กรมชลประทาน

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

แนวทางการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน ประเภทเขื่อนดินถม (Earth Dam) กรมชลประทาน

EG_PUB_01/65

ส่วนวิศวกรรมธรณี
สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา
พฤศจิกายน 2565

คำนำ

การปรับปรุงฐานรากเขื่อน เป็นขั้นตอนที่จำเป็นและสำคัญในการก่อสร้างเขื่อน เป็นการปรับปรุงสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่มีอยู่เดิมให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ชั้นฐานรากเขื่อนสามารถรองรับน้ำหนักของตัวเขื่อนได้เป็นอย่างดี ไม่เกิดการทรุดตัวเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด และมีความทึบน้ำเพียงพอไม่ให้น้ำไหลซึมผ่านชั้นฐานรากเขื่อนเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ การพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนให้เหมาะสมกับสภาพธรณีวิทยาของพื้นที่จึงจำเป็นอย่างยิ่ง วิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนกระทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ ได้แก่ สภาพทางธรณีวิทยาของฐานรากที่มีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่โครงการ สภาพฐานรากเกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ทางธรณีวิทยาทำให้มีคุณลักษณะ องค์ประกอบ และคุณสมบัติของวัสดุฐานรากแตกต่างกันออกไป ซึ่งเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ในการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากให้ถูกต้องเหมาะสม เพื่อให้ได้เขื่อนที่มีความปลอดภัยและใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการต่าง ๆ นอกจากจะต้องพิจารณาสภาพธรณีวิทยาของฐานรากเขื่อน ชนิดและความสูงของเขื่อน และข้อมูลธรณีเทคนิคแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ของวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน โดยพิจารณาจากชนิดของชั้นดินหรือชั้นหินฐานราก และราคาของงานปรับปรุงฐานรากเขื่อน เมื่อเทียบกับมูลค่าของน้ำที่จะเก็บกักไว้

การเลือกใช้วิธีการปรับปรุงฐานรากวิธีใดวิธีหนึ่ง ขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่จะต้องพิจารณา อย่างไรก็ตาม วิธีที่นิยมนำไปใช้ออกแบบมีอยู่เพียงไม่กี่วิธี โดยเฉพาะวิธีการลดการรั่วซึม ส่วนใหญ่จะออกแบบเป็น Full cut off หากเป็นฐานรากดินสลับชั้นกรวดทรายที่มีความหนาเกินกว่าจะขุดลอกออกได้จะใช้วิธีการปู Blanket หรือ Slurry trench หากเป็นฐานรากหินก็จะทำการ Grout ด้วยน้ำปูนซีเมนต์/ของผสมเป็นหลัก หากสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนมีความซับซ้อนพบสภาพฐานรากหลายชนิด อาจกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนหลายวิธีประกอบกัน มากกว่าหนึ่งวิธีขึ้นไปก็ได้ ในการออกแบบปรับปรุงฐานรากลักษณะดังกล่าวนี้ บ่อยครั้งที่มีการออกแบบโดยอาศัยประสบการณ์ (Experience) หรือ อย่างที่เคยทำ (Rule of thumb) เนื่องจากวิธีการต่างกันจะมีข้อจำกัดและความเหมาะสมกับเขื่อนและสภาพฐานรากที่ไม่เหมือนกัน หากออกแบบโดยอาศัยประสบการณ์ (Experience) โอกาสที่จะผิดพลาดย่อมมีได้น้อย แต่หากใช้หลักเกณฑ์ข้อหลังคือ อย่างที่เคยทำ (Rule of thumb) โดยมิได้พิจารณารายละเอียด ย่อมมีโอกาสสูงที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

เอกสารฉบับนี้ได้จัดทำเพื่อเป็นแนวทางการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนประเภทเขื่อนดินถม เนื้อหาประกอบด้วยหลักเกณฑ์การพิจารณา วิธีการ และขั้นตอนการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อน การประเมินปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก รวมถึงรายละเอียดของวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎี ขั้นตอนการดำเนินการ และการปฏิบัติงานของการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Cement grouting) การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) และการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีก่อสร้างกำแพงทึบน้ำ (Slurry trench) และได้นำกรณีศึกษาในการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนของกรมชลประทาน ที่ได้ดำเนินการออกแบบในช่วงปีงบประมาณ พ.ศ. 2563-2564 จำนวน 3 โครงการมาเป็นกรณีศึกษา โดยแต่ละโครงการมีสภาพธรณีวิทยาฐานรากและสภาพปัญหาที่แตกต่างกัน ได้แก่

1) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสม สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นหินแข็ง

2) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสมและเจาะ-อัดฉีดสารเคมีด้วยวิธี Sleeve grout pipe สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นดิน กรวด ทราย และชั้นหินแข็ง

3) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสมและก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นดิน/หินผุ และชั้นหินแข็ง

จุดมุ่งหมายของเอกสารฉบับนี้ เพื่อให้นักธรณีวิทยาและผู้ปฏิบัติงานออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อน เข้าใจถึงหลักเกณฑ์การพิจารณา วิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน และขั้นตอนการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนที่เหมาะสม สำหรับเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานที่ได้มาตรฐานและเป็นไปตามหลักวิชาการ สามารถอ้างอิงและนำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างเขื่อนดินถม (Earth dam) ของกรมชลประทาน ต่อไป

กัมปนาท ขวัญศิริกุล
พฤศจิกายน 2565

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 หลักเกณฑ์พิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน	3
2.1 การพิจารณาด้านเทคนิค	3
2.2 ชนิดของฐานรากเขื่อน	3
2.3 องค์ประกอบในการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน	3
2.4 การพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน	4
2.5 การประเมินปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก	5
บทที่ 3 ขั้นตอนการพิจารณาและวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน	6
3.1 ขั้นตอนการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน	6
3.2 การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Cement grouting)	6
3.2.1 ทฤษฎีการอัดฉีด	6
3.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน	10
3.3 การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting)	18
3.3.1 หลักการอัดฉีดสารเคมี	18
3.3.2 การพิจารณาวัสดุและคุณสมบัติของสารเคมี	19
3.3.3 ข้อจำกัดของการอัดฉีดสารเคมี (Limitations of chemical grouts)	21
3.3.4 สารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีด (Chemical grout materials)	22
3.3.5 การปฏิบัติงานปรับปรุงฐานรากโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมี	25
3.4 การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench	33
3.4.1 หลักการ Slurry trench method	33
3.4.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบ (Design considerations)	34
3.4.3 ชนิดของ Slurry trench	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.4 การปฏิบัติงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench	37
บทที่ 4 กรณีศึกษา	40
4.1 การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อนโครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี	40
4.2 การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อนโครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาว อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร	48
4.3 การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อนโครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยา อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา	58
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุป	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก แปลนและรูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี	
ภาคผนวก ข แปลนและรูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาว อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร	
ภาคผนวก ค แปลนและรูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยา อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา	

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3-1	แสดงค่า Permeability ของดิน หิน ชนิดต่าง ๆ	8
3-2	แสดงการประเมินการไหลของน้ำผ่านช่องว่าง รอยแตกของหินที่มีขนาดต่าง ๆ ที่ระดับแรงดันน้ำ (Water pressure) 20 เมตร และ 100 เมตร	8
3-3	การเลือกใช้วัสดุในการ grout โดยพิจารณาจากคุณภาพมวลหิน และอัตราการรั่วซึม	9
3-4	หลักเกณฑ์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมน้ำปูน	15
3-5	รูปแบบการไหลของน้ำ	17
3-6	ชนิดของวัสดุ สารเคมี และคุณสมบัติของสารเคมีที่นิยมใช้ในการอัดฉีด	22
3-7	วัตถุประสงค์การใช้งานของสารเคมีแต่ละชนิด	23
3-8	ความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกต และความหนืดเมื่อเทียบกับน้ำ	24
4-1	แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B)	44
4-2	แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณจากจุด A ไป จุด B	47
4-3	แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B)	52
4-4	แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณจากจุด A ไป จุด B	56
4-5	แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B)	62
4-6	แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณจากจุด A ไป จุด B	65
4-7	แสดงการเปรียบเทียบค่า % การปรับปรุงฐานรากเขื่อนของแต่ละวิธี	66

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3-1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนประเภทเขื่อนดินถม	7
3-2	แผนภาพ Grain size distribution of Cements	10
3-3	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบวิธีการอัดฉีด (Grouting) โดยพิจารณาชนิดวัสดุของชั้นดิน/หินฐานราก (Comparison of grouts)	19
3-4	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนืดและค่าความเข้มของสารเคมีที่นิยมใช้ในการอัดฉีด	20
3-5	แสดงชุดเครื่องเจาะหินแบบหมุน (Rotary drilling) พร้อมอุปกรณ์การเจาะ	26
3-6	แสดงอุปกรณ์การเจาะสำหรับใช้กับเครื่องเจาะหินแบบ Rotary oil feed	26
3-7	แสดงเครื่องสูบน้ำและชุดควบคุมการอัดฉีดน้ำ	27
3-8	แสดงกระบอกเก็บตัวอย่างแกนหินชนิด 3 ชั้นและอุปกรณ์ประกอบ	27
3-9	แสดงเครื่องเจาะหินแบบ (Percussion drilling) พร้อมอุปกรณ์การเจาะ	29
3-10	แสดงอุปกรณ์การเจาะสำหรับใช้กับเครื่องแบบ (Percussion drilling)	29
3-11	แสดงชุดอัดฉีดของผสมแบบเคลื่อนที่	30
3-12	แสดงชุดควบคุมการอัดฉีด	30
3-13	แสดงชุดลูกยางอัดในหลุมเจาะ	31
3-14	แสดงเครื่องสูบน้ำและถังพักน้ำ	31
3-15	แสดงวัสดุชุดท่ออัดฉีดของผสมติดปลอกลูกยาง	32
3-16	แสดงวัสดุโซเดียมซิลิเกตและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	32
3-17	แสดงวัสดุเบนโทไนท์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	33
3-18	ภาพแสดง Hydrostatic pressure ของ Slurry และ Filter cake ที่เพิ่มความมั่นคงของร่องขุด	34
3-19	แผนภาพแสดงการก่อสร้างโดยวิธี Slurry trench	38
3-20	ภาพแสดงการถมคันดิน (Dike) เพื่อให้สารละลายในร่องขุดมีระดับสูงกว่าระดับน้ำใต้ดิน	39

บทที่ 1
บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

การปรับปรุงฐานรากเขื่อนเป็นขั้นตอนที่จำเป็นและสำคัญในการก่อสร้างเขื่อน เป็นการปรับปรุงสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่มีอยู่เดิมให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ชั้นฐานรากเขื่อนสามารถรองรับน้ำหนักของตัวเขื่อนได้เป็นอย่างดี ไม่เกิดการทรุดตัวเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด และมีความทึบน้ำเพียงพอไม่ให้น้ำไหลซึมผ่านชั้นฐานรากเขื่อนเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ การพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนให้เหมาะสมกับสภาพธรณีวิทยาของพื้นที่จึงจำเป็นอย่างยิ่ง วิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนกระทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ ได้แก่ สภาพทางธรณีวิทยาของฐานรากที่มีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่โครงการ สภาพฐานรากเกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ทางธรณีวิทยาทำให้มีคุณลักษณะ องค์ประกอบ และคุณสมบัติของวัสดุแตกต่างกันออกไป ซึ่งเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ในการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากให้ถูกต้องเหมาะสม เพื่อให้ได้เขื่อนที่มีความปลอดภัยและใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการต่าง ๆ นอกจากจะต้องพิจารณาสภาพธรณีวิทยาของฐานรากเขื่อน ชนิด ความสูงของเขื่อน และข้อมูลธรณีเทคนิค อีกทั้งต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ของวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน โดยพิจารณาจากชนิดของชั้นดินหรือชั้นหินฐานราก และราคาค่าก่อสร้างของงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนเมื่อเทียบกับมูลค่าของน้ำที่จะเก็บกักไว้

การเลือกใช้วิธีการปรับปรุงฐานรากวิธีใดวิธีหนึ่ง ขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่จะต้องพิจารณา อย่างไรก็ตาม วิธีการที่นิยมนำไปใช้ออกแบบกันมาก มีอยู่เพียงไม่กี่วิธี โดยเฉพาะวิธีการลดการรั่วซึม ส่วนใหญ่จะออกแบบเป็น Full cut off หากเป็นฐานรากดินสลับชั้นกรวดทรายที่มีความหนาเกินกว่าจะขุดลอกออกได้จะใช้วิธีการปู Blanket หรือ Slurry trench หากเป็นฐานรากหินก็จะทำการ Grout ด้วยน้ำปูนซีเมนต์/ของผสมเป็นหลัก หากสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่มีความซับซ้อนพบสภาพฐานรากหลายชนิด อาจกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนหลายวิธีประกอบกัน มากกว่าหนึ่งวิธีขึ้นไปก็ได้ ในการออกแบบปรับปรุงฐานรากลักษณะดังกล่าวนี้ บ่อยครั้งที่มีการออกแบบโดยอาศัยประสบการณ์ (Experience) หรือ อย่างที่เคยทำ (Rule of thumb) เนื่องจากวิธีการต่าง ๆ กันจะมีข้อจำกัดและความเหมาะสมกับเขื่อน และสภาพฐานรากที่ไม่เหมือนกัน หากออกแบบโดยอาศัยประสบการณ์ (Experience) โอกาสที่จะผิดพลาดย่อมมีได้น้อย แต่ถ้าหากใช้หลักเกณฑ์ข้อหลังคือ อย่างที่เคยทำ (Rule of thumb) โดยมิได้พิจารณารายละเอียด ย่อมมีโอกาสสูงที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

ผู้เขียนปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา มีหน้าที่ รับผิดชอบในการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนของกรมชลประทาน จึงได้ทำการรวบรวม ค้นคว้า ทฤษฎี หลักเกณฑ์พิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนที่มีเนื้อหาครอบคลุมการพิจารณาด้านเทคนิค ชนิดของฐานรากเขื่อน องค์ประกอบในการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน การประเมินปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก รวมถึงรายละเอียดของวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน ที่ประกอบด้วยทฤษฎี ขั้นตอนการดำเนินการและการปฏิบัติงานของการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Cement grouting) การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) และการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench รวมทั้งเอกสารประกอบด้วยความรู้ด้านต่างๆ ที่ต้องใช้ในการปรับปรุงฐานรากเขื่อน โดยจัดทำเป็นเอกสารเพื่อให้นักธรณีวิทยาผู้ปฏิบัติงานออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนเข้าใจถึงหลักเกณฑ์การพิจารณา วิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน

และขั้นตอนการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนที่เหมาะสม สำหรับเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานสำหรับนักธรณีวิทยาผู้ออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อน ที่ได้มาตรฐานและเป็นไปตามหลักวิชาการ สามารถอ้างอิงและนำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างเขื่อนดินถมของกรมชลประทานได้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อนำเสนอหลักเกณฑ์การพิจารณา วิธีการ และขั้นตอนการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนประเภทเขื่อนดินถม (Earth dam) สำหรับเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานสำหรับนักธรณีวิทยาและผู้ออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อน ของกรมชลประทาน

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

ขอบเขตของการดำเนินงานของการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนประเภทเขื่อนดินประกอบด้วยการรวบรวม ค้นคว้า ทฤษฎี หลักเกณฑ์พิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนที่มีเนื้อหาครอบคลุมการพิจารณาด้านเทคนิค ชนิดของฐานรากเขื่อน องค์ประกอบในการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน การประเมินปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก รวมถึงรายละเอียดของวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน ที่ประกอบด้วยทฤษฎี ขั้นตอนการดำเนินการและการปฏิบัติงานของการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Cement grouting) การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) และการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench

เนื้อหาในเอกสารประกอบด้วยความรู้ด้านต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการปรับปรุงฐานรากเขื่อนและได้นำกรณีศึกษาในการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนของกรมชลประทาน ที่ได้ดำเนินการออกแบบในช่วงปีงบประมาณ พ.ศ. 2563-2564 จำนวน 3 โครงการมาเป็นกรณีศึกษา โดยแต่ละโครงการมีสภาพธรณีวิทยาฐานรากและสภาพปัญหาที่แตกต่างกัน ได้แก่

1) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสม สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นหินแข็ง

2) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสมและเจาะ-อัดฉีดสารเคมีด้วยวิธี Sleeve grout pipe สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นดิน กรวด ทราย และชั้นหินแข็ง

3) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสมและก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นดิน/หินผุ และชั้นหินแข็ง

เอกสารนี้ได้สรุปข้อมูลและขั้นตอนการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนของทั้ง 3 โครงการเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นวิธีการปรับปรุงฐานรากที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากสภาพธรณีวิทยาฐานรากที่แตกต่างกันของพื้นที่ได้อย่างชัดเจน

บทที่ 2
หลักเกณฑ์พิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน

2.1 การพิจารณาด้านเทคนิค

การปรับปรุงฐานรากเขื่อนประเภทดินถมมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ฐานรากที่รองรับเขื่อนมีคุณสมบัติดังนี้

(1) มีความสามารถในการต้านแรงเฉือนเพียงพอ (Adequate shearing strength)
(2) มีการทรุดตัวน้อยภายใต้น้ำหนักกดทับของตัวเขื่อนและน้ำที่เก็บกัก (Small settlement under deformation) ต้องทำให้มีการทรุดตัวอย่างสม่ำเสมอเท่าเทียมกัน ไม่เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential settlement)
(3) มีการรั่วซึมของน้ำผ่านฐานรากน้อย อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (Small leakage) ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำ
(4) ไม่เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการไหลลอดของน้ำ แล้วพัดพาดินหรือหินฐานรากออกไป ทำให้เกิดเป็นโพรงภายในฐานราก (No collapse due to seepage) หรือที่เรียกว่าเกิด Piping
(5) ไม่เกิดการหลวมตัวเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหว (No liquefaction due to earthquake)

2.2 ชนิดของฐานรากเขื่อน

โดยทั่วไปฐานรากเขื่อน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

(1) ฐานรากที่เป็นชั้นดิน
(2) ฐานรากที่เป็นชั้นกรวด-ทราย
(3) ฐานรากที่เป็นชั้นหิน

ในธรรมชาติ มักพบฐานรากทั้ง 3 ประเภท รวมอยู่ด้วยกัน เช่น บริเวณใกล้ร่องน้ำจะพบเป็นชั้นกรวด-ทราย หรือชั้นดินหนาปกคลุมอยู่เหนือชั้นหิน ส่วนบริเวณฐานยัน (Abutment) ทั้ง 2 ฝั่ง อาจมีบางส่วนเป็นดินหนาปกคลุมอยู่เหนือชั้นหิน หรือเป็นชั้นหินโผล่ให้เห็น

2.3 องค์ประกอบในการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน

วิธีการปรับปรุงฐานรากให้มีความเหมาะสม ต้องพิจารณาถึง

(1) สภาพของฐานราก (Foundation condition) และข้อมูลด้านธรณีเทคนิค ได้แก่
    - ค่าการรั่วซึม (Permeability)
    - ค่าความต่อเนื่องของมวลหิน (Rock Quality Designation; RQD)
    - การผุพัง (Weathering)
(2) ชนิดของเขื่อน (Type of dam) และรูปแบบของเขื่อน เพื่อพิจารณาขอบเขตของงานปรับปรุงฐานราก
(3) ความสูงของเขื่อน (Height) เพื่อพิจารณาน้ำหนักที่หินฐานรากจะต้องรองรับ
(4) ความสูงของระดับกักเก็บน้ำเพื่อพิจารณาความลึกที่จะทำการปรับปรุงฐานราก
(5) ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณกักเก็บน้ำ ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างต่อปี เพื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่จะยอมให้รั่วซึมผ่านชั้นฐานราก

สภาพของฐานรากสามารถจัดแบ่งตามลักษณะปัญหาที่เกิดขึ้นออกได้เป็นหลายประเภท ดังต่อไปนี้

(1) สภาพฐานรากที่เป็นชั้นดิน

(2) สภาพฐานรากที่เป็นชั้นตะกอนกรวด ทราย

(3) สภาพฐานรากที่เป็นชั้นหินไม่มีความแกร่ง (Soft rocks)

(4) สภาพฐานรากที่เป็นชั้นหินชนิดที่มีการผุสลาย หรือมีการแปรสภาพได้สูง (Extremely weathered or altered rocks)

(5) สภาพฐานรากของชั้นหินที่มีแนวของรอยเลื่อน (Fault) และรอยเฉือน (shear) ตัดผ่าน

(6) สภาพฐานรากที่เป็นชั้นหิน ประกอบด้วย แนวแตก (Joints) และรอยแตก (Opened cracks) ต่าง ๆ

2.4 การพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน

การปรับปรุงฐานรากเขื่อนมีวัตถุประสงค์เพื่อปิดกั้นและลดการไหลรั่วของน้ำลอดผ่านฐานรากเขื่อน เพิ่มความมั่นคง และลดการทรุดตัว มีรายละเอียด ดังนี้

2.4.1 การปรับปรุงฐานรากเขื่อนเพื่อปิดกั้นและลดการไหลรั่วของน้ำ มีอยู่หลายวิธี สามารถจำแนกออกได้ดังนี้

1) Cut off เป็นการก่อสร้างส่วนที่ทึบน้ำเพื่อปิดกั้นการไหลหรือลดการไหลของน้ำผ่านฐานราก มีลักษณะต่างกัน เช่น

- Slurry trench
- Compacted backfill trench
- Concrete cut off trench (Diaphragm wall)
- Sheet pile cut off
- Grouting: ประกอบด้วย Curtain grout และ Blanket grout

2) Upstream impervious blanket

2.4.2 การปรับปรุงฐานรากเขื่อนเพื่อเพิ่มความมั่นคงและลดการทรุดตัว

1) ฐานรากที่เป็นดินอ่อน ต้องดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังต่อไปนี้

- ขุดออกและถมกลับด้วยวัสดุที่เหมาะสม (Excavated-replacement)
- ทำให้เกิดการทรุดตัวก่อนก่อสร้าง (Pre-consolidation)
- เสริมความมั่นคงด้วย Stabilized berm
- ควบคุมการก่อสร้างด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้ดินอ่อนเกิดการทรุดตัวเท่า ๆ กันอย่างช้า ๆ ซึ่งจะไม่เกิดอันตรายต่อความมั่นคงของเขื่อน
- ปรับปรุงคุณสมบัติของดิน เช่น Soil-cement column

2) ฐานรากที่เป็นชั้นกรวดทราย อาจดำเนินการโดยวิธีการต่อไปนี้

- ขุดออกแล้วถมกลับด้วยวัสดุที่เหมาะสม
- ทำการอัดแน่น (Densification) ชั้นกรวดทรายในที่ (In situ)
- Grouting: Consolidation หรือ Blanket grout ประกอบด้วยการอัดฉีดน้ำปูนหรือสารเคมี หรือสารอื่น ๆ ที่เหมาะสม ทำให้ชั้นกรวดทรายมีการเกาะตัวยึดกันแน่นมากขึ้น

3) ฐานรากที่เป็นหิน

- ขุดลอกหรือระเบิดออก จนถึงระดับชั้นหินที่แข็งรับน้ำหนักได้

- Grouting: Consolidation หรือ Blanket grouting จะเป็นการอัดฉีดน้ำปูน หรือสารอื่น ๆ ที่เหมาะสมเข้าไปอุดรอยแตกต่าง ๆ ในหิน

ในการออกแบบปรับปรุงฐานรากลักษณะดังกล่าวนี้ บ่อยครั้งที่มีการออกแบบโดยอาศัยประสบการณ์ (Experience) หรืออย่างที่เคยทำ (Rule of thumb) เนื่องจากวิธีการต่างกันจะมีข้อจำกัดและความเหมาะสมกับเขื่อนและสภาพฐานรากไม่เหมือนกัน หากออกแบบโดยอาศัยประสบการณ์ โอกาสที่จะผิดพลาดย่อมมีได้น้อย แต่ถ้าหากใช้หลักเกณฑ์ข้อหลังคือ Rule of thumb โดยมิได้พิจารณารายละเอียดด้วยแล้ว ย่อมมีโอกาสสูงที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการต่าง ๆ นอกจากจะต้องพิจารณาสภาพธรณีวิทยาของฐานรากเขื่อน ชนิดและความสูงของเขื่อน และข้อมูลธรณีเทคนิคแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ของวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน โดยพิจารณาจากชนิดของชั้นดินหรือชั้นหินฐานราก และมูลค่าของงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนเมื่อเทียบกับมูลค่าของน้ำที่จะเก็บกักไว้

2.5 การประเมินปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก

อิทธิพลของน้ำที่ไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เขื่อนเกิดความเสียหายไม่สามารถใช้งานเขื่อนได้ตามวัตถุประสงค์ ได้แก่

(1) ทำให้เกิดการกัดเซาะที่ลาดเขื่อน ภายในตัวเขื่อน ฐานรากเขื่อนและอาคารประกอบ

(2) ทำให้เกิดการรั่วซึมของน้ำออกทางท้ายเขื่อนหรือขอบอ่างมากเกินไป จนไม่สามารถกักเก็บน้ำได้ตามเป้าหมาย

(3) ทำให้เกิดแรงดันน้ำสูงในตัวเขื่อนและลาดเขื่อน และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเคลื่อนพังได้

การรั่วซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาด้านเทคนิค สำหรับพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน โดยต้องประเมินปริมาณการรั่วซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และเปรียบทียบวิธีการปรับปรุงฐานรากโดยวิธีการต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตัดสินใจ และกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน รวมทั้งวิเคราะห์ความมั่นคงของเขื่อน

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำรั่วซึมผ่านฐานรากเขื่อนใช้วิธี Finite element หรือการคำนวณวิธีอื่น ๆ ในการดำเนินการออกแบบและกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน โดยส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน ได้ทำการประเมินปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานรากโดยวิธี Finite element ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยพื้นฐานของสมการการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุน (Porous media) ซึ่งเป็นการทำ Seepage modelling โดยใช้โปรแกรม SEEP/W (GEO-SLOPE International, 2004)

บทที่ 3
ขั้นตอนการพิจารณาและวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน

การปรับปรุงฐานรากเขื่อนมีความสำคัญ และจำเป็นสำหรับโครงการก่อสร้างเขื่อนและอาคารประกอบของกรมชลประทาน ดังนั้นการกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากที่ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ และสภาพปัญหา ต้องกำหนดวิธีการให้เหมาะสมกับสภาพชนิดของฐานราก การไหลของน้ำในชั้นฐานราก รวมทั้งรูปแบบขนาดของรอยแตก รอยแยก ช่องว่างของชั้นฐานราก เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงขั้นตอนการพิจารณารวมถึงทฤษฎีและรายละเอียดของงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนในแต่ละวิธี ที่นำมาใช้ในงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนของกรมชลประทาน ได้แก่ การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน/ของผสม (Cement grouting) การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) และการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench รายละเอียด มีดังนี้

3.1 ขั้นตอนการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน

ขั้นตอนการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนประเภทเขื่อนดินถม ดังแสดงใน**รูปที่ 3-1** ขั้นตอนประกอบด้วย การกำหนดวัตถุประสงค์ การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์และประเมินชนิดของฐานรากเขื่อน การวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านฐานรากเขื่อน การประเมินปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับฐานรากเขื่อน การพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน และการกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนที่เหมาะสม

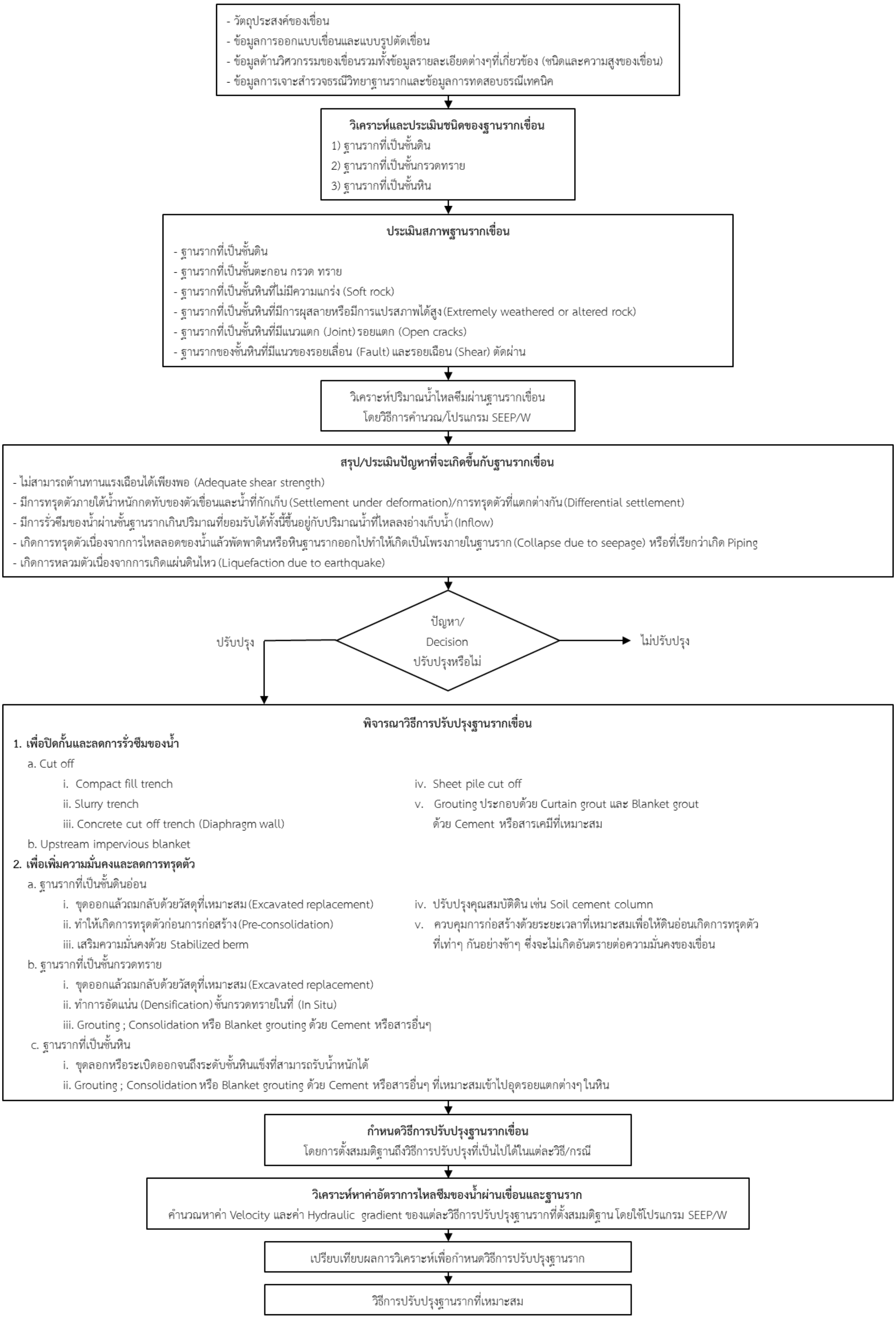
3.2 การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน/ของผสม (Cement grouting)

3.2.1 ทฤษฎีการอัดฉีด (Grouting theory)

Grouting หรือการอัดฉีดเป็นกระบวนการอัดฉีดของผสม/สารแขวนลอยเพื่ออุดรอยแตกหรือช่องว่าง โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ในการอัดฉีด ได้แก่ ทราย ดินเหนียว และซีเมนต์ วัสดุดังกล่าวเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำแต่เมื่อนำมาเป็นวัสดุสำหรับอัดฉีด จะนำมาผสมกับน้ำเพื่อสร้างสารแขวนลอย น้ำทำหน้าที่เป็นพาหนะในการเคลื่อนที่นำอนุภาคของแข็งเหล่านั้นเข้าไปในช่องว่างซึ่งเรียกว่า การอัดฉีดของผสม (สารแขวนลอย) (E. Nonveiller, 1989 และ Christian Kutzner, 1996)

ข้อพิจารณาสำหรับการอัดฉีดนอกจากจะพิจารณาวัตถุประสงค์ของงานแล้ว จะต้องพิจารณาคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ (Mechanical properties) ของดิน หิน และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้อัดฉีด เพื่อการตัดสินใจเลือกวิธีการและชนิดของการอัดฉีด ได้แก่

- ความพรุน (Porosity) ของดิน หิน คือจำนวนของช่องว่างต่อปริมาตรของมวลดินหรือหินทั้งหมด โดยแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ (Percentage)
- ขนาด รูปร่าง ของกรวด ทราย และส่วนประกอบแร่ของหิน
- ค่าการซึมผ่าน (Permeability) ของดิน หิน ดังแสดงใน**ตารางที่ 3-1**



รูปที่ 3-1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการพิจารณา และกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนประเภทเขื่อนดินถม

ตารางที่ 3-1 แสดงค่า Permeability ของดิน หินชนิดต่าง ๆ (Gary B. Hemphill, 2013)

<table>
<tr><td>Permeability</td><td colspan="3">Pervious</td><td colspan="5">Semi-Pervious</td><td colspan="5">Impervious</td></tr>
<tr><td>Unconsolidated Sand and Gravel</td><td colspan="2">Well Sorted Gravel</td><td colspan="3">Well Sorted Sand Or Sand & Gravel</td><td colspan="4">Very Fine Sand, Silt, Loess, Loam</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>Unconsolidated Clay & Organic</td><td colspan="4"></td><td colspan="2">Peat</td><td colspan="3">Layered Clay</td><td colspan="4">Unweathered Clay</td></tr>
<tr><td>Consolidated Rocks</td><td colspan="4">Highly Fracture Rock</td><td colspan="3">Oil Reservoir Rocks</td><td colspan="2">Fresh Sandstone</td><td colspan="2">Fresh Limestone, Dolomite</td><td colspan="2">Fresh Granite</td></tr>
<tr><td>(cm^2)</td><td>10^{-3}</td><td>10^{-4}</td><td>10^{-5}</td><td>10^{-6}</td><td>10^{-7}</td><td>10^{-8}</td><td>10^{-9}</td><td>10^{-10}</td><td>10^{-11}</td><td>10^{-12}</td><td>10^{-13}</td><td>10^{-14}</td><td>10^{-15}</td></tr>
</table>

Source: Adapted from Bear (1972).

Gary B. Hemphill (2013) ได้มีการประเมินการไหลของน้ำผ่านช่องว่าง รอยแตกของหินที่มีขนาดต่าง ๆ ที่ระดับแรงดันน้ำ (Water pressure) 20 เมตร และ 100 เมตร ดังแสดงใน**ตารางที่ 3-2**

ตารางที่ 3-2 แสดงการประเมินการไหลของน้ำผ่านช่องว่าง รอยแตกของหินที่มีขนาดต่าง ๆ ที่ระดับแรงดันน้ำ (Water pressure) 20 เมตร และ 100 เมตร (Gary B. Hemphill, 2013)

Aperture of Fissure		**Water Pressure (Head)**			
		20 m (65 ft), 28 psi		**100 m (328 ft), 142 psi**	
mm	**In.**	**l/min**	**gal/min**	**l/min**	**gal/min**
0.1	0.004	≈1	≈0.26	≈5	1.3
0.2	0.008	5-10	1.3-2.6	25-50	6.6-13.2
0.4	0.16	50-100	13.2-26.4	500	132

Source: Adapted from Littlejohn (1975).

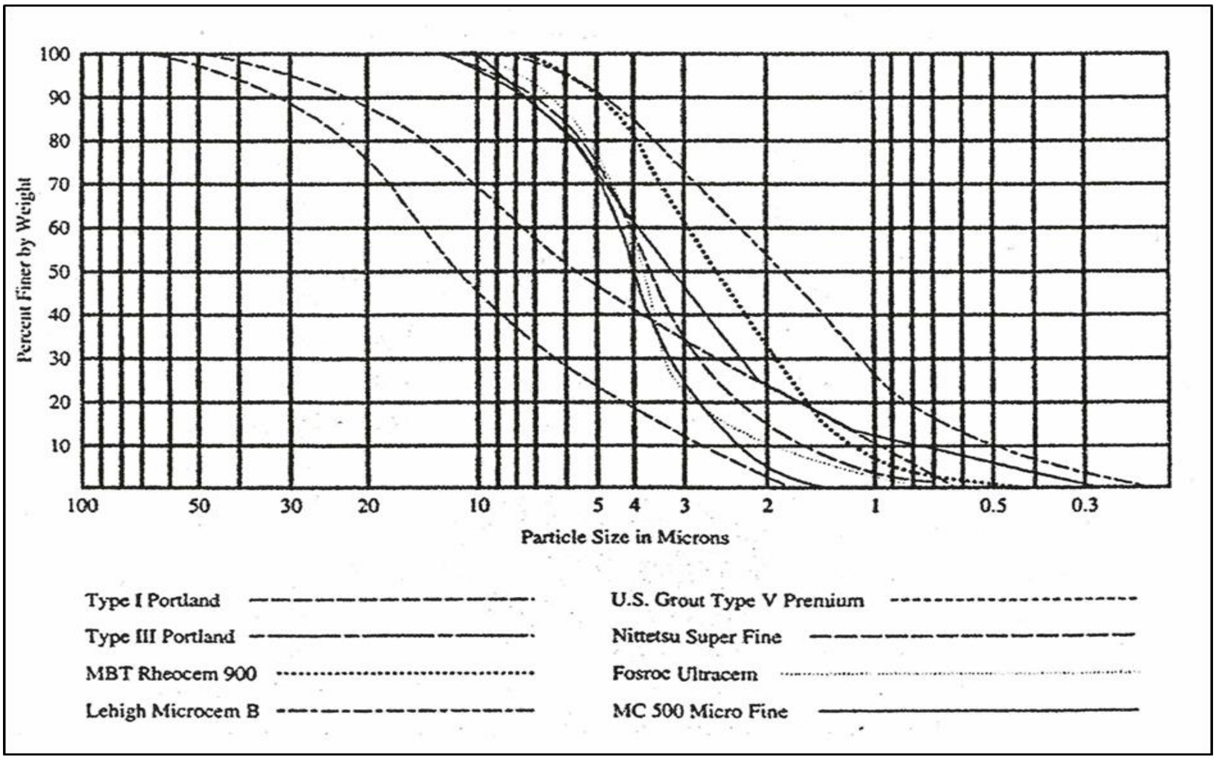
การพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุที่ใช้ในการอัดฉีด พิจารณาจากคุณภาพมวลหินและอัตราการรั่วซึม ซึ่งจะช่วยในการตัดสินใจเลือกชนิดซีเมนต์ (Cement type) และวัสดุสำหรับอัดฉีด ดังแสดงใน**ตารางที่ 3-3**

Cement particle ที่ใช้ในการอัดฉีดจะต้องมีขนาดเล็กกว่าช่องว่าง 3-5 เท่า ในงาน Grout โดยทั่วไปนิยมใช้ Ordinary Portland Cement (OPC) Type I Type III Microfine Cement (MFC) และ Ultrafine Cement (UFC) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และชนิดของงาน Grout โดย Portland cement Type I และ Type III ผลิตมาจากวัสดุเหมือนกันแต่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า Type III และ Type III มี Strength สูงกว่า Type I ตามรายละเอียดแผนภาพ Grain size distribution of cements ดังแสดงใน**รูปที่ 3-2**

ตารางที่ 3-3 การเลือกใช้วัสดุในการ grout โดยพิจารณาจากคุณภาพมวลหินและอัตราการรั่วซึม (Gary B. Hemphill, 2013)

Rock Mass Jointed Rock	Q	RMR	Grouting Required	Type of Grout Material
Massive, no joints	1000	I	Not required	
Very few joints <0.1 joints/m^3 (0.13/yd^3)	100	I	Spot/target grouting	MFC, if joints >0.5 mm used OPC
Few joints, <1/m^3 (1.3/yd^3), ≤2 joint sets	10	II	Limited continuous	MFC
Jointed rock, <10/m^3 (13/yd^3),>2 joint	1	III	Continuous	MFC
Very jointed rock, ≥10 joints/m^3		III, IV	Continuous, closer spacing, in stages	MFC/UFC
Fault Zones				
Zones with clay	<0.1	V	Displace, wash out/replace compact	OPC/possibly MFC
Silty zones	<0.1	V	Penetrate, very close spacing, stages	UFC, chemicals
Sandy zones	<0.1	V	Penetrate, close spacing, in stages	MFC, UFC
Gravel zones/sugar cube rock	<0.1	IV, V	Penetrate, quick set, in stages	OPC, MFC
Mixed material	<0.1	IV, V	Penetrate, displace, compact, replace, in stages, close spacing	OPC/MFC → UFC/chemicals
Regional Structural Zones	The grout materials and techniques depend on the size and composition of the zone. Often it consists of penetrate, displace, compact, replace, in stages, close spacing. Using OPC/MFC → UFC/chemicals			

OPC = Ordinary portland cement, maximum grain size range 120-14 μm
MFC = Microfine cement, range of particle size 0-30 μm
UFC = Ultrafine cement, grain size range 0-15 μm
Chemical grout contains no particles
Source: from Sjöström 1980.



รูปที่ 3-2 แผนภาพ Grain size distribution of Cements (Gary B. Hemphill, 2013)

3.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Cement grouting) รายละเอียดการดำเนินงาน มีดังนี้

1) การออกแบบอัดฉีดน้ำปูนฐานรากเขื่อน ขั้นตอนการดำเนินงาน มีดังนี้

(1) ศึกษาสภาพธรณีวิทยาบริเวณที่ตั้งเขื่อน
- ชนิดของมวลหิน
- โครงสร้างการวางตัวของมวลหิน
- ความหนาของชั้นดินและความลึกของหน้าหิน
- สภาพน้ำใต้ดิน
- ลักษณะทางธรณีวิทยาอื่น ๆ

(2) ตรวจสอบสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อน
- ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจธรณีวิทยาฐานรากในขั้นออกแบบรายละเอียดและจากข้อมูลหลุมเจาะในขั้นตอนการศึกษาความเหมาะสม
- รูปตัดธรณีวิทยาฐานรากเขื่อน
- ชนิด ความหนาของชั้นดิน
- ค่าความแน่นจากผลการตอกทดสอบมาตรฐาน (SPT)
- ค่าการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดิน หิน (Permeability)
- ชนิด สภาพการผุสลาย ความแข็ง สภาพของรอยแตก โครงสร้างทางธรณีวิทยาของชั้นหิน
- ระดับน้ำใต้ดิน

(3) สรุปผลด้านธรณีวิศวกรรมฐานรากเขื่อน
- อัตราการรั่วซึมของน้ำ (Permeability)
- ระดับการผุสลายของหิน (Degree of weathering)
- คุณภาพของแท่งตัวอย่างหิน (Rock quality designation; RQD)
- วิเคราะห์ คำนวณค่าการรั่วซึม โดยจัดทำแบบจำลองการไหลผ่านเขื่อนและฐานรากตามแนวขวางกับแนวศูนย์กลางเขื่อน อย่างน้อย 1 แนว โดยเลือกแนวที่คาดว่าวิกฤติที่สุดเพื่อให้ทราบถึงปริมาณน้ำที่ไหลรั่วและทราบแรงดันน้ำและความเร็วของน้ำที่จุดต่าง ๆ ใต้เขื่อน
- เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สภาพการรั่วและไหลลอดในกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงฐานราก หากไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จึงพิจารณาเพิ่มวิธีการปรับปรุงฐานรากมากขึ้นไปเรื่อย ๆ ตามลำดับจนได้ตามเกณฑ์

2) การกำหนดเกณฑ์ในการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Cement grouting)

(1) ระดับฐานรากเขื่อน
- ฐานร่องแกนเขื่อน (Cut off trench) กำหนดให้ระดับร่องแกนเขื่อนวางอยู่บนหินแข็ง (Fresh rock) หากระดับของหินแข็งอยู่ลึกมากอาจยอมให้ฐานร่องแกนอยู่ที่ระดับชั้นหินผุมากถึงหินผุปานกลาง (Highly to moderately weathered rock) เป็นอย่างน้อย
- ฐานเขื่อนด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ (U/S and D/S Shells) กำหนดให้วางอยู่บนชั้นดินแน่นปานกลาง (Medium dense, SPT-N value >10) เป็นอย่างน้อยหรือลึกอย่างน้อยประมาณ 1 เมตร

(2) Curtain grouting
- กำหนดให้มีจำนวนอย่างน้อย 1 แถว โดยประเมินจากผลการทดสอบ Water pressure ในหลุมเจาะและอัตราการรั่วซึมน้ำเป็นหลัก รวมทั้งพิจารณาค่า RQD% ของแท่งตัวอย่างหินจากการเจาะสำรวจ ซึ่งโดยปกติถ้าค่า RQD% ของแท่งตัวอย่างหินต่ำ จะมีอัตราการรั่วซึมสูง ความลึกของ Curtain grout กำหนดให้ไม่น้อยกว่า 0.6 H (โดยที่ H =ความสูงของน้ำเหนือระดับดินเดิม)
- เป้าหมายของการ Grout โดยทั่วไปกำหนดให้ได้อัตราการรั่วซึมของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 Lugeon หรือขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ผู้ออกแบบเป็นผู้กำหนด
- หากไม่พบชั้นหินทึบน้ำที่ระดับความลึกน้อยกว่า 1.0 H จากระดับร่องแกนเขื่อนจะทำการ Grout ลงไปจนถึงที่ระดับ 1.0 H เป็นอย่างน้อย
- ความลึกของการ Grout ให้พิจารณาจากระดับขุดร่องแกน โดยค่า H เป็นความลึกของน้ำ ณ จุดใด ๆ ที่ทำการพิจารณาวัดจากระดับน้ำกักเก็บสูงสุดถึงระดับดินเดิม
- จำนวนแถวขึ้นอยู่กับผลการวิเคราะห์ความหนาของแนว Grout

(3) Blanket grouting
- กำหนดให้มีจำนวนอย่างน้อย 2 แถว ซึ่งอยู่ทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำด้านละ 1 แถว โดยกำหนดให้มีความลึกไม่น้อยกว่า 6 เมตร หรือประเมินจากคุณภาพของแท่งตัวอย่างหิน (Rock Quality Designation; RQD %) และอัตราการรั่วซึมน้ำของชั้นหิน (Permeability) เป็นหลัก

- กรณีที่ชั้นหินฐานรากค่อนข้างทึบน้ำและมีแรงดันน้ำที่จุดนั้นค่อนข้างต่ำอาจไม่ต้องมี Blanket grout ก็ได้ (ให้ตรวจสอบจากผลการวิเคราะห์)

(4) Abutment grouting

- บริเวณฐานยันเขื่อน (Abutment) ฝั่งขวาและฝั่งซ้ายควรทำการ Grout แบบ Radial grout ด้วยความลึกเท่ากับความลึกของ Curtain grouting ที่อยู่ถัดไป และมีจำนวน 1 แถวเป็นอย่างน้อย

(5) Pilot hole และ Check hole

- ควรกำหนดให้มีปริมาณเพียงพอ เพื่อทำการตรวจสอบข้อมูลก่อนการ Grout และตรวจสอบผลภายหลังการ Grout ได้ครบถ้วน
- ตรวจสอบค่าการรั่วซึม
- ควรกำหนดหลุมเจาะเอียงไว้ด้วย

(6) การคำนวณปริมาณงาน คิดราคางานและจัดทำข้อกำหนด (Bill of Quantity and Specification)

- ต้องดำเนินการอย่างรอบคอบครบถ้วนตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด กำหนดปริมาณวัสดุ Grout ต้องเพียงพอ โดยขึ้นอยู่กับการพิจารณาจากสภาพของชั้นหินฐานรากเป็นเกณฑ์
- ต้องมีข้อกำหนดในขั้นตอนการปฏิบัติการเจาะแบบต่าง ๆ การเว้นระยะห่างของหลุมเจาะ ชนิดของการเจาะทดสอบ การเตรียมและการอัดฉีดของผสม การตรวจสอบ การส่งมอบงาน และการวัดปริมาณงานให้ชัดเจน
- กำหนดรูปแบบของการทำรายงานผลการปฏิบัติงาน

3) การปฏิบัติงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Cemet grouting)

โดยทั่วไปการอัดฉีดในงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนจะใช้ Cement และน้ำ หรือในบางกรณีอาจใช้สารผสมอื่น วิธีการคร่าว ๆ มีดังนี้

งานปรับปรุงฐานรากโดยวิธีการเจาะอัดฉีดน้ำปูน เริ่มจากการเปิดร่องแกนเขื่อนจนถึงระดับตามแบบ และเป็นชั้นหินแกร่ง (Sound rock) ที่สามารถรับแรงดันจากการอัดฉีดได้ แล้วทำการเจาะหลุมนำ (Pilot holes) การทดสอบการรั่วซึมของน้ำด้วยความดัน (Lugeon test) การเจาะหลุมเพื่ออัดฉีดน้ำปูน การทดสอบการรั่วซึมน้ำด้วยความดัน (Water pressure test) การอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) และสุดท้ายเป็นการเจาะหลุมตรวจสอบ (Check holes) รวมทั้งการปรับปรุงพื้นผิวหินฐานราก ได้แก่ การทำ Dental concrete และการทำ Slush grout

(1) การเจาะ (Drilling)

- การเจาะหลุมนำ (Pilot holes)

เพื่อศึกษาสภาพลักษณะและคุณสมบัติชั้นหินและค่าการรั่วซึมในบริเวณชั้นหินฐานราก โดยจะทำการเจาะแทรกระหว่างหลุมเจาะสำรวจธรณีวิทยาฐานรากที่มีอยู่แล้ว เพื่อให้ได้ข้อมูลเพิ่มเติม ทำการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างแกนหิน และทำการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ (Lugeon test) เพื่อนำข้อมูลมาประเมินสภาพชั้นหินฐานรากเป็นการเบื้องต้น

- การเจาะหลุมเพื่ออัดฉีดน้ำปูน

การเจาะเพื่อการอัดฉีดน้ำปูน เริ่มต้นที่แถวท้ายน้ำ เหนือน้ำ และสิ้นสุดที่แถวกลาง ตามลำดับ โดยรูปแบบของหลุมอัดฉีด (Pattern of grout holes) และตำแหน่งหลุมอัดฉีดในแต่ละแถว ประกอบด้วย หลุม P คือหลุมเพื่อการอัดฉีดชุดลำดับที่ 1 (Primary grout holes) และมีหลุม S คือหลุมเพื่อการอัดฉีดชุดลำดับที่ 2 (Secondary grout holes) แทรกอยู่กึ่งกลางระหว่างหลุม P การปฏิบัติงานเจาะหลุมเพื่ออัดฉีดน้ำปูน ดำเนินการแบบ Split spacing method คือขั้นตอนแรกทำการเจาะหลุม P ในระยะห่าง 6 เมตร แล้วทำการเจาะหลุม S แทรกระหว่าง หลุม P ทำให้ระยะห่างระหว่างหลุมเป็น 3 เมตร และถ้าค่าการรั่วซึมของน้ำมากกว่า 5 lugeon และหรือค่าปริมาณปูนที่ใช้อัดฉีด (Cement take) มากกว่า 50 กิโลกรัม/เมตร ซึ่งยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์กำหนด จะทำการพิจารณาเพิ่มหลุมอัดฉีดหลุม T ซึ่งเป็นหลุมเพื่อการอัดฉีดชุดลำดับที่ 3 (Tertiary grout holes) แทรกระหว่างหลุม P และหลุม S ทำให้ระยะห่างระหว่างหลุมเป็น 1.5 เมตร และพิจารณาเพิ่มหลุมอัดฉีด หลุม Q ซึ่งเป็นหลุมเพื่อการอัดฉีดชุดลำดับที่ 4 (Quaternary grout holes) แทรกระหว่างหลุม P หรือ S และหลุม T ทำให้ระยะห่างระหว่างหลุมเป็น 0.75 เมตร ไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าการรั่วซึมและปริมาณปูนที่ใช้อัดฉีด มีค่าตามเกณฑ์ที่กำหนด

(2) การทดสอบการรั่วซึมของน้ำด้วยความดัน (Water pressure test)

การทดสอบความรั่วซึมของน้ำด้วยความดัน เป็นการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความรั่วซึมที่เกิดขึ้นในชั้นหินแต่ละช่วงของการทดสอบ ซึ่งหากพบว่ามีค่าการรั่วซึมน้อยจะได้พิจารณาว่าสมควรอัดฉีดน้ำปูนหรือไม่ อันเป็นการประหยัดเวลา อีกทั้งเป็นการหาค่าอัตราการไหลของน้ำ ถ้ามีความเร็วมากจะได้เตรียมวัสดุสำหรับการอัดฉีดได้ถูกต้อง เป็นการหาค่าการรั่วซึมของน้ำเพื่อใช้พิจารณาอัตราส่วนผสมเริ่มต้นของน้ำปูนที่ใช้ในการอัดฉีด และใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาความดันที่เหมาะสมสำหรับการอัดฉีดน้ำปูน รวมทั้งเป็นการตรวจสอบผลการอัดฉีดน้ำปูนของหลุมข้างเคียงที่ได้ดำเนินการไปแล้วว่าทำให้สภาพหินฐานรากดีขึ้นหรือไม่ เพียงใด

การทดสอบแบบ Water Pressure Test จะใช้เวลา 30 นาที โดยใช้เวลาครั้งละ 10 นาที วัดปริมาณน้ำที่หายไปแล้วนำมาคำนวณหาค่าการรั่วซึมของน้ำ เป็นหน่วย Lugeon จากสูตร โดยมีสูตรการคำนวณ ดังต่อไปนี้

$$Lu = 10Q / PL$$

โดย Lu = อัตราการรั่วซึมของน้ำมีหน่วยเป็น Lugeon

Q = ปริมาณน้ำที่หายไปในช่วงที่ทำการทดสอบต่อหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น ลิตร/นาที

L = ช่วงความลึกของชั้นหินที่ทดสอบ มีหน่วยเป็นเมตร

P = ความดันที่ใช้ในการทดสอบ หาได้จากค่าความดันจากมาตรวัดความดัน (Pressure gauge) รวมกับค่าความดันน้ำที่อยู่ในหลุมเจาะ (Hydrostatic pressure) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

(3) การอัดฉีดน้ำปูน

■ ชนิดของการอัดฉีดน้ำปูน

การอัดฉีดน้ำปูนเป็นขั้นตอนหลักของงานปรับปรุงฐานราก ขั้นตอนนี้ คือ การอัดฉีดน้ำปูนเข้าไปในหลุมเจาะผ่านระบบท่อ สิ่งสำคัญที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการอัดฉีด คือ ความดันที่ใช้ในการอัดฉีด และอัตราส่วนผสมของน้ำปูน สามารถแบ่งประเภทการอัดฉีดได้ ดังนี้

- การอัดฉีดแบบ Curtain เป็นการอัดฉีดเพื่อลดและป้องกันการไหลซึมของน้ำที่จะไหลลอดผ่านใต้ตัวเขื่อน และช่วยลดแรงยกตัว (Uplift pressure) ของน้ำใต้เขื่อน

- การอัดฉีดแบบ Blanket เป็นการอัดฉีดเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักตัวเขื่อนของหินฐานราก (Bearing capacity) และยืดระยะทางเดินของน้ำที่จะไหลลอดใต้ตัวเขื่อน รวมทั้งเพื่อรองรับงานอัดฉีดแบบ Curtain ที่จะตามมา (งานอัดฉีดแบบ Blanket กระทำก่อนการอัดฉีดแบบ Curtain)

- การอัดฉีดแบบ Consolidation เป็นการอัดฉีดเพื่อให้ใต้ฐานเขื่อน หรืออาคารชลประทานอื่น เช่น อาคารท่อส่งน้ำ (Outlet) เพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนัก และป้องกันการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของฐานรากได้

- การอัดฉีดแบบ Wing Grout เป็นการอัดฉีดในหลุมเจาะที่อยู่บริเวณติดกับไหล่เขา (Abutment) จึงได้ขยายพื้นที่การอัดฉีดเพิ่มเข้าไปในหินฐานรากในบริเวณดังกล่าว โดยการเจาะเอียงเพื่อป้องกันน้ำไหลซึมผ่านชั้นหินบริเวณนั้น

- การอัดฉีดแบบ Slush Grout เป็นการอัดฉีดน้ำปูนบนผิวหน้ารอยแตกของหินเพื่อให้น้ำปูนเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามรอยแตกดังกล่าว

■ วิธีการอัดฉีดน้ำปูน

วิธีการอัดฉีดน้ำปูนขึ้นอยู่กับสภาพธรณีวิทยาฐานราก และความเหมาะสมในการปฏิบัติงาน วิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปฏิบัติแบ่งได้ 2 แบบ คือ

- การอัดฉีดด้วยวิธี Downstage grouting method เป็นวิธีการอัดฉีดช่วงบนให้เสร็จก่อน แล้วจึงทำการอัดฉีดช่วงล่างลงไปทีละช่วงจนถึงระดับที่ต้องการ วิธีนี้เหมาะสำหรับสภาพฐานรากที่พังง่าย มีรอยแตกมาก ๆ หรือเป็นชั้นหินที่อ่อน (Soft rock) รวมทั้งในกรณีที่พบชั้นน้ำบาดาล)Water bearing formation) การอัดฉีดวิธีนี้ใช้เวลาในการรอให้น้ำปูนแข็งตัวอย่างน้อย 12 ชั่วโมง เมื่อทำเสร็จจะได้ผลดีกว่าวิธีอื่น ข้อดี คือ ลดปัญหาน้ำปูนรั่วขึ้นผิวหน้าเพราะช่วงบนได้อัดฉีดไว้ดีแล้ว ลดปัญหาหลุมพังในช่วงบนในขณะที่เจาะเพื่ออัดฉีดในช่วงล่าง สามารถติดตั้งลูกยาง Packer ได้ดีเนื่องจากช่วงบนได้ทำการอัดฉีดไว้ดีแล้ว ข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการรอให้น้ำปูนแข็งตัวนานอย่างน้อย ชั่วโมง 12 และเสียค่าใช้จ่ายสูงเพราะต้องเจาะผ่านชั้นที่อัดฉีดไปแล้ว (Re-drilling)

- การอัดฉีดด้วยวิธี Upstage grouting method เป็นวิธีการอัดฉีดจากช่วงล่างสุดขึ้นมาช่วงบน วิธีนี้เหมาะกับสภาพฐานรากเป็นหินแข็ง มีรอยแตกไม่มาก และไม่มีปัญหาการรั่วซึมของน้ำปูนขึ้นสู่ผิวหน้า ข้อดี คือ สามารถเจาะได้ต่อเนื่อง การปฏิบัติงานจึงเร็วขึ้น และทำความสะอาดหลุมเพียงครั้งเดียว ข้อเสีย คือ น้ำปูนบางส่วนอาจไปอุดรอยแตกในช่วงที่อยู่เหนือขึ้นไป การติดตั้งลูกยาง Packer ตามช่วงที่กำหนดอาจจะทำได้ยากหรืออาจคลาดเคลื่อน

■ วัสดุ และอัตราส่วนของน้ำปูน

การอัดฉีดน้ำปูน เป็นการอัดฉีดส่วนผสมของน้ำและปูนในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเข้าไปแทรกตามรอยแตกของชั้นหิน โดยเริ่มจากอัตราส่วนที่เจือจางไปถึงอัตราส่วนที่เข้มข้น ตามลำดับ อัตราส่วนปูนซีเมนต์:น้ำ เป็น 1:10, 1:9, 1:8, 1:7, 1:6, 1:5, 1:4, 1:3, 1:2 โดยปริมาตรของปูน หลักเกณฑ์ในการเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำปูน ดังแสดงใน**ตารางที่ 3-4**

หลักเกณฑ์กำหนดการเสร็จสมบูรณ์ของการอัดฉีด (Complete grouting) ในแต่ละช่วง มีข้อกำหนดว่าชั้นหินที่ทำการอัดฉีดจะต้องสามารถรับแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดได้ตามความดันที่กำหนดไว้ในแต่ช่วงความลึก และการอัดฉีดน้ำปูนในแต่ละช่วงของหลุม ให้กระทำโดยต่อเนื่องจนกระทั่งอัตราการอัดฉีดน้ำปูนในช่วงนั้นเท่ากับหรือน้อยกว่า 1 ลิตร /นาที /เมตร ภายใต้ความดันที่กำหนด รวมทั้งต้องคงค่าความดันที่ใช้ในการอัดฉีดต่อเนื่องได้ประมาณ 30 นาที จึงจะถือว่าการอัดฉีดของช่วงนั้นเสร็จสิ้น (Complete)

แต่อย่างไรก็ตามมักพบว่ามีโอกาสที่ชั้นหินที่อัดฉีดน้ำปูนจะไม่สามารถทำการอัดฉีดให้เสร็จสมบูรณ์ในครั้งนั้น ๆ ได้ เนื่องจากพบว่ามีการรั่วซึมของน้ำปูนขึ้นสู่ผิวหน้า และไม่สามารถทำการอุดการรั่วได้ แม้จะใช้วิธีการต่าง ๆ แล้วก็ตาม การพบชั้นฐานรากที่มีค่าการรั่วซึมสูงผิดปกติ เช่น กรณีพบโพรง รอยแตกที่ใหญ่และยาวต่อเนื่องกัน และชั้นน้ำใต้ดิน เป็นต้น กรณีนี้ต้องหยุดการอัดฉีดชั่วขณะ (Interrupted) แล้วปล่อยให้น้ำปูนแข็งตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จึงเจาะและอัดฉีดซ้ำในชั้นหินนั้น ๆ อีกครั้ง (Regrout) และดำเนินการต่อไปจนกระทั่งชั้นหินนั้น ๆ สามารถอัดฉีดได้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ต่อไป

ตารางที่ 3-4 หลักเกณฑ์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมน้ำปูน

รายการ	อัตราส่วน C/W
1) อัตราส่วนเริ่มต้น	1:10
2) หลังจากอัดฉีดอัตราส่วนเริ่มต้นไปแล้ว 176 ลิตร โดยที่ยังไม่ได้ความดันที่กำหนด ให้เปลี่ยนเป็น	1:9
3) หลังจากอัดฉีดอัตราส่วน 1:9 ไปแล้ว 160 ลิตร โดยที่ยังไม่ได้ความดันที่กำหนด ให้เปลี่ยนเป็น	1:8
4) หลังจากอัดฉีดอัตราส่วน 1:8 ไปแล้ว 144 ลิตร โดยที่ยังไม่ได้ความดันที่กำหนด ให้เปลี่ยนเป็น	1:7
5) หลังจากอัดฉีดอัตราส่วน 1:7 ไปแล้ว 128 ลิตร โดยที่ยังไม่ได้ความดันที่กำหนด ให้เปลี่ยนเป็น	1:6
6) หลังจากอัดฉีดอัตราส่วน 1:6 ไปแล้ว 112 ลิตร โดยที่ยังไม่ได้ความดันที่กำหนด ให้เปลี่ยนเป็น	1:5
7) หลังจากอัดฉีดอัตราส่วน 1:5 ไปแล้ว 192 ลิตร โดยที่ยังไม่ได้ความดันที่กำหนด ให้เปลี่ยนเป็น	1:4
8) หลังจากอัดฉีดอัตราส่วน 1:4 ไปแล้ว 160 ลิตร โดยที่ยังไม่ได้ความดันที่กำหนด ให้เปลี่ยนเป็น	1:3
9) หลังจากอัดฉีดอัตราส่วน 1:3 ไปแล้ว 192 ลิตร โดยที่ยังไม่ได้ความดันที่กำหนด ให้เปลี่ยนเป็น	1:2
10) จนกระทั่งเสร็จสิ้นการอัดฉีด	

- การพิจารณาเพิ่มงานอัดฉีดน้ำปูน

การเจาะและอัดฉีดน้ำปูนนั้น โดยปกติตามแบบจะกำหนดหลุมมาเพียงหลุมเดียว เพื่อการอัดฉีดชุดลำดับที่ 1 (Primary grout holes) และชุดลำดับที่ 2 (Secondary grout holes) เท่านั้น

เมื่อดำเนินการอัดฉีดตามขั้นตอนมาจนถึงหลุมอัดฉีดชุดสุดท้าย ต้องทำการประเมินสภาพชั้นหินฐานรากว่ามีค่าการรั่วซึมของน้ำลดลงมาอยู่ในเกณฑ์กำหนดแล้วหรือไม่ กล่าวคือจะพิจารณาค่า

การรั่วซึมน้ำของหลุมชุดสุดท้าย หากมีค่าการรั่วซึมของน้ำมากกว่า 5 lugeon และหรือมีค่าการใช้ปริมาณปูนในการอัดฉีด (Cement take) มากกว่า 50 กิโลกรัม/เมตร เมื่อพบว่ามีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดจะพิจารณาเพิ่มหลุมเจาะเพื่อการอัดฉีดเป็นกรณี ๆ ไป โดยจะเน้นการเพิ่มหลุมอัดฉีดในช่วงบน ๆ (Shallow zone) เป็นส่วนมาก ในขณะที่การอัดฉีดในช่วงลึก ๆ จะพิจารณาตามความเหมาะสม

(4) การเจาะหลุมตรวจสอบ (Check Hole)

เมื่อดำเนินการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อปรับปรุงฐานรากจนครบตามแบบ และหลุมที่พิจารณาเพิ่มตามที่กล่าวมาแล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการเจาะหลุมตรวจสอบ (Check hole) เพื่อทำการศึกษาสภาพชั้นหินฐานราก ภายหลังการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อปรับปรุงฐานราก หลุมตรวจสอบจะวางในตำแหน่งที่ครอบคลุมพื้นที่การอัดฉีดน้ำปูนที่เสร็จสมบูรณ์ โดยจะเจาะผ่านบริเวณที่มีค่าการรั่วซึมของน้ำสูงและปริมาณปูนที่ใช้อัดฉีดมาก เพื่อตรวจสอบสภาพชั้นหินฐานราก โดยการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างแกนหินซึ่งอาจจะพบปูนที่ใช้ในการอัดฉีดแล้วแข็งตัวแทรกอยู่ตามรอยแตกของชั้นหิน รวมทั้งทดสอบความรั่วซึมของน้ำ (Lugeon test) ในชั้นหินฐานราก ใช้เวลาทดสอบ 50 นาที ซึ่งค่าการรั่วซึมของน้ำจะต้องลดลงมาอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ถ้าผลจากหลุมตรวจสอบยังมีค่าการรั่วซึมของน้ำสูงมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดต้องพิจารณาเพิ่มหลุมตรวจสอบ (Recheck) ในบริเวณนั้น ๆ เพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ

(5) การทดสอบความรั่วซึมน้ำ (Lugeon Test)

การทดสอบความรั่วซึมน้ำจะดำเนินการในหลุมนำ (Pilot holes) และหลุมตรวจสอบ (Check holes) เมื่อเจาะถึงความลึกที่กำหนด จะทำการทดสอบความรั่วซึมของน้ำแบบ Lugeon test ทุกช่วงทั้งในหลุมนำและหลุมตรวจสอบ จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อทราบและประเมินสภาพการรั่วซึมของน้ำ รวมทั้งประเมินค่าความดันวิกฤติ (Critical pressure) คือ ค่าความดันสูงสุดของชั้นหินฐานรากที่ทนรับแรงดันได้ การทดสอบความรั่วซึมของน้ำที่กระทำในหลุมนำทำให้ทราบข้อมูลเพิ่มเติมในสภาพที่กำลังก่อสร้าง สามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการสำรวจธรณีวิทยา และใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาแบบงานปรับปรุงฐานราก เพื่อสามารถดำเนินงานเจาะและอัดฉีดน้ำปูนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการทดสอบภายหลังการอัดฉีดน้ำปูน กระทำในหลุมตรวจสอบเพื่อหาค่าการรั่วซึมของน้ำว่าลดลงจนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ อย่างไร

ความดันที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้ 0.18, 0.32, 0.46, 0.32, 0.18 คูณความลึกเป็นเมตร จากปากหลุมถึงระดับล่างสุดของช่วงที่ทำการทดสอบ เพื่อหาค่าการรั่วซึมของน้ำตามที่ต้องการ

วิธีการทดสอบ กระทำในลักษณะที่คล้ายกับการทดสอบน้ำด้วยความดัน (Water Pressure Test) และผลที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณหาค่าการรั่วซึมน้ำได้จากสูตร

$$Lu = 10Q / PL$$

โดย Lu = อัตราการรั่วซึมของน้ำมีหน่วยเป็น Lugeon

Q = ปริมาณน้ำที่หายไปในช่วงที่ทำการทดสอบต่อหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น ลิตร/นาที

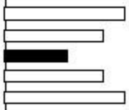
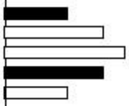
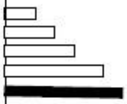
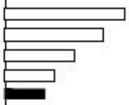
L = ช่วงความลึกของชั้นหินที่ทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร

P = ความดันที่ใช้ในการทดสอบ

หาได้จากค่าความดันจากมาตรวัดความดัน (Pressure Gauge) รวมกับค่าความดันน้ำที่อยู่ในหลุมเจาะ (Hydrostatic Pressure) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

เมื่อได้ค่าอัตราการรั่วซึมของน้ำทั้งหมดแล้ว (5 ค่า) สามารถพิจารณาเลือกหาค่าตัวแทน (representative value) เพียง 1 ค่า โดยดูรูปแบบการไหลของน้ำจาก Chart ของ A.C. Houlsby (1990) ดังแสดงใน**ตารางที่ 3-5**

ตารางที่ 3-5 รูปแบบการไหลของน้ำ (A.C. Houlsby, 1990)

Resulted lugeon pattern		Interpretation characteristics of pattern	Lugeon value should be used as permeability
Group	Note		
	All 5 lugeon are about the same	(laminar flow) (L)	Average value (commonly 1-3 lugeon)
	Lowest lugeon occurring at highest pressure	(turbulent flow) or mix with laminar flow (T)	Lowest value (commonly greater than 3 lugeon)
	Highest lugeon occurring at highest pressure	(dilation) temporarily fissure opening or material being compressed (D)	Lowest or medium value
	Lugeon increasing as test proceeds	(wash out) causing charges to foundation (W)	Highest value, unless special reasons require otherwise
	Lugeon decreasing as test proceeds	(void filling) (V)	Usually, final value

(6) งาน Slush grout และ Dental concrete

งาน Slush grout จะทำในบริเวณที่หินมีรอยแตก รอยแยก หรือโพรง อัตราส่วนผสมของ Slush grout มีสัดส่วน คือ น้ำ : ซีเมนต์ เท่ากับ 0.8 : 1 ถึง 0.4 : 1 และ ซีเมนต์ : ทราย เท่ากับ 1 : 1.5 ก่อนการปฏิบัติงานต้องเตรียมผิวหน้าของหินที่จะทำ Slush grout ให้สะอาด และเปียกชื้นพอเหมาะ การทำ Slush grout จะต้องลงด้วยมือ เกรียง หรือแปรง เพื่อปิดรอยแตก หรือรอยแยก และต้องดำเนินการภายใน 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะลงดินทึบน้ำของทำนบดิน สามารถใช้วิธี Shortcrete แทนการทำ Slush grout ได้

การทำ Dental concrete เป็นการอุดช่องว่างหรือรอยแตกของพื้นผิวร่องแกน ก่อนการปฏิบัติงานต้องทำความสะอาดพื้นผิวร่องแกน รอยแตก หรือรอยแยกต่าง ๆ ให้สะอาด โดยทำการขุดและขนย้ายเศษหินที่แตกหลวม หรือหลุดร่อน หรือชั้นหินที่สลายตัวผุพังเป็นดินออกให้หมด การปฏิบัติงานต้องทำอย่างประณีต เพื่อให้ Dental concrete ติดยึดแน่นกับผนังของช่องว่างหรือรอยแตก

3.3 การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting)

3.3.1 หลักการอัดฉีดสารเคมี

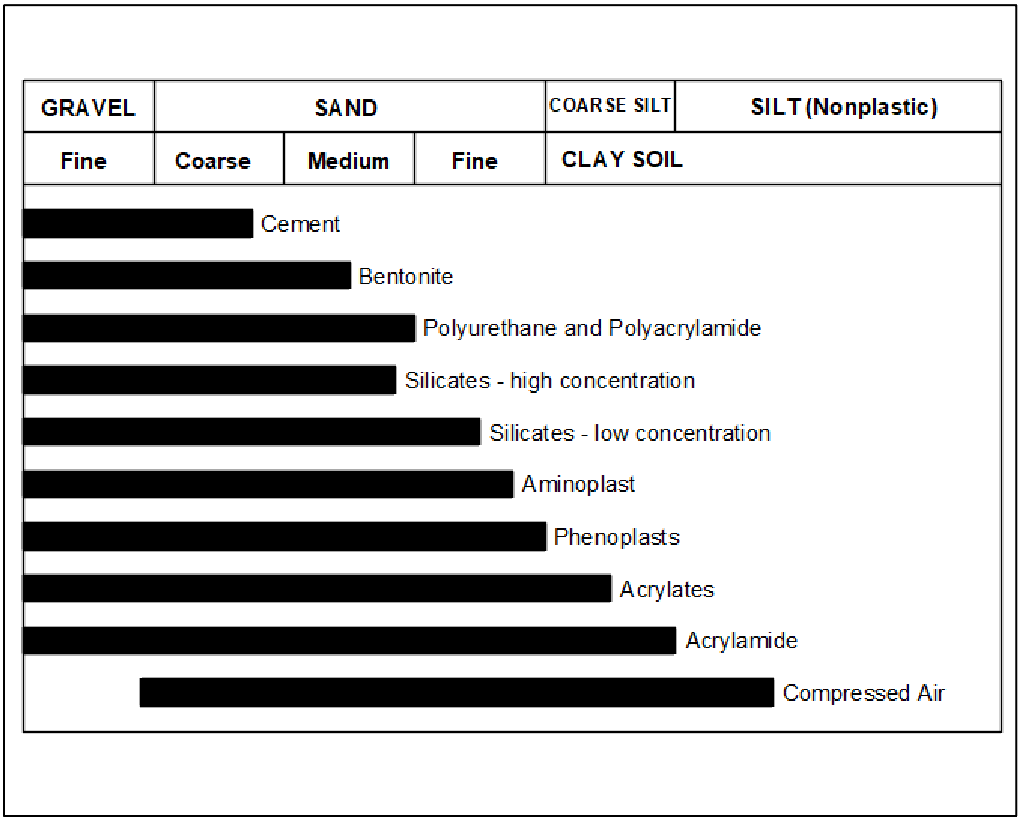
การอัดฉีดสารเคมี ในงานปรับปรุงฐานรากเขื่อน เป็นการอัดฉีดโดยใช้สารเคมีในรูปของสารละลายที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ที่เหมาะสมไม่ผสมกับวัสดุอื่น (Pure solution; no particles in suspension) เข้าไปในชั้นฐานรากดินที่มีความละเอียดต่างชนิดกันหรือช่องว่างของฐานรากหินที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งไม่สามารถที่จะทำการอัดฉีดโดยใช้น้ำปูนหรือ Cement portland ได้ มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

- เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดิน หินฐานราก
- เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและหรือลดการรั่วซึมของชั้นดิน หินฐานราก
- ลดการบีบอัดของชั้นดิน หิน (Reduce the compressibility of ground)
- อุดรอยแตก รอยแยกของชั้นฐานราก

วัสดุทั่วไปที่ใช้ในการอัดฉีดเป็นของเหลวที่ไม่มีอนุภาคของแข็งแขวนลอย เรียกว่า การอัดฉีดสารเคมี แต่ในทางปฏิบัติมักจะเติมสารแขวนลอยลงในสารเคมี เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติและเร่งปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลาย ซึ่งเป็นสารเติมแต่ง (Additive) แต่ก็ยังเรียกว่าการอัดฉีดสารเคมี ความแตกต่างของการอัดฉีดน้ำปูนหรือของผสม (Cement grouting) และการอัดฉีดด้วยสารเคมี (Chemical grouting) คือ ความสามารถในการซึมผ่านของอนุภาคและความหนืดของสารละลาย ภาพแสดงการเปรียบเทียบวิธีการอัดฉีดโดยพิจารณาจากชนิดของชั้นดิน หินฐานราก ดังแสดงใน**รูปที่ 3-3**

ความแตกต่างของการอัดฉีดโดยสารเคมี และการอัดฉีดโดยน้ำปูนหรือของผสม คือ การอัดฉีดของผสมหรือซีเมนต์ เป็นการอัดฉีดโดยใช้แรงดันเข้าไปในช่องว่างในรูปของสารแขวนลอย (Suspensions) ของอนุภาคซีเมนต์ในตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือน้ำ ส่วนการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) เป็นการอัดฉีดสารเคมีโดยใช้แรงดันเพื่ออุดช่องว่างของดินหรือหิน ในรูปของสารละลาย (Solutions) โดยสารเคมีจะทำปฏิกิริยาภายในเวลาที่กำหนดไว้ในรูปของของแข็ง กึ่งของแข็ง หรือเจล (Gel) และต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เฉพาะในการอัดฉีด

ความแตกต่างอีกประการหนึ่ง คือ Cement grouting ประกอบด้วยสารแขวนลอยของอนุภาคซีเมนต์/ของผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ไมโครเมตร (ปูนซีเมนต์ Portland) ส่วน Chemical grouting ใช้สารเคมีซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 นาโนเมตร (I.W. Northcroft, 2006)



รูปที่ 3-3 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบวิธีการอัดฉีด (Grouting) โดยพิจารณาชนิดวัสดุของชั้นดิน/หินฐานราก (Comparison of grouts) (คัดลอกจาก Reuben H. Karol, 2003)

3.3.2 การพิจารณาวัสดุและคุณสมบัติของสารเคมี

การอัดฉีดโดยสารเคมี ซึ่งสารเคมีที่ใช้มีขนาดอนุภาคเล็กมากใกล้เคียงกับน้ำสามารถแทรกผ่านช่องว่างขนาดเล็กที่น้ำไหลผ่านได้ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความหนืด และข้อจำกัดของแรงดันที่จะใช้ในการ Grout จึงจำเป็นต้องพิจารณาความเหมาะสมและข้อจำกัดของการอัดฉีดโดยสารเคมี

คุณสมบัติของสารเคมีที่นำมาใช้ให้ตรงกับวัตถุประสงค์ในการอัดฉีดที่จะต้องพิจารณาได้แก่ ความคงทนถาวร/อายุการใช้งาน (Permanence) ความสามารถในการแทรกซึม (Penetrability) ความแข็งแรง (Strength) ระยะเวลาในการเซ็ตตัว (Gel time control) ความอ่อนไหวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Sensitivity) ความเป็นพิษ (Toxicity) รวมทั้งปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic factors) มีรายละเอียด ดังนี้

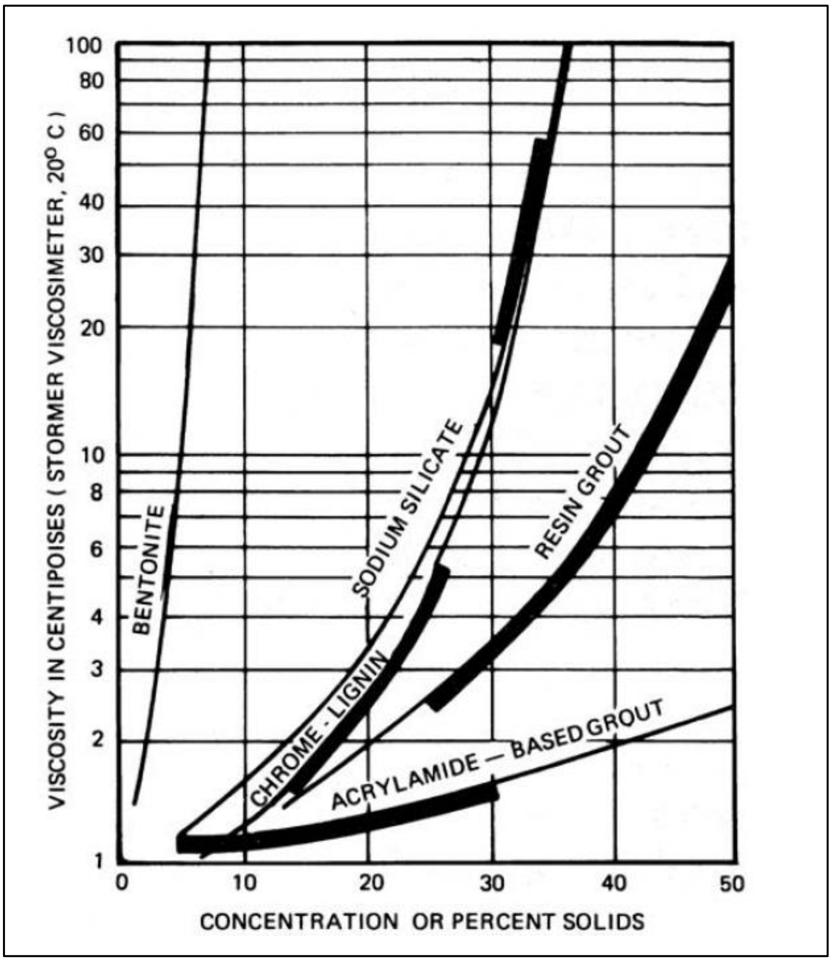
1) ความคงทน (Permanence)

ความคงทน คือ ความสามารถภายหลังการอัดฉีด (Grout) ให้ทนต่อสภาวะต่าง ๆ เช่น ภายใต้สภาวะเปียก สภาวะแห้ง และการละลายซ้ำ ๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศหรือสิ่งแวดล้อม สารเคมีที่พบบางชนิดในดินหรือน้ำใต้ดินอาจทำให้สารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีดเสื่อมสภาพได้

2) ความสามารถในการแทรกซึม (Penetrability)

ความสามารถในการแทรกซึมของสารเคมีเข้าไปในช่องว่างขนาดเล็กของชั้นดิน หิน ขึ้นอยู่กับค่าความหนืดของสารเคมี (Viscosities) ที่ใช้อัดฉีด เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสารเคมีสามารถต้านทานการไหลของน้ำหรือน้ำใต้ดิน และต้านทานการเกิด Internal shear force

- ความหนืดมีหน่วยเป็น dyne-seconds/cm^2 หรือ Poises (P)
- 1 Poise (P) = แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 cm^2 หนา 1 cm เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/sec (1 Poise = 100 Centipoise, cP)
- แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนืดและค่าความเข้มของสารเคมีที่นิยมใช้ในการอัดฉีด ดังแสดงใน**รูปที่ 3-4**



รูปที่ 3-4 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนืดและค่าความเข้มของสารเคมีที่นิยมใช้ในการอัดฉีด (คัดลอกจาก Reuben H. Karol, 2003)

ความสามารถในการแทรกซึม (Penetrability) ของสารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีด ขึ้นอยู่กับค่าการซึมผ่าน (Hydraulic conductivity K) ของดิน หิน ตามหลักการถ้าดินมีค่า K ค่า 10^{-4} cm/sec ความหนืดของสารเคมีที่ใช้ควรน้อยกว่า 2 cP ถ้าค่า K มีค่ามากกว่า 10^{-3} cm/sec ค่า Viscosity ที่ใช้เท่ากับ 5 cP และค่า K มากกว่า 10^{-2} cm/sec ค่า Viscosity ที่ใช้เท่ากับ 10 cP

3) ความแข็งแรง (Strength)

การอัดฉีดสารเคมีเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ช่องว่างของรอยแตกเป็นการเพิ่มความแข็งแรง และเสถียรภาพให้กับมวลดิน

4) การควบคุมเวลาการเกิดเจล (Gel time control)

เวลาในการเกิดเจล คือช่วงเวลาระหว่างการผสมส่วนประกอบของสารเคมีตั้งต้นถึงเวลาการก่อตัวของเจล เวลาจึงสำคัญในการอัดฉีด เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อส่วนประกอบของสารเคมี ได้แก่ ตัวกระตุ้น ตัวยับยั้ง และตัวเร่งปฏิกิริยา สัดส่วนของส่วนประกอบทางเคมีที่ต่างกัน สามารถเปลี่ยนเวลาการ

เกิดเจลได้ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องทราบความแปรผันของเวลาการเกิดเจล ช่วงเวลาที่ทำให้เกิดเจลนี้เรียกว่า การบ่ม (Cure time)

5) ความอ่อนไหว (Sensitivity) ต่อสภาพแวดล้อม

สารเคมีบางชนิดมีความอ่อนไหว หรือไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเจือจางโดยน้ำใต้ดิน สภาพทางเคมีรวมถึง pH ของน้ำใต้ดิน ความอ่อนไหวต่อปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อเวลาการเกิดเจล

6) ลักษณะที่เป็นพิษ (Toxicity)

การอัดฉีดด้วยสารเคมีจะต้องตระหนักถึงสมบัติของสารเคมีที่จะเป็นพิษหรืออันตรายหากไม่ได้ใช้อย่างเหมาะสม แนวทางพื้นฐานควรปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตอย่างรอบคอบ

3.3.3 ข้อจำกัดของการอัดฉีดสารเคมี (Limitations of chemical grouts)

ความหนืดของสารเคมีที่อัดฉีดโดยทั่วไป จะมีความหนืดต่ำกว่าการอัดฉีดของผสมหรือซีเมนต์ประกอบกับสารเคมีไม่มีอนุภาคที่เป็นของแข็ง จึงสามารถอัดฉีดเข้าไปในช่องว่างที่มีขนาดเล็กเกินกว่าของผสมและซีเมนต์จะแทรกซึมเข้าไปได้ การอัดฉีดโดยสารเคมีจึงใช้เพื่อควบคุมการไหลของน้ำ และเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุที่ไม่สามารถอัดฉีดโดยของผสมหรือซีเมนต์ได้ การอัดฉีดโดยสารเคมีนิยมนำมาใช้ในการเติมช่องว่างของวัสดุเม็ดละเอียด และยังมีประสิทธิภาพในการปิด อุด รอยแยกหรือรอยร้าวของผนังซีเมนต์ได้ เพื่อรักษาเสถียรภาพหรือเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุเนื้อละเอียดในชั้นดิน หินฐานราก และสำหรับการควบคุมน้ำในงานอุโมงค์ ปล่อง ร่องลึก และการขุดเจาะอื่น ๆ นอกจากนั้น ยังใช้ร่วมกับวัสดุสำหรับอุดช่องว่างอื่น ๆ ของงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นกรวด ทราย ที่มีค่าการรั่วซึมสูง

ข้อจำกัดของการอัดฉีดด้วยสารเคมี คือมีราคาแพงกว่าวิธีการอัดฉีดโดยวัสดุอื่น ๆ โดยทั่วไปช่องว่างขนาดใหญ่จะถูกอัดฉีดด้วยของผสมและซีเมนต์เป็นหลัก การอัดฉีดด้วยสารเคมีจะกระทำตามความจำเป็นเท่านั้น และในบางกรณีอาจเกิดผลกระทบที่อาจเป็นพิษ เช่น มลพิษทางด้านน้ำใต้ดินที่อาจเกิดขึ้นซึ่งเป็นข้อพิจารณาหลักในการเลือกชนิดของสารเคมีที่จะใช้ในการอัดฉีด

เพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายของการอัดฉีดสารเคมี จะต้องมีการกำหนดคุณสมบัติพื้นฐาน ดังนี้

1) การเลือกใช้ชนิดของสารเคมีในการอัดฉีด
   - มีลักษณะเป็นผง สามารถละลายในน้ำได้ (ลักษณะที่เป็นผงจะสะดวกในการขนส่ง)
   - สะดวกในการใช้งานและมีราคาที่ถูกกว่า
   - ราคาไม่แพง มีจำหน่ายตามท้องตลาด
   - ไม่เปลี่ยนแปลงสภาพในสภาวะการเก็บ
   - ไม่มีคุณลักษณะที่เป็นพิษ
   - ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน
   - ไม่ระเบิด
2) สารละลายในการอัดฉีด จะต้องมีคุณสมบัติ
   - มีความหนืดต่ำ ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
   - มีความเสถียรในสภาวะอุณหภูมิปกติ
   - ไม่ไวต่อปฏิกิริยาของเกลือที่พบในน้ำใต้ดิน
   - มีค่า pH ค่อนข้างคงที่
   - สามารถควบคุมเวลาในการเปลี่ยนเป็นเจล (Gel time)

- ทนต่อการทำละลายของน้ำใต้ดิน (ภายหลังการ Grout)

3) ภายหลังการ Grout
   - มีสภาพเป็นเจลแบบถาวร
   - ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารละลายที่พบในน้ำใต้ดินภายหลังการ Grout
   - ไม่เป็นพิษ ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน
   - มีความมั่นคง แข็งแรง

3.3.4 สารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีด (Chemical grout materials)

สารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีดมีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะที่เหมาะกับการใช้งานที่หลากหลาย ที่นิยมมากที่สุด คือ Sodium silicate, Acrylate, Lignin, Urethane และ Resin ชนิดของสารเคมีและคุณสมบัติที่นิยมในการอัดฉีด ดังแสดงใน**ตารางที่ 3-6** วัตถุประสงค์ของการเลือกใช้สารเคมีดังแสดงใน**ตารางที่ 3-7**

การอัดฉีดโดยใช้ Sodium silicate เป็นที่นิยมมากที่สุดในการปรับปรุงฐานรากเขื่อนและงานก่อสร้างอุโมงค์ เนื่องจากมีความปลอดภัยและไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม Sodium silicate ถูกพัฒนาให้เป็นสารเคมีในการทำ Chemical grout ในรูปแบบต่าง ๆ สารละลาย Sodium silicate ประกอบด้วย Silica ที่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติในการยึดเกาะ รวมทั้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบต่าง ๆ มีขนาดอนุภาคเล็ก แทรกซึมเข้าไปในพื้นผิว รูพรุน ช่องว่างขนาดเล็กได้ง่าย สามารถปรับความหนืดให้เหมาะสมต่อการอัดฉีดในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีขนาดเล็กได้ โดยมีพื้นฐานมาจากการทำปฏิกิริยาของสารละลาย Sodium silicate ซึ่งเป็นอัลคาไลน์ (Alkaline) ทำหน้าที่เป็นสารทำปฏิกิริยาเมื่อสารละลายถูกทำให้เป็นกลาง Colloid ของซิลิกาจะรวมตัวกันเพื่อสร้างเจล (Gel) ซึ่งจะเกิดขึ้นหาก Sodium silicate มีความเข้มข้นโดยปริมาตรมากกว่า 1-2 % ทำให้สามารถเกาะยึดอนุภาคดินหรือตะกอนเข้าด้วยกัน รวมทั้งเติมช่องว่างโดยแทรกตัวในช่องว่างของเม็ดดินป้องกันการไหลผ่านของน้ำได้

ตารางที่ 3-6 ชนิดของวัสดุ สารเคมีและคุณสมบัติของสารเคมีที่นิยมใช้ในการอัดฉีด (คัดลอกจาก J. Paul Guyer, 2015)

Type	**Property**					
	Penetration in Grouted Units	Durability	Ease of Application	Potential Toxicity	Flammability of Materials	Relative Costs
Portland-cement-based grouts	L	H	M	L	N	L
Silicates	H	M	H	L	N	L
Acrylates	H	M	H	M	L	H
Lignins	H	M	H	H	L	H
Urethanes	M	H	M	H	H	H
Resins	L	H	M	H	M	H

N = non-flammable, L = low, M = moderate, H = high.

ตารางที่ 3-7 วัตถุประสงค์การใช้งานของสารเคมีแต่ละชนิด (คัดลอกจาก J. Paul Guyer, 2015)

Application	Type				
	Sodium Silicate	Acrylate	Lignin	Urethane	Resins
Adding strength	C	C	C	R	R
Reducing water flow	C	C	C	U	R
Concrete repair	U	U	U	C	C
Sewer repair	U	U	U	C	C
Load transfer and support	U	U	U	C	U
Installation of anchors	R	R	R	U	C

C = commonly used, U = used, R = rarely used.

ในงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนของกรมชลประทาน ใช้การอัดฉีดโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ผสมกับโซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate ; $NaHCO_3$) และน้ำ เรียกว่า Silicate-based grout ที่อยู่ในสภาวะที่เป็นของเหลวในช่วงแรกของการอัดฉีด เมื่อทำการอัดฉีดแล้วสารเคมีจะเปลี่ยนจากสถานะของเหลวกลายเป็น Soft gel แทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างมวลดิน หรือแนวแตก รอยแยกของมวลหิน

สารเคมีและอัตราส่วนที่ใช้ในการอัดฉีดของการปรับปรุงฐานรากเขื่อน ประกอบด้วย โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) เป็นสารละลายประเภท Alkaline colloidal มีสูตรทางเคมี คือ $nSiO_2\,Na_2O$ คุณลักษณะของ Sodium silicate ประกอบด้วย Ponderal Ratio (Rp) = $SiO_2\,Na_2O$ และสามารถวัดความหนาแน่นในหน่วยของ Degree Baume’ (Be’) หรือ Degree Twaddle (^{o}TW) โดยทั่วไปโซเดียมซิลิเกตจะมีค่า Ponderal Ratio (Rp) อยู่ในช่วง 3-4 และมีความหนาแน่นจำเพาะอยู่ในช่วง 30-40 Be’ (30-42 ^{o}TW) และมีคุณสมบัติ ดังนี้

- อัตราส่วนระหว่าง SiO_2 : Na_2O = 3.2-3.4
- ความถ่วงจำเพาะที่ 20 ℃ = 63-67 %
- ส่วนผสมของ SiO_2 = 25.6-26.6 %
- ส่วนผสมของ Na_2O = 7.5-8.5 %
- ความหนืดของสารเคมีที่ 20℃ = 60-90 cP
- pH = 10.5-11.5

กระบวนการอัดฉีดสารโซเดียมซิลิเกตและสารละลายสารผสม สามารถฉีดได้ทั้งแบบการอัดฉีดแบบ 2 สารผสม และการอัดฉีดแบบสารละลายเดียว (แบบผสมกับสารตั้งต้นเพื่อสร้างเป็นสารตัวเดียวกัน) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

(1) การอัดฉีดแบบ 2 สารผสม (Two-solution process) หรือที่เรียกว่าเทคนิค Jooste 2-shot วิธีการนี้ Sodium silicate จะถูกฉีดเข้าไปก่อน แล้วจึงอัดฉีดตัวทำปฏิกิริยา (Reactant solution) เข้าไปในขั้นตอนที่สอง (นิยมใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์: Calcium chloride) วิธีการนี้จะทำให้ชั้นดินมีความมั่นคงแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่ก็เป็นเทคนิคที่มีราคาสูงที่สุดเช่นกัน หรือในบางครั้งใช้การอัดฉีดแบบ The two-component technique โดยการอัดฉีดสารโซเดียมซิลิเกตและแคลเซียมคลอไรด์แยกกัน แล้วให้

ไปผสมกันที่บริเวณจุดที่ต้องการทำให้เกิดการก่อตัวของเจลที่รวดเร็วและแข็งเกือบจะทันที ใช้ประโยชน์ในการหยุดการไหลของน้ำ วิธีการนี้จะมีความคงทนอย่างน้อย 20 ปี และไม่เสื่อมสภาพ

(2) การอัดฉีดแบบสารละลายเดียว (One-solution process) เป็นการผสมสารโซเดียมซิลิเกต และสารทำปฏิกิริยา นิยมใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งทำให้โซเดียมซิลิเกตกลายเป็นเจลในระยะเวลาที่ควบคุมการเกิดเจลตามอัตราส่วนของสารละลาย กระบวนการนี้มีข้อดีคือการสร้างเจลที่สม่ำเสมอ สามารถควบคุมปริมาณเจลในระหว่างการอัดฉีดได้

โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate; $nSiO_2Na_2O$) มีคุณสมบัติเป็นด่าง เมื่อผสมกับโซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate; $NaHCO_3$) จะทำให้ได้โซเดียมคาร์บอเนตและเจล (Silica gel) และมีคุณสมบัติเป็นกลาง ดังสมการนี้

$$nSiO_2Na_2O + 2NaHCO_3 \rightarrow 2Na_2CO_3 + nSiO_2 + H_2O$$

เมื่อทำการละลายอย่างเหมาะสมความเป็นกรดอ่อน ๆ ของไบคาร์บอเนต จะทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Setting time) สอดคล้องกับสภาวะการแทรกซึม กล่าวคือ เจลที่ได้จะมีค่าความหนืดต่ำ (Low viscosity) ใกล้เคียงกับน้ำซึ่งเหมาะต่อการอัดฉีดเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีช่องว่างขนาดเล็กหรือช่องว่างขนาดเล็กของรอยแตกของหิน อัตราส่วนที่เหมาะสมที่นิยมใช้ คือ

- โซเดียมซิลิเกต (30 -37 Be’) : 100-200 litres/m^3
- โซเดียมไบคาร์บอเนต : 15-30 kg/m^3
- น้ำ (ในการผสมสารเคมี น้ำกร่อยหรือน้ำทะเลไม่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของ Silicate-based grout ได้)

โดยทั่วไปความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการอัดฉีดอยู่ในช่วง 10 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรากหรือวัสดุที่ต้องการอัดฉีดและผลลัพธ์ที่ต้องการ ความเข้มข้นจะถูกกำหนดโดยเวลาของการจับตัวเป็นเจล (Gel time) ความหนืดของสารละลายโซเดียมซิลิเกตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตและความหนืดเมื่อเทียบกับน้ำ ดังแสดงใน**ตารางที่ 3-8**

ตารางที่ 3-8 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต และความหนืดเมื่อเทียบกับน้ำ (คัดลอกจาก J.Paul Guyer, 2015)

Sodium Silicate Concentration, percent	Viscosity (as Compared with Water) Factor
10	2.5
20	3.2
30	3.5-4.5
40	4.0-6.0
50	5.2-12
60	8.0-20
70	92

3.3.5 การปฏิบัติงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมี

การปฏิบัติงานเจาะ-อัดฉีดสารเคมี ในงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยทั่วไปนิยมใช้วิธี Sleeve grout pipe แบ่งขั้นตอนในการดำเนินงานได้เป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

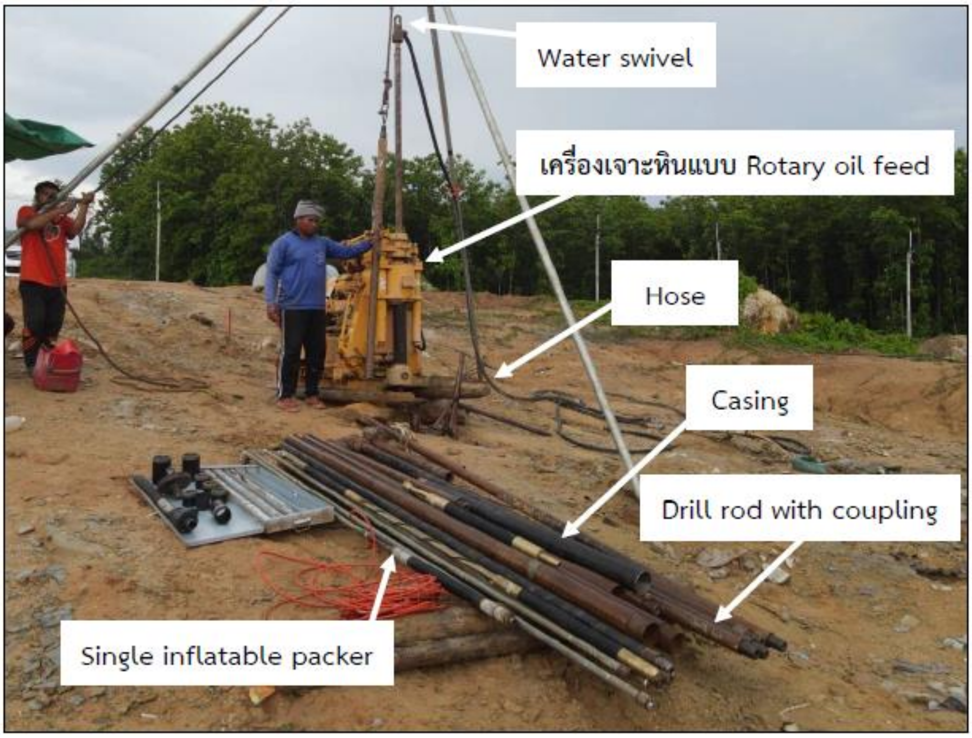
(1) ขั้นตอนการสร้างหลุมเจาะ โดยการเจาะหลุมจะใช้ทั้งเครื่องเจาะแบบหมุน (Rotary drilling) หรือเครื่องเจาะแบบกระแทก (Percussion drilling) ชนิด Top hammer ในกรณีหลุมเจาะสามารถคงสภาพ และสามารถรองรับขั้นตอนการดำเนินงานขั้นตอนต่อไปได้ จากนั้นติดตั้งชุดท่ออัดฉีดของผสมติดปลอกลูกยาง (Rubber sleeve grout pipe) แล้วทำการอุดช่องว่างระหว่างท่ออัดฉีดของผสมติดปลอกลูกยางกับผนังหลุมเจาะด้วยการกรอกน้ำปูน อัตราส่วนผสมน้ำ : ปูน = 5 : 1 โดยปริมาตร + น้ำโคลน (Bentonite) 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ กำหนดค่า Stability ไม่ต่ำกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

(2) ขั้นตอนในการอัดฉีดสารเคมีด้วยชุดอัดฉีดของผสมแบบเคลื่อนที่ โดยทำการใช้ชุดลูกยางอัดฉีดในหลุมเจาะ (Inflatable packer) ตามระดับความลึกที่ได้ติดตั้งปลอกลูกยาง (Rubber sleeve) ไว้ และทำการดันปลอกลูกยางที่ติดตั้งไว้ด้วยความดัน 2-7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรด้วยน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดภาวะของ Hydraulic fracturing บริเวณที่น้ำปูนซีเมนต์ผสมเบนโทไนท์ระหว่างท่ออัดฉีดของผสมติดปลอกลูกยางกับผนังหลุม จากนั้นทำการอัดฉีดสารเคมีผ่านรอยแตกด้วยอัตราส่วนและความดันที่กำหนดไว้ต่อไป

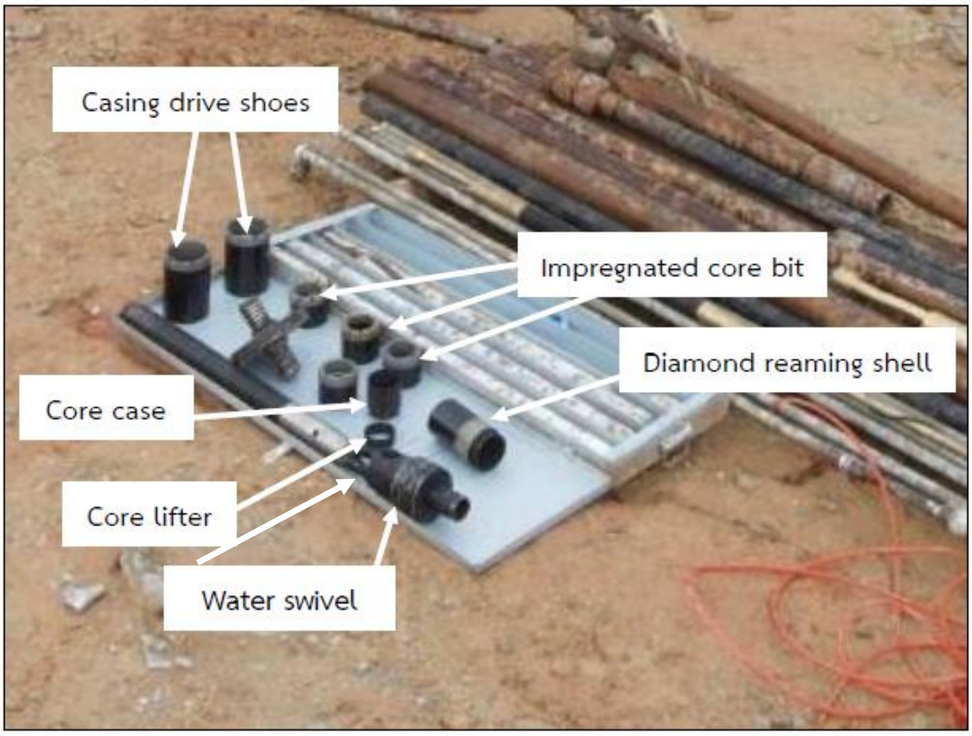
อุปกรณ์และวัสดุหลักในการอัดฉีดสารเคมี ประกอบด้วย

(1) ชุดเครื่องเจาะหินแบบหมุน พร้อมอุปกรณ์การเจาะ ดังแสดงใน**รูปที่ 3-5 3-6 3-7 และ 3-8** ประกอบด้วย

- เครื่องสูบน้ำ (Water pump)
- มาตรวัดน้ำ (Water meter)
- เกจ์หรือมาตรวัดความดัน (Pressure gauge)
- ชุดสายยางทนแรงดัน (Hose)
- หัวเจาะเพชร (Impregnated core bit)
- หัวเจาะขยายข้างหลุมเจาะ (Diamond reaming shell)
- หัวเจาะเพชรใช้กับท่อกรุ (NW diamond core bit)
- หัวจ่ายน้ำ (Water swivel)
- ก้านเจาะพร้อมข้อต่อ (Drill rod with coupling)
- ท่อกรุ (Casing)
- หัวต่อท่อกรุ (Casing drive shoes)
- กระบอกเก็บตัวอย่างแกนหินชนิด 3 ชั้น (Triple tube core barrel)
- ชุดจับแกนหิน (Core case and core lifter)

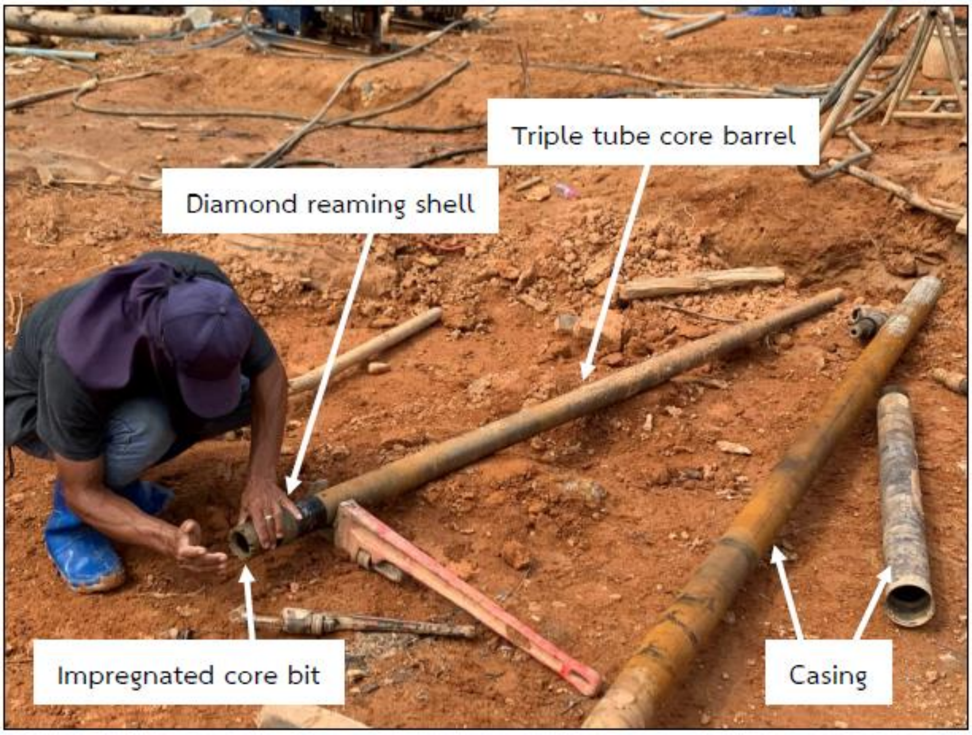


รูปที่ 3-5 แสดงชุดเครื่องเจาะหินแบบหมุน (Rotary drilling) พร้อมอุปกรณ์การเจาะ



รูปที่ 3-6 แสดงอุปกรณ์การเจาะสำหรับใช้กับเครื่องเจาะหินแบบ Rotary oil feed

รูปที่ 3-7 แสดงเครื่องสูบน้ำและชุดควบคุมการอัดฉีดน้ำ



รูปที่ 3-8 แสดงกระบอกเก็บตัวอย่างแกนหินชนิด 3 ชั้นและอุปกรณ์ประกอบ

(2) ชุดเครื่องเจาะหินแบบกระแทก (Percussion drilling) พร้อมอุปกรณ์การเจาะ ดังแสดงใน**รูปที่ 3-9** และ**3-10**) ประกอบด้วย

- ก้านเจาะ (Extension rod)
- ข้อต่อ (Coupling)

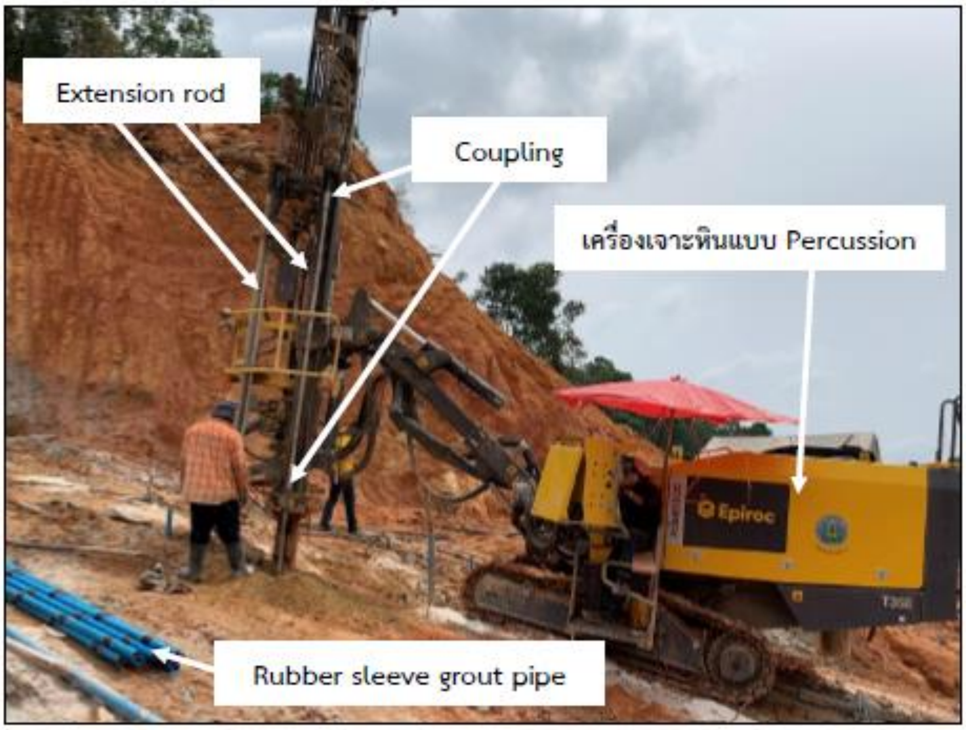
- ข้อต่อก้านเจาะหินกับหัวกระแทกของเครื่องเจาะ (Shank adapter)
- หัวเจาะแบบเม็ดกระดุม (Button bit)

(3) ชุดอัดฉีดของผสมแบบเคลื่อนที่พร้อมอุปกรณ์ประกอบ ดังแสดงใน**รูปที่ 3-11 3-12 3-13 และ 3-14** ประกอบด้วย

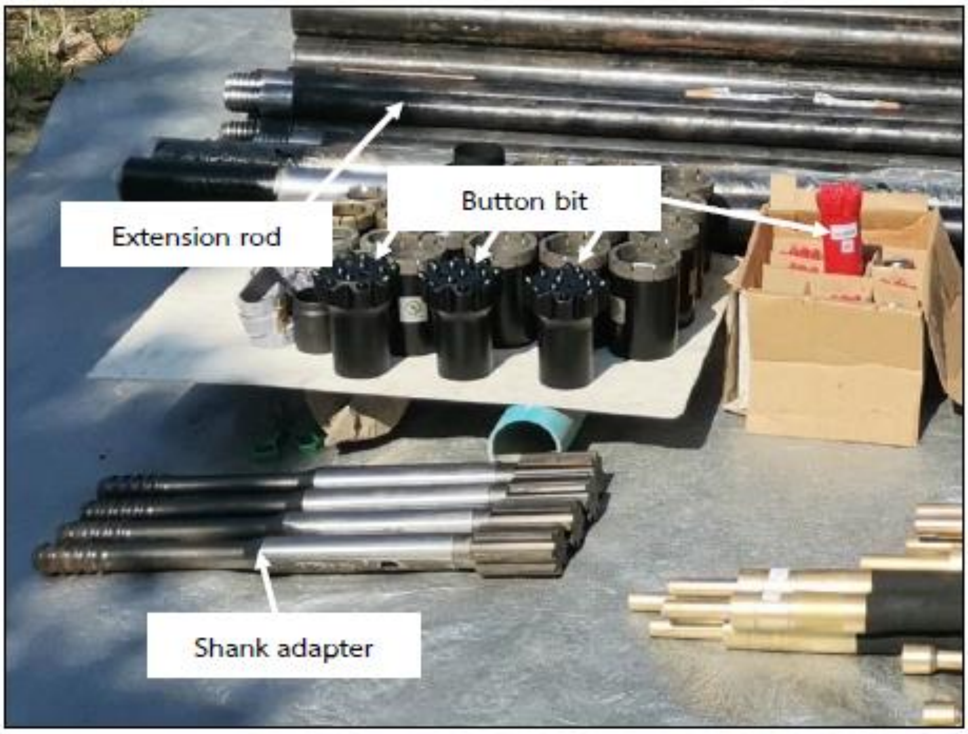
- ถังผสม (Grout mixer)
- ถังกวน (Grout agitator)
- เครื่องสูบหรืออัดฉีดของผสม (Grout pump)
- เหล็กวัดปริมาตรของผสม (Measuring steel bar)
- ถังเก็บน้ำ (Water tank)
- เครื่องสูบน้ำ (Water pump)
- มาตรวัดน้ำ (Water meter)
- สายยางทนแรงดัน (Hose)
- ชุดควบคุมการอัดฉีด (Grout control) ประกอบไปด้วย มาตรวัดปริมาตรของผสม (Grout meter) และเกจ์หรือมาตรวัดความดัน (Pressure gauge)
- ชุดลูกยางอัดในหลุมเจาะแบบเดี่ยวและแบบคู่ (Single and double inflatable packer)

(4) วัสดุและอุปกรณ์ในการอัดฉีดสารเคมี ดังแสดงใน**รูปที่ 3-15 3-16** และ**รูปที่ 3-17** ประกอบด้วย

- ชุดท่ออัดฉีดของผสมติดปลอกลูกยาง (Rubber sleeve grout pipe)
- โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate)
- โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium Bicarbonate)
- เบนโทไนท์ (Bentonite)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (Portland cement type 1)

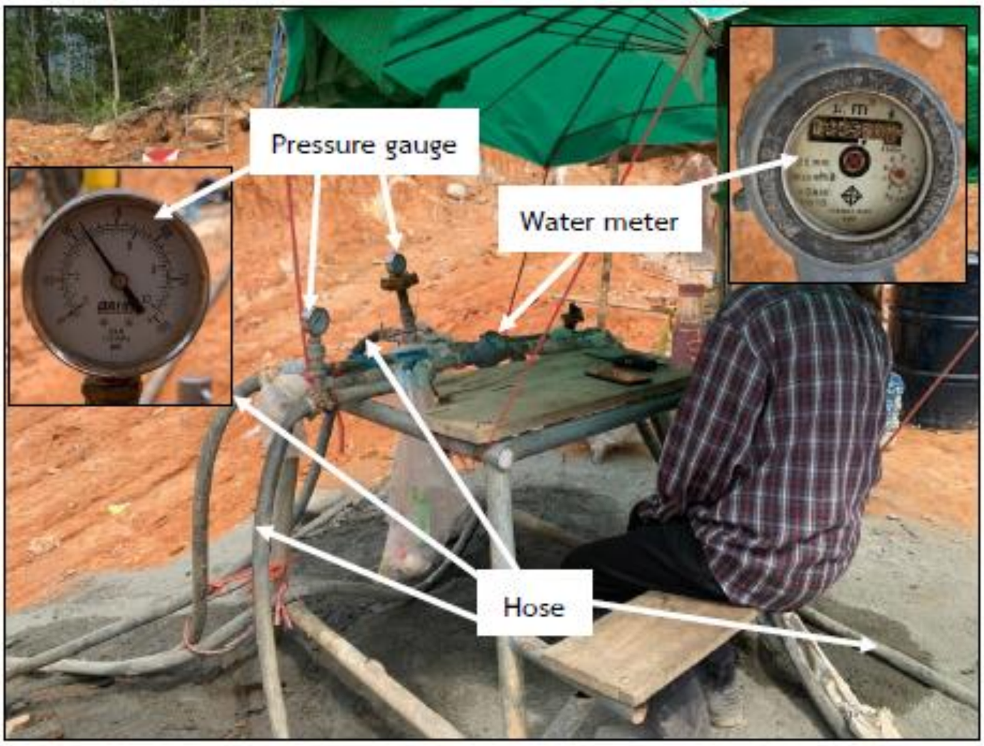


รูปที่ 3-9 แสดงเครื่องเจาะหินแบบกระแทก (Percussion drilling) พร้อมอุปกรณ์การเจาะ

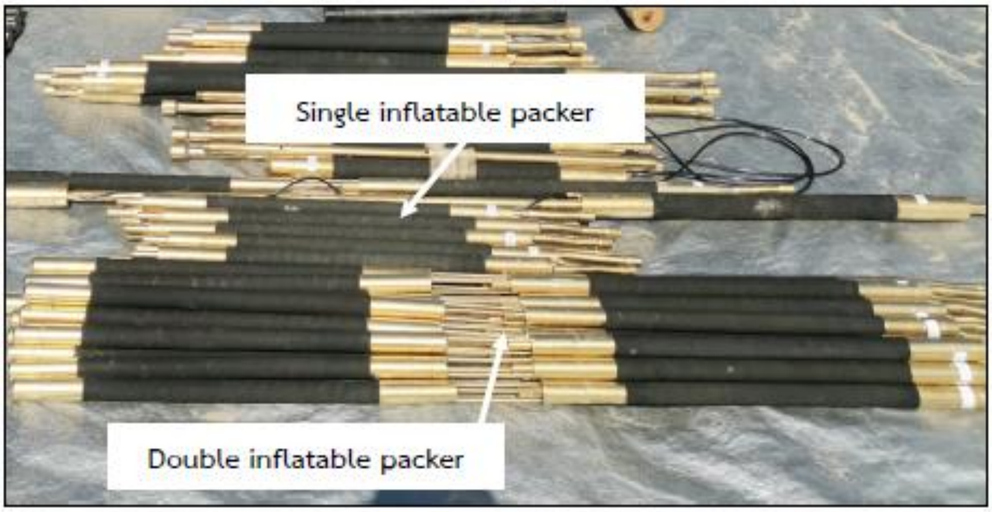


รูปที่ 3-10 แสดงอุปกรณ์การเจาะสำหรับใช้กับเครื่องแบบกระแทก (Percussion drilling)

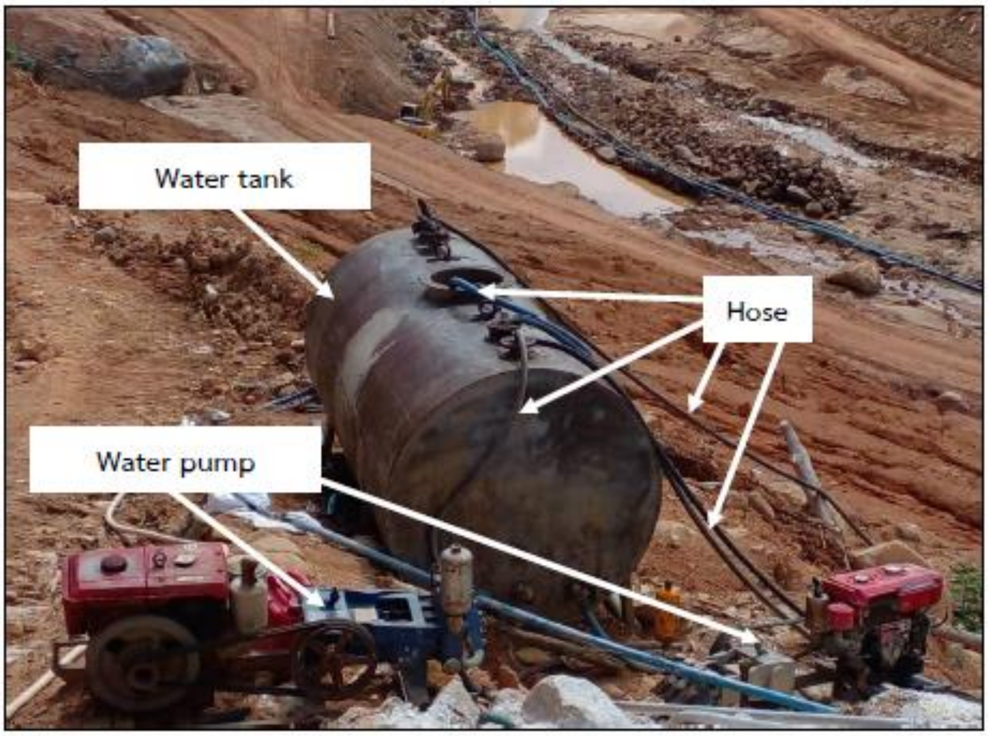
รูปที่ 3-11 แสดงชุดอัดฉีดของผสมแบบเคลื่อนที่



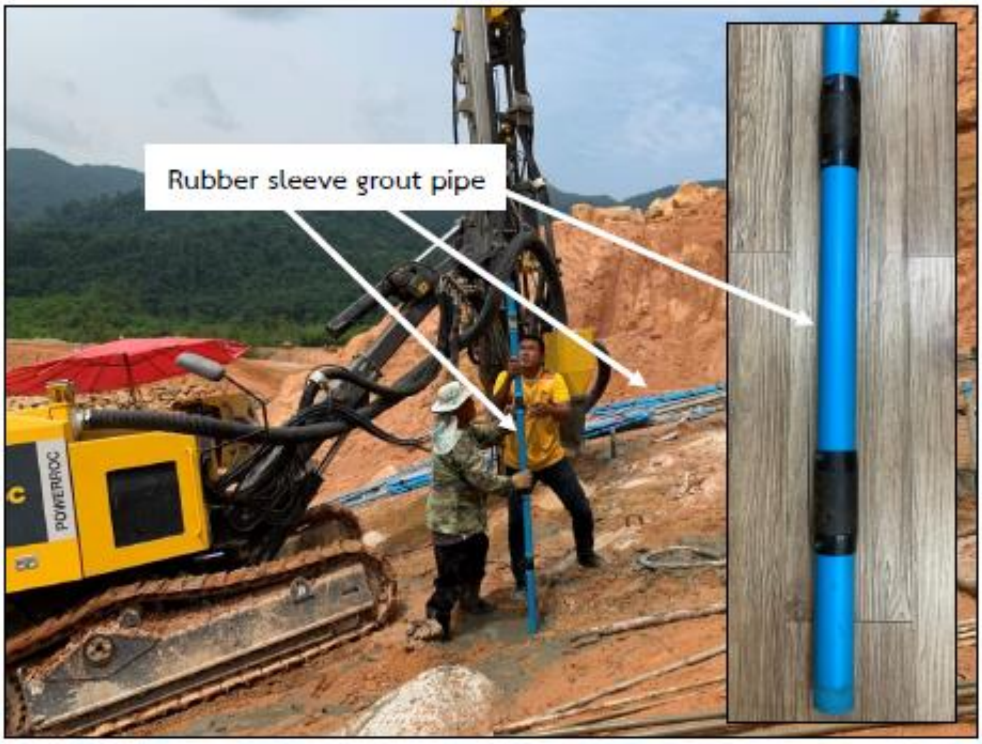
รูปที่ 3-12 แสดงชุดควบคุมการอัดฉีด



รูปที่ 3-13 แสดงชุดลูกยางอัดในหลุมเจาะ



รูปที่ 3-14 แสดงเครื่องสูบน้ำและถังพักน้ำ



รูปที่ 3-15 แสดงวัสดุอุปกรณ์ชุดท่ออัดฉีดของผสมติดปลอกลูกยาง

รูปที่ 3-16 แสดงวัสดุโซเดียมซิลิเกต โซเดียมไบคาร์บอเนต และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

รูปที่ 3-17 แสดงวัสดุเบนโทไนท์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

3.4 การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยเทคนิคการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench

3.4.1 หลักการของ Slurry trench

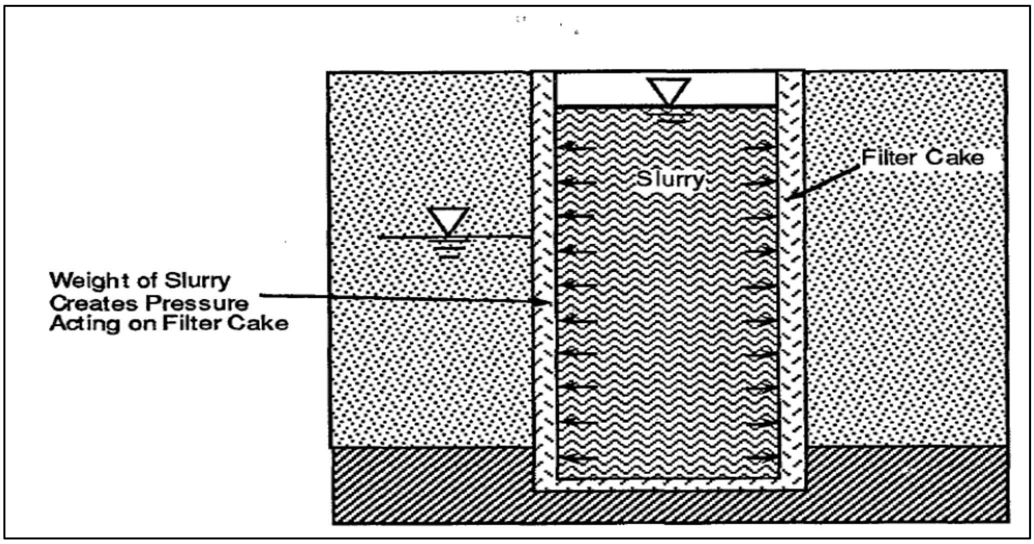
เทคนิคการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำแบบ Slurry trench สำหรับการปรับปรุงฐานรากในการก่อสร้างเขื่อนดินเป็นวิธีการหนึ่งในการทำ Impervious cutoff wall ซึ่งปกติทั่วไปการปิดกั้นการไหลรั่วของน้ำออกจากอ่างผ่านฐานรากและตัวเขื่อน มักนิยมใช้การขุดดินฐานรากเป็นร่องแกนเขื่อนลงไปจนถึงชั้นหน้าหินทึบน้ำแล้วบดอัดดินเหนียวทึบน้ำกลับขึ้นมาจนถึงตัวเขื่อนเหนือระดับดินเดิมเชื่อมต่อกับแกนดินเหนียวของตัวเขื่อน แต่เนื่องจากสภาพธรณีวิทยาฐานรากในบางพื้นที่ไม่สามารถจะใช้วิธีการดังกล่าวได้ จึงพิจารณาใช้เทคนิคการก่อสร้างด้วยวิธี Slurry trench แทนการขุดร่องแกน และ Cement grouting หรืออาจใช้การก่อสร้างด้วยวิธี Slurry trench ร่วมกับการปรับปรุงฐานรากวิธีการอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่ต้องพิจารณาตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1

การก่อสร้างกำแพงทึบน้ำโดยวิธี Slurry trench เพื่อปรับปรุงฐานรากเขื่อน หมายถึงเทคนิคการก่อสร้างผนัง กำแพง หรือฐานรากใต้ดิน ในกรณีที่

- ชั้นดินฐานรากเป็นกรวด ทราย ที่มีความหนามากเกินกว่าที่จะทำการขุดได้โดยประหยัด
- ดินฐานรากอ่อนหรือเป็นกรวด ทรายหลวมยากต่อการรักษาความมั่นคงของลาดบ่อขุดไม่ให้เกิดการพังทลายได้
- ระดับน้ำใต้ดินอยู่ตื้น และเป็นอุปสรรคต่อการขุดและสูบน้ำออกจากบ่อก่อสร้าง
- ในกรณีซ่อมเขื่อนดินเดิมโดยไม่จำเป็นต้องรื้อตัวเขื่อนเดิมออกทั้งหมด

Slurry trench หรือที่เรียกว่า Slurry trench cutoff wall สร้างโดยเทคนิคการใช้สารละลาย ซึ่งมีการขุดไปในชั้นดินเป็นร่องตามความลึกที่ต้องการโดยการใช้ Backhole หรือ Clamshell โดยมีน้ำโคลน (Bentonite) หรือสารละลาย (Mud or slurry) หล่ออยู่ในร่องขุดตลอดเวลา เพื่อช่วยรักษา

เสถียรภาพของผนังด้านข้างของร่องขุดผ่านความดันอุทกสถิต (Hydrostatic pressure) อนุภาคของ Clay จะสร้างผิวบาง ๆ เป็นชั้นทึบน้ำตามผนังร่องขุดที่เรียกว่า Filter cake ที่มีค่าความซึมผ่านต่ำ (Low hydraulic conductivity) และแรงดันของสารละลายจะรักษาความมั่นคงของร่องขุดไม่ให้พังทลายระหว่างการขุดลงไปในชั้นดินระดับลึก และเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อดินรอบ ๆ ร่องขุดด้วยการที่น้ำโคลนแทรกเข้าไปเชื่อมยึดเม็ดดินรวมทั้งป้องกันการไหลของน้ำใต้ดินเข้ามาในร่องขุด ดังแสดงใน**รูปที่ 3-18** อย่างไรก็ตามระดับของสารละลายจะต้องมีระดับที่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินโดยรอบเพื่อรักษาเสถียรภาพ หากพบว่าระดับน้ำใต้ดินสูงหรือเหนือกว่าพื้นดินอาจต้องมีการสร้างคันกั้นน้ำ (Dike) เพื่อยกระดับความสูงของพื้นดินตามแนวของร่องขุด



รูปที่ 3-18 ภาพแสดง Hydrostatic pressure ของ Slurry และ Filter cake ที่เพิ่มความมั่นคงของร่องขุด (Wall constructed by slurry techniques, ref.file:///D:/Geotechnical/Slurry% 20trench/Chapter%207%20-%20Vertical%20Cutoff%20Walls%20(PDF).pdf)

เมื่อทำการขุดถึงระดับความลึกที่ต้องการ หรือลึกถึงชั้นหินทึบน้ำ ต้องทำความสะอาดก้นร่องขุดอาจมีเศษหินหรือตะกอนอยู่ที่ก้นร่องขุดด้วยการดูดหรือสูบขึ้นมา และเทวัสดุถมกลับด้วยดินเบนโทไนท์ (Soil bentonite backfilled; SB backfill) หรือวัสดุทึบน้ำอื่น ๆ ลงไปในร่องขุดจนเต็มแทนที่น้ำโคลนที่อยู่ในร่องขุด แล้วทำการปิดส่วนบนของกำแพงทึบน้ำ

เหตุผลสำคัญที่ Slurry trench นิยมนำมาใช้ในการทำ Cutoff wall คือ

- ความลึกของร่องขุดสามารถตรวจสอบเพื่อยืนยันความลึกที่ต้องการและวัสดุที่ขุดขึ้นมาจะตรวจสอบเพื่อยืนยันคุณสมบัติที่สารละลายสามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นวัสดุได้
- สามารถตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ถมกลับ (Backfill) ว่าเป็นไปตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้หรือไม่
- มีผนังค่อนข้างหนาเมื่อเปรียบเทียบกับ Sheet pile หรือ Geomembrane
- Slurry trench ไม่มีรอยต่อของโครงสร้าง (Construction segments)

3.4.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบ (Design considerations)

Slurry trench ทำหน้าที่ควบคุมการรั่วซึมของน้ำไหลผ่านฐานราก ป้องกันไม่ให้น้ำไหลลอดผ่านชั้นดิน ทราย หรือกรวดซึ่งมีค่าการรั่วซึมสูงใต้ฐานเขื่อนเพื่อลดการสูญเสียของน้ำเก็บกักและป้องกันปัญหา

เสถียรภาพและความมั่นคงของตัวเขื่อนอันเนื่องมาจากแรงดันของน้ำใต้ดินบริเวณลาดเขื่อนด้านท้าย หรือการพัดพา (Piping erosion) คุณสมบัติที่สำคัญของกำแพงทึบน้ำคือ จะต้องมีความทึบน้ำที่เพียงพอและคงทน (Durability) และคุณสมบัติในการยืดหยุ่นที่เหมาะสม (Deformability) ไม่ทำให้เกิดปัญหาในระหว่างการก่อสร้างสามารถรับแรงกดทับแรงดันดินกระทำด้านข้าง การเคลื่อนตัวและทรุดตัวของดินฐานรากจากน้ำหนักตัวเขื่อนโดยเฉพาะน้ำหนักของน้ำจากการเติมน้ำครั้งแรกของอ่าง (First reservoir filling) Slurry trench ที่ดีจะต้องมีกำลังรับแรงได้ และสามารถหดตัวได้โดยไม่แตกร้าว (Jeffrey Evans, et.al., 2022, Ken Andromalos, et.al., 2017) ต้องมีคุณสมบัติที่ Slurry trench ดังนี้

(1) การรั่วซึม (Permeability)

ความทึบน้ำของ Slurry trench ขึ้นอยู่กับค่าการรั่วซึมของวัสดุที่ใช้ถมกลับ (Backfill) คุณภาพในการก่อสร้าง และยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น ความต่อเนื่องของวัสดุถมกลับ ความกว้างของร่องกำแพงทึบน้ำ สภาพชั้นดิน/หินบริเวณด้านล่างร่องขุด และรอยต่อระหว่างส่วนบนของกำแพงกับดินบดอัดตัวเขื่อน โดยทั่วไปค่าการรั่วซึมของดินเบนโทไนท์ (Soil bentonite) ที่ใช้เป็นวัสดุถมกลับในการออกแบบจะกำหนดค่าประมาณ 10^{-7}-10^{-8} m/sec

(2) การยืดหยุ่น (Deformability)

โดยปกติแล้ว เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเกี่ยวกับการทรุดตัวและการหดตัวของดินฐานราก วัสดุที่ใช้ทำกำแพงควรจะมีการยืดหยุ่นคล้ายคลึงกับดิน แต่โดยหลักปฏิบัติแล้ว ICOLD (1985) การใช้วัสดุทำกำแพงที่มีค่าโมดูลัส (Modulus) อยู่ราว 4-5 เท่าของดินฐานราก จะเป็นวัสดุที่เหมาะสมไม่ก่อให้เกิดปัญหาการสืบเนื่องกับการเคลื่อนตัวของดิน นอกจากนั้นวัสดุผสมต้องมีคุณสมบัติพลาสติก (Plastic) กล่าวคือ จะต้องหดตัวได้มาก (5 – 10% Strain) โดยไม่เกิดการแตกร้าวในลักษณะการรับแรงตามสภาพจริงใต้เขื่อน ซึ่งเป็นแบบ Triaxial เพราะมี Confining Pressure จากแรงดันดินด้านข้างกระทำ

(3) การรับกำลัง (Strength)

วัสดุผสมที่ใช้ถมกลับเป็นกำแพง จะต้องมีกำลังพอเพื่อสามารถรับน้ำหนักกด แรงดันด้านข้างจากตัวเขื่อนและน้ำในอ่าง รับแรงดันดินอัดที่ระดับลึก และต้านการเกิดการกัดเซาะ (Erosion) อันเนื่องมาจาก Hydraulic gradient ระหว่างสองด้านของกำแพง ในขณะเดียวกันจะต้องควบคุมมิให้มีกำลังสูงเกินควร เพราะจะทำให้กำแพงมีความแข็ง (Rigid) มากเกินไป ทำให้เกิดการแตกร้าวของกำแพงได้

(4) ความคงทน (Durability)

วัสดุผสมที่ใช้ถมกลับเป็นกำแพง จะต้องเลือกใช้ส่วนผสมและวัสดุผสมเพิ่ม ให้ส่วนผสมมีความมั่นคงต่อปฏิกิริยาเคมี ที่อาจเกิดจากสภาพน้ำใต้ดินและดิน ดังต่อไปนี้

- น้ำใต้ดินที่มีเกลือคลอไรด์ (Chloride) หรือ ซัลเฟต (Sulphate) ซึ่งมีผลต่อโคลนผง (Bentonite) ที่ใช้ผสมเป็นน้ำโคลน (Slurry) อาจทำให้ส่วนผสมแข็งหรือเหลวเกินไป
- น้ำกร่อยหรือน้ำเค็ม ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของโคลนผง (Bentonite)

(5) ความสามารถเทได้ (Workability)

ส่วนผสมของวัสดุผสมที่ใช้ถมกลับเป็นกำแพง จะต้องมีความหนืด (Viscosity) และความหนาแน่นที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถทำการถมกลับไล่น้ำโคลนได้ทั่วถึง และไม่เกิดการแยกตัว (Segregation)

อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้วิธี Slurry trench ในงานก่อสร้างหรืองานปรับปรุงฐานรากเขื่อนก็ควรต้องพิจารณาถึงข้อดีและข้อด้อยของการใช้ Slurry trench เพื่อประกอบการตัดสินใจตามรายละเอียด ดังนี้

<u>ข้อดีของการใช้ Slurry trench</u>

- ลดระยะเวลาการก่อสร้าง
  สำหรับในงานเขื่อน สามารถถมบดอัดตัวเขื่อนไปส่วนหนึ่งได้ โดยไม่ต้องรอการขุดและถมร่องแกน เมื่อมีพื้นที่การก่อสร้างกว้างขึ้นจะสามารถทำ Slurry trench พร้อมกับการบดอัดตัวเขื่อนไปพร้อม ๆ กันได้
- สามารถก่อสร้างใต้ระดับน้ำใต้ดิน
  เนื่องจาก Slurry trench ขณะขุดมีน้ำโคลนวิทยาศาสตร์คอยประคองผนัง และขณะเดียวกันมีความทึบน้ำมากพอที่จะปิดกั้นมิให้น้ำใต้ดินเข้ามาในร่องขุด จะไม่มีปัญหาในการก่อสร้างใต้ระดับน้ำใต้ดิน
- สามารถก่อสร้างลงไปในระดับลึกมาก
  ความมั่นคงของร่องขุด จะไม่มีผลจากความลึก เพราะความหนาแน่นของน้ำโคลนสูงกว่าน้ำใต้ดินอยู่แล้ว
- ใช้พื้นที่ก่อสร้างน้อย
  ในขณะก่อสร้าง Slurry trench จะใช้พื้นที่การทำงานของเครื่องจักร ประมาณ 20 เมตรจากแนวร่องขุด

<u>ข้อด้อยของการใช้ Slurry trench</u>

- ราคาค่อนข้างแพง เมื่อเทียบกับการค้ำยันหลุมขุดประเภทอื่น ๆ
- ผิวผนังของ Slurry trench ไม่เรียบ เนื่องจากต้องใช้ผิวดินเป็นแบบ
- มีอุปสรรคจากหินลอยก้อนใหญ่ ๆ ขวางแนวร่องขุด
- เป็นเทคนิคที่ต้องการผู้มีความรู้และประสบการณ์สูงในการควบคุมคุณภาพงาน

3.4.3 ชนิดของ Slurry trench

ชนิดของ Slurry trench ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ถมกลับ (Backfill material) แบ่งได้ ดังนี้

- Soil bentonite cutoff เป็นกำแพงทึบน้ำที่มีเนื้อกำแพงเป็นดินธรรมชาติที่คัดเลือกจากบริเวณที่ก่อสร้างนำมาผสมกับหินหรือกรวด ทราย และน้ำโคลน (Bentonite) ตามสัดส่วนที่เหมาะสมจนมีความทึบน้ำและยืดหยุ่น มักจะผสมบนพื้นลาน แล้วใช้รถ Backhoe ตักลงในร่องขุด เตรียมไว้เป็นร่องยาว โดยที่วัสดุถมกลับที่ดีจะต้องมีส่วนผสมที่มีความข้นเหลว เทลงในร่องแล้วไล่ที่น้ำโคลนในร่องขึ้นมาได้ ดังนั้นจึงต้องมี Slump ประมาณ 10 เซนติเมตร ข้อดีในการใช้ Soil-bentonite คือ วัสดุที่ใช้ผสมมีราคาถูก และอาจพิจารณาใช้วัสดุที่ขุดขึ้นมาเป็นส่วนผสมได้ด้วย เนื่องจากการขุดมักเป็นร่องต่อเนื่อง การเทวัสดุถมกลับลงในร่องขุดจะไม่ทำให้เกิดรอยต่อและมีความยืดหยุ่นสูง ข้อเสีย คือ การควบคุมคุณภาพให้สม่ำเสมอทำได้ยาก

- Plastic concrete cutoff เป็นกำแพงทึบน้ำที่มีวัสดุเนื้อกำแพงประกอบด้วย กรวด ทราย ซีเมนต์ น้ำโคลน (Bentonite) และน้ำ โดยส่วนผสมต้องออกแบบให้มีคุณสมบัติทึบน้ำ มีความแข็งแรง และมีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับดินฐานราก มักจะใช้ในกรณีที่เป็นกำแพงทึบน้ำใต้ดินฐานรากของตัวเขื่อน และก่อสร้างควบคู่กับการขุดและถมกลับเป็นแผงเว้นสลับแผง เพื่อให้แผงที่เทก่อนได้กำลังที่เพียงพอที่จะยืนอยู่ได้ด้วยตัวเองขณะขุดแผงข้างเคียง การควบคุมคุณภาพทำได้ดีกว่า Soil-bentonite เนื่องจากการผสมต้อง

ทำในโรงผสม (Mixing plant) จึงจะได้คุณภาพที่ดี โดยเทลงในร่องขุดคล้ายคอนกรีตโดยใช้ Trimie Pipe จึงวัดปริมาตรได้ละเอียดถูกต้อง

- Concrete diaphram wall วัสดุกำแพงเป็นคอนกรีตมีความแข็งตัวมาก เมื่อเทียบกับดินฐานราก ดังนั้นต้องระมัดระวังในการใช้ เพราะอาจทำให้เกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน และเกิดรอยแตกของเขื่อนที่บริเวณปลายบนของกำแพง จึงนำมาใช้น้อยมากในงานเขื่อน

วิธีการขุด (Excavation) ร่องขุดเพื่อก่อสร้างกำแพงทึบน้ำจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ถมกลับ แบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

- การขุดแบบเป็นร่องต่อเนื่อง (Open trenching) วิธีนี้จะทำการขุดร่องขุดเป็นร่องยาวต่อเนื่อง โดยการใส่น้ำโคลน (Slurry) ลงในร่องขุดให้เต็มขณะทำการขุด เมื่อขุดจนถึงความลึกตามแบบหรือชั้นหิน และได้ความยาวของร่องขุดที่สามารถถมกลับได้ จะถมกลับด้วยวัสดุตามที่กำหนด วัสดุถมกลับที่มักใช้กับการขุดวิธีนี้เป็นดิน-เบนโทไนท์ (Soil-bentonite)

- การขุดแบบเป็นแผงสลับแผง (Alternate panels) วิธีนี้จะทำการขุดร่องขุดเป็นแผงเว้นสลับแผง โดยการใส่น้ำโคลนลงในร่องขุดให้เต็มขณะทำการขุด เมื่อทำการถมกลับแล้วจึงมาทำการขุดแผงที่อยู่ข้างเคียง เพื่อให้แผงที่เทก่อนได้กำลังที่เพียงพอที่จะยืนอยู่ได้ด้วยตัวเองขณะขุดแผงข้างเคียง วัสดุถมกลับที่ใช้กับร่องขุดวิธีนี้ สามารถใช้วัสดุถมกลับได้เกือบทุกลักษณะ คือ ดิน-เบนโทไนท์ (Soil-bentonite) , Plastic concrete, concrete และ Cement-bentonite

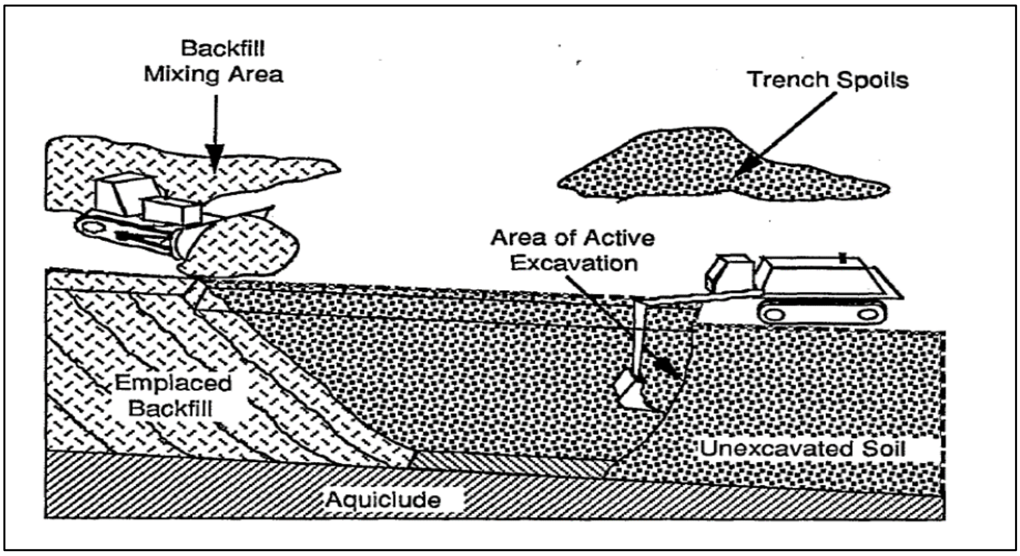
การขุดร่องขุด สามารถใช้เครื่องจักรที่ใช้ในการขุด ชนิด Backhoe, Dragline หรือ Clamshell ในการเลือกใช้เครื่องจักรที่ใช้ในการขุด จะขึ้นอยู่กับความลึกและชนิดของกำแพงทึบน้ำ

3.4.4 การปฏิบัติงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench

การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธี Slurry trench แสดงเป็นแผนภาพให้เข้าใจง่าย ๆ ดังแสดงใน**รูปที่ 3-19** มีขั้นตอนในการปฏิบัติงาน ดังนี้

(1) การวางแผนการก่อสร้างและการเตรียมเครื่องจักร อุปกรณ์ (Preconstruction planning and mobilization)

กิจกรรมแรกของงานก่อสร้าง ได้แก่ การเตรียม รวบรวม ศึกษา แบบ แปลน รูปตัด และข้อกำหนดทางวิศวกรรมของงานก่อสร้างกำแพงทึบน้ำโดยวิธี Slurry trench รวมทั้งข้อมูลสภาพธรณีวิทยาฐานราก เพื่อนำไปวางแผนการดำเนินงาน การเตรียมเครื่องจักรและอุปกรณ์ กำหนดขั้นตอนการก่อสร้าง กำหนดปริมาณวัสดุ จัดเตรียมบุคลากรและงบประมาณในการดำเนินงาน



รูปที่ 3-19 แผนภาพแสดงการก่อสร้างโดยวิธี Slurry trench (Ref.file:///D:/Geotechnical%20data/Slurry%20trench/Chapter%207%20-%20Vertical%20Cutoff%20Walls%20(PDF).pdf)

(2) การเตรียมพื้นที่ (Site preparation)

การเตรียมพื้นที่สำหรับการก่อสร้างและแก้ไขอุปสรรคต่าง ๆ การเตรียมพื้นผิวโดยเฉพาะในบริเวณพื้นที่ลุ่มต่ำ ต้องพิจารณาข้อกำหนดที่สำคัญของเทคนิคการก่อสร้าง Slurry trench คือ ระดับของสารละลายในร่องขุดจะต้องสูงกว่าระดับน้ำใต้ดิน หากในพื้นที่มีระดับน้ำใต้ดินที่อยู่ตื้นจำเป็นต้องมีการถมคันดิน (Dike) ให้สูงเพื่อให้ระดับของสารละลายในร่องสูงกว่าระดับน้ำใต้ดิน ดังแสดงใน**รูปที่ 3-20** นอกจากนั้นยังต้องจัดเตรียมพื้นที่ผิวสำหรับผสมวัสดุที่จะใช้ด้วย

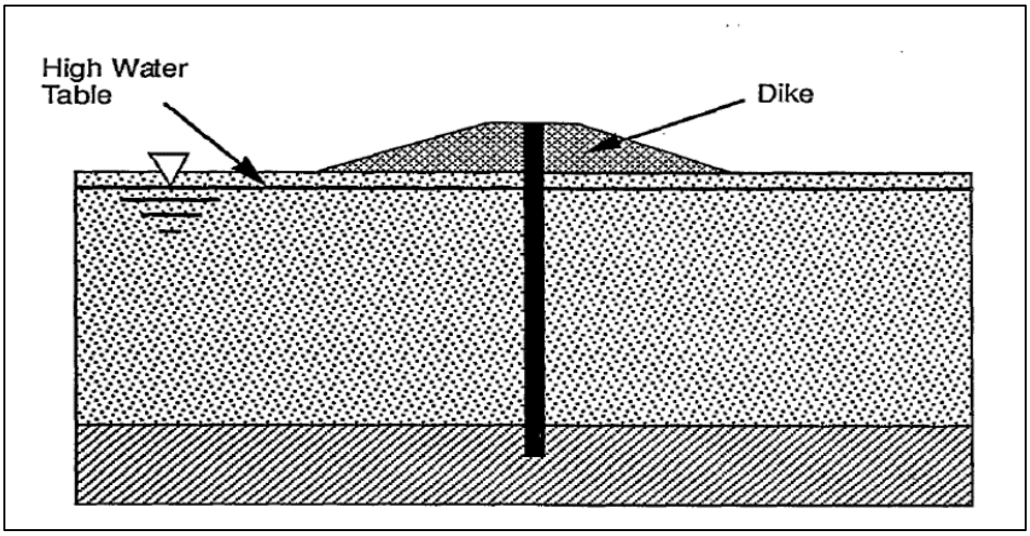
(3) การเตรียมวัสดุและคุณสมบัติ (Slurry preparation and properties)

ก่อนการขุดหรือในระหว่างการขุดจะต้องเตรียมวัสดุและส่วนประกอบที่จะใช้ประกอบด้วย โคลนผง (Bentonite) ซึ่งเป็นวัสดุหลักในการทำน้ำโคลนสำหรับป้องกันการพังและเสริมความมั่นคงให้ร่องขุดและวัสดุถมกลับเป็น Slurry รวมทั้งการเตรียมโรงผลิตน้ำโคลน ประกอบด้วยเครื่องผสมน้ำโคลน บ่อพักน้ำโคลน (Hydration pond) ปั๊มกวนน้ำโคลน เครื่องสูบน้ำโคลน เครื่องอัดลม ท่อส่งน้ำโคลนและอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติน้ำโคลน

(4) การขุดร่องขุด (Trench excavation)

ทำการขุดร่องให้มีขนาดความกว้าง ความยาว และความลึกตามที่แสดงในแบบที่กำหนด และต้องขุดถึงชั้นหิน (Bed rock) หรือชั้นทึบน้ำ ในระหว่างการขุดต้องเติมน้ำโคลน (สารละลาย Bentonite) ลงในร่องขุดตั้งแต่เริ่มทำการขุด โดยต้องตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำโคลนให้มีความเข้มข้นตามเกณฑ์ที่กำหนดตลอดเวลา หากมีการหยุดการทำงานนานเกิน 8 ชั่วโมง ก่อนการเริ่มงานขุดต่อจะต้องทำการกวนน้ำโคลนในร่องขุดด้วยแรงดันลม หรือด้วยวิธีการอื่นที่เหมาะสม

เมื่อขุดถึงระดับตามที่แบบกำหนดไว้ หรือขุดจนถึงชั้นหิน ต้องทำการตรวจสอบความลึกของร่องขุดจนมั่นใจว่าเป็นไปตามความลึกที่กำหนด และหากพบว่าพบก้อนหินลอย หินหลวมหรือเศษหินจะต้องกำจัดออกไปเพื่อทำความสะอาดและตรวจสอบความสะอาดร่องขุด ในระหว่างการขุดร่องจะต้องทำความสะอาดน้ำโคลนอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำโคลนหมุนเวียนผ่านตะแกรงร่อนหรือกระบวนการอื่นเพื่อกำจัดเศษตะกอนต่าง ๆ ออกจากน้ำโคลน



รูปที่ 3-20 ภาพแสดงการถมคันดิน (Dike) เพื่อให้สารละลายในร่องขุดมีระดับสูงกว่าระดับน้ำใต้ดิน (Ref.file:///D:/Geotechnical%20data/Slurry%20trench/Chapter%207%20-%20Vertical%20Cutoff%20Walls%20(PDF).pdf)

(5) การถมกลับร่องขุด (Trench backfill)

การถมกลับร่องขุด เริ่มดำเนินการเมื่อทำการขุดร่องจนมีความยาวพอสมควร และทำความสะอาดพื้นร่องขุดด้วยวิธีการพ่นลม (Air jetting or air lift) เรียบร้อย การถมกลับให้เริ่มถมวัสดุผสมจากพื้นล่างสุดของร่องขุดทำการถมไล่ระดับขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนวัสดุผสมถมสูงถึงระดับพื้นผิวน้ำโคลนในร่องขุด หรืออาจใช้วิธีการเติมวัสดุผสมลงในร่องขุดด้วยท่อเทคอนกรีตใต้น้ำ (Tremie pipe) โดยการหย่อนปลายท่อลงไปจนถึงพื้นร่องขุด จากนั้นเริ่มเทวัสดุผสมลงในท่อจนเต็มแล้วยกขึ้นช้า ๆ ให้วัสดุผสมไหลออกไปเอง ต้องระมัดระวังในการยกปลายท่อจนปลายท่อพ้นระดับน้ำโคลนเพื่อรักษาความสม่ำเสมอ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดช่องว่าง โพรงหรือก้อนในกองวัสดุผสม

เมื่อถมร่องขุดเป็นกำแพงทึบน้ำจนถึงระดับที่กำหนดแล้ว จะต้องถมปิดทันทีด้วยดินจากบ่อยืมดินที่ใช้ในงานถมดินตัวเขื่อนดิน โดยดินต้องมีความชื้นสม่ำเสมอและสูงกว่าความชื้นที่ Optimum moisture content ประมาณ 4% และต้องถมให้มีความหนาไม่น้อยกว่า 1.50 เมตร โดยการถมนี้ให้ใช้เฉพาะรถขุดและบุ้งกี๋ก้ามปูตักดินคลุมลงบนผิวหน้ากำแพงทึบน้ำ ห้ามทำการบดอัด และห้ามรถแทรกเตอร์หรือเครื่องจักรหนักย่ำหรือเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่ก่อสร้าง Slurry trench ที่ถมไว้จนกว่าจะครบ 21 วัน เมื่อครบกำหนดแล้ว ให้นำดินที่ถมปิดออกจนเหลือความหนาประมาณ 30 เซนติเมตร ตรวจสอบความชื้นให้เท่ากับที่กำหนดไว้ จากนั้นทำการบดอัดแน่นดินตัวเขื่อน และเริ่มงานในขั้นตอนต่อไปตามวิธีการที่กำหนดสำหรับงานถมบดอัดแน่นของงานเขื่อน

บทที่ 4
กรณีศึกษา

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยความรู้ด้านต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการปรับปรุงฐานรากเขื่อน และได้นำกรณีศึกษาในการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนของกรมชลประทาน ที่ได้ดำเนินการออกแบบในช่วงปีงบประมาณ พ.ศ. 2563-2564 จำนวน 3 โครงการมาเป็นกรณีศึกษา โดยแต่ละโครงการมีสภาพธรณีวิทยาฐานรากและสภาพปัญหาที่แตกต่างกัน ได้แก่

1) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสม สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นหินแข็ง

2) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสมและเจาะ-อัดฉีดสารเคมีด้วยวิธี Sleeve grout pipe สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นดิน กรวด ทราย และชั้นหินแข็ง

3) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสมและก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นดิน/หินผุ และชั้นหินแข็ง

เนื้อหาในบทนี้ได้สรุปข้อมูลและขั้นตอนการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนของทั้ง 3 โครงการ เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นวิธีการปรับปรุงฐานรากที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากสภาพธรณีวิทยาฐานรากที่แตกต่างกันของพื้นที่ได้อย่างชัดเจน

4.1 การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อนโครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี

4.1.1 เรื่องเดิม

สำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม ได้ขอความอนุเคราะห์ให้ส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา ดำเนินการพิจารณาออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อนและอาคารประกอบ โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี ตามหนังสือ ฝ่ายออกแบบเขื่อนที่ 2 ส่วนออกแบบเขื่อน สำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม ที่ สอส (อข.2) 07/136/2563 ลงวันที่ 25 กันยายน 2563 เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ออกแบบปรับปรุงฐานรากโครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี

4.1.2 รายละเอียดโครงการ

จากรายงานสรุปโครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี

ประเภทโครงการ อ่างเก็บน้ำ

พื้นที่รับน้ำฝนไหลลงอ่างฯ	27.49	ตารางกิโลเมตร
ปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ เกณฑ์เฉลี่ย	14.05	ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี
ปริมาณฝนเฉลี่ย	1,412.00	มิลลิเมตร/ปี
ปริมาณน้ำนองสูงสุดในรอบ 100 ปี	85.59	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
ปริมาณน้ำนองสูงสุดในรอบ 500 ปี	118.59	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
ความจุอ่างฯ ที่ระดับน้ำต่ำสุด	0.608	ล้านลูกบาศก์เมตร

ความจุอ่างฯ ที่ระดับเก็บกัก	6.015	ล้านลูกบาศก์เมตร
ความจุอ่างฯ ที่ระดับน้ำนองสูงสุด	6.678	ล้านลูกบาศก์เมตร
ระดับท้องน้ำประมาณ	+ 178.50	เมตร (ร.ท.ก.)
ระดับเก็บกักปกติ	+ 210.00	เมตร (ร.ท.ก.)
ระดับเก็บกักต่ำสุด	+ 191.50	เมตร (ร.ท.ก.)
ระดับน้ำนองสูงสุด	+ 211.50	เมตร (ร.ท.ก.)
พื้นที่ผิวอ่างฯ ที่ระดับเก็บกักปกติ	269	ไร่
พื้นที่ผิวอ่างฯ ที่ระดับน้ำนองสูงสุด	284	ไร่

ลักษณะเขื่อนดิน ประเภทเขื่อนดินถม แบบแบ่งส่วน (Zoned-type earthfill dam)

ระดับสันเขื่อน	+ 213.50	เมตร (ร.ท.ก.)
ความกว้างสันเขื่อน	8.00	เมตร
ความยาวเขื่อน	809.00	เมตร
ส่วนที่มีความสูงที่สุด	35.00	เมตร
ลาดเขื่อน : ด้านเหนือน้ำ	1 : 3	
ด้านท้ายน้ำ	1 : 2.5	
ส่วนกว้างที่สุดของฐานเขื่อนประมาณ	190.00	เมตร
หินทิ้ง (Rip Rap)หนา	0.70	เมตร
กรวดทรายรองพื้น (Bedding) หนา	0.30	เมตร

อาคารระบายน้ำล้น ชนิดระบายน้ำด้านข้าง (Side channel spillway) อยู่ที่ Abutment ฝั่งซ้ายของเขื่อนดินที่ กม.0+864.20

สันฝายมีความยาว	40.00	เมตร
ระดับสันฝาย	+ 210.000	เมตร (ร.ท.ก.)
ระดับน้ำนองสูงสุด	+ 211.500	เมตร (ร.ท.ก.)
ระบายน้ำได้สูงสุดประมาณ	150.00	ลูกบาศก์เมตร/วินาที (รอบ 500 ปี)

อาคารท่อส่งน้ำ

ประเภท ท่อคอนกรีตเสริมเหล็ก Reinforce concrete conduit

ท่อส่งน้ำฝั่งขวา ที่ กม.0+250.00 ของเขื่อนดิน

ระดับธรณีอาคาร	+ 186.00	เมตร (ร.ท.ก.)
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	1.20	เมตร
ความยาว	262.00	เมตร
ปริมาณน้ำไหลผ่านท่อ	12.558	ลูกบาศก์เมตร/วินาที

4.1.3 สภาพธรณีวิทยาทั่วไป

สภาพธรณีวิทยาทั่วไป โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี และบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง ข้อมูลจากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:250,000 ระวางจอมกระสาน ND 48-6 โดยกรมทรัพยากรธรณี, 2522 พบว่าบริเวณพื้นที่โครงการฯ และพื้นที่โดยรอบประกอบด้วย ชุดหิน 3 ชุด โดยเรียงอายุจากแก่ไปอ่อน ดังนี้

1) หมวดหินภูพาน (Kpp) ในกลุ่มหินโคราช อายุ Lower - Middle Cretaceous ประกอบด้วย หินทรายแป้ง และหินทรายเนื้อปนกรวด สีเทาแกมน้ำตาล เทาแกมชมพูและส้ม มีชั้นหนารอยชั้นขวาง หินทรายแป้งและหินดินดาน สีน้ำตาลแกมแดง

2) หมวดหินโคกกรวด (Kkk) ในกลุ่มหินโคราช อายุ Middle - Upper Cretaceous ประกอบด้วย หินทรายแป้ง หินทรายและหินกรวดมน เนื้อปูนปนเม็ดละเอียด สีแดงแกมเทา น้ำตาลแกมแดง และน้ำตาลอ่อน

3) ชุดหินอัคนี ประกอบด้วย ชุดหิน bs อายุ Tertiary ประกอบด้วย โอลิวีนบะซอลต์ พบไดอะเบสเล็กน้อย

4.1.4 สภาพธรณีวิทยาฐานราก

ข้อมูลจากรายงานการเจาะสำรวจธรณีวิทยาฐานราก โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี (ส่วนธรณีวิทยา, 2562) แสดงข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจ และทดสอบคุณสมบัติทางธรณีเทคนิค รวมทั้งสิ้น 9 หลุม ความลึกรวม 194.00 เมตร พบสภาพธรณีวิทยาฐานรากบริเวณพื้นที่โครงการเป็นชั้นฐานราก 2 ชนิด ประกอบด้วยชั้นฐานรากดินปิดทับอยู่บนชั้นฐานรากหิน มีรายละเอียด ดังนี้

1) ชั้นฐานรากดิน

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งขวา (หลุมเจาะ DHD.1 DHD.2 และ DHD.3) พบดินกลุ่ม Clayey sand (SC) และ Silty sand (SM) ที่บริเวณแนวศูนย์กลางท่อส่งน้ำ (DHD.3) ชั้นดินมีความหนาประมาณ 3.00 เมตร ค่า Relative density อยู่ในช่วง Very dense ค่าตอกทดลอง (SPT) >50 มีค่าการรั่วซึมอยู่ในช่วงทึบน้ำ

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณช่วงกลางน้ำ (หลุมเจาะ DHD.4 DHD.5 และ DHD.6) เป็นดินกลุ่ม Clayey sand (SC) มีความหนาอยู่ในช่วง 2.00-13.00 เมตร ค่า Relative density อยู่ในช่วง Dense to very dense ค่าตอกทดลอง (SPT) อยู่ในช่วง 7->50 มีค่าการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูงมาก (3.11×10^{-5}-8.68×10^{-4} cm/sec)

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งซ้าย (หลุมเจาะ DHD.7 DHD.8 และ DHD.9) เป็นดินกลุ่ม Clayey sand (SC) มีความหนา 3.00- 5.00 เมตร ค่า Relative density อยู่ในช่วง Dense to very dense ค่าตอกทดลอง (SPT) อยู่ในช่วง 9->50 มีค่าการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงสูงมาก (5.76×10^{-5}-9.28×10^{-4} cm/sec)

2) ชั้นฐานรากหิน

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งขวา (หลุมเจาะ DHD.1 DHD.2 และ DHD.3) พบชั้นหินฐานรากเป็นชั้นหินทราย (Sandstone) แทรกสลับกับหินทรายแป้ง (Siltstone) ที่ระดับผิวดิน (หลุมเจาะ DHD.1 และ DHD.2) ที่หลุมเจาะ DHD.3 พบชั้นหินฐานรากช่วงบนที่เป็นหินทรายที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงสูง (Moderately to highly weathered rock) ความแข็งต่ำถึงปานกลาง (Soft to medium hard rock) พบหินทรายแป้งที่ระดับความลึก 7.00-15.00 เมตร มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงสูง (Moderately to highly weathered rock) ความแข็งปานกลาง (Medium hard rock) ความต่อเนื่องของมวลหินมีค่าตั้งแต่ต่ำมากถึงสูงมาก (Very poor to very good rock) มีค่าการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงสูงมาก (6.25->200 Lugeon)

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณช่วงลำน้ำ (หลุมเจาะ DHD.4 DHD.5 และ DHD.6) ในช่วงบนของชั้นหินฐานรากพบชั้นหินทรายหนาประมาณ 2.00-4.00 เมตร มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง

ถึงสูง (Moderately to highly weathered rock) ค่าการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์สูง (33 Lugeon) ส่วนช่วงล่างเป็นหินทรายแป้งมีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงปานกลาง (Slightly to moderately weathered rock) ความต่อเนื่องของมวลหินมีค่าตั้งแต่ต่ำมากถึงสูงมาก (Very poor to very good rock) ค่าการรั่วซึมสูงในช่วงบน (39.40 Lugeon) ส่วนที่ระดับความลึกลงไปเป็นชั้นทึบน้ำ

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งซ้าย (หลุมเจาะ DHD.7 DHD.8 และ DHD.9) พบชั้นหินทรายแทรกสลับกับหินทรายแป้ง ที่ระดับความลึก 3.00-4.00 เมตรจากผิวดิน ในช่วงบนมีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์สูงถึงสูงมาก (Highly to completely weathered rock) ส่วนถัดลงมามีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงปานกลาง (Slightly to moderately weathered rock) ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกันโดยมีค่าตั้งแต่ต่ำมากถึงสูงมาก (Very poor to very good rock) มีค่าการรั่วซึมสูงในช่วงบนของชั้นหินฐานรากมีค่า 87.30 Lugeon

4.1.5 วิเคราะห์สภาพฐานรากเขื่อน

ฐานรากเขื่อนมี 2 ชนิด ได้แก่

1) ฐานรากดิน เป็น Clayey sand (SC) และ Silty sand (SM) บริเวณแนวทำนบฝั่งซ้ายและฝั่งขวามีความหนาประมาณ 3.00-5.00 เมตร ส่วนบริเวณช่วงลำน้ำมีความหนามากถึง 13.00 เมตร ค่าตอกทดลองแสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักค่อนข้างดี แต่มีค่าการรั่วซึมส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์สูงถึงสูงมาก

2) ฐานรากหิน เป็นชั้นหินทราย (Sandstone) แทรกสลับกับหินทรายแป้ง (Siltstone) ที่มีอัตราการผุสลายปานกลางถึงสูง (Moderately to highly weathered rock) ความแข็งต่ำถึงปานกลาง หินทรายแป้งพบระดับความลึก 7.00-15.00 เมตร มีอัตราการผุสลายปานกลางถึงสูง (Moderately to highly weathered rock) ความแข็งปานกลาง ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกันโดยมีค่าตั้งแต่ต่ำมากถึงสูงมาก พบรอยแตก (Opened cracks) และแนวแตก (Joints) มีค่าการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงสูงมาก (6.25->200 Lugeon) ในช่วงบนส่วนที่ระดับความลึกลงไปเป็นชั้นทึบน้ำ

4.1.6 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำซึมผ่านฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SEEP/W ของบริษัท GEO-SLOPE ประเทศแคนาดา มีวัตถุประสงค์ และรายละเอียด ดังนี้

- ประเมินปริมาณน้ำรั่วซึมผ่านเขื่อนและฐานรากในสภาพปกติก่อนการออกแบบปรับปรุงฐานรากสำหรับเป็นข้อมูลในการประเมินปัญหาการรั่วซึมผ่านเขื่อนและฐานรากว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยและยอมรับได้หรือไม่ ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านฐานราก เพื่อประเมินจากข้อมูลปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 14.05 ล้าน ลูกบาศก์เมตร/ปี ปริมาณน้ำที่ต้องการเก็บกัก ณ ความจุที่ระดับเก็บกักประมาณ 6.015 ล้านลูกบาศก์เมตร ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก พบว่า ปริมาณน้ำส่วนใหญ่จะไหลซึมผ่านฐานรากมากกว่าตัวเขื่อน โดยมีปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก ประมาณ 790,505 ลูกบาศก์เมตร/ปี คิดเป็นร้อยละ 13.14 ของความจุระดับเก็บกัก ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน**ตารางที่ 4-1**

- เพื่อวิเคราะห์โอกาสการเกิดการกัดพาของน้ำบริเวณท้ายเขื่อนของสมมติฐานในการออกแบบของแต่ละกรณี (Scenarios) ซึ่งอาจทำให้เกิดการพิบัติของเขื่อน รวมทั้งเพื่อต้องการทราบพฤติกรรมการไหลของน้ำได้ชัดเจน ซึ่งพิจารณาจากค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter จุด (A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain จุด (B) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีแรงกระทำของน้ำต่อมวลดินค่อนข้างสูง โดยค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient ที่ไม่ทำให้เกิดโอกาสการกัดพา โดยต้องพิจารณาค่า Velocity บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) ต้องมีค่า

น้อยกว่า 0.01 m/sec และ ค่า Hydraulic gradient (จุด A) จากตำแหน่งก่อนเข้า Filter ไปยังตำแหน่ง Toe drain (จุด B) ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.25 (โดยเฉพาะตำแหน่ง Toe drain เมื่อกำหนดค่า Factor of safty ของเขื่อนโดยทั่วไป เท่ากับ 4)

- ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน**ตารางที่ 4-1** แสดงพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อนโดยค่า Velocity บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) มีค่า 0.4 และ 0.4 ซึ่งมีค่าเกิน 0.25 ซึ่งแสดงว่ามีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากและผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B)

Analysis method Case	Velocity (m/sec)		Hydraulic Gradient		Seepage through Dam & Foundation (m^3/sec/m)	Seepage through Foundation (m^3/sec/m)	Seepage/year (m^3/year)
	Point A	Point B	Point A	Point B			
<u>Section กม 0+250</u> 1. No Foundation Improvement	7.93E-06	8.74E-06	0.40	0.44	2.76E-05	2.68E-05	790,505

4.1.7 ประเมินปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อนและฐานราก

เขื่อนมีความสูงถึง 35 เมตร และจากข้อมูลรายละเอียดสภาพของฐานรากที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถที่จะประเมินปัญหาที่จะเกิดกับฐานราก ได้ดังนี้

1) ชั้นฐานรากดินมีความหนาไม่มาก มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้แตกต่างกัน โดยทั่วไปสามารถรับน้ำหนักได้ดี แต่มีค่าการรั่วซึมสูงถึงสูงมาก

2) ชั้นฐานรากหินมีอัตราการผุพังสูง ความแข็งต่ำถึงปานกลาง ค่าความต่อเนื่องของมวลหินต่ำ พบรอยแตก (Opened cracks) และแนวแตก (Joints) มีค่าการรั่วซึมสูงถึงสูงมาก จากสภาพดังกล่าวเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) ทำให้มีการทรุดตัวภายใต้น้ำหนักที่กดทับของเขื่อนและน้ำที่กักเก็บ (Settlement under deformation) และเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential settlement)

3) การไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อนโดยพิจารณาค่า Hydraulic gradient บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) มีค่า 0.4 และ 0.44 ซึ่งมีค่าเกิน 0.25 ประกอบกับฐานรากดินและฐานรากหินที่มีค่าการรั่วซึมสูง โดยคิดเป็นปริมาณการไหลรั่วซึมผ่านฐานรากเขื่อนประมาณ 790,505 ลูกบาศก์เมตร/ปี ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการทรุดตัวอันเนื่องมาจากการไหลของน้ำผ่านฐานรากแล้วพัดพาดินหรือหินฐานรากออกไปทำให้เกิดโพรงภายในฐานราก (Collapse due to seepage) หรือที่เรียกว่าการกัดพา (Piping)

4.1.8 กำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำซึมผ่านเขื่อนและฐานรากและพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านเขื่อนจากค่า Hydraulic properties โดยพิจารณาจากข้อมูลตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.1.1 ถึง 4.1.6 ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อนและฐานรากได้กำหนดแนวความคิด (Conceptual) วิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนของโครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานีที่เหมาะสมกับสภาพธรณีวิทยาฐานราก โดยตั้งสมมติฐานวิธีการออกแบบที่เป็นไปได้ 5 กรณี (โดยใช้โปรแกรม SEEP/W) คือ

1) กรณีไม่ทำการปรับปรุงฐานราก
2) กรณีทำ Full cutoff trench ชั้นฐานรากดิน
3) กรณีทำ Full cutoff trench & ปู Upstream impervious blanket 6H ชั้นฐานรากดิน
4) กรณีทำ Full cutoff trench & ปู Upstream impervious blanket 12H ชั้นฐานรากดิน
5) กรณีทำ Full Cutoff Trench ชั้นฐานรากดิน & Grouting ชั้นฐานรากหิน

ผลการวิเคราะห์แสดงใน**ตารางที่ 4-2** เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลวิเคราะห์แล้วจึงพิจารณาเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุดอีกครั้ง

สมมติฐานในกรณีปรับปรุงฐานรากแบบต่าง ๆ ที่เป็นได้ทั้ง 5 กรณี พบว่า

1) กรณีการไม่ทำการปรับปรุงฐานราก (No foundation improvement) พบว่า มีน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก ประมาณ 790,505 ลูกบาศก์เมตร/ปี คิดเป็นร้อยละ 13.14 ของปริมาณความจุอ่างที่ระดับเก็บกัก และคิดเป็นร้อยละ 5.62 ของปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างต่อปี

2) กรณีการปรับปรุงฐานรากโดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) และบดอัดด้วยชั้นดินทึบน้ำแล้ว พบว่า มีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 628,354 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถลดการรั่วซึมของน้ำลดลงร้อยละ 21.78

3) กรณีการปรับปรุงฐานรากโดยวิธีบดอัดและปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 6 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S Impervious Blanket 6H) พบว่า มีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 544,718 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถปรับปรุงฐานรากได้ร้อยละ 32.73

4) กรณีการปรับปรุงฐานรากโดยวิธีบดอัดและปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 12 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S Impervious Blanket 12H) พบว่า มีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 540,428 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถปรับปรุงฐานรากได้ร้อยละ 33.28

5) กรณีการปรับปรุงฐานรากโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน/ของผสม (Cement grouting) ลงไปในชั้นฐานรากหิน พบว่ามีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 387,744 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถปรับปรุงฐานรากได้ร้อยละ 53.73

จากผลการวิเคราะห์ค่า Hydraulic gradient และค่า Velocity บริเวณจุด A และ B พบว่า

- วิธีการปรับปรุงฐานราก โดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full Cutoff Trench) และบดอัดด้วยชั้นดินทึบน้ำ พบว่า มีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic gradient มากกว่า 0.25 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- วิธีการปรับปรุงฐานรากโดยวิธีบดอัดและปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 6 เท่าและ 12 เท่าของความสูงเขื่อน พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic Gradient มากกว่า 0.25 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- วิธีการปรับปรุงฐานรากโดยวิธีการอัดฉีดของน้ำปูน/ของผสม (Cement grouting) ลงไปในชั้นฐานรากหิน พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic gradient น้อยกว่า 0.25 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยโดยไม่มีโอกาสเกิดการกัดพา

จากผลการวิเคราะห์นำมาพิจารณา และกำหนดวิธีปรับปรุงฐานราก 2 วิธีประกอบกัน ได้แก่ วิธี Full cutoff trench ในชั้นฐานรากดิน และ Cement grouting สำหรับชั้นฐานรากหิน มีรายละเอียด ดังนี้

1) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน และป้องกันและลดการรั่วซึมของน้ำ เพิ่มความมั่นคงและลดการทรุดตัวในชั้นดินฐานราก การออกแบบปรับปรุงฐานรากจึงได้กำหนดวิธี Cutoff โดยการขุดลอกลงไปจนถึงชั้นดินทึบน้ำที่มีความแน่นหรือชั้นหินแกร่ง (Sound rock) หรือถึงก้นร่องแกนตามที่แบบกำหนด แล้วบดอัดด้วยดินทึบน้ำ (Full cutoff trench)

2) เพื่อลดการทรุดตัวภายใต้น้ำหนักกดทับและป้องกันไม่ให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน รวมทั้งปิดกั้นและลดการรั่วซึมผ่านชั้นฐานรากหิน ที่มีแนวแตก (Joints) และรอยแตก (Opened cracks) รวมทั้งช่องว่างของระนาบชั้นหิน (Bedding plane) การออกแบบได้เลือกใช้วิธีการ Cement grouting ประกอบด้วย Curtain grouting Blanket grouting และ Consolidation grouting ลงในชั้นหินฐานราก โดยกำหนดวิธีการทำ Cement grouting เนื่องจากสภาพธรณีวิทยาของชั้นหินฐานรากมีขนาดของแนวแตก รอยแตกมีขนาดใหญ่ที่อนุภาคของซีเมนต์หรือน้ำปูนที่มีความเข้มข้นสามารถแทรกเข้าไปอุดช่องว่างภายในรอยแตกได้ และเป็นวิธีการที่สะดวก รวดเร็ว ราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ รวมทั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทำงานไม่มีความยุ่งยาก

3) ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของเขื่อนจากโอกาสการเกิดการกัดพา (Piping) ภายหลังการปรับปรุงฐานรากชั้นดินโดยการทำ Full cutoff trench และการปรับปรุงฐานรากหินด้วยวิธี Cement grouting โดยพิจารณาจากค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณจุดก่อนที่น้ำไหลเข้า Filter และบริเวณจุด Toe drain พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic gradient น้อยกว่า 0.25 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยไม่มีโอกาสเกิด Piping

4) แปลน และรูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดินของโครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี หมายเลขแบบ สสธ.-ส.7-0322 แสดงใน **ภาคผนวก ก**

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณจากจุด A ไปจุด B

Analysis method case	Velocity (m/sec)		Hydraulic gradient		Seepage through dam & foundation (m^3/sec/m)	Seepage through foundation (m^3/sec/m)	% Foundation improved	Seepage/year (m^3/year)
	Point A	Point B	Point A	Point B				
<u>Section กม 0+250</u>								
1. No foundation improvement	7.93E-06	8.74E-06	0.40	0.44	2.76E-05	2.68E-05		790,505
2. Full cutoff	5.09E-06	6.86E-06	0.25	0.34	2.20E-05	2.09E-05	21.78	628,354
3. Full cutoff & U/S impervious blanket 6H	4.35E-06	5.88E-06	0.22	0.29	1.90E-05	1.80E-05	32.73	544,718
4. Full cutoff & U/S impervious blanket 12H	4.13E-06	5.83E-06	0.21	0.29	1.89E-05	1.79E-05	33.28	540,428
5. Full cutoff & grouting	2.81E-06	4.07E-06	0.14	0.20	1.36E-05	1.24E-05	53.73	387,744

$$\% \text{ Foundation Improved*} = \frac{(\text{Seepage through foundation case 1}) - (\text{Seepage through foundation Case 2,...,5})}{(\text{Seepage through foundation case 1})} \times 100$$

4.2 การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อนโครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร

4.2.1 เรื่องเดิม

ฝ่ายออกแบบเขื่อนที่ 1 สำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม ได้ขอความอนุเคราะห์ให้ส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา ช่วยดำเนินการพิจารณาออกแบบปรับปรุงฐานรากตามแนวศูนย์กลางเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร ตามหนังสือ ฝ่ายออกแบบเขื่อนที่1 ส่วนออกแบบเขื่อน สำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม ที่ สอส (อข.1) 07/051/2563 ลงวันที่ 26 พฤษภาคม 2563 เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ออกแบบปรับปรุงฐานรากโครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร

4.2.2 รายละเอียดโครงการ

จากรายงานการสำรวจธรณีวิทยาฐานรากโครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร

ประเภทโครงการเขื่อนดิน อ่างเก็บน้ำ Zone earth dam

ที่ตั้งโครงการ เส้นรุ้งที่ 16° 06′ 55.49′′ เหนือ เส้นแวงที่ 99° 17′ 59.89′′ ตะวันออก

พื้นที่ลุ่มน้ำ	16.94	ตารางกิโลเมตร
ความยาวลำน้ำ (สายหลัก)	5.65	กิโลเมตร
ความยาวลำน้ำสายหลักจากจุดศูนย์ถ่วงของลุ่มน้ำ	3.06	กิโลเมตร
ความลาดเทลำน้ำเฉลี่ย	1:24	
ปริมาณฝนเฉลี่ยรายปี	1,302.60	มิลลิเมตร
ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปี	11,810,000	ลูกบาศก์เมตร
อัตราการกัดเซาะของลำน้ำโดยเฉลี่ย	0.10	มิลลิเมตร/ปี
ปริมาณตะกอนเฉลี่ยรายปี	1,694.00	ลูกบาศก์เมตร
ระดับเก็บกัก	+183.00	เมตร (ร.ท.ก.)
ระดับเก็บกักต่ำสุด	+160.00	เมตร (ร.ท.ก.)
ความจุอ่างฯ ที่ระดับเก็บกัก	13,190,000	ลูกบาศก์เมตร

4.2.3 สภาพธรณีวิทยาทั่วไป

สภาพธรณีวิทยาทั่วไป โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร จากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย (Changwat Phitsanulok) มาตราส่วน 1:250,000 พบว่าบริเวณพื้นที่โครงการฯ และพื้นที่โดยรอบ ประกอบด้วย ชุดตะกอน 2 ชุด และชุดหิน 2 ชุด เรียงลำดับอายุจากแก่ไปอ่อน ได้ดังนี้

1) ชุดหิน PE มหายุคพรีแคมเบรียน (Precambrian Era) เป็นหินแปรเชิงซ้อน ประกอบด้วย หินออเกนไนส์ (Augen gneiss) หินแกรนิตไนส์ (Granite gneiss) หินไบโอไทต์-ไมโครไคลน์ไนส์ (Biotite-microcline gneiss) หินควอตซ์-เฟลด์สปาร์ไนส์ (Quartz-feldspathic gneiss) หินไบโอไทต์ชีสต์ (Biotite schist) หินควอร์ตไซต์แสดงลักษณะเป็นชั้น (Banded quartzite) หินแคลก์-ซิลิเกต (Calc-silicate rock) และหินอ่อน (Marble)

2) ชุดหิน gr มหายุคมีโซโซอิก (Mesozoic Era) ประกอบด้วย หินแกรโนไดโอไรต์ (Granodiorite) หินไดโอไรต์ (Diorite) บริเวณชายขอบพนังหินพบเป็นอัคนีประเภท หินแอนดีไซต์ (Andesite) หินไรโอไลต์ (Rhyolite) หินมัสโคไวต์-ฮอร์นเบลนด์แกรนิต (Muscovite-hornblende granite) หินส่วนใหญ่ที่พบกระจายตัวในบริเวณอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาว เป็นหินแกรนิต และหินไนส์สิกแกรนิต

3) ชุดตะกอน Q1 ยุคควอเทอร์นารี (Quaternary Period) ดินตะกอนตะพักลำน้ำ ประกอบด้วย กรวด (Gravel) ทราย (Sand) และ ทรายแป้ง (Silt) ส่วนใหญ่พบบริเวณลำน้ำคลองน้ำขาว

4) ชุดตะกอน Q ยุคควอเทอร์นารี (Quaternary Period) ดินตะกอนน้ำพา ประกอบด้วย ทราย (Sand) ทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) ส่วนใหญ่พบบริเวณลำน้ำคลองน้ำขาว

พื้นที่อ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาว ประกอบด้วยชั้นดินที่เกิดจากการผุสลายตัวของหินในพื้นที่ มีความหนาค่อนข้างมาก ดินที่กระจายตัวในพื้นที่ประกอบด้วย SM และ GM พบหินก้อนมนเล็กถึงขนาดใหญ่ และหินลอย (Float rock) กระจายตัวอยู่บริเวณเนินเขาและที่ลาดเนินเขา ดินบริเวณที่ราบน้ำท่วมถึงและตามลำน้ำคลองน้ำขาว เป็นดินที่ถูกทางน้ำพัดพามาตกตะกอน (Stream deposit) ประกอบด้วย ดินทรายแป้ง ดินทราย ก้อนกรวด (Gravel) ก้อนหินมนเล็ก (Cobble) และก้อนหินมนใหญ่ (Boulder) หินโผล่ที่พบเป็นหินแกรนิต และหินไนส์สิกแกรนิต สีน้ำตาล สีน้ำตาลอมเทา สีเขียวอมเทา สีเทาขาว ถึงสีเทา กระจายตัวตามบริเวณลำห้วยขนาดเล็ก บริเวณฐานยันฝั่งซ้าย และบริเวณลำน้ำคลองน้ำขาว ชั้นหินฐานรากบริเวณฐานยันทั้งสองข้างมีแนวแตกหลัก 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ส่วนใหญ่มีลักษณะตัดกันของแนวแตกด้วยมุมเอียงเทค่อนข้างดิ่ง มีการเรียงตัวของแร่ที่เป็นแผ่นไมกา (Mica) ในหินไนส์สิกแกรนิต อาจส่งผลให้เกิดมวลหินมีความเปราะบาง (Weak) กลายเป็นแนวแตก

โครงสร้างของชั้นหินในบริเวณโครงการค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยาก เนื่องจากมีชั้นดินปกคลุมหนา และมวลหินในพื้นที่เกิดจากการแทรกดันตัวของมวลหินแกรนิต (หินอัคนีแทรกซอน) ทั่วบริเวณพื้นที่โครงการ ตามแนวลำห้วยขนาดเล็ก ทางด้านทิศใต้ของฐานยันฝั่งซ้าย พบเป็นหินแกรนิตสีขาว และในบางบริเวณพบเป็นหินไนส์สิกแกรนิต แสดงลักษณะการเรียงชั้นของเม็ดเป็นแถบแร่สีขาวและสีดำเรียงตัวเป็นแถบ (Foliation) มีทิศทางในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และบริเวณฐานยันฝั่งขวา พบหินโผล่ตามลำน้ำคลองน้ำขาวส่วนใหญ่เป็นหินแกรนิต แต่ในบางบริเวณพบเป็นหินไนส์สิกแกรนิต มีลักษณะการเรียงชั้นของเม็ดแร่เช่นเดียวกับบริเวณฐานยันฝั่งซ้าย แนวสันเขาของฐานยันเขื่อนทั้งสองฝั่งวางตัวในแนวทิศเหนือ-ใต้

ทิศทางของแนวแตก (Joint) ในชั้นหินมีอยู่ 2 ทิศทางหลัก ได้แก่ ทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) และทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ซึ่งมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการวางตัวของรอยเลื่อนขนาดเล็กใกล้กับพื้นที่โครงการ และเมื่อจำแนกการวางตัวของแนวแตก (Joint) ด้วยทิศทางของแนวการเอียงเทของชั้นหิน (Dip direction/dip) สามารถจำแนก ได้ 3 ทิศทาง หรือ 3 กลุ่ม ได้แก่ ทิศทางตะวันออกเฉียงใต้ (SE) ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ได้แก่ 147/14, 353/77 และ 225/66

รอยเลื่อน (Fault) จากแผนที่ธรณีวิทยาและการเดินสำรวจในภาคสนาม ไม่พบโครงสร้างรอยเลื่อนในบริเวณพื้นที่โครงการ นอกจากนี้ เมื่อศึกษาข้อมูลแผนที่แสดงแนวรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย จัดทำโดยกรมทรัพยากรธรณี (2555) พบว่าจังหวัดกำแพงเพชรมีกลุ่มรอยเลื่อนที่พาดผ่านคือ กลุ่มรอยเลื่อนเมย ซึ่งเป็นรอยเลื่อนที่มีจุดเริ่มต้นในประเทศพม่าพาดผ่านบริเวณลำน้ำเมยที่บ้านท่าสองยาง อำเภอท่าสองยาง จังหวัดตาก และสิ้นสุดในเขตพื้นที่อำเภอโกสัมพี จังหวัดกำแพงเพชร มีความยาวประมาณ 230 กิโลเมตร ในทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ โดยกลุ่มรอยเลื่อนมีระยะห่างจากพื้นที่โครงการไปทางทิศเหนือประมาณ 70-80 กิโลเมตร

4.2.4. สภาพธรณีวิทยาฐานราก

ข้อมูลจากการรายงานการสำรวจสภาพธรณีวิทยาฐานราก และแบบหลุมเจาะธรณีวิทยาฐานราก รูปตัดธรณีวิทยาฐานรากตามแนวศูนย์กลางเขื่อน หมายเลขแบบ สธว.-กส.648-649 โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร (ส่วนธรณีวิทยา, 2562) จำนวน 12 หลุม รวมความลึกที่ทำการสำรวจ 216 เมตร ผลสำรวจ แสดงรายละเอียด ดังนี้

1) ชั้นฐานรากดิน

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งขวา (หลุมเจาะ DH.1 ถึง DH.4) เป็นดินกลุ่ม Silty sand (SM) และ Silty gravel with sand (GM) ชั้นดินมีความหนา 2.03-6.70 เมตร ค่า Relative density ของชั้นดินช่วงบนอยู่ในช่วง Medium dense และเพิ่มขึ้นจนถึงเกณฑ์ Very dense ในช่วงที่ลึกลงไป ค่าตอกทดลอง (SPT) มีค่า 14 ถึง >50 โดยทั่วไปเป็นชั้นดินที่สามารถรับน้ำหนักได้ดี ค่าการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินมีค่าอยู่ในเกณฑ์สูงถึงสูงมาก (1.85×10^{-4}- 5.91×10^{-2} cm/sec)

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณลำน้ำ (หลุมเจาะ DH.6) เป็นดินกลุ่ม Silty sand (SM) และ Silty gravel with sand (GM) ชั้นดินมีความหนา 2.91 เมตร เกิดจากการผุสลายของชั้นหินแกรนิตที่เป็นหินฐานราก ค่า Relative density ของชั้นดินช่วงบนอยู่ในช่วง Loose และเพิ่มขึ้นจนถึงเกณฑ์ Very dense ในช่วงที่ลึกลงไป ค่าตอกทดลอง (SPT) มีค่า 7 ถึง >10/0 ค่าการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินมีค่าอยู่ในเกณฑ์สูงมาก (6.28×10^{-3}- 1.82×10^{-2}cm/sec)

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งซ้าย (หลุมเจาะ DH.7 ถึง DH.12) ส่วนใหญ่เป็นดินกลุ่ม Silty sand (SM) พบ Clayey sand (SC) Clayey sand with gravel (SC) ในช่วงบนของหลุมเจาะ DH.8 และ DH.9 ชั้นดินมีความหนาอยู่ในช่วง 3.00- 6.65 เมตร ยกเว้นที่หลุมเจาะ DH.8 ที่มีชั้นดินหนามากถึง 31.06 เมตร และหลุม DH.9 ที่มีชั้นดินหนา 10.67 เมตร ค่า Relative density ของชั้นดินช่วงบนอยู่ในช่วง Loose และเพิ่มขึ้นจนถึงเกณฑ์ Very dense ในช่วงที่ลึกลงไป ค่าตอกทดลอง (SPT) มีค่า 8 ถึง >10/0 ค่าการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินมีค่าอยู่ในเกณฑ์สูงถึงสูงมาก (2.17×10^{-4}- 5.08×10^{-3}cm/sec)

2) ชั้นฐานรากหิน

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งขวา พบชั้นหินฐานรากเป็นหินแกรนิต (Granite) และหินไนส์สิกแกรนิต (Gneissic granite) มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูง (Slightly to highly weathered rock) สลับกันตลอดทั้งความลึก ความแข็งของหินอยู่ในช่วงแข็งปานกลางถึงแข็งมาก (Medium hard to hard rock) ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกัน โดยมีค่า

อยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูงมาก (Very poor to very good rock) มีค่าการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินฐานรากอยู่ในเกณฑ์ช่วงตั้งแต่ต่ำถึงสูง (1.90-38.65 Lugeon)

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณลำน้ำ พบชั้นหินฐานรากเป็นหินแกรนิต (Granite) และหินไนส์สิกแกรนิต (Gneissic granite) มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูง (Slightly to highly weathered rock) สลับกันตลอดทั้งความลึก ความแข็งของหินอยู่ในช่วงแข็งถึงแข็งมาก (Hard to very hard rock) ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูงมาก (Very poor to very good rock) มีค่าการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินฐานรากอยู่ในช่วงตั้งแต่ต่ำถึงสูง (4.37-24.92 Lugeon)

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งซ้าย พบชั้นหินฐานรากเป็นหินแกรนิต (Granite) และหินไนส์สิกแกรนิต (Gneissic granite) ยกเว้นบริเวณหลุมเจาะ DH.9 พบหินฐานรากเป็นหินทราย (Sandstone) และหินปูน (Limestone) ความลึกของชั้นหินฐานรากโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3.00-6.00 เมตร แต่ในบริเวณหลุมเจาะ DH.8 มีความลึกมากถึง 31.06 เมตร แตกต่างจากบริเวณอื่นๆ ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างที่เป็นรอยเลื่อน (Fault) ทำให้บริเวณนี้มีชั้นดินฐานรากหนากว่างบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง อัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูง (Slightly to highly weathered rock) สลับกันตลอดทั้งความลึก ความแข็งของหินอยู่ในช่วงแข็งปานกลางถึงแข็งมาก (Medium hard to very hard rock) ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกันโดยมีค่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูงมาก (Poor to very good rock) มีค่าการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินฐานรากอยู่ในช่วงตั้งแต่ต่ำถึงสูงมาก (1.76-57.64 Lugeon)

4.2.5 วิเคราะห์สภาพฐานรากเขื่อน

ชนิดของฐานรากเขื่อนเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1) ฐานรากดิน เป็นดินกลุ่ม Silty sand (SM) พบ Silty gravel with sand (GM) แทรกสลับอยู่บริเวณช่วงบน โดยทั่วไปฐานรากดินมีความหนาอยู่ในช่วง 2.91 -6.70 เมตร ยกเว้นบริเวณหลุมเจาะ DH.8 เป็นดินกลุ่ม Silty sand (SM) มีความหนาของชั้นดิน 31.06 เมตร ค่าตอกทดลองแสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักค่อนข้างดี แต่มีค่าการรั่วซึมสูงถึงสูงมาก

2) ฐานรากหิน พบชั้นหินฐานรากเป็นหินแกรนิต (Granite) และหินไนส์สิกแกรนิต มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูง (Slightly to highly weathered rock) สลับกันตลอดทั้งความลึก ความแข็งของหินอยู่ในช่วงแข็งปานกลางถึงแข็งมาก (Medium hard to very hard rock) ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกันโดยมีค่าต่ำถึงสูงมาก (Very poor to very good rock) มีค่าการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินฐานรากสูงถึงสูงมาก

ฐานรากหินบริเวณหลุมเจาะ DH.8 อยู่ที่ระดับความลึก 31.06 เมตรแตกต่างจากบริเวณใกล้เคียงประกอบกับบริเวณหลุมเจาะ DH.9 ซึ่งอยู่ห่างกัน 50 เมตร พบชั้นหินฐานรากเป็นหินทรายและหินปูน ที่ระดับความลึก 10.67 เมตร เป็นผลมาจากโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่เป็นรอยเลื่อน และหินมีการแตกหักสูง รวมทั้งมีอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นฐานรากหินสูงมาก

4.2.6 การวิเคราะห์ปริมาณการไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำซึมผ่านฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร โดยใช้โปรแกรม SEEP/W ของบริษัท GEO-SLOPE ประเทศแคนาดา มีวัตถุประสงค์ และรายละเอียด ดังนี้

- ประเมินปริมาณน้ำรั่วซึมผ่านเขื่อนและฐานรากในสภาพปกติก่อนการออกแบบปรับปรุงฐานราก สำหรับเป็นข้อมูลในการประเมินปัญหาการรั่วซึมผ่านเขื่อนและฐานรากว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยและยอมรับได้หรือไม่ ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านฐานราก เพื่อประเมินจากข้อมูลปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 11.81 ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี ปริมาณน้ำที่ต้องการเก็บกัก ณ ความจุที่ระดับเก็บกักประมาณ 13.190 ล้านลูกบาศก์เมตร ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานรากแล้ว พบว่าปริมาณน้ำส่วนใหญ่จะไหลซึมผ่านฐานรากมากกว่าตัวเขื่อน ปริมาณการไหลซึมประมาณ 1,028,373 ลูกบาศก์เมตร/ปี คิดเป็นร้อยละ 7.85 ของปริมาณความจุอ่างที่ระดับเก็บกัก และคิดเป็นร้อยละ 8.70 ของปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างต่อปี ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงใน**ตารางที่ 4-3**

- เพื่อวิเคราะห์โอกาสการเกิดการกัดพาของน้ำบริเวณท้ายเขื่อนของสมมติฐานในการออกแบบของแต่ละกรณี (Scenarios) ซึ่งอาจทำให้เกิดการพิบัติของเขื่อน รวมทั้งเพื่อต้องการทราบพฤติกรรมของการไหลของน้ำได้ชัดเจน ซึ่งพิจารณาจากค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีแรงกระทำของน้ำต่อมวลดินค่อนข้างสูง โดยค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient ที่ไม่ทำให้เกิดโอกาสการกัดพา โดยต้องพิจารณาค่า Velocity บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.01 m/sec และ ค่า Hydraulic gradient (จุด A) จากตำแหน่งก่อนเข้า Filter ไปยังตำแหน่ง Toe drain (จุด B) ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.25 (โดยเฉพาะตำแหน่ง Toe drain เมื่อกำหนดค่า Factor of safty ของเขื่อนโดยทั่วไป เท่ากับ 4)

- ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน**ตารางที่ 4-3** แสดงพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อนโดยค่า Hydraulic gradient บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) มีค่า 0.5 และ 1.08 ซึ่งมีค่าเกิน 0.25 ซึ่งแสดงว่ามีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic Gradient บริเวณก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B)

Analysis method case	Velocity (m/sec)		Hydraulic gradient		Seepage through dam & foundation (m^3/sec/m)	Seepage through foundation (m^3/sec/m)	Seepage/year (m^3/year)
	Point A	Point B	Point A	Point B			
1. No foundation improvement	4.88E-06	1.05E-05	0.50	1.08	5.39E-05	5.28E-05	1,028,373

4.2.7 ประเมินปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อนและฐานราก

เขื่อนมีความสูง 20.00 เมตร และจากสภาพของฐานรากตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถที่จะประเมินปัญหาที่จะเกิดกับฐานราก ได้ดังนี้

1) ชั้นดินฐานรากบริเวณ กม.0+000 ถึง กม. 0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 ชั้นดินฐานรากมีความหนา 2.0-7.0 เมตร สามารถขุดเปิดร่องแกนจนถึงชั้นฐานรากหินแล้วบดอัดด้วยดินทึบน้ำ (Full cutoff trench) ได้ แต่ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 ชั้นดินฐานรากมีความหนามากถึง 31.06 เมตร มีค่าการรั่วซึมสูง (ตามแบบรูปตัดตามยาวทำนบดินหมายเลขแบบ 291682) วิศวกรผู้ออกแบบไม่สามารถใช้วิธีขุดเปิดร่องแกนจนถึงชั้นหินฐานรากที่ระดับ +130.0 เมตรได้ จึงใช้วิธีการขุดเปิดร่องแกนเพียงบางส่วน (Partial cutoff) ถึงระดับ +150.0 เมตร ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) และการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นฐานรากดินบริเวณนี้

2) ชั้นฐานดินรากดังกล่าวมีการทรุดตัวภายใต้น้ำหนักที่กดทับของเขื่อนและน้ำที่กักเก็บ (Settlement under deformation) และเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential settlement)

3) การไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อนโดยพิจารณาค่า Hydraulic gradient บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) มีค่า 0.5 และ 1.08 ซึ่งมีค่าเกิน 0.25 ประกอบกับฐานรากดินและฐานรากหินที่มีค่าการรั่วซึมสูงโดยคิดเป็นปริมาณการไหลรั่วซึมผ่านฐานรากเขื่อน 1,028,373 ลูกบาศก์เมตร/ปี ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการทรุดตัวอันเนื่องมาจากการไหลของน้ำผ่านฐานรากแล้วพัดพาดินหรือหินฐานรากออกไปทำให้เกิดโพรงภายในฐานราก (Collapse due to seepage) หรือที่เรียกว่าการกัดพา (Piping)

4.2.8 กำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำซึมผ่านเขื่อนและฐานราก และพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านเขื่อนจากค่า Hydraulic properties โดยพิจารณาจากข้อมูลตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.2.1 ถึง 4.2.7 ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อนและฐานรากได้กำหนดแนวความคิด (Conceptual) วิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนของโครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร ที่เหมาะสมกับสภาพธรณีวิทยาฐานราก โดยตั้งสมมติฐานวิธีการออกแบบที่เป็นไปได้ 5 กรณี (โดยใช้โปรแกรม SEEP/W) โดยแบ่งพื้นที่การวิเคราะห์เป็น 2 section ได้แก่ กม.0+260 (เป็นตัวแทนพื้นที่ตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อนยกเว้น กม.0+330 ถึง กม.0+456) และ กม.0+370 (เป็นตัวแทน กม.0+330 ถึง กม.0+456) การวิเคราะห์ปริมาณน้ำซึมผ่านเขื่อนและฐานราก และวิเคราะห์โอกาสการเกิดการกัดพาของน้ำบริเวณท้ายเขื่อน มีรายละเอียด ดังนี้

1) กรณีไม่ทำการปรับปรุงฐานราก

2) กรณีทำ Full cutoff trench ชั้นฐานรากดิน กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และ Partial cutoff trench ชั้นฐานรากดิน ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456

3) กรณีทำ Full cutoff trench ชั้นฐานรากดิน กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และ Partial cutoff trench ชั้นฐานรากดิน ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 & ปู Upstream impervious blanket 6H

4) กรณีทำ Full cutoff trench ชั้นฐานรากดิน กม.0+000 ถึง กม. 0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และ Partial cutoff trench ชั้นฐานรากดิน ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 & ปู Upstream impervious blanket 12H

5) กรณีทำ Full cutoff trench ชั้นฐานรากดิน กม.0+000 ถึง กม. 0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 & Grouting ชั้นฐานรากหิน (Cement grouting) และ Partial cutoff trench ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 & Grouting ชั้นฐานรากดิน (Chemical grouting)

ผลการวิเคราะห์แสดงใน**ตารางที่ 4-4** เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลวิเคราะห์แล้ว จึงพิจารณาเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุดอีกครั้ง

สมมติฐานในกรณีปรับปรุงฐานรากแบบต่าง ๆ ที่เป็นได้ทั้ง 5 กรณี พบว่า

1) กรณีการไม่ทำการปรับปรุงฐานราก (No Foundation Improvement) พบว่ามีน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก ประมาณ 1,028,373 ลูกบาศก์เมตร/ปี (คิดเป็นร้อยละ 7.85 ของปริมาณความจุอ่างที่ระดับเก็บกัก และคิดเป็นร้อยละ 8.70 ของปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างต่อปี)

2) กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) กม.0+000 ถึง กม. 0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 พบว่ามีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 984,491 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถลดการรั่วซึมของน้ำลดลงร้อยละ 4.36

3) กรณีการปรับปรุงฐานรากดิน โดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) กม.0+000 ถึง กม. 0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม. 0+456 และปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 6 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S Impervious Blanket 6H) พบว่ามีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 828,041 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถปรับปรุงฐานรากได้ร้อยละ 20.08

4) กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) กม.0+000 ถึง กม. 0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 และปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 12 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S Impervious Blanket 12H) พบว่ามีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 810,869 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถปรับปรุงฐานรากได้ร้อยละ 21.78

5) กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) กม.0+000 ถึง กม. 0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และวิธีการอัดฉีดน้ำปูน/ของผสม (Cement grouting) ลงไปในชั้นฐานรากหิน และขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 และวิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) ลงไปในชั้นฐานรากดิน พบว่า มีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 178,391 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถปรับปรุงฐานรากได้ร้อยละ 85.11

จากผลการวิเคราะห์ค่า Hydraulic Gradient และค่า Velocity บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) แล้วพบว่า

- กรณีการไม่ทำการปรับปรุงฐานราก (No Foundation Improvement) พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic Gradient มากกว่า 0.25 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- วิธีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic Gradient มากกว่า 0.25 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- วิธีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 และปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 6 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S Impervious Blanket 6H) พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic Gradient มากกว่า 0.25 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- วิธีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 และปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 12 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S Impervious Blanket 12H) พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic Gradient มากกว่า 0.25 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- วิธีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 และวิธีการอัดฉีดน้ำปูน/ของผสม (Cement grouting) ลงไปในชั้นฐานรากหิน และขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 และวิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) ลงไปในชั้นฐานรากดิน พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic Gradient น้อยกว่า 0.25 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยโดยไม่มีโอกาสเกิดการกัดพา

ตารางที่ 4-4 แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณจากจุ;ด A ไป จุด B

Analysis method (case)	Velocity (m/sec)		Hydraulic gradient		Seepage through dam &foundation (m^3/sec/m)	Seepage through foundation (m^3/sec/m)	%Foundation improved	Seepage/year (m3/year)
	Point A	Point B	Point A	Point B				
1. No Foundation improvement	4.88E-06	1.05E-05	0.50	1.08	5.39E-05	5.28E-05		1,028,373
2. Full cutoff กม.0+000 ถึง กม. 0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 Partial cutoff กม.0+330 ถึง กม.0+456	3.93E-06	1.01E-05	0.40	1.04	5.16E-05	5.05E-05	4.36	984,491
3. Full cutoff กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม. 0+456 ถึง กม.0+605 Partial cutoff กม.0+330 ถึง กม.0+456 & U/S Impervious Blanket 6H	3.25E-06	8.52E-06	0.33	0.87	4.34E-05	4.22E-05	20.08	828,041
4. Full cutoff กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 Partial cutoff กม.0+330 ถึง กม.0+456 & U/S Impervious Blanket 12H	3.17E-06	8.33E-06	0.32	0.85	4.25E-05	4.13E-05	21.78	810,869
5. Full cutoff กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม.0+456 ถึง กม. 0+605 & Cement grouting Partial cutoff กม.0+330 ถึง กม.0+456 & Chemical grouting	4.50E-07	1.88E-06	0.05	0.19	9.35E-06	7.86E-06	85.11	178,391

$$\%\ \text{Foundation improved}^* = \frac{(\text{Seepage through foundation case 1}) - (\text{Seepage through foundation case 2,...,5})}{(\text{Seepage through foundation case 1})} \times 100$$

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น จึงได้กำหนดวิธีปรับปรุงฐานราก โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1) เพื่อป้องกันและลดการรั่วซึมของน้ำ เพิ่มความมั่นคง ความสามารถในการรับแรงเฉือนและลดการทรุดตัวในชั้นดินฐานราก การออกแบบปรับปรุงชั้นฐานรากดินได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 บริเวณ ได้แก่

- บริเวณ กม.0+000 ถึง กม.0+330 และ กม.0+456 ถึง กม.0+605 ใช้วิธีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีการขุดลอกร่องแกนลงไปถึงชั้นหินฐานรากหรือถึงก้นร่องแกนตามที่แบบกำหนดแล้วบดอัดด้วยดินทึบน้ำตลอดแนว (Full cutoff trench)

- ช่วงบริเวณ กม.0+330 ถึง กม.0+456 ใช้วิธีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีการขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน แล้วบดอัดด้วยดินทึบน้ำ (Partial cutoff trench) และใช้วิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) ลงไปในชั้นฐานรากดิน

2) เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นฐานรากดิน ในช่วง กม.0+330 ถึง กม.0+456 ที่มีความหนามากถึง 31.06 เมตร ได้กำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากโดยวิธี Chemical grouting ชนิด Sleeve grout pipe เนื่องจากสภาพดินบริเวณดังกล่าวเป็นกลุ่มดิน Silty sand (SM) ดินส่วนใหญ่มีความแน่นดินมีขนาดละเอียด มีขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนดินขนาดเล็ก ไม่สามารถทำการอัดฉีดด้วย Cement grouting ได้เนื่องจากอนุภาคของ Cement ไม่สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ รวมทั้งไม่สามารถใช้วิธีการปรับปรุงฐานรากโดยวิธีการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำโดยวิธี Slurry trench เนื่องจากชั้นดินมีความหนามากถึง 31.06 เมตร ในช่วงระยะทางตามแนวศูนย์กลางเขื่อนประมาณ 80 เมตร ซึ่งมีความลึกเกินศักยภาพของเครื่องจักรใช้ขุดร่องที่เป็น Back hole

3) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน และปิดกั้นและลดการรั่วซึมผ่านชั้นฐานรากหินที่มีการผุพังและรอยแตก (Opened cracks) ของหินแกรนิต การออกแบบได้เลือกใช้วิธีการ Cement grouting ประกอบด้วย Curtain grout และ Blanket grout ลงในชั้นหินฐานราก โดยการ Grouting 5 Lugeon โดยกำหนดวิธีการทำ Cement grouting เนื่องจากสภาพธรณีวิทยาของชั้นหินฐานรากมีขนาดของรอยแตกมีขนาดใหญ่พอที่อนุภาคของซีเมนต์หรือน้ำปูนที่มีความเข้มข้นสามารถแทรกเข้าไปอุดช่องว่างภายในรอยแตกได้ และเป็นวิธีการที่สะดวก รวดเร็ว ราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ รวมทั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทำงานไม่มีความยุ่งยาก

4) ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของเขื่อนจากโอกาสการเกิดการกัดพา (Piping) ภายหลังการปรับปรุงฐานรากดินด้วยวิธี Partial cutoff trench และวิธี Chemical grouting และการปรับปรุงฐานรากหินด้วยวิธี Cement grouting โดยพิจารณาจากค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณจุดก่อนที่น้ำไหลเข้า Filter และบริเวณจุด Toe drain พบว่า มีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic gradient น้อยกว่า 0.25 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยไม่มีโอกาสเกิด Piping

แปลน และรูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดินของโครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร แสดงใน**ภาคผนวก ข**

4.3 การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อนโครงการอ่างเก็บน้ำลำพระยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา

4.3.1 เรื่องเดิม

กองพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลาง ส่วนวิศวกรรม ได้ขอความอนุเคราะห์ให้ส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา ดำเนินการออกแบบรายละเอียดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดินและจัดทำเงื่อนไขข้อกำหนดรายการ รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) พร้อมคำนวณปริมาณงานราคางานปรับปรุงฐานราก โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา ตามหนังสือที่ กพก. 1082/2562 ลงวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2564

4.3.2 รายละเอียดโครงการ

รายงานการศึกษาวางโครงการ (Pre-feasibility report) โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยา อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมืองยะลา จังหวัดยะลา NO. PR. – G4 – B24– 002 –15/62 ส่วนวางโครงการที่ 4 สำนักบริหารโครงการ ตุลาคม, 2562

ที่ตั้ง หมู่ที่ 6 บ้านทองล้น ตำบลลำพะยา อำเภอเมืองยะลา จังหวัดยะลา

Latitude	06 35’ 08’’	เหนือ
Longitude	101 08’ 34’’	ตะวันออก

พิกัดตามแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 ระวางหมายเลข 5222 III 47 NQH 736950E 728450N

ประเภทโครงการ	อ่างเก็บน้ำ	
พื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ	20.41	ตารางกิโลเมตร
ความยาวลำน้ำ (สายหลัก)	7.84	กิโลเมตร
ความลาดเทลำน้ำเฉลี่ย	1 : 31	
ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี	1,816	มิลลิเมตร
ปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ ในเกณฑ์เฉลี่ย	16,090,000	ลูกบาศก์เมตร/ปี
อัตราการกัดเซาะของลำน้ำโดยเฉลี่ย	0.14	มิลลิเมตรต่อปี
ปริมาณตะกอนเฉลี่ยรายปี	2,761	ลูกบาศก์เมตร
ความจุอ่างฯ ที่ระดับ Dead Storage	300,000	ลูกบาศก์เมตร
ความจุอ่างฯ ที่ระดับเก็บกัก	13,000,000	ลูกบาศก์เมตร
ความจุที่ระดับน้ำนองสูงสุด	15,000,000	ลูกบาศก์เมตร
ระดับท้องน้ำ	+46.380	เมตร (ร.ท.ก.)
ระดับ Dead Storage	+53.500	เมตร (ร.ท.ก.)
ระดับเก็บกัก	+76.500	เมตร (ร.ท.ก.)
ระดับน้ำนองสูงสุด	+78.270	เมตร (ร.ท.ก.)
ระดับสันทำนบ	+79.800	เมตร (ร.ท.ก.)
พื้นที่ผิวอ่างฯ ที่ระดับ Dead Storage	63	ไร่
พื้นที่ผิวอ่างฯ ที่ระดับเก็บกัก	410	ไร่
พื้นที่ผิวอ่างฯ ที่ระดับน้ำนองสูงสุด	470	ไร่
พื้นที่รับประโยชน์ประมาณ	8,100	ไร่
ส่งน้ำสำหรับการอุปโภค-บริโภคได้ประมาณ	990,000	ลูกบาศก์เมตร/ปี

อาคารหัวงาน

ประเภทอาคารหัวงาน	เขื่อนดินแบบ (Zone Type)	
ระดับสันเขื่อน	+79.800	เมตร (ร.ท.ก.)
ความกว้างของสันเขื่อน	8.00	เมตร
ความยาวของสันเขื่อน	1,400	เมตร
ส่วนสูงที่สุด	33.42	เมตร
ลาดตัวเขื่อน ด้านเหนือน้ำ 1 : 3 ด้านท้ายน้ำ 1 : 2.5		
ความกว้างที่สุดของฐานเขื่อนประมาณ	210.00	เมตร
Bedding หนา	0.30	เมตร
Riprap หนา	0.90	เมตร
ปริมาณดินถมตัวทำนบดินประมาณ	1,453,783	ลูกบาศก์เมตร

4.3.3 สภาพธรณีวิทยาทั่วไป

จากการศึกษาข้อมูลพื้นฐานด้านธรณีวิทยาจากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:250,000 จัดทำโดยกรมทรัพยากรธรณี พ.ศ. 2528 ระวาง NB 47 - 8 อำเภอตากใบ จังหวัดนราธิวาส “CHANGWAT NARATHIWAT AND AMPHOE TAKBAI” พบว่าบริเวณพื้นที่โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และพื้นที่ใกล้เคียง ปกคลุมไปด้วยตะกอนยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) รองรับด้วยหินอัคนียุคครีเทเชียส (Cretaceous) และหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous) และยุคเพอร์เมียน (Permian) จากการเรียงลำดับชั้นหินที่พบบริเวณพื้นที่โครงการและพื้นที่ใกล้เคียง สามารถเรียงลำดับจาก ชั้นหินที่มีอายุแก่ไปยังชั้นหินที่มีอายุอ่อนได้ ดังต่อไปนี้

1) ชุดหิน CY: เป็นหินตะกอน (Sedimentary rocks) ยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous) ประกอบด้วย หินดินดาน สีเทาแกมเขียว เป็นชั้นชัดเจน หินทราย สีขาวถึงสีน้ำตาล เนื้อปานกลางถึงเนื้อหยาบ หินดินดานเนื้อซิลิกา หินเชิร์ต หินดินดาน มีชั้นเฉียงระดับ และหินกรวดมน

2) ชุดหิน P: เป็นหินตะกอน (Sedimentary rocks) ยุคเพอร์เมียน (Permian) ประกอบด้วย หินปูนตกผลึกใหม่ สีเทาอ่อนถึงสีขาว มีชั้นหนามากและเป็นชั้นชัดเจน และหินอ่อน

3) ชุดหิน Kgr: เป็นหินอัคนี (Igneous rocks) ยุคครีเทเชียส (Cretaceous) ประกอบด้วย หินแกรนิต หินควอตซ์มอนโซไนต์ หินเพกมาไทต์ หินแอไพลต์ และหินทัวร์มาลีนแกรนิตเนื้อละเอียด

4) ชุดตะกอน Quaternary: เป็นตะกอนอายุควอเทอร์นารี (Quaternary) ประกอบด้วย ตะกอนจำพวกกรวด ทราย ดิน และดินเหนียว ที่ยังไมแข็งตัวกลายเป็นหิน อายุประมาณ 1.8 ล้านปีจนถึงปัจจุบัน กระจายตัวครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกวาง สามารถจำแนกตะกอนรวนในพื้นที่ โดยอาศัยชนิดของตะกอนและสภาวะแวดล้อมของการตกตะกอนได้ ดังนี้

- ตะกอนน้ำพา (Qa) ประกอบดวย กรวด ทราย ทรายแปง และดินเหนียว เกิดจากน้ำพัดพา กรวด หิน ดิน ทราย ไปสะสมตัวอยางไมเปนระบบ มีอิทธิพลของความลาดชันและน้ำผิวดินปะปนบ้าง จึงเกิดตะกอนหลากหลายชนิดปนกัน ลักษณะเปนภูมิประเทศที่ราบริมแมน้ำ พื้นที่ราบนี้มักเปนแหลงสะสมตัวของชั้นทรายแมน้ำ บางแหงสามารถหาแหลงทรายกอสราง และดินเหนียว สำหรับเปนวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา โดยทั่วไปสภาพดินเปนดินรวนที่มีแรธาตุที่จำเปนตอพืชอุดมสมบูรณเหมาะตอการเพาะปลูกมากที่สุด แตเนื่องจากเปนที่ราบจึงมักประสบกับน้ำทวมขังในชวงฤดูฝนเปนประจำ

- ตะกอนตะพักลุ่มน้ำและตะกอนเชิงเขา (Qt) ประกอบด้วย กรวด และทราย เกิดจากแม่น้ำกัดเซาะทางดิ่งมากขึ้นปรากฏเปนภูมิประเทศขั้นบันได ดินมีธาตุอุดมสมบูรณพอสมควรปลูกพืชไดบางชนิด

ส่วนตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนผุพังอยู่กับที่ ประกอบด้วย ทราย ทรายแป้ง ดินลูกรัง และศิลาแลง เกิดจากการผุพังของหินเดิม ตะกอนถูกพัดพาไม่ไกลจึงมักพบตามเชิงเขาหรือขอบแอง

บริเวณพื้นที่โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ พื้นที่โดยทั่วไปปิดทับด้วยชั้นดินจำพวกดิน Silty sand (SM) และ Clayey sand (SC) ส่วนชนิดของชั้นหินฐานรากวางตัวรองรับด้วยชุดหิน Kgr เป็นหินอัคนียุคครีเทเชียส หินชุดนี้ประกอบด้วย หินแกรนิต หินควอตซ์มอนโซไนต์ หินเพกมาไทต์ หินแอไพลต์ และหินทัวร์มาลีนแกรนิตเนื้อละเอียด

4.3.4 สภาพธรณีวิทยาฐานราก

จากรายงานการสำรวจธรณีวิทยาฐานราก โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา ฝ่ายธรณีวิทยาที่ 4 ส่วนธรณีวิทยา สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน, ธันวาคม 2542 (MEMO G. 51/2542) สรุปได้ดังนี้

1) ชั้นฐานรากดิน

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งขวา (หลุมเจาะ DH.10 ถึง DH.14) พบดินกลุ่ม Clayey sand (SC) และ Silty sand (SM) บริเวณหลุมเจาะ DH.10 ชั้นดินมีความหนา 4.50 เมตร ส่วนความหนาของชั้นดินจากหลุมเจาะ DH.11 ถึง DH.14 ชั้นดินมีความหนามาก โดยมีความหนาอยู่ในช่วง 10.00-14.58 เมตร ค่า Relative density ของชั้นดินช่วงบนอยู่ในเกณฑ์ Very loose to loose และเพิ่มขึ้นจนถึงเกณฑ์ Very dense ในช่วงที่ลึกลงไป ค่าตอกทดลอง (SPT) มีค่า 6 ถึง >50 มีค่าการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินมีอยู่ในเกณฑ์สูงถึงสูงมาก (1.12×10^{-4}- 2.39×10^{-2}cm/sec) ยกเว้นหลุมเจาะ DH.14 มีค่าการรั่วซึมสูงในช่วงบนส่วนที่ระดับลึกลงไปเป็นชั้นทึบน้ำ

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณช่วงลำน้ำ (หลุมเจาะ DH.8 และ DH.9) เป็นดินกลุ่ม Silty sand (SM) มีความหนาประมาณ 10.00 เมตร ค่า Relative density ของชั้นดินช่วงบนอยู่ในเกณฑ์ Very loose to loose และเพิ่มขึ้นจนถึงเกณฑ์ Very dense ในช่วงที่ลึกลงไป ค่าตอกทดลอง (SPT) ของชั้นดินช่วงบนมีค่าต่ำ ส่วนที่ระดับความลึกลงไปมีค่าอยู่ในช่วง >50 ค่าการรั่วซึมของชั้นดินช่วงบนมีค่าสูงมาก (1.06×10^{-3}-2.65×10^{-3} cm/sec) ส่วนชั้นดินที่อยู่ลึกลงไปจนถึงชั้นหน้าหินส่วนใหญ่เป็นชั้นทึบน้ำ (Impervious)

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งซ้าย (หลุมเจาะ DH.1 ถึง DH.7) เป็นดินกลุ่ม Silty sand (SM) และ Clayey sand (SC) บริเวณหลุมเจาะ DH.1-DH.4 มีความหนา 13.50- 19.22 เมตร ส่วนบริเวณหลุมเจาะ DH.5 DH.6 และ DH.7 มีความหนาประมาณ 1.70- 8.20 เมตร ค่า Relative density ของชั้นดินช่วงบนอยู่ในเกณฑ์ Very loose to loose และเพิ่มขึ้นจนถึงเกณฑ์ Very dense ในช่วงที่ลึกลงไป ค่าตอกทดลอง (SPT) ของชั้นดินช่วงบนมีค่าต่ำ ส่วนที่ระดับความลึกลงไปมีค่าอยู่ในช่วง >50 ค่าการรั่วซึมของชั้นดินฐานรากในบริเวณนี้อยู่ในเกณฑ์สูงถึงสูงมาก (2.12×10^{-4}-1.71×10^{-2} cm/sec)

2) ชั้นฐานรากหิน

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งขวา พบชั้นหินฐานรากเป็นหินแกรนิต (Granite) มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ช่วงต่ำถึงสูงมาก (Slightly to highly weathered rock) สลับกันตลอดทั้งความลึก ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกันโดยมีค่าปานกลางถึงสูงมาก (Moderately to very good rock) มีค่าการรั่วซึมโดยเฉลี่ยสูงถึงสูงมาก (15.20-113.25 Lugeon)

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณช่วงลำน้ำพบชั้นหินฐานรากเป็นหินแกรนิต (Granite) มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ช่วงต่ำถึงสูงมาก (Slightly to highly weathered rock) สลับกันตลอดทั้งความลึก ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกันโดยมีค่าปานกลางถึงสูงมาก (Moderately to very good rock)

มีค่าการรั่วซึม โดยทั่วไปจะเป็นชั้นทึบน้ำมีบางบริเวณและบางช่วงความลึกที่มีอัตราการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์สูง (10.20-37.90 Lugeon)

- แนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณแนวทำนบฝั่งซ้าย พบชั้นหินฐานรากเป็นหินแกรนิต (Granite) มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ช่วงต่ำถึงสูงมาก (Slightly to highly weathered rock) สลับกันตลอดทั้งความลึก ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกันโดยมีค่าปานกลางถึงสูงมาก (Moderately to very good rock) มีค่าการรั่วซึม โดยทั่วไปจะเป็นชั้นทึบน้ำมีบางบริเวณ และบางช่วงความลึกที่มีอัตราการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงสูง (5.93-32.48 Lugeon)

4.3.5 วิเคราะห์สภาพฐานรากเขื่อน

- ชนิดของฐานรากเขื่อนเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ฐานรากดินและฐานรากหินรวมอยู่ด้วยกัน (แบบรูปตัดตามยาวแนวศูนย์กลางเขื่อน หมายเลขแบบ 196354 แสดง**ภาคผนวก ค**)

- ฐานรากดิน เป็นดินกลุ่ม Clayey sand (SC) และ Silty sand (SM) บริเวณแนวทำนบฝั่งซ้ายและฝั่งขวามีความหนามากสุดถึง 19.22 เมตร ส่วนบริเวณลำน้ำมีความหนาประมาณ 10.0 เมตร ค่าตอกทดลองแสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักค่อนข้างดี แต่มีค่าการรั่วซึมสูงถึงสูงมาก

- ฐานรากหิน พบชั้นหินฐานรากเป็นหินแกรนิต (Granite) มีอัตราการผุสลายอยู่ในเกณฑ์ช่วงต่ำถึงสูงมาก (Slightly to highly weathered rock) สลับกันตลอดทั้งความลึก ความต่อเนื่องของมวลหินแตกต่างกัน มีค่าปานกลางถึงดีมาก (Moderately to very good rock) มีค่าการรั่วซึมโดยเฉลี่ยสูงถึงสูงมาก (15.20-113.25 Lugeon) มีบางบริเวณเป็นชั้นทึบน้ำ เนื่องจากคุณภาพมวลหินดี มีแนวแตก และรอยแยกน้อย

4.3.6 การวิเคราะห์ปริมาณการไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำซึมผ่านฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำพระยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา โดยใช้โปรแกรม SEEP/W ของบริษัท GEO-SLOPE ประเทศแคนาดา มีวัตถุประสงค์ และรายละเอียด ดังนี้

- ประเมินปริมาณน้ำรั่วซึมผ่านเขื่อนและฐานรากในสภาพปกติก่อนการออกแบบปรับปรุงฐานรากสำหรับเป็นข้อมูลในการประเมินปัญหาการรั่วซึมผ่านเขื่อนและฐานรากว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยและยอมรับได้หรือไม่ ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านฐานราก เพื่อประเมินจากข้อมูลปริมาณน้ำไหลลงอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 16.09 ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี ปริมาณน้ำที่ต้องการเก็บกัก ณ ความจุที่ระดับเก็บกักประมาณ 13.00 ล้านลูกบาศก์เมตร ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก พบว่าปริมาณน้ำส่วนใหญ่จะไหลซึมผ่านฐานรากมากกว่าตัวเขื่อน ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก ประมาณ 2,088,697 ลูกบาศก์เมตร/ปี คิดเป็นคิดเป็นร้อยละ 12.98 ของปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างต่อปี และร้อยละ 16.06 ของปริมาณความจุอ่างที่ระดับเก็บกัก ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน**ตารางที่ 4-5**

- เพื่อวิเคราะห์โอกาสการเกิดการกัดพาของน้ำบริเวณท้ายเขื่อนของสมมติฐานในการออกแบบของแต่ละกรณี (Scenarios) ซึ่งอาจทำให้เกิดการพิบัติของเขื่อน รวมทั้งเพื่อต้องการทราบพฤติกรรมของการไหลของน้ำได้ชัดเจน ซึ่งพิจารณาจากค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีแรงกระทำของน้ำต่อมวลดินค่อนข้างสูง โดยค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient ไม่ทำให้เกิดโอกาสการกัดพา โดยพิจารณาค่า Velocity บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.01 m/sec และ ค่า Hydraulic gradient (จุด A) จากตำแหน่งก่อนเข้า Filter ไปยังตำแหน่ง Toe drain (จุด B) ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.25 (โดยเฉพาะตำแหน่ง Toe drain เมื่อกำหนดค่า Factor of safty ของเขื่อนโดยทั่วไป เท่ากับ 4)

- ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน**ตารางที่ 4-5** แสดงพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านตัวเขื่อน ค่า Hydraulic gradient บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) มีค่าเกิน 0.25 ซึ่งแสดงว่ามีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B)

Analysis method case	Velocity (m/sec)		Hydraulic ggadient		Seepage through am & foundation (m^3/sec/m)	Seepage through foundation (m^3/sec/m)	Seepage/year (m3/year)
	Point A	Point B	Point A	Point B			
1. No foundation Improvement							
- กม.0+015 ถึง กม.0+500	3.81E-07	1.34E-06	1.1458	0.5257	1.30E-05	1.28E-05	198,605
- กม.0+500 ถึง กม. 1+000	7.69E-06	1.93E-05	0.2848	0.7069	6.07E-05	5.97E-05	957,291
- กม.1+000 ถึง กม. 1+345	6.72E-06	1.89E-05	0.1319	0.3673	8.57E-05	8.56E-05	932,801
Total							**2,088,697**

4.3.7 ประเมินปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อนและฐานราก

เขื่อนมีความสูงถึง 33.42 เมตร และจากสภาพของฐานรากตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถประเมินปัญหาที่จะเกิดกับฐานราก ได้ดังนี้

1) ชั้นดินฐานรากบริเวณฐานยันฝั่งขวา ตั้งแต่ กม.0+015 ถึง กม. 0+500 (ข้อมูลจากหลุมเจาะ DH.11 DH.12 DH.13 และ DH.14) แสดงให้เห็นชั้นฐานรากดินมีความหนาอยู่ในช่วง 12.30-14.58 เมตร มีค่าการรั่วซึมสูงถึงสูงมาก (10^{-4} ถึง 10^{-3} m/sec) ข้อมูลการออกแบบจากรูปตัดตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน หมายเลข 196354 ไม่สามารถที่จะขุดเปิดชั้นดินจนถึงชั้นหินฐานรากได้ เนื่องจากชั้นดินฐานรากมีความหนามาก โดยกำหนดความลึกการขุดเปิดท้องร่องแกนเขื่อนประมาณ 6.00 เมตรจากระดับดินเดิม ดังนั้นชั้นฐานรากดินที่ไม่สามารถขุดออกได้จึงมีปัญหาเรื่องการรั่วซึมของน้ำซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกัดพา (Piping)

2) ชั้นดินฐานรากบริเวณฐานยันฝั่งซ้าย ตั้งแต่ กม.1+000 ถึง กม.1+345 (ข้อมูลจากหลุมเจาะ DH.1 DH.2 DH.3 และ DH.4) แสดงให้เห็นชั้นฐานรากดินมีความหนาอยู่ในช่วง 14.20-27.00 เมตร มีค่าการรั่วซึมสูงถึงสูงมาก (10^{-4} ถึง 10^{-3} m/sec) ข้อมูลการออกแบบจากรูปตัดตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน หมายเลข 196354 ไม่สามารถที่จะขุดเปิดชั้นดินจนถึงชั้นหินฐานรากได้ เนื่องจากชั้นดินฐานรากมีความหนามาก โดยกำหนดความลึกการขุดเปิดท้องร่องแกนเขื่อนประมาณ 6.00 เมตรจากระดับดินเดิม ดังนั้นชั้นฐานรากดินที่ไม่สามารถขุดออกได้จึงมีปัญหาเรื่องการรั่วซึมของน้ำซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกัดพา (Piping)

3) ชั้นดินฐานรากและชั้นหินฐานรากในช่วงบนมีค่าการรั่วซึมสูงโดยคิดเป็นปริมาณการไหลรั่วซึมผ่านฐานรากเขื่อน 2,088,697 ลูกบาศก์เมตร/ปี ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการทรุดตัวอันเนื่องมาจากการไหลของน้ำผ่านฐานรากแล้วพัดพาดินหรือหินฐานรากออกไปทำให้เกิดโพรงภายในฐานราก (Collapse due to seepage) หรือที่เรียกว่าการกัดพา (Piping)

4.3.8 กำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน

แนวคิดการกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำพระยา อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อนและฐานรากจากข้อมูลตามที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ได้กำหนดแนวความคิด (Conceptual) ในการวิเคราะห์โดยตั้งสมมติฐานวิธีการออกแบบที่เป็นไปได้ 5 กรณี (โดยใช้โปรแกรม SEEP/W) โดยแบ่งพื้นที่การวิเคราะห์เป็น 3 Section ได้แก่ กม.0+190 (เป็นตัวแทนพื้นที่ตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน กม.0+015 ถึง กม.0+500) กม.0+700 (เป็นตัวแทนพื้นที่ตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน กม.0+500 ถึง กม.1+000) และกม.1+110 (เป็นตัวแทนพื้นที่ตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน กม.1+000 ถึง กม.1+345) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก และวิเคราะห์โอกาสการเกิดการกัดพาของน้ำบริเวณท้ายเขื่อน มีรายละเอียด ดังนี้

1) กรณีไม่ทำการปรับปรุงฐานราก

2) กรณีทำ Partial cutoff trench ชั้นฐานรากดิน (กม.0+015 ถึง กม. 0+500 และ กม. 1+000 ถึง กม.1+345) และ Full cutoff trench ชั้นฐานรากดิน (กม.0+500 ถึง กม.1+000)

3) กรณีทำ Partial cutoff trench ชั้นฐานรากดิน (กม.0+015 ถึง กม. 0+500 และ กม. 1+000 ถึง กม.1+345) และ Full cutoff trench ชั้นฐานรากดิน (กม.0+500 ถึง กม.1+000) & ปู Upstream impervious blanket 6H

4) กรณีทำ Partial cutoff trench ชั้นฐานรากดิน (กม.0+015 ถึง กม. 0+500 และ กม. 1+000 ถึง กม.1+345) และ Full cutoff trench ชั้นฐานรากดิน (กม.0+500 ถึง กม.1+000) & ปู Upstream impervious blanket 12H

5) กรณีทำ Partial cutoff trench & Slurry trench ชั้นฐานรากดิน & Grouting ชั้นฐานรากหิน (กม.0+015 ถึง กม. 0+500 และ กม.1+000 ถึง กม.1+345) และ Full cutoff trench (กม.0+500 ถึง กม.1+000) & Grouting ชั้นฐานรากหิน

ผลการวิเคราะห์แสดงใน**ตารางที่ 4-6** เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลวิเคราะห์แล้ว จึงพิจารณาเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุด

สมมติฐานในกรณีปรับปรุงฐานรากแบบต่าง ๆ ที่เป็นได้ทั้ง 5 กรณี พบว่า

1) กรณีการไม่ทำการปรับปรุงฐานราก (No Foundation Improvement) พบว่ามีน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก ประมาณ 2,088,697 ลูกบาศก์เมตร/ปี คิดเป็นร้อยละ 12.98 ของปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างต่อปี และร้อยละ 16.06 ของปริมาณความจุอ่างที่ระดับเก็บกัก

2) กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+015 ถึง กม.0+500 และ กม.1+000 ถึง กม.1+345 และขุดลอกร่องแกนลงไปจนถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+500 ถึง กม.1+000 พบว่ามีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 1,425,485 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถลดการรั่วซึมของน้ำลดลง ร้อยละ 31.75

3) กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+015 ถึง กม.0+500 และ กม.1+000 ถึง กม.1+345 และขุดลอกร่องแกนลงไป

จนถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+500 ถึง กม.1+000 และปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 6 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S Impervious Blanket 6H) พบว่ามีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 1,208,010 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถปรับปรุงฐานรากได้ร้อยละ 42.16

4) กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+015 ถึง กม.0+500 และ กม.1+000 ถึง กม.1+345 และขุดลอกร่องแกนลงไปจนถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+500 ถึง กม.1+000 และปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 12 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S Impervious Blanket 12H) พบว่ามีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 1,031,363 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถปรับปรุงฐานรากได้ร้อยละ 50.62

5) กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+015 ถึง กม.0+500 และ กม.1+000 ถึง กม.1+345 ชั้นฐานรากดินในส่วนที่ลึกลงไปจนถึงชั้นหินฐานรากใช้วิธีการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำโดยวิธี Slurry trench ส่วนช่วงบริเวณ กม.0+500 ถึง กม.1+000 ขุดลอกร่องแกนลงไปจนถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) ส่วนชั้นฐานรากหินโดยวิธี Cement grouting พบว่ามีอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานรากประมาณ 477,057 ลูกบาศก์เมตร/ปี สามารถปรับปรุงฐานรากได้ร้อยละ 77.16

ตารางที่ 4-6 แสดงผลการคำนวณหาค่าอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านเขื่อนและฐานราก และผลการคำนวณหาค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient บริเวณจากจุด A ไป จุด B

Analysis method (case)	Velocity (m/sec)		Hydraulic gradient		Seepage through dam &foundation (m^3/sec/m)	Seepage through foundation (m^3/sec/m)	%Foundation improved	Seepage/year (m3/year)
	Point A	Point B	Point A	Point B				
<u>กม.0+015 ถึง กม.0+500</u>								
1. No foundation improvement	3.81E-07	1.34E-06	0.1458	0.5257	1.30E-05	1.28E-05	-	198,605
2. Partial cutoff	3.10E-06	1.52E-06	0.1520	0.5956	1.27E-05	1.25E-05	2.60	194,292
3 Partial cutoff & U/S impervious blanket 6H	2.57E-06	1.30E-06	0.1262	0.5095	1.10E-05	1.08E-05	15.70	168,734
4. Partial cutof & U/S impervious blanket 12H	2.32E-06	1.18E-06	0.1141	0.4629	1.01E-05	9.84E-06	23.35	153,745
5. Partial cutoff & Slurry trench & grouting	1.12E-06	8.52E-07	0.0549	0.3337	8.47E-06	8.22E-06	35.97	129,614
<u>กม.0+500 ถึง กม.1+000</u>								
1. No foundation improvement	7.69E-06	1.93E-05	0.2848	0.7069	6.07E-05	5.97E-05		957,291
2. Full cutoff	6.43E-06	9.27E-06	3.1622	0.3411	2.96E-05	2.83E-05	52.62	465,976
3 Full cutoff & U/S impervious blanket 6H	5.84E-06	8.46E-06	2.8741	0.3113	2.70E-05	2.57E-05	56.90	425,768
4 Full cutoff & U/S impervious blanket 12H	5.77E-06	8.36E-06	2.8414	0.3078	2.67E-05	2.54E-05	57.39	421,053
5. Full cutoff & grouting	7.26E-07	4.45E-06	0.3574	0.1643	1.39E-05	1.27E-05	78.71	219,223
<u>กม.1+000 ถึง กม.1+345</u>								
1. No foundation improvement	6.72E-06	1.89E-05	0.1319	0.3673	8.57E-05	8.56E-05	-	932,801
2. Partial cutoff	1.16E-05	1.50E-05	0.2282	0.2919	7.03E-05	7.01E-05	18.10	765,217
3 Partial cutoff & U/S impervious blanket 6H	9.30E-06	1.20E-05	0.1826	0.2332	5.64E-05	5.61E-05	34.41	613,508
4. Partial cutof & U/S impervious blanket 12H	6.90E-06	8.88E-06	0.1356	0.1724	4.20E-05	4.17E-05	51.27	456,565
5. Partial cutoff & slurry trench & grouting	1.43E-06	2.32E-06	0.0281	0.0452	1.18E-05	1.15E-05	86.59	128,220

$$\%\ \text{Foundation improved}^{*} = \frac{(\text{Seepage through foundation case 1}) - (\text{Seepage through foundation case 2,...,5})}{(\text{Seepage through foundation case 1})} \times 100$$

ตารางที่ 4-7 แสดงการเปรียบเทียบค่า % การปรับปรุงฐานรากเขื่อนของแต่ละวิธี

Analysis method (Case)	% Foundation improved	Seepage/year (m^3/year)
1. No foundation improvement		2,088,697
2. กม.0+015 ถึง กม.0+500 Partial cutoff กม.0+500 ถึง กม.1+000 Full cutoff กม.1+000 ถึง กม.1+345 Partial cutoff	31.75	1,425,485
3. กม.0+015 ถึง กม.0+500 Partial cutoff กม.0+500 ถึง กม.1+000 Full cutoff กม.1+000 ถึง กม.1+345 Partial cutoff & U/S impervious blanket 6H	42.16	1,208010
4. กม.0+015 ถึง กม.0+500 Partial cutoff กม.0+500 ถึง กม.1+000 Full cutoff กม.1+000 ถึง กม.1+345 Partial cutoff & U/S impervious blanket 6H	50.62	1,031,363
5. กม.0+015 ถึง กม.0+500 Partial cutoff & slurry trench & grouting กม.0+500 ถึง กม.1+000 Full cutoff & grouting 5 Lugeon กม.1+000 ถึง กม.1+345 Partial cutoff & slurry trench & grouting	77.16	477,057

$$\% \text{ Foundation improved*} = \frac{(\text{Seepage through foundation case 1}) - (\text{Seepage through foundation case 2,...,5})}{(\text{Seepage through foundation case 1})} \times 100$$

จากผลการวิเคราะห์ค่า Hydraulic gradient และค่า Velocity ทั้ง 3 Section บริเวณตำแหน่งก่อนเข้า Filter (จุด A) และบริเวณท้ายเขื่อนที่ตำแหน่ง Toe drain (จุด B) พบว่า

- กรณีการไม่ทำการปรับปรุงฐานราก (No foundation improvement) มีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec แต่มีค่า Hydraulic Gradient ที่จุด A ของ Section กม.0+700 จุด B ของ Section กม.0+190 กม.0+700 และ กม.1+110 มากกว่า 0.25 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+015 ถึง กม.0+500 และ กม.1+000 ถึง กม.1+345 และขุดลอกร่องแกนลงไปจนถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+500 ถึง กม.1+000 พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic gradient จุด A ของ Section กม.0+700 จุด B ของ Section กม.0+190 กม.0+700 และ กม.1+110 มากกว่า 0.25 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+015 ถึง กม.0+500 และ กม.1+000 ถึง กม.1+345 และขุดลอกร่องแกนลงไปจนถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+500 ถึง กม.1+000 และปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 6 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S impervious blanket 6H) พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic gradient จุด A ของ Section กม.0+700 จุด B ของ Section กม.0+190 และ กม. 0+700 มากกว่า 0.25 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+015 ถึง กม.0+500 และ กม.1+000 ถึง กม.1+345 และขุดลอกร่องแกนลงไปจนถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+500 ถึง กม.1+000 และปู Blanket ด้วยดินเคลย์หนา 2.00 เมตร ด้านเหนือน้ำที่มีความยาว 12 เท่าของความสูงเขื่อน (U/S impervious blanket 12H) พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และค่า Hydraulic gradient จุด A ของ Section กม.0+700 จุด B ของ Section กม.0+190 และ กม.0+700 มากกว่า 0.25 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีโอกาสเกิดการกัดพา (Piping)

- กรณีการปรับปรุงฐานรากดินโดยวิธีขุดลอกร่องแกนเป็นบางส่วนในช่วงบน (Partial cutoff trench) ช่วงบริเวณ กม.0+015 ถึง กม.0+500 และ กม.1+000 ถึง กม.1+345 ชั้นฐานรากดินในส่วนที่ลึกลงไปจนถึงชั้นหินฐานรากใช้วิธีการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำโดยวิธี Slurry trench ส่วนช่วงบริเวณ กม.0+500 ถึง กม.1+000 ขุดลอกร่องแกนลงไปจนถึงชั้นหินฐานรากหรือก้นร่องแกน (Full cutoff trench) ส่วนชั้นฐานรากหินเป็น Cement grouting พบว่ามีค่า Velocity น้อยกว่า 0.01 m/sec และ Hydraulic gradient ส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 0.25 ยกเว้น จุด A ของ Section กม.0+700 และจุด B ของ Section กม.0+190 ในกรณีนี้พบว่าบริเวณ กม.0+700 มีค่า Hydraulic gradient ที่จุด A (ก่อนเข้า Filter) มีค่าสูง ส่วนที่จุด B (Toe drain) มีค่าต่ำ โดยเป็นการไหลของน้ำจากจุด A ไป จุด B ที่มีความเร็วในการไหลค่อนข้างช้า เนื่องจากวิศวกรผู้ออกแบบเขื่อนได้ออกแบบโดยการเพิ่ม Filter ที่บริเวณส่วนล่างของ Core zone ทำให้ค่า Hydraulic gradient ที่จุด A สูง

แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลปริมาณการรั่วซึมและความเร็วในการไหลที่มีค่าต่ำจึงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยกว่าการปรับปรุงฐานรากในกรณีอื่น ๆ

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้นจึงได้กำหนดวิธีปรับปรุงฐานรากเขื่อนของโครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา โดยได้กำหนดวิธีปรับปรุงฐานราก 3 วิธีประกอบกัน ได้แก่ วิธี Partial cutoff trench วิธี Slurry trench ในชั้นฐานรากดิน และ Cement grouting ในชั้นฐานรากหิน มีรายละเอียด ดังนี้

1) การป้องกันและลดการรั่วซึมของน้ำ เพิ่มความมั่นคงและลดการทรุดตัวในชั้นดินฐานรากที่มีค่าการรั่วซึมสูงและชั้นดินมีความหนามาก ไม่สามารถออกแบบปรับปรุงฐานรากดินด้วยวิธี Full cutoff trench ได้กำหนดวิธีการเป็นแบบ Partial cutoff trench โดยกำหนดให้ระดับของ Bottom of cutoff trench วางอยู่ที่ชั้นดินที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้โดยพิจารณาจากค่าตอกทดลอง (SPT) หรือถึงก้นร่องแกนตามที่แบบกำหนด ในส่วนของชั้นดินฐานรากที่ลึกลงไปจนถึงชั้นหินฐานราก ได้กำหนดเป็นการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำ (Impervious diaphragm wall) โดยวิธี Slurry wall ด้วยวิธีการขุดร่อง (Trench) ซึ่งทำให้มั่นคงในระหว่างการขุดร่องด้วยน้ำโคลน (Slurry) ที่ทำจากโคลนผง (Bentonite) แล้วถมปิดกลับด้วยวัสดุผสมทึบน้ำเพื่อให้ได้กำแพงทึบน้ำที่ปิดกั้นการไหลซึมของน้ำผ่านฐานราก

2) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน ปิดกั้น และลดการรั่วซึมผ่านชั้นฐานรากหินที่มีการผุพังและรอยแตก (Opened cracks) ของหินแกรนิต การออกแบบได้เลือกใช้วิธีการ Cement grouting ประกอบด้วย Curtain grout และ Blanket grout ลงในชั้นหินฐานราก โดยกำหนดวิธีการทำ Cement grouting เนื่องจากสภาพธรณีวิทยาของชั้นหินฐานรากมีขนาดของรอยแตกมีขนาดใหญ่พอที่อนุภาคของซีเมนต์หรือน้ำปูนที่มีความเข้มข้นสามารถแทรกเข้าไปอุดช่องว่างภายในรอยแตกได้ และเป็นวิธีการที่สะดวก รวดเร็ว ราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ รวมทั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทำงานไม่มีความยุ่งยาก

แปลน และรูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดินของโครงการอ่างเก็บน้ำลำพระยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา หมายเลขแบบ สสธ.-ส.7-0326 แสดงใน **ภาคผนวก ค**

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การปรับปรุงฐานรากเขื่อนเป็นขั้นตอนที่จำเป็นและสำคัญในการก่อสร้างเขื่อน มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ชั้นฐานรากเขื่อนสามารถรองรับน้ำหนักของตัวเขื่อนได้ โดยไม่เกิดการทรุดตัวเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด และมีความทึบน้ำเพียงพอไม่ให้น้ำไหลซึมผ่านชั้นฐานรากเขื่อนได้มากเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ การเลือกใช้วิธีการปรับปรุงฐานรากวิธีการใดวิธีการหนึ่ง ขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่จะต้องพิจารณา ผู้เขียนปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา มีหน้าที่รับผิดชอบในการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนของกรมชลประทาน จึงได้นำเสนอหลักเกณฑ์การพิจารณา วิธีการ และขั้นตอนการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนประเภทเขื่อนดินถม (Earthfill dam) สำหรับเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานสำหรับนักธรณีวิทยาผู้ออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนของกรมชลประทาน

ขอบเขตการดำเนินงานของการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนประเภทเขื่อนดินประกอบด้วยการรวบรวม ค้นคว้า ทฤษฎี หลักเกณฑ์พิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนที่มีเนื้อหาครอบคลุมการพิจารณาด้านเทคนิค ชนิดของฐานรากเขื่อน องค์ประกอบในการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน การประเมินปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก รวมถึงรายละเอียดของวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน ประกอบด้วยทฤษฎี ขั้นตอนการดำเนินการและการปฏิบัติงานของการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Cement grouting) การปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) และการปรับปรุงฐานรากเขื่อนโดยวิธีก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench

การดำเนินการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนดินถม มีขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้

1) การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล
2) วิเคราะห์ชนิดของฐานรากเขื่อน
3) ประเมินสภาพฐานรากเขื่อน
4) วิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก
5) ประเมินปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับฐานรากเขื่อน
6) การตัดสินใจ และพิจารณาว่ามีความจำเป็นในการปรับปรุงฐานรากเขื่อนหรือไม่
7) การพิจารณาวิธีการที่เหมาะสมในการปรับปรุงฐานรากเขื่อน
8) กำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน
9) วิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลซึมผ่านเขื่อนและฐานราก คำนวณค่า Velocity และค่า Hydraulic gradient ของวิธีการปรับปรุงฐานรากแต่ละวิธีที่ตั้งสมมติฐาน โดยวิธีการคำนวนหรือใช้โปรแกรม SEEP/W
10) เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากที่เหมาะสม
11) ออกแบบและจัดทำรายงาน แปลน รูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อน Bill of Quantity (BOQ) และรายละเอียดด้านวิศวกรรมในการก่อสร้าง

เนื้อหาในเอกสารประกอบด้วยความรู้ด้านต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการปรับปรุงฐานรากเขื่อน และได้นำกรณีศึกษาในการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนของกรมชลประทาน ที่ได้ดำเนินการออกแบบในช่วงปีงบประมาณ พ.ศ. 2563-2564 จำนวน 3 โครงการ มาเป็นกรณีศึกษา โดยแต่ละโครงการมีสภาพธรณีวิทยาฐานรากและสภาพปัญหาที่แตกต่างกัน ได้แก่

1) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสม สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นหินแข็ง

2) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสมและเจาะ-อัดฉีดสารเคมีด้วยวิธี Sleeve grout pipe สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นดิน กรวด ทราย และชั้นหินแข็ง

3) การออกแบบปรับปรุงฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา โดยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน/ของผสมและก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry trench สำหรับสภาพธรณีวิทยาฐานรากเขื่อนที่เป็นชั้นดิน/หินผุ และชั้นหินแข็ง

รายงานฉบับนี้ได้สรุปข้อมูลและขั้นตอนการพิจารณาวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนของทั้ง 3 โครงการ เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นวิธีการปรับปรุงฐานรากที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากสภาพธรณีวิทยาฐานรากที่แตกต่างกันของพื้นที่ได้อย่างชัดเจน รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักธรณีวิทยาผู้ปฏิบัติงานออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนเข้าใจถึงหลักเกณฑ์การพิจารณา วิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อน และขั้นตอนการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนที่เหมาะสม สำหรับเป็นแนวทางที่ได้มาตรฐานและเป็นไปตามหลักวิชาการ สามารถอ้างอิงและนำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างเขื่อนดินถมของกรมชลประทาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนในแต่ละวิธีให้เหมาะสมกับสภาพธรณีวิทยาฐานรากและมีคุณสมบัติครบถ้วนเป็นไปตามเกณฑ์ นักธรณีวิทยาผู้ออกแบบงานปรับปรุงฐานรากจะต้องพิจารณา/ให้ข้อคิดเห็น ร่วมกับวิศวกรผู้ออกแบบเขื่อน ทั้งนี้ เนื่องจากฐานรากเขื่อนเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อการพิจารณาเลือกชนิดของอาคารในการออกแบบก่อสร้างตัวเขื่อน

2) โดยทั่วไปสภาพของฐานรากเขื่อนของแต่ละพื้นที่โครงการมักจะประกอบด้วยฐานรากมากกว่า 2 ประเภทหรือหลายประเภทรวมอยู่ด้วยกัน ดังนั้นนักธรณีวิทยาผู้ออกแบบปรับปรุงฐานรากจะต้องพิจารณาด้วยความละเอียด รอบคอบในการพิจารณาปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับฐานรากเขื่อน โดยการกำหนดวิธีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนให้มีความทึบน้ำ และมีความสามารถในการรับน้ำหนักของตัวเขื่อนได้

3) เพื่อเป็นการเพิ่มพูน องค์ความรู้ ความสามารถในการกำหนดวิธีการ และออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนให้ดียิ่งขึ้น ผู้ออกแบบควรต้องติดตามและประเมินผลการปฏิบัติงานปรับปรุงฐานรากของโครงการก่อสร้างที่ได้ดำเนินการและได้นำแบบงานปรับปรุงฐานรากไปใช้ในระหว่างการก่อสร้างจนกระทั่งแล้วเสร็จ เพื่อรับทราบปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น และแก้ไขปัญหาร่วมกัน ซึ่งจะเป็นหลักประกันอย่างดีว่างานที่ดำเนินการจะแล้วเสร็จตามที่กำหนดไว้ เป็นไปตามมาตรฐานตามหลักวิชาการ และใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างเขื่อนดินถมของกรมชลประทาน

เอกสารอ้างอิง

ส่วนธรณีวิทยา, 2542. รายงานการสำรวจธรณีวิทยาฐานราก โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยา อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา, สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน (MEMO G.51/2542)

ส่วนธรณีวิทยา, 2562. รายงานการสำรวจธรณีวิทยาฐานราก โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร, สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน (MEMO G.1/2562)

ส่วนธรณีวิทยา, 2563. รายงานการสำรวจธรณีวิทยาฐานราก โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี, สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน (MEMO G.2/2563)

ส่วนวิศวกรรมธรณี, 2563. รายงานการวิเคราะห์การรั่วซึมของน้ำผ่านฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาวอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร, สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน (EG_SA_RIO_04/01/63)

ส่วนวิศวกรรมธรณี, 2563. รายงานการวิเคราะห์การรั่วซึมของน้ำผ่านฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี, สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน (EG_SA_RIO_07/01/63)

ส่วนวิศวกรรมธรณี, 2564. รายงานการวิเคราะห์การรั่วซึมของน้ำผ่านฐานรากเขื่อน โครงการอ่างเก็บน้ำลำพระยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา, สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน (EG_SA_RIO_17/01/64)

A.C. Houlsby, 1990. Construction and design of cement grouting. A guide to grouting in rock formation, Wiley series of practical construction guide, John Wiley & Sons, Inc., New York. 442 page.

Christian Kutzner, 1996. Grouting of rock and soil. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland. 271 page.

E. Nonveiller, 1989. Grouting theory and practice. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands. 250 page.

Gary B. Hemphill, 2013. Practical tunnel construction. John Wiley & Sons, Inc., United State of America. 415 page.

Geo-slope International Ltd., 2004. SEEP/W Software, Canada.

International Commission on Large Dams, 1985. Filling materials: For Watertight Cut Off Walls, volume 51 in Bulletin (International Commission on Large Dams), 70 pages.

I.W. Northcroft, 2006. Innovative materials and methods for ground support, consolidation and water sealing for the mining industry: The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, volume 106, p. 835-844.

Jeffrey Evans, Daniel Ruffing and david Elton, 2022. Fundamentals of ground improvement engineering. CRC Press Talor & Francis group. http://talorandfrancis.com.

J. Paul Guyer, 2015. An Introduction to chemical grouting of soils. 31 page. https://www.cedengineering.com/userfiles/An%20Introduction%20to%20Chemicals%20for%20Grouting%20of%20Soils%20R1.pdf,.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Ken Andromalos, P.E., Michael Fisher, and Michael Beardsley, P.E., 2017. Design and construction considerations for the use of slurry walls to construct water reservoirs in the Denver formation. Envirocon, Golden, CO, USA.

https://www.geo-solutions.com/wp-content/uploads/2017/03/12_Considerations-for-the-Use-of-Slurry-Walls.pdf

Reuben H. Karol, 2003. Chemical grouting and soil stabilization, Third edition, revised and expanded. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, U.S.A., 583 page.

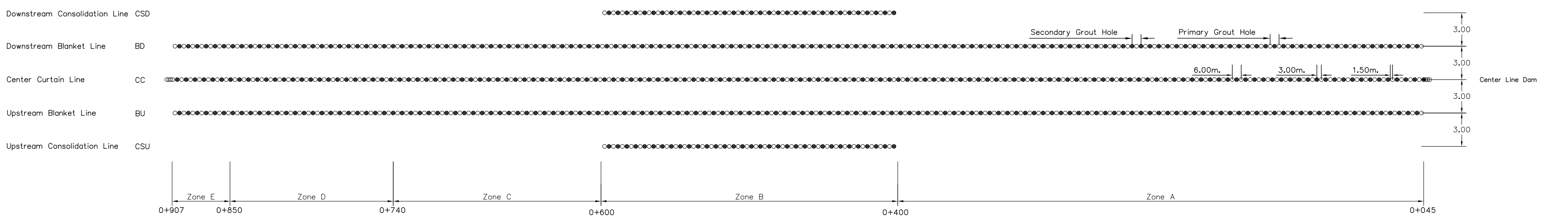
Walls constructed by slurry techniques. Ref.file:///D:/Geotechnical%20data/Slurry%20trench/Chapter%207%20-%20Vertical%20Cutoff%20Walls%20(PDF).pdf

ภาคผนวก

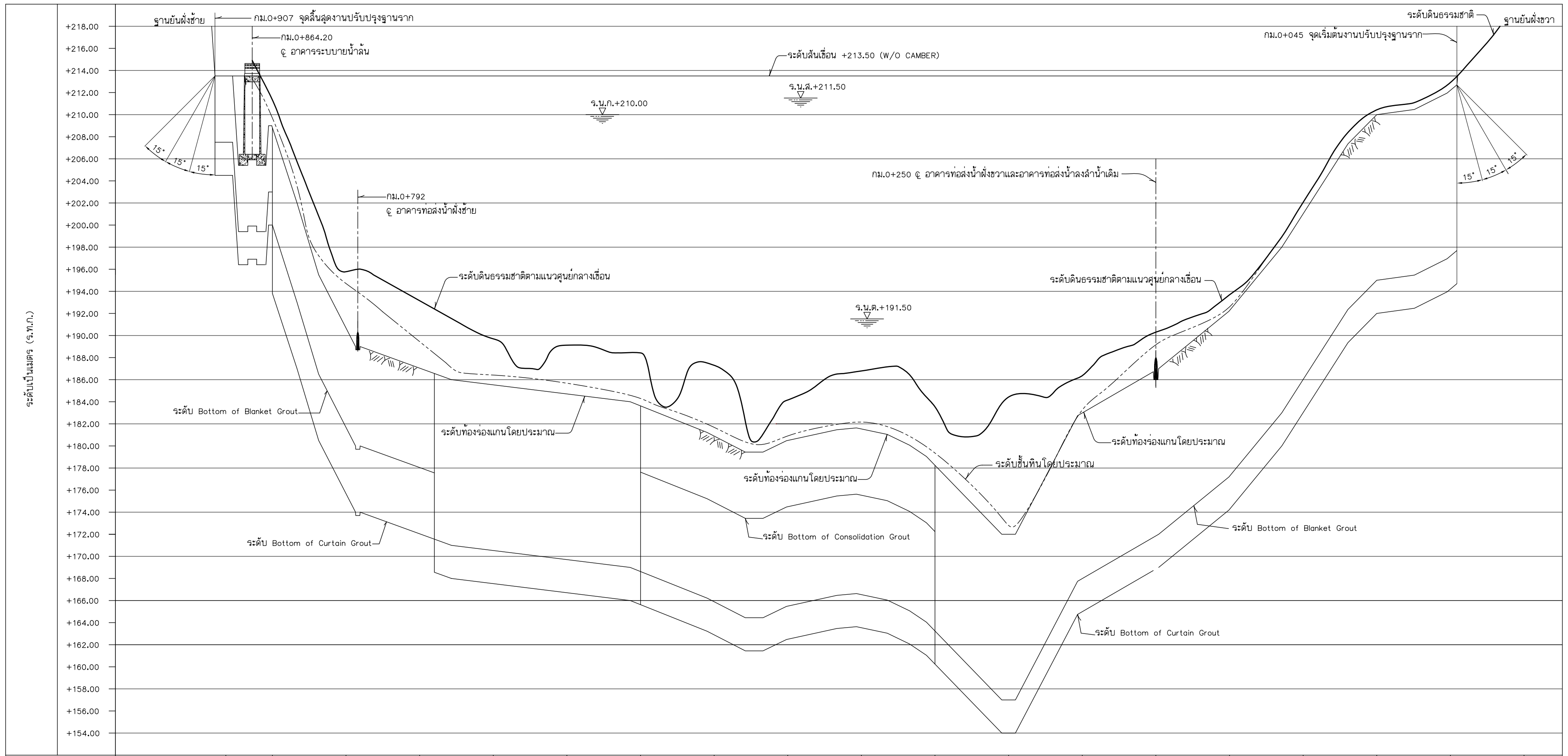
ภาคผนวก ก

แปลนและรูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน
โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ
อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี

สสธ.-ส.7-0322

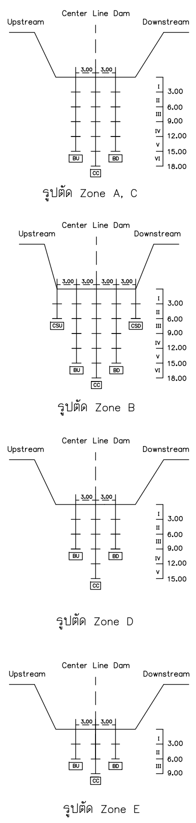


แปลนงานปรับปรุงชั้นหินฐานราก (มองตามน้ำ)



ระยะทางเป็น กม.	0+900 / 0+907	0+850	0+800	0+740 / 0+700	0+600	0+500	0+400 / 0+300 / 0+200 / 0+100 / 0+045	0+000
Zone	Wing Grout	E	D	C	B	A	Wing Grout	
Depth of Consolidation Grout Hole (m)	-	-	-	-	6.00	-	-	
Depth of Blanket Grout Hole (m)	-	6.00	9.00	15.00	15.00	15.00	-	
Depth of Curtain Grout Hole (m)	9.00	9.00	15.00	18.00	18.00	18.00	9.00	

รูปตัดตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน (มองตามน้ำ)



สัญลักษณ์

I ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 1
II ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 2
III ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 3
IV ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 4
V ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 5
VI ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 6

รูปตัดขวางตำแหน่งหลุมเจาะอัดฉีดน้ำปูน
(ไม่แสดงมาตราส่วน)

หมายเหตุ

1. ระดับ (ร.ท.ก.) และมิติต่าง ๆ กำหนดไว้เป็นเมตร ระยะทางเป็นกิโลเมตร นอกจากแสดงไว้เป็นอย่างอื่น
2. ระดับดินธรรมชาติ ระดับชั้นหินโดยประมาณ ระดับท้องร่องแกน คัดลอกจากแบบรูปตัดตามยาวทำนบดิน ของสำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม ฝ่ายออกแบบเขื่อนที่ 2 เลขที่ XXXXXX
3. งานปรับปรุงฐานรากเขื่อน จะดำเนินการได้ต่อเมื่อได้ทำการขุดลอกร่องแกนจนถึงระดับท้องร่องแกนตามแบบ หรือจนถึงระดับที่สามารถจะทำการปรับปรุงฐานรากได้
4. กรณีที่มีงานระเบิดหินในบริเวณตัวเขื่อนหรือบริเวณใกล้เคียงซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่องานปรับปรุงฐานรากเขื่อนก่อนเริ่มดำเนินการปรับปรุงฐานรากเขื่อนจะต้องทำการระเบิดหินนั้นให้เสร็จเรียบร้อยก่อน หรือให้อยู่ในดุลยพินิจและพิจารณาเห็นชอบจากนักธรณีวิทยาผู้ควบคุมงานในสนาม
5. ให้ดำเนินการเจาะ - อัดฉีดน้ำปูนปรับปรุงฐานรากเขื่อนแบบ Split Spacing Method โดยเคร่งครัด ดังนี้
   5.1 หลุม Blanket Grout Hole และ หลุม Consolidation Grout Hole ให้ดำเนินการเจาะแบบ Percussion Drilling
   5.2 หลุม Curtain Grout Hole ให้ดำเนินการเจาะแบบ Rotary Drilling
6. ในกรณีที่มีการเจาะผ่านดินบดอัด ให้ทำการเจาะโดยไม่ใช้น้ำ แล้วฝัง Grout Pipe ด้วย Casing จนถึงหน้าหินแข็ง และเมื่อดำเนินการ Grout หินฐานรากเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการถอน Casing ออก แล้วทำการอุดหลุมให้เต็มด้วยส่วนผสมของ Plastic Concrete ที่เหมาะสมทันที
7. ตำแหน่ง ความลึก ทิศทาง ตลอดจนปริมาณของหลุมเจาะ - อัดฉีดน้ำปูน เป็นการกำหนดไว้โดยประมาณ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่พบในสนามเป็นสำคัญ ทั้งนี้โดยให้อยู่ในดุลยพินิจ และพิจารณาเห็นชอบจากนักธรณีวิทยาผู้ควบคุมงานในสนาม

แบบประกอบ	แบบหมายเลข
1. GEOLOGIC PROFILE ALONG CENTER LINE DAM AND OUTLET	สธว.-กส.-703
2. รูปตัดตามยาวทำนบดิน	XXXXXX

มาตราส่วน { ทางตั้ง 1:200 / ทางราบ 1:1,500

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
มาตราส่วน 1:1,500 เมตร

0 1 2 3 4 5 10 15
มาตราส่วน 1 : 200 เมตร

กรมชลประทาน
โครงการอ่างเก็บน้ำลำห้วยบอน
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ
อ.น้ำยืน จ.อุบลราชธานี
งานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน
แปลนและรูปตัด

ครั้งที่	ตำแหน่ง	รายการแก้ไข	วันที่	ตรวจ / เสนอ	ผ่าน / เห็นชอบ	อนุมัติ

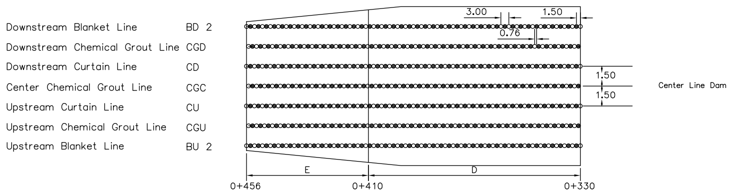
ออกแบบ		เสนอ		วธ.2สธ.
เขียน		ผ่าน		ผวธ.สธ
ลอก		เห็นชอบ		ผส.สธ.
ตรวจ		อนุมัติ	แทน	อธช.

สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา
ส่วนวิศวกรรมธรณี วันที่

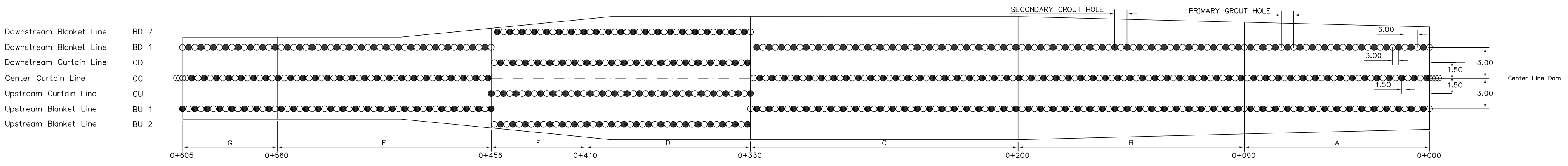
สสธ.-ส.7-0322

ภาคผนวก ข

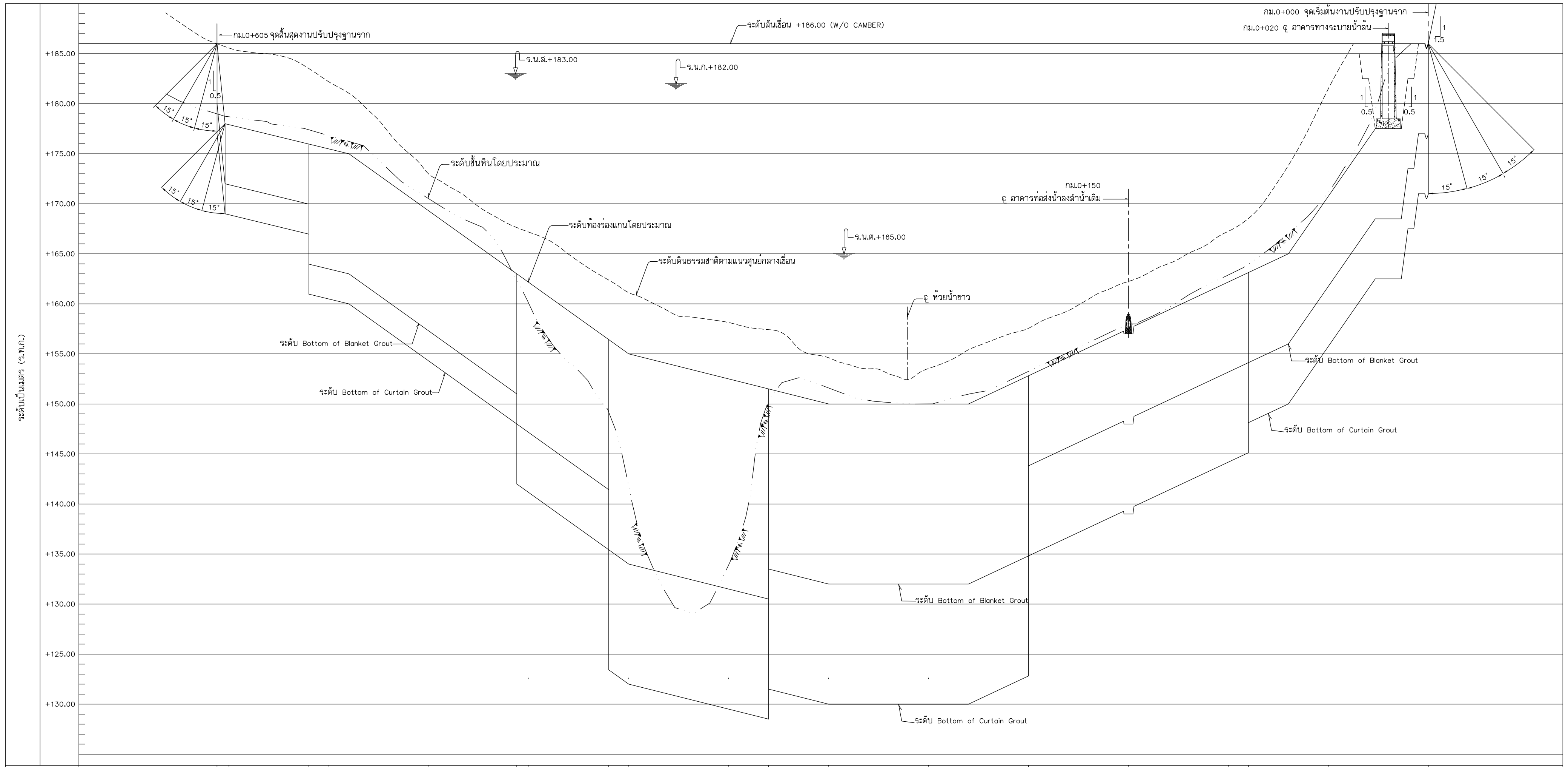
แปลนและรูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน
โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาว อันเนื่องมาจากพระราชดำริ
อำเภอคลองลาน จังหวัดกำแพงเพชร



แปลนงานปรับปรุงชั้นดินฐานราก (มองตามน้ำ)



แปลนงานปรับปรุงชั้นหินฐานราก (มองตามน้ำ)



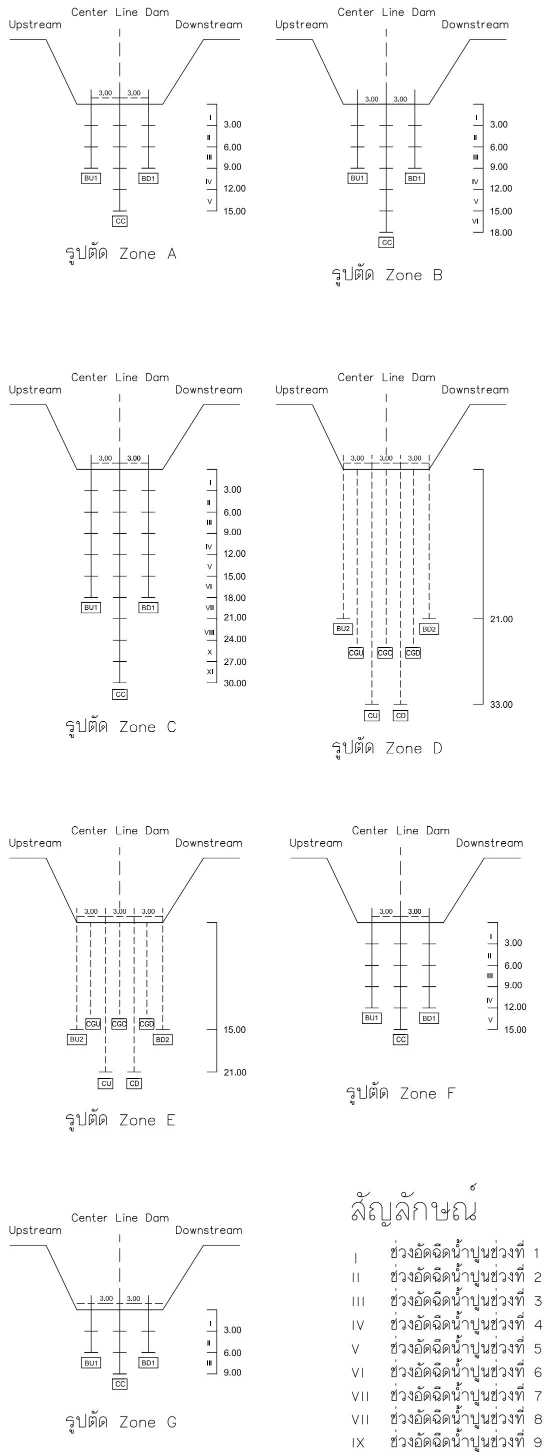
ระยะทางเป็น กม.		0+605 0+600	0+560 0+550 0+500	0+456 0+450	0+410 0+400 0+350	0+330 0+300 0+250	0+200 0+150 0+100	0+090 0+050	0+000
Zone	Wing Grout	G	F	E	D	C	B	A	Wing Grout
Depth of Blanket Grout Hole (m)		6.00	12.00	15.00	21.00	18.00	9.00	9.00	
Depth of Curtain Grout Hole (m)	9.00	9.00	15.00	21.00	33.00	30.00	18.00	15.00	15.00

รูปตัดตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน (มองตามน้ำ)

มาตราส่วน { แนวตั้ง 1:200 / แนวนอน 1:1,000

มาตราส่วน 1:200 เมตร

มาตราส่วน 1:1,000 เมตร



รูปตัดขวางตำแหน่งหลุมเจาะอัดฉีดน้ำปูน

(ไม่แสดงมาตราส่วน)

สัญลักษณ์

- I ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 1
- II ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 2
- III ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 3
- IV ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 4
- V ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 5
- VI ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 6
- VII ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 7
- VII ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 8
- IX ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 9
- X ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 10
- XI ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 11

หมายเหตุ

1. ระดับ (ร.ท.ก.) และมิติต่าง ๆ กำหนดไว้เป็นเมตร ระยะทางเป็นกิโลเมตร นอกจากแสดงไว้เป็นอย่างอื่น
2. ระดับดินธรรมชาติ ระดับชั้นหินโดยประมาณ ระดับท้องร่องแกน คัดลอกจากแบบรูปตัดตามยาว ตามแนวศูนย์กลางเขื่อน ของสำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม ฝ่ายออกแบบเขื่อนที่ 1 เลขที่ 291683
3. งานปรับปรุงฐานรากเขื่อน จะดำเนินการได้ต่อเมื่อได้ทำการขุดลอกร่องแกนจนถึงระดับท้องร่องแกนตามแบบ หรือจนถึงระดับที่สามารถจะทำการปรับปรุงฐานรากได้
4. กรณีที่มีงานระเบิดหินในบริเวณตัวเขื่อนหรือบริเวณใกล้เคียงซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่องาน ปรับปรุงฐานรากเขื่อนก่อนเริ่มดำเนินการปรับปรุงฐานรากเขื่อนจะต้องทำการระเบิดหินนั้นให้เสร็จ เรียบร้อยก่อน หรือให้อยู่ในดุลยพินิจและพิจารณาเห็นชอบจากนักธรณีวิทยาผู้ควบคุมงานในสนาม
5. กรณีการปรับปรุงฐานรากในชั้นหินให้ดำเนินการเจาะ – อัดฉีดน้ำปูนปรับปรุงฐานรากเขื่อนแบบ Split Spacing Method โดยเคร่งครัด
6. การปรับปรุงฐานรากในชั้นดินช่วง กม. 0+330 ถึง กม. 0+456 ให้ดำเนินการเจาะ–อัดฉีดด้วยวิธี Sleeve Grout Pipe Method
7. ในกรณีที่มีการเจาะผ่านดินบดอัด ให้ทำการเจาะโดยไม่ใช้น้ำ แล้วฝัง Grout Pipe ด้วย Casing จนถึงหน้าหินแข็ง และเมื่อดำเนินการ Grout หินฐานรากเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการถอน Casing ออก แล้วทำการอุดหลุมให้เต็มด้วยส่วนผสมของ Plastic Concrete ที่เหมาะสมทันที
8. ตำแหน่ง ความลึก ทิศทาง ตลอดจนปริมาณของหลุมเจาะ – อัดฉีดน้ำปูนและสารเคมี เป็นการกำหนดไว้ โดยประมาณ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่พบในสนามเป็นสำคัญ ทั้งนี้โดยให้อยู่ในดุลยพินิจ และพิจารณาเห็นชอบจากนักธรณีวิทยาผู้ควบคุมงานในสนาม

แบบประกอบ

แบบประกอบ	แบบหมายเลข
1. หลุมเจาะธรณีวิทยาฐานราก รูปตัดธรณีวิทยาฐานรากตามแนวศูนย์กลางเขื่อน	สธว.-กส.-648
2. รูปตัดตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน	291683

กรมชลประทาน

โครงการอ่างเก็บน้ำคลองน้ำขาว อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

อ.คลองลาน จ.กำแพงเพชร

งานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน

แปลนและรูปตัด

ออกแบบ		เสนอ		วธ.1สธ.
เขียน		ผ่าน		ผวธ.สธ
ลอก		เห็นชอบ		ผส.สธ.
ตรวจ		อนุมัติ	แทน	อธช.

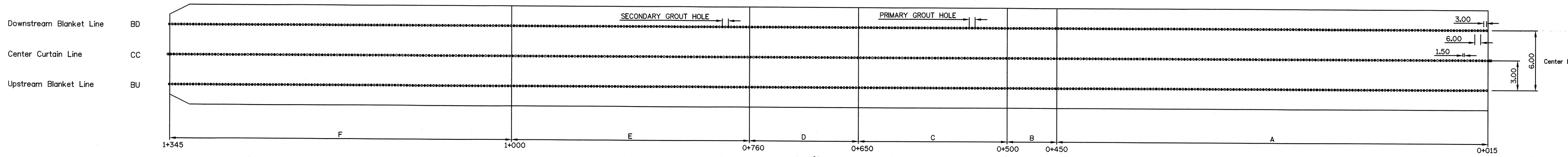
ครั้งที่	ตำแหน่ง	รายการแก้ไข	วันที่	ตรวจ / เสนอ	ผ่าน / เห็นชอบ	อนุมัติ

สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา ส่วนวิศวกรรมธรณี วันที่

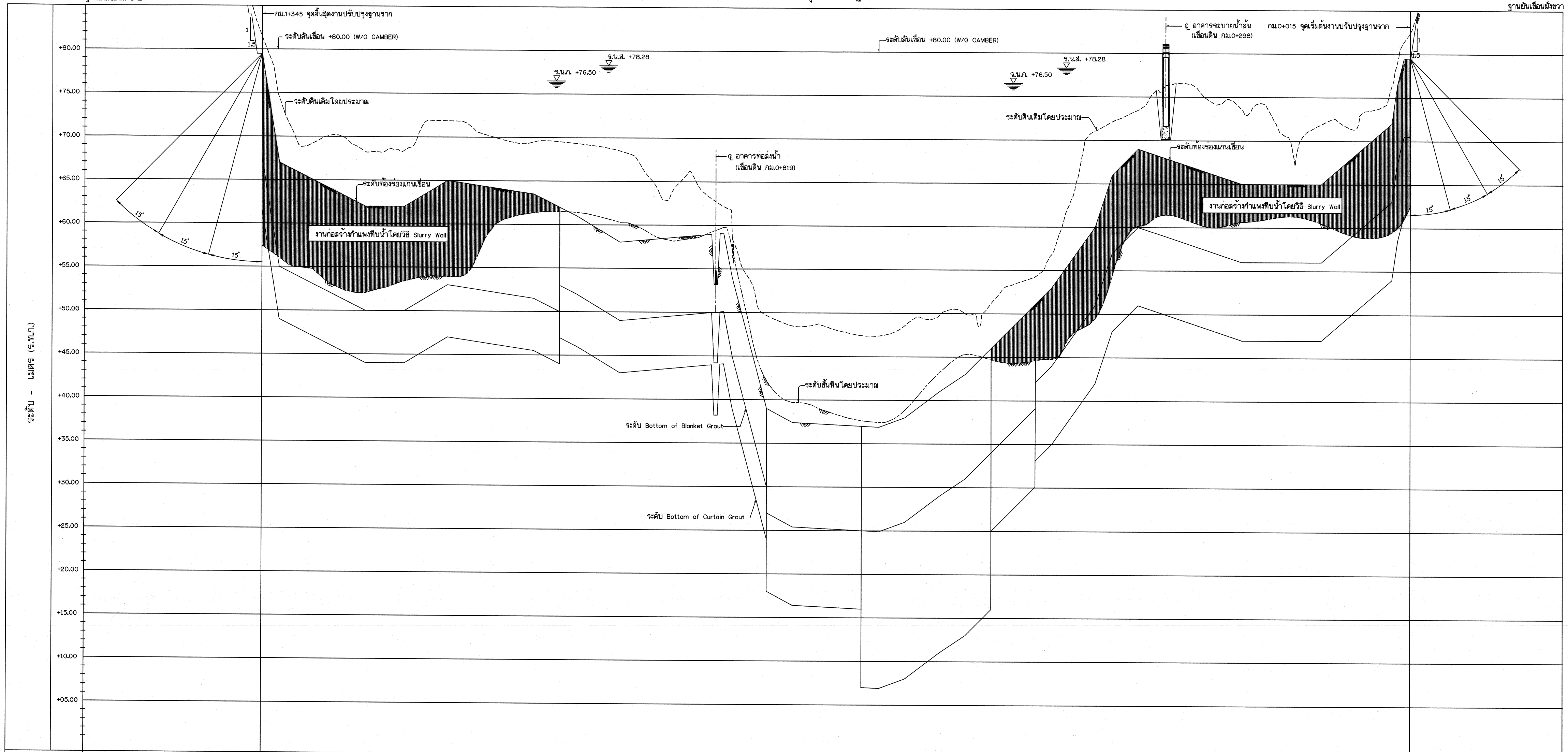
สสธ.-ส.7-0318

ภาคผนวก ค

แปลนและรูปตัดงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน
โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยา อันเนื่องมาจากพระราชดำริ
อำเภอเมือง จังหวัดยะลา



แปลนงานปรับปรุงชั้นหินฐานราก (มองตามน้ำ)



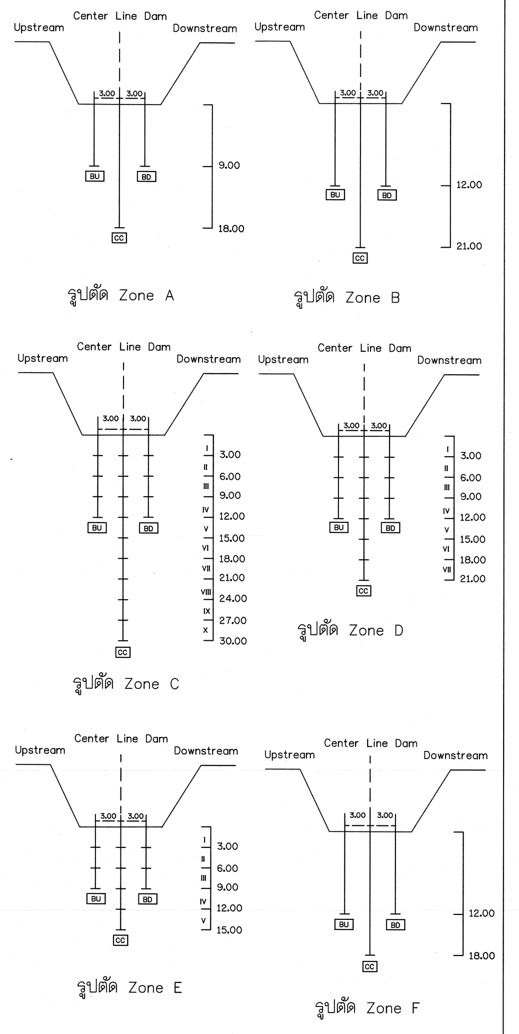
ระยะทาง-กิโลเมตร	1+400 – 1+345	1+345 – 1+000	1+000 – 0+760	0+760 – 0+650	0+650 – 0+500	0+500 – 0+450	0+450 – 0+015	0+015 – 0+000
Zone	Wing Grout	F	E	D	C	B	A	Wing Grout
Depth of Blanket Grout Hole (m)		12.00	9.00	12.00	12.00	12.00	9.00	
Depth of Curtain Grout Hole (m)	24.00	18.00	15.00	21.00	30.00	21.00	18.00	18.00

รูปตัดตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อนดิน (มองตามน้ำ)

มาตราส่วน { ทางตั้ง 1:200 / ทางราบ 1:2,000

0 10 50 100 150 มาตราส่วน 1:2,000 เมตร

0 1 2 3 4 5 10 15 มาตราส่วน 1:200 เมตร



รูปตัดขวางตำแหน่งหลุมเจาะอัดฉีดน้ำปูน

(ไม่แสดงมาตราส่วน)

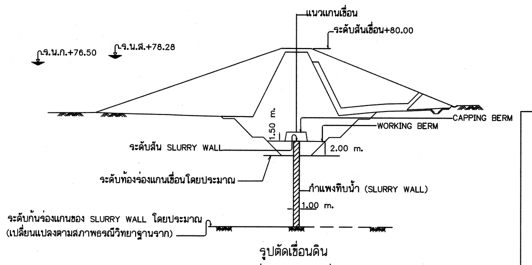
สัญลักษณ์

- I ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 1
- II ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 2
- III ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 3
- IV ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 4
- V ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 5
- VI ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 6
- VII ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 7
- VIII ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 8
- IX ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 9
- X ช่วงอัดฉีดน้ำปูนช่วงที่ 10

หมายเหตุ

1. ระดับ (ร.ท.ก.) และมิติต่างๆ กำหนดไว้เป็นเมตร ระยะทางเป็นกิโลเมตร นอกจากแสดงไว้เป็นอย่างอื่น
2. ระดับดินธรรมชาติ ระดับชั้นหินโดยประมาณ ระดับท้องร่องแกน คัดลอกจากแบบรูปตัดตามยาว ตามแนวศูนย์กลางเขื่อน ของสำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม กลุ่มงานออกแบบเขื่อน 2 เลขที่ 196354
3. งานปรับปรุงฐานรากเขื่อน จะดำเนินการได้ต่อเมื่อได้ทำการขุดลอกร่องแกนจนถึงระดับก้นร่องแกนตามแบบ หรือให้อยู่ในดุลยพินิจและพิจารณาเห็นชอบจากนักธรณีวิทยาผู้ควบคุมงานในสนามของกรม
4. กรณีที่มีงานระเบิดหินในบริเวณตัวเขื่อนหรือบริเวณใกล้เคียงซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่องาน ปรับปรุงฐานรากเขื่อน ก่อนเริ่มดำเนินการปรับปรุงฐานรากเขื่อนจะต้องทำการระเบิดหินนั้นให้เสร็จ เรียบร้อยก่อน หรือให้อยู่ในดุลยพินิจและพิจารณาเห็นชอบจากนักธรณีวิทยาผู้ควบคุมงานในสนามของกรม
5. งานปรับปรุงฐานรากด้วยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน ให้ดำเนินการดังนี้
   5.1 ให้ดำเนินการเจาะ – อัดฉีดน้ำปูนปรับปรุงฐานรากเขื่อนแบบ Split Spacing Method โดยเคร่งครัด
   5.2 หลุม Blanket Grout Hole ให้ดำเนินการเจาะแบบ Percussion Drilling
   5.3 หลุม Curtain Grout Hole ช่วง กม. 0+760 ถึง กม. 1+000 ให้ดำเนินการเจาะแบบ Percussion Drilling ช่วง กม. 0+015 ถึง กม. 0+760 และ กม. 1+000 ถึง กม. 1+345 ให้ดำเนินการเจาะแบบ Rotary Drilling
   5.4 ในกรณีที่มีการเจาะผ่านดินบดอัด ให้ทำการเจาะโดยไม่ใช้น้ำ แล้วฝัง Grout Pipe ด้วย Casing จนถึงหน้าหินแข็ง และเมื่อดำเนินการ Grout หินฐานรากเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการถอน Casing ออก แล้วทำการอุดหลุมให้เต็มด้วยส่วนผสมของ Plastic Concrete ที่เหมาะสมทันที
6. งานปรับปรุงฐานรากด้วยวิธีการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำ (Impervious Cutoff Wall) ด้วยวิธี Slurry Wall ให้ดำเนินการดังนี้
   6.1 เริ่มดำเนินการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำด้วยวิธี Slurry Wall จาก ช่วง กม. 0+015 ถึง กม. 0+500 และ กม. 1+000 ถึง กม. 1+345
   6.2 เครื่องจักรที่ใช้ขุดร่อง (Trench) เพื่อทำเป็นกำแพงทึบน้ำ จะต้องมีขนาดและกำลังที่สามารถขุดร่องได้ลึกไม่น้อยกว่า 20.00 เมตร ความกว้างไม่น้อยกว่า 1.00 เมตร และสามารถขุดได้เท่ากับความกว้างของร่องขุดเพียงครั้งเดียว โดยต้องสามารถจมลงในน้ำโคลนได้เร็วตาม Density ของน้ำโคลนที่ต้องการ
   6.3 วัสดุที่ใช้สำหรับทำน้ำโคลน (Slurry) จะต้องเป็นชนิด Sodium Bentonite ที่มีคุณสมบัติผ่านการทดสอบตามวิธีที่ระบุไว้ใน API STANDARD 13 A, SECTION 3-1983
   6.4 น้ำโคลนล้วนที่ถูกส่งไปยังร่องขุดเพื่อทำหน้าที่ค้ำยันผนังของร่องขุด ต้องประกอบด้วยโคลนผงที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนดใน API STANDARD 13 A "STANDARD FIELD PROCEDURE FOR TESTING DRILLING FLUIDS" ต้องประกอบด้วยโคลนผงประมาณ 60 กิโลกรัมต่อน้ำโคลน 1 ลูกบาศก์เมตร และมีน้ำหนักประมาณ 1.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความหนืดไม่น้อยกว่า 15 เซนติพอยส์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อวัดด้วย MARCH FUNNEL ไม่น้อยกว่า 40 วินาที, มีการสูญเสียน้ำ (Filtrat Loss) ไม่เกิน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในเวลา 30 นาที ภายใต้ความดัน 7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
   6.5 วัสดุสำหรับถมร่องขุด เพื่อทำเป็นกำแพงทึบน้ำ ต้องประกอบด้วย กรวด หรือหิน ทรายหยาบ ดินจากบ่อยืมดิน หรือฐานราก และน้ำโคลน (Slurry) โดยวัสดุดังกล่าว ต้องนำมาผสมกันในสัดส่วนที่เหมาะสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความข้นเหลว (Consistency) ที่เหมาะสม โดยให้ค่าความยุบตัว (Slump) ประมาณ 10 เซนติเมตร (4 นิ้ว)
   6.6 น้ำโคลนที่ใช้ผสมเพื่อเป็นวัสดุถมร่องขุด ต้องมีความหนาแน่น 1.10-1.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีอัตราการสูญเสียน้ำไม่เกิน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในเวลา 30 นาที ภายใต้ความดัน 7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
7. รายละเอียดเพิ่มเติมอื่นๆที่นอกเหนือจากนี้ ให้ศึกษาจากข้อกำหนดรายละเอียดด้านเทคนิค (Technical Specification) งานปรับปรุงฐานรากด้วยวิธีการเจาะ-อัดฉีดน้ำปูน และงานก่อสร้างกำแพงทึบน้ำ (Impervious Cutoff Wall) ด้วยวิธี Slurry Wall โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยา อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา
8. ตำแหน่ง ความลึก ทิศทาง ตลอดจนปริมาณของหลุมเจาะ – อัดฉีดน้ำปูน รวมถึง ความยาว ความลึกของกำแพงทึบน้ำ เป็นการกำหนดไว้โดยประมาณ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่พบในสนามเป็นสำคัญ ทั้งนี้โดยให้อยู่ในดุลยพินิจและพิจารณาเห็นชอบจากนักธรณีวิทยาผู้ควบคุมงานในสนามของกรม และผลการวิเคราะห์ทางด้านวิชาการ

แบบประกอบ	แบบหมายเลข
1. หลุมเจาะธรณีวิทยาฐานราก รูปตัดธรณีวิทยาฐานรากตามแนวศูนย์กลางเขื่อน	196347 และ 196348
2. รูปตัดตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน	196354



รูปตัดเขื่อนดิน
(ไม่แสดงมาตราส่วน)

กรมชลประทาน

โครงการอ่างเก็บน้ำลำพะยา

(อันเนื่องมาจากพระราชดำริ)

อ.เมือง จ.ยะลา

งานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน

แปลนและรูปตัด

ออกแบบ		เสนอ	วอ.4ลธ.
เขียน		ผ่าน	ผวธ.ลธ
ลอก		เห็นชอบ	ผส.ลธ.
ตรวจ		อนุมัติ แทน	อธช.

ครั้งที่	ตำแหน่ง	รายการแก้ไข	วันที่	ตรวจ / เสนอ	ผ่าน / เห็นชอบ	อนุมัติ

สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา
ส่วนวิศวกรรมธรณี วันที่

ลลธ.-ล.7-0326