที่ 4 จีวีจางและเชิงลาดชันดินซีเมนต์ มีลักษณะบริเวณความไม่ต่อเนื่องบน (Rock discontinuity) การพังทลายเป็นรูปเหมือนใบพัด (Wedge & Plane Slide) การล้มตัว (Topple) หรือหินร่วง (Rock fall) โดยเกิดขึ้นบนลาดชันเอียงชันทาง (Back slope) ที่เป็นเนิน ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายการพังทลายเนื่องจากน้ำที่ซบเซาบริเวณปลายเชิงลาดชันทาง (Erosion at toe slope) จากถนนแม่ป๋านแม่ป๋านในจังหวัดพังงา เมื่อปี พ.ศ. 2558

ที่มา: ใหญ่สูงของไม้ (2558)



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายการพังทลายเนื่องจากน้ำที่ซบเซาบริเวณปลายเชิงลาดชันทาง (Erosion at toe slope) จากน้ำในธารระบายน้ำ (ทางด้านบน Top view) ทางหลวงหมายเลข 1009 รพ. 42 จังหวัดเชียงใหม่ ถ่ายเมื่อปี พ.ศ. 2565

รูปที่ 7.24 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 3) คู่มือปฏิบัติการ



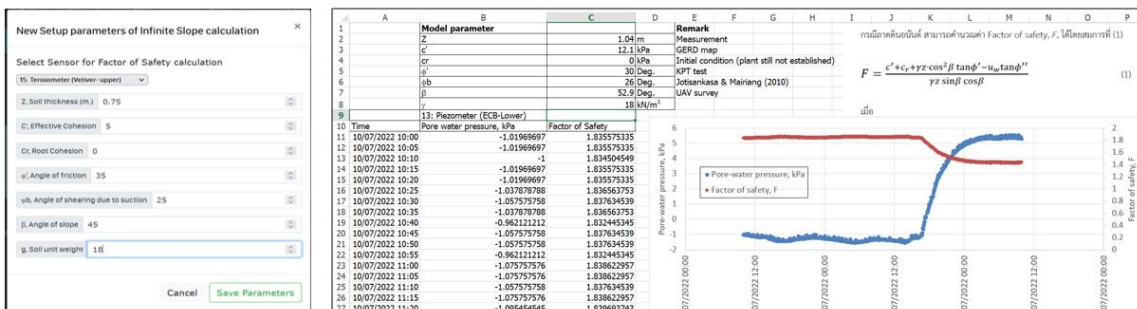

คู่มือปฏิบัติการ (Practitioner's Handbook)
ด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง

สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2565

รูปที่ 7.25 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 4) สื่อการสอนอิเล็กทรอนิกส์



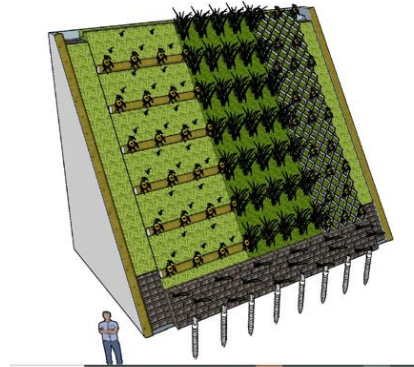
รูปที่ 7.26 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 5) VDO ประชาสัมพันธ์



รูปที่ 7.27 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 6) โปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพ



- ชุดความรู้ด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมเชิงลาดในงานทาง
- แบบแปลงศึกษาที่ 1
- แบบแปลงศึกษาที่ 2
- แบบแปลงศึกษาที่ 3
- แบบแปลงศึกษาที่ 4
- เอกสารประกอบอื่นๆ



รูปที่ 7.28 ตัวอย่างหน้าจอควบคุม (Dashboard) ของระบบ RRD Slope Monitoring Online Interactive Platform โมดูล 7) ข้อมูลและเอกสารประกอบอื่น ๆ

เอกสารอ้างอิง

- Chaiprakaikeow, S., Bay, J., Chaowalittrakul N. (2016) *Study of Dynamic Soil Properties of Mae Chang Dam using Spectral Analysis of Surface Waves and Resonance Tests*. The 21st National Convention on Civil Engineering, 28-30 June 2016, Songkhla, Thailand
- Chikute, G. C. and Sonar, I. P. (2019) *Failures of Gabion Walls, International Journal of Photoenergy*. Vol. 8, Issue 11, pp. 1384-1390, 10.35940/ijitee. J9731.0981119
- Choi, S. W., Lee, J., Kim, J. M., Park, H. S. (2013) *Design and Application of a Field Sensing System for Ground Anchors in Slopes, Sensors*. 13 (3), pp. 3739-3752
- Cornforth, D. H. (2005). *Landslides in practice*. Investigation, Analysis and Remedial/Preventive Options in Soil, 14-15.
- D.J. Scheffler & Nye, Inc. (2022) *Landslide & Slope Repair*. Retrieved 18 May 2022 from <https://www.djscheffler.com/landslide-slope-repair>
- Dunnicliff, J (1993) *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. Wiley
- EGAT. (1980). *Subsoil Investigation for 230 KV Banpong 2 – Srinagarins*, Transmission Line
- Environmental Section of the Idaho Transportation Department (2011) *Best Management Practices Manual*
- FDOT State Construction Office (2020) *Mechanically Stabilized Earth Wall Inspector's Handbook*
- Fookes, P.G. (1997) *Tropical residual soils*. The Geological Society, Bath, UK
- GEOTECH (2022) *Rockfall and Avalanche Protection*. Retrieved 10 May 2022 from <http://www.geo-technics.com/en/services/Rockfall-protection>
- Indian Railways Institute of Civil Engineering (2022) *Rock Fall Protection System*. Retrieved 19 May 2022 from https://www.ircen.gov.in/ModelRoom/M10_Rockfall%20Protection%20Systems.html
- Jeffery, J. (2018) *Case Study: Straits Regency retaining wall failure*. Retrieved 18 May 2022 from <http://www.malaysiaconstructionservices.com/documentations-discussions/testimonials/casestudystraitregencyretainingwallfailure>
- Jotisankasa, A., Takahashi, A., Takeyama, T., & Mairaing, W. (2009). *A study of deformation behaviour of an instrumented slope subject to rainfall near Thadan dam Thailand*. In Proc. 14th National Convention in Civil Engineer-ing, Nakornrachasrima, Thailand.

- Katsuichiro, G., Campbell, G., Hulme, L., Ismael, B., Lin K. Rebekah, M., Sammonds, P. and Emily, S. (2017) *The Kumamoto Japan Earthquakes of 14 and 16 April 2016: A Field Report by EEFIT*. 10.13140/RG.2.2.10956.92806.
- Larimit (2022) *Reinforced Soil Structures*. Retrieved 10 May 2022 from https://www.larimit.com/mitigation_measures/994/
- Lobo-Guerrero, S. (2019) *Case Studies of Landslide Stabilization with Deep Foundation Elements*. 9^o Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia 3^a Feira da Industria de Fundações e Geotecnia SEFE 9 – 4 a 6 de junho de 2019, São Paulo, Brasil ABEF
- Maccaferri (2014) *Construction of New Airport at Pakyong*. Sikkim, India Case History Rev: 01, Issue Date 10.10.14
- Miller, S. M. (2017) *GWFV walls and slopes*. Retrieved 10 May 2022 from <https://geosyntheticsmagazine.com/2017/10/01/gwfv-walls-and-slopes/>
- Ministry of Business, Innovation & Employment (MBIE) (2016) *Rockfall: Design Considerations for Passive Protection Structures*
- Panchuck, Karla (2018) *Measuring Geological Features*. Physical Geology, First University of Saskatchewan Edition. Retrieved 18 May 2022 from https://en.wikipedia.org/wiki/Strike_and_dip,
- Qi, X., Yu, Z. X., Zhao, L., Xu, H. and Zhao, S. C. (2018). *A new numerical modelling approach for flexible rockfall protection barriers based on failure modes*. Advanced Steel Construction. 14. 479-495. 10.18057/IJASC.2018.14.3.10.
- Rahardjo, H., Krisdani, H. & Leong, E.C. (2007). *Application of unsaturated soil mechanics in capillary barrier system*. Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia 2007), Nanjing, China. pp. 127-137.
- Sitar, N., Geraili Mikola, R. and Candia, G. (2012) *Seismically Induced Lateral Earth Pressures on Retaining Structures and Basement Walls*. Geotechnical Special Publication, pp. 335 – 358, 10.1061/9780784412138.0013
- Soil & Slope Sdn. Bhd. (2022) *Slope Engineering*. Retrieved 10 May 2022 from <http://www.soilandslope.com/slope.html>

State of Wisconsin Department of Transportation (2017), *Wisdot Structure Inspection Manual Part 4. – Ancillary Structures Chapter 4 – Retaining Walls*

Stuedlein, A. W., Bailey, M., Lindquist, D., Sankey, J. and Neely, W. J. (2010). *Design and Performance of a 46-m-High MSE wall*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000294

Terzaghi, K, Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. 3rd, New York, John Wiley and Sons, pp. 549.

The Constructor (2022). *Retaining Wall Types, Materials, Economy, and Applications*, Retrieved 18 May 2022 from <https://theconstructor.org/geotechnical/retaining-wall-types-use/24566/>

กรมทรัพยากรธรณี. (2532) *ธรณีวิทยาประเทศไทย*. กรุงเทพฯ.

กรมทรัพยากรน้ำ (2565) *ระบบเตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning) สำหรับพื้นที่เสี่ยงน้ำหลาก-ดินถล่ม*. สืบค้นจาก <http://ews.dwr.go.th/ews//index.php>

กรมทางหลวง (2553) *คู่มือการปฏิบัติงานของกรมทางหลวง กรณีเกิดภัยพิบัติ*. สำนักบริหารบำรุงทาง.

กรมทางหลวง (2554) *คู่มือการออกแบบระบบระบายน้ำและป้องกันการกัดเซาะในงานทางหลวง*. สำนักสำรวจและออกแบบ

กรมทางหลวง (2555) *แบบแนะนำ (Recommended typical drawing). โครงการศึกษาการแก้ไขป้องกันการชะล้างพังทลายและเคลื่อนตัวของเชิงลาด*. สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

กรมทางหลวง (2563) *รายงานขั้นสุดท้ายโครงการศึกษาเพื่อตรวจสอบคุณภาพดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติโดยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย*. เสนอโดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมทรัพยากรธรณี (2564) *ธรณีวิทยาประเทศไทย*. สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2564, จาก <http://www.dmr.go.th/download/pdf/North/Chiangmai.pdf>

กรมโยธาธิการและผังเมือง (2562) *มาตรฐานประกอบกรปฏิบัติการเพื่อความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับอาคาร การขุดดินและการถมดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม (Landslide) และบริเวณลาดเชิงเขา*

กองธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี (2565) *ระบบเฝ้าระวังพื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มล่วงหน้า* สืบค้นเมื่อ 10 พฤษภาคม 2565 จาก <http://gerdmodel.ku.ac.th/dmrweb/index.php>

คลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ (2564) *แผนที่ฝน 24 ชม. ย้อนหลัง* สืบค้นเมื่อ 22 ตุลาคม 2564, จาก thaiwater.net

- จิตติมา เทพพานิช และ อภินิติ โชติสังกาศ (2554) *พฤติกรรมการไหลซึมและแรงดันน้ำในช่องว่างดิน กรณีศึกษาพื้นที่ดินถล่ม ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์*. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยมหิดล 18 – 20 พฤษภาคม 2554, นครปฐม
- ไทยรัฐออนไลน์ (2558) *น้ำเซาะตลิ่งที่พังงา ทำเสาไฟล้ม-ถนนทรุด แจ้งเตรียมอพยพ 3 หมู่บ้าน สืบค้นเมื่อ 17 กุมภาพันธ์ 2565* จาก <https://www.thairath.co.th/news/local/528483>
- บุญชัย เชิญเกียรติประดับ และวารากร ไม้เรียง (2547) *การจัดการภัยธรรมชาติเนื่องแผ่นดินถล่ม*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9
- เพ็ญตา สาตรักษ์ (2550) *ธรณีฟิสิกส์เพื่อการสำรวจใต้ผิวดิน*. ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วรัช ก้องกิจกุล, วรุตม์ ต้นติวังษ์, บุญเสียง หมูเย็น, วรินทร์ พุ่งเฟื่อง และจิตตาพรณ ฉันทโชติ (2556) *กรณีศึกษาการก่อสร้างโครงสร้างดินเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์รองรับโครงสร้างถนน*. การอบรมความรู้เชิงทฤษฎี การออกแบบ และการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์ในงานวิศวกรรมโยธา, น. 41-48, 11-12 กรกฎาคม 2556, นครราชสีมา
- สันติ ไทยยืนวงษ์, ภูเบศร หนูทิมทอง, วิทวัส เดชมาก, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ (2556) *การเตือนภัยดินถล่มจากการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ภูเขาทางภาคเหนือของประเทศไทย*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, GTE401-406, 8-10 พฤษภาคม, เชียงใหม่
- สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (2551) *คู่มือการสำรวจ วิเคราะห์ความเสียหายของการชะล้างพังทลายและเคลื่อนตัวของเชิงลาด (ฉบับสนาม)*.
- สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง (2553) *รายงานฉบับที่ วพ.280 หลักการออกแบบและการควบคุมงานเบื้องต้น: งาน Soil Nail*
- สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง (2555) *คู่มือการออกแบบอาคารระบายน้ำและป้องกันการกัดเซาะในงานทางหลวง*.
- เสวก จินโต, อภินิติ โชติสังกาศ, สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว, และ ประกิต ไชยศรี (2562) *การประยุกต์ระบบวัดความขึ้นดินเพื่อการวัดความสมบูรณ์ ของโครงสร้างชั้นทางเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24 วันที่ 10-12 กรกฎาคม 2562 จ.อุตรธานี น. 2641-2650
- อภินิติ โชติสังกาศ และ วิษณุพงศ์ พอลิละ (2551) *การพัฒนาระบบตรวจวัดพฤติกรรมดินถล่ม*. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อภินิติ โชติสังกาศ, ไกรโรจน์ มหรรณพกุล และ นิพนธ์ อีระชัยกุลพานิช (2558) *เทคโนโลยีสำรวจการไหลซึม น้ำใต้ดินด้วยเสียงในงานวิศวกรรมปฐพี*. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 จัดโดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) วันที่ 8-10 กรกฎาคม 2558, จ.ชลบุรี.

อภินิติ โชติสังกาศ, อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์, จิโรจน์ ศุกลรัตน์, เอกนรินทร์ จินะวงศ์, กุลภัทร์ พิสิษฐ์กุล, นรินทร์ หรรษชัยนันท์ (2555) *เสถียรภาพและการกัดเซาะลาดดินคันทาง ทางหลวงหมายเลข 1009 กม.42 ดอยอินทนนท์*. Proceedings of the International Conference on Highway Engineering 2012 18-20 April 2012 Centara Grand Hotel, Bangkok, Thailand. หน้า 421-433.

อภินิติ โชติสังกาศ (2556) *ชีววิศวกรรมปฐพี เพื่อควบคุมการชะล้างพังทลายของลาดและดินถล่ม Soil-bioengineering: Use of vegetation and soil engineering for erosion control and slope stabilization* จำนวน 264, (น. ISBN: 978-616-91792-1-4).

อรรถพล แตรระกุล, อภินิติ โชติสังกาศ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และจิโรจน์ ศุกลรัตน์ (2555) *พฤติกรรมแรงดันน้ำ ช่องว่างดิน และปริมาณน้ำฝน: กรณีศึกษา ลาดดินคันทางเสริมแรง ทางหลวงหมายเลข 1095 จังหวัดแม่ฮ่องสอน*. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร 9-10 พฤษภาคม 2555 (รางวัลบทความดีเด่น มุลงนิเทศศาสตราจารย์ ดร.ชัย มุกต์พันธุ์).

