



กรมชลประทาน
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์



การแก้ไขปัญหาน้ำไหลร่วนผ่านเขื่อนดินถมโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมี
โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยางอันเนื่องมาจากพระราชดำริ
อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว

EG_PUB_01/63



ส่วนวิศวกรรมธรณี
สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา
พฤศจิกายน 2563

คำนำ

ตามที่ได้เกิดเหตุการณ์น้ำไหลรั่วผ่านเขื่อนดินถม โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยางอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว บริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ที่บริเวณ กม.2+158 ที่ระดับ +100.00 เมตร (รสม.) ของเขื่อน เมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563 เวลา 21.00 น. ผู้บริหารกรมชลประทาน ได้สั่งการให้ผู้เชี่ยวชาญและเจ้าหน้าที่จากส่วนกลางเข้าพื้นที่อย่างเร่งด่วน โดยผู้เขียนซึ่งปฏิบัติหน้าที่ผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา ได้เข้าปฏิบัติงานเพื่อตรวจสอบปัญหาและหาแนวทางการดำเนินการแก้ไขปัญหาในสถานการณ์ฉุกเฉินดังกล่าว การแก้ไขปัญหาที่น้ำไหลรั่วผ่านเขื่อนดินถม ประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินงาน ได้แก่ (1) การตรวจสอบและวิเคราะห์เบื้องต้น จากข้อมูลโครงการ แบบก่อสร้าง ข้อมูลธรณีวิทยาฐานรากและการตรวจสอบสภาพพื้นที่และปริมาณน้ำไหลรั่ว (2) การดำเนินการป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อน โดยการถมวัสดุเม็ดหยาบเพื่อชะลอการกัดเซาะดินถมตัวเขื่อนในบริเวณโดยรอบจุดที่พบน้ำไหลรั่วและก่อสร้างบ่อลดแรงดัน รวมทั้งการถมดินเสริมบริเวณลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำและการลดระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ (3) การสำรวจข้อมูลเพิ่มเติมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแก้ไขปัญหา โดยวิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะตามแนวศูนย์กลางเขื่อนและดำเนินการเจาะเพื่อหาจุดไหลรั่วของน้ำ (4) การกำหนดวิธีการแก้ไขปัญหาโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมีในการแก้ไขปัญหาการรั่วไหลของน้ำในภาวะวิกฤติ

การอัดฉีดเพื่อแก้ไขปัญหาการไหลรั่วของน้ำในครั้งนี้ เป็นการแก้ไขปัญหาในภาวะวิกฤติเร่งด่วนเนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลรั่วที่ตรวจวัด เมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563 ที่มีอัตราการไหลรั่วอยู่ที่ 25 ลิตรต่อวินาที เพิ่มมากขึ้นเป็น 176 ลิตรต่อวินาที ในวันที่ 26 ตุลาคม 2563 จึงต้องกำหนดวิธีหรือกระบวนการในการอัดฉีดและเลือกใช้วัสดุในการอัดฉีดที่มีคุณสมบัติในการหยุดการไหลของน้ำได้อย่างรวดเร็ว และต้องเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็ก สามารถแทรกเข้าไปในรอยแตกช่องว่างของดินถมได้ ภายหลังจากอัดฉีดดินถมต้องที่บ้น้ำและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยกระบวนการในการอัดฉีดเริ่มต้นด้วยการอัดฉีดแบบ 2 สารผสม (Two-solution process) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหยุดการไหลรั่วของน้ำอย่างรวดเร็วที่สุด โดยการอัดฉีดน้ำปูนและสารโซเดียมซิลิเกตจะแยกกันเป็น 2 Lines ลงในหลุมอัดฉีดเดียวกัน ซึ่ง Line 1 เป็นการอัดฉีดน้ำปูนที่เป็นการผสมกันของน้ำและซีเมนต์ (W:C) Line 2 เป็นสารผสมของน้ำและโซเดียมซิลิเกต (W:S) โดยให้ไปผสมกันที่บริเวณจุดหรือความลึกที่ต้องการทำให้เกิดการก่อตัวที่รวดเร็วและแข็งเกือบจะทันที ใช้ประโยชน์ในการหยุดการไหลของน้ำ การดำเนินการอัดฉีดในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาอัตราส่วน (Grout mix ratio) และระยะเวลาการแข็งตัว (Setting time) ที่เหมาะสมกับสภาพปัญหาหน้างานที่ต้องหยุดการไหลของน้ำให้เร็วที่สุด จึงได้กำหนดและออกแบบตำแหน่งและความลึกของหลุมอัดฉีดของผสมโดยรอบจุดที่น้ำไหลรั่ว (กม.2+182) จำนวน 12 หลุม โดยมีระยะห่างระหว่างหลุม 3 เมตร จำนวน 3 แถว แถวละ 4 หลุม โดย offset ออกจากแนวศูนย์กลางเขื่อนด้านละ 3 เมตร และขั้นตอนต่อมาใช้กระบวนการอัดฉีดเป็นแบบสารละลายเดียว (One-solution process) ได้แก่ ซีเมนต์ (Cement Portland) เป็นวัสดุในการอัดฉีดและใช้สารโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) เป็นสารผสม (Additive) ซึ่งเป็นสารที่จะทำให้ควบคุมเวลาการแข็งตัวของซีเมนต์หรือน้ำปูนได้ และเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของดินถมตัวเขื่อน ผลการปฏิบัติงานอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมีดังกล่าว สามารถหยุดการไหลรั่วของน้ำได้ทั้งหมด

การดำเนินการดังกล่าวเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีและวิธีการที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาสามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่มีรูปแบบในลักษณะเดียวกันหรือคล้ายคลึงกัน ในกรณีที่เกิดปัญหา

การไหลรั่วของน้ำผ่านเขื่อนดินถมของโครงการอื่น ๆ ในอนาคต ผู้รับผิดชอบในการปฏิบัติงานแก้ไขปัญห
สามารถนำวิธีการและขั้นตอนการแก้ไขปัญหโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมีไปประยุกต์ใช้เพื่อการแก้ไข
ปัญหาที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ รวมทั้งใช้เป็นกรณีศึกษาให้แก่เจ้าหน้าที่ของกรมชลประทาน
สถาบันการศึกษา และหน่วยงานอื่น ๆ ตลอดจนผู้สนใจทั่วไป เพื่อลดความเสียหายและป้องกันการพิบัติที่จะ
เกิดขึ้น รวมทั้งประหยัดเวลาและงบประมาณในการแก้ไขปัญห และซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดจากการไหล
รั่วของน้ำผ่านเขื่อนดิน โดยใช้เวลาในการปฏิบัติงานแก้ไขปัญหในครั้งนี้เพียง 120 ชั่วโมง นับตั้งแต่วันที่พบ
ปัญห ซึ่งถือว่าเป็นระยะเวลาที่น้อยมากในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

กัมปนาท ขวัญศิริกุล
พฤศจิกายน 2563

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	1
1.4 ข้อมูลโครงการ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	6
2.1 ข้อมูลธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่โครงการ	6
2.2 การพิบัติของเขื่อน	7
2.3 การรั่วซึมผ่านฐานรากและตัวเขื่อนดินถม	10
2.4 การอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมี	11
2.4.1 ทฤษฎีการอัดฉีด (Grouting theory)	11
2.4.2 การปฏิบัติงานอัดฉีดน้ำปูนและสารผสม (Cement grouting)	14
2.4.3 การปฏิบัติงานอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting)	16
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	24
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	24
3.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์เบื้องต้น	25
3.3 การดำเนินการป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อน	27
3.4 การสำรวจเพิ่มเติมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแก้ไขปัญหา	32
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	39
4.1 การอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมีในการแก้ไขปัญหาการไหลรั่วของน้ำในภาวะวิกฤติ	39
4.2 การเพิ่มประสิทธิภาพความมั่นคงระยะเร่งด่วน	43
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารอ้างอิง	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลโครงการและแบบก่อสร้าง

ภาคผนวก ข แบบปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน หมายเลข สสธ.-ส.7-0323

ภาคผนวก ค ข้อมูลการตอกทดลองแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test ;
SPT)

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	แสดงค่า Permeability ของดิน หินชนิดต่าง ๆ	12
2-2	แสดงการประเมินการไหลของน้ำผ่านช่องว่าง รอยแตกของหินที่มีขนาดต่าง ๆ ที่ระดับแรงดันน้ำ (Water pressure) 20 เมตร และ 100 เมตร	12
2-3	การเลือกใช้วัสดุในการ grout จากคุณภาพมวลหินและอัตราการรั่วซึม	13
2-4	หลักเกณฑ์การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมน้ำปูน	16
2-5	ชนิดของวัสดุ สารเคมีและคุณสมบัติของสารเคมีที่นิยมใช้ในการอัดฉีด	21
2-6	วัตถุประสงค์การใช้งานของสารเคมีแต่ละชนิด	21
2-7	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต และความหนืดเมื่อเทียบกับน้ำ	23
3-1	ผลการเจาะสำรวจชั้นดินด้วยสว่านมือ (Hand Auger)	27
4-1	แสดงอัตราส่วนของวัสดุที่เหมาะสม (Grout mix ratio) และระยะเวลาการเซตตัวของวัสดุ (Setting time)	41

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1-1	บริเวณตำแหน่งที่พบการไหลรั่วของน้ำ	2
1-2	สภาพการไหลรั่วของน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ กม.2+158 ระดับ +100.00 เมตร (รสม.) เมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563 เวลา 21.00 น.	2
1-3	สภาพการไหลรั่วของน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ กม.2+158 ระดับ +100.00 เมตร (รสม.) เมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2563	3
2-1	แผนที่ธรณีวิทยาบริเวณเขื่อนห้วยยาง อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว	6
2-2	ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากน้ำล้นสันเขื่อน (Crest overtopping)	7
2-3	ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากการกัดเซาะภายใน (Internal erosion or piping)	7
2-4	ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากการทรุดของตัวเขื่อนและฐานราก (Embankment and foundation settlement)	8
2-5	ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากความไม่เสถียรภาพของลาดชันดิน (Slope Instability : I)	8
2-6	ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากความไม่เสถียรภาพของลาดชันดิน (Slope Instability : II)	8
2-7	ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากความไม่เสถียรภาพของลาดชันดิน (Slope Instability : III)	9
2-8	รูปแบบการเกิด Internal erosion ในตัวเขื่อนดินถม	10
2-9	การรั่วซึมของตัวเขื่อนและฐานราก	11
2-10	แผนภาพ Grain size distribution of Cements	14
2-11	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบวิธีการอัดฉีด (Grouting) โดยพิจารณาชนิดวัสดุของชั้นดิน/หินฐานราก (Comparison of grouts)	17
2-12	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนืดและค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่นิยมใช้ในการอัดฉีด	18
3-1	บริเวณตำแหน่งที่พบการไหลรั่วของน้ำ	25
3-2	สภาพการไหลรั่วของน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ กม.2+158 ระดับ +100.00 เมตร (รสม.) เมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563 เวลา 21.00 น.	26
3-3	สภาพการไหลรั่วของน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ กม.2+158 ระดับ +100.00 เมตร (รสม.) เมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2563	26
3-4	การชะลอกการกัดเซาะดินถมตัวเขื่อนในช่วงแรกของเหตุการณ์ด้วยการถมวัสดุเม็ดหยาบ	27
3-5	การก่อสร้างบ่อล้อมจุดที่น้ำไหลรั่วออกมาเพื่อวัดอัตราการไหลรั่วของน้ำ	28
3-6	ติดตั้งท่อเพื่อวัดอัตราการไหลรั่วของน้ำ	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3-7	ข้อมูลอัตราการไหลร่วของน้ำรายชั่วโมง (เริ่มวัด เวลา 18.00 น. วันที่ 22 ตุลาคม 2563)	29
3-8	การก่อสร้างบ่อเพื่อเพิ่มความสูงของระดับน้ำสำหรับลดแรงดันและความเร็วในการไหลของน้ำ	29
3-9	หลักการ Piping and critical exit gradient	30
3-10	การถมดินเสริมบริเวณลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ	30
3-11	การระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำผ่านคลองส่งน้ำฝั่งขวา	31
3-12	การระบายน้ำด้วยวิธีกาลักน้ำบริเวณอาคารระบายน้ำล้น (Spillway)	31
3-13	การระบายน้ำด้วยวิธีกาลักน้ำบริเวณอาคารระบายน้ำล้น (Spillway)	32
3-14	แผนที่ธรณีวิทยาบริเวณเขื่อนห้วยยาง อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว	33
3-15	การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity survey)	34
3-16	ผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	34
3-17	ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจในบริเวณที่มีผลการแปลความหมายจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำหรือ Anomalous zone	35
3-18	เจาะเพื่อหาแนวรูรั่วของน้ำโดยใช้เครื่องเจาะแบบกระแทก	36
3-19	เจาะเพื่อหาแนวรูรั่วของน้ำโดยใช้เครื่องเจาะแบบหมุน	36
3-20	จุดเจาะสำรวจโดยพิจารณาจากข้อมูลสภาพภูมิประเทศจากแปลนรูปตัด ตามแบบหมายเลข หย-ห-034	37
3-21	จุดที่เป็นแนวการไหลร่วของน้ำที่ตำแหน่ง กม 182+2 ที่ระดับประมาณ 98.50+ เมตร (.รสม)	37
3-22	จุดที่เจาะพบการไหลร่วของน้ำที่ตำแหน่ง กม.2+182 ที่ระดับประมาณ +98.50 เมตร (รสม.)	38
4-1	แสดงอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา	39
4-2	แผนภาพแสดงอัตราการรั่วซึมผ่านรอยรั่วของน้ำ	42
4-3	ภาพแสดงการหยุดไหลร่วของน้ำได้ทั้งหมด	42
4-4	ภาพแสดงร่องรอยการกัดเซาะของน้ำฝนบริเวณลาดด้านท้ายเขื่อน	43
4-5	การไหลร่วของสารผสมที่อัดฉีดบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	44
4-6	หลุมยุบบริเวณสันเขื่อนด้านเหนือน้ำ	44
4-7	หลุมยุบบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ	45
4-8	ตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะทดสอบภายหลังการอัดฉีด	46
4-9	ตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะทดสอบภายหลังการอัดฉีด	46
4-10	การแทนที่ของของผสมในชั้นดินที่เข้าไปเติมเต็มในช่องว่างที่เป็นแนวแตก รอยแยกของชั้นดิน	47

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ภายหลังการก่อสร้างเขื่อนห้วยยาง อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว ในปี พ.ศ. 2529 และได้เปิดใช้งานในช่วงเวลาที่ผ่านมา พบว่าเขื่อนห้วยยางมีปัญหาการไหลระบายน้ำฝนและการกัดเซาะลาดด้านท้ายเขื่อน จนทำให้เกิดหลุมยุบบนสันเขื่อน อันเนื่องมาจากดินถมตัวเขื่อนเป็นดินกระจายตัว (Dispersive soil) จึงได้มีการออกแบบและซ่อมแซมลาดด้านท้ายเขื่อน และในระหว่างดำเนินการก่อสร้างในปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 ได้เกิดเหตุการณ์น้ำไหลรั่วผ่านเขื่อนดินถมบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ที่บริเวณ กม.2+158 ที่ระดับ +100.00 เมตร (รสม.) ของเขื่อน เมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563 เวลา 21.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 1-1 รูปที่ 1-2 และรูปที่ 1-3 ช่วงเวลาที่เหตุน้ำไหลรั่วที่ระดับ +100.00 เมตร (รสม.) ระดับน้ำอยู่ที่ระดับ +104.56 เมตร (รสม.) คิดเป็นปริมาณน้ำที่เก็บกักในอ่างเก็บน้ำ 53.50 ล้านลูกบาศก์เมตร เจ้าหน้าที่โครงการและผู้เกี่ยวข้องได้แจ้งเหตุโดยลำดับ ผู้บริหารกรมชลประทานได้สั่งการให้ผู้เชี่ยวชาญและเจ้าหน้าที่จากส่วนกลาง เข้าพื้นที่อย่างเร่งด่วน โดยเจ้าหน้าที่จากสำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา ได้รับคำสั่งให้เข้าพื้นที่เผชิญเหตุ ได้รับทราบข้อมูลและหารือกับผู้บริหารกรมชลประทาน ผู้เชี่ยวชาญและเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบซึ่งปฏิบัติงานในพื้นที่ ส่วนวิศวกรรมธรณีได้เข้าปฏิบัติงานเพื่อตรวจสอบปัญหา และหาแนวทางการดำเนินการแก้ไขปัญหาในสถานการณ์ฉุกเฉินดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อแก้ไขปัญหาการไหลรั่วผ่านเขื่อนดินถมบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยาง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว ภายใต้สถานการณ์ฉุกเฉิน

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

การดำเนินงานแก้ไขปัญหาน้ำไหลรั่วผ่านเขื่อนดินถมบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ เป็นการดำเนินงานที่แข่งกับเวลา และสภาพความเสียหายของเขื่อนที่จะขยายความรุนแรงขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน ขอบเขตการดำเนินงานประกอบด้วย การตรวจสอบปัญหาและแนวทางการแก้ไข โดยต้องกำหนดวิธีการให้เหมาะสมกับประเภท สภาพเขื่อน ชนิดของฐานราก และการไหลของน้ำที่ไหลรั่วผ่านดินถมตัวเขื่อนและชั้นฐานราก รวมทั้งรูปแบบ ขนาดของรอยแตก รอยแยก ช่องว่างของชั้นหินฐานราก โดยเนื้อหาในรายงานฉบับนี้จะเป็นการอธิบายถึงขั้นตอน รายละเอียด และการปฏิบัติงานในการแก้ไขปัญหาโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูน (Cement grouting) และการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) รวมถึงรายละเอียดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในการแก้ไขปัญหาการไหลรั่วของน้ำผ่านเขื่อนดินถมของเขื่อนห้วยยาง



รูปที่ 1-1 บริเวณตำแหน่งที่พบการไหลรั่วของน้ำ



รูปที่ 1-2 สภาพการไหลรั่วของน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ กม.2+158 ระดับ +100.00 เมตร (รสม.)
เมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563 เวลา 21.00 น.



รูปที่ 1-3 สภาพการไหลร่วนของน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ กม.2+158 ระดับ +100.00 เมตร (รสม.)
เมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2563

1.4 ข้อมูลโครงการ

เมื่อวันที่ 8 เมษายน 2507 กระทรวงมหาดไทย ได้ตั้งคณะกรรมการประสานนโยบาย และปฏิบัติการเคลื่อนที่ เพื่อปฏิบัติงานในท้องถิ่นห่างไกลและทุรกันดาร ซึ่งได้พิจารณาวางแผนปรับปรุงอำเภอตาพระยา จังหวัดปราจีนบุรี โดยทำเหมืองฝายเก็บกักน้ำ และกรมชลประทานได้รับงบประมาณการก่อสร้างฝาย โดยคณะกรรมการพัฒนาภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นผู้จัดทำให้ กรมชลประทานได้ดำเนินการก่อสร้างฝายในปี พ.ศ. 2508 และได้ส่งมอบให้กับจังหวัดปราจีนบุรี ในปี พ.ศ. 2511

ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2513 กรมชลประทานได้รับงบประมาณเพื่อดำเนินการก่อสร้างโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยาง แต่เนื่องจากรายละเอียดยังไม่สมบูรณ์ จึงไม่สามารถดำเนินการได้ ต่อมาในปีงบประมาณ พ.ศ. 2514-2516 ได้รับงบประมาณเพื่อดำเนินการก่อสร้างอีกครั้ง ดังนี้ ตัดถนนเข้าห้วยยาง สร้างที่ทำการบ้านพักโรงเรียนชั่วคราว สำรวจทางธรณีวิทยา สำรวจแนวคลองส่งน้ำ และดำเนินการขออนุมัติใช้ที่ดินในเขตป่าสงวน ซึ่งกรมป่าไม้ได้ตรวจสอบเสนอคณะรัฐมนตรี และคณะรัฐมนตรีได้ลงมติอนุมัติให้กรมชลประทานเข้าดำเนินการได้ เมื่อวันที่ 13 มีนาคม 2516

ต่อมาในปีงบประมาณ พ.ศ. 2517 กรมชลประทานได้ระงับการก่อสร้างไว้ก่อน เพื่อศึกษารายละเอียดข้อมูล และเร่งรัดให้กองวางโครงการดำเนินจัดทำรายงานความเหมาะสมเพื่อเสนอบรรจุเข้าแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2520-2524) ซึ่งกองวางโครงการได้จัดทำรายงานดังกล่าวแล้วเสร็จ เมื่อเดือนธันวาคม 2519 แต่ในช่วงเวลานั้นเกิดปัญหาด้านงบประมาณและอื่น ๆ จึงจำเป็นต้องระงับการก่อสร้างโครงการห้วยยางอีกครั้ง

และเมื่อวันที่ 18 สิงหาคม 2525 ประชาชนอำเภอตาพระยา ได้มีหนังสือร้องเรียนขอให้สร้างโครงการชลประทานในเขตอำเภอตาพระยา กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จึงเสนอให้กรมชลประทานพิจารณาทบทวนโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยางอีกครั้ง เนื่องจากโครงการนี้สามารถอำนวยประโยชน์แก่ประชาชนใน

พื้นที่อำเภอตาพระยา หมู่บ้านป้องกันตนเองชายแดนไทย-กัมพูชา อีกทั้งยังเป็นประโยชน์แก่ทางการทหารด้วย คณะรัฐมนตรีจึงมีมติให้กรมชลประทานเปิดการก่อสร้างโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยาง เมื่อวันที่ 13 พฤษภาคม 2529

1.4.1 ที่ตั้งและลักษณะภูมิประเทศ

อ่างเก็บน้ำห้วยยาง ตั้งอยู่ในหมู่ที่ 8 บ้านโคกกราด ตำบลทัพราช อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว ตามแผนที่ 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ระวาง 5537III พิกัด 48 PTA 463513 ละติจูด $14^{\circ} - 00' - 40''$ ลองจิจูด $102^{\circ} - 38' - 50''$ เป็นพื้นที่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าตาพระยา และป่าสงวนแห่งชาติป่าโคกสูง มีพื้นที่รับน้ำฝนประมาณ 194.5 ตารางกิโลเมตร พื้นที่อ่างเก็บน้ำประมาณ 9,600 ไร่ ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่รับน้ำเป็นทุ่งนาประมาณร้อยละ 2 ป่าโปร่งร้อยละ 8 และป่าทึบร้อยละ 80 ภูเขาสำคัญต่าง ๆ ที่อยู่บนขอบของพื้นที่รับน้ำฝน มีดังนี้ ด้านทิศเหนือติดเขาพรานนุช เขาสะแกกรัง และเขาหวง ด้านใต้ติดเขาคันนา ด้านตะวันตกติดเขาทลาย และเขาห้วยชัน

ลำน้ำห้วยยาง มีต้นกำเนิดจากภูเขาสูง คือเขาห้วยชัน และเขาหวง ไหลจากทิศตะวันตกไปตะวันออก และไปบรรจบกับลำน้ำสะโตนที่สระแกกลายเป็นแม่น้ำ SWAY JIG ในเขตประเทศกัมพูชา ความยาวของลำน้ำห้วยยางประมาณ 75 กิโลเมตร ส่วนความยาวจนถึงจุดที่ตั้งเขื่อนประมาณ 37 กิโลเมตร ลักษณะความลาดเอียงของลำน้ำตอนต้นเฉลี่ย 0.002 และตอนกลางเฉลี่ย 0.0025 ลำน้ำห้วยยางมีลำน้ำสาขา คือ ห้วยอีลาย และห้วยอีลายน้อย

เส้นทางคมนาคม ที่ใช้ติดต่อกับโครงการฯ ใช้ถนนเข้าห้วงงานโครงการฯ ซึ่งแยกจากทางหลวงหมายเลข 3068 สายอำเภออรัญประเทศ-อำเภอตาพระยา ตรงกิโลเมตรที่ 35+640 สภาพถนนเข้าห้วงงานฯ เป็นถนนลูกรังโดยตลอด ระยะทางจากทางแยกถึงห้วงงานโครงการฯ ประมาณ 14 กิโลเมตร ที่ตั้งห้วงงานโครงการฯ ห่างจากจังหวัดสระแก้วประมาณ 100 กิโลเมตร อำเภออรัญประเทศประมาณ 50 กิโลเมตร และอำเภอตาพระยา ประมาณ 20 กิโลเมตร

1.4.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อให้มีแหล่งน้ำใช้ในการเกษตรอย่างสมบูรณ์แบบในเขตโครงการฯ และใช้ในการอุปโภค-บริโภค โดยเฉพาะในฤดูแล้ง ในเขตพื้นที่อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว

1.4.3 ลักษณะโครงการ

ทำนบกิน

ทำเลที่สร้างทำนบกิน	แผนที่ระวาง 5537 III	พิกัด 48 PTV 463513
พื้นที่รับน้ำฝน	194.50	ตารางกิโลเมตร
ปริมาณฝนตกเฉลี่ยทั้งปี	1,193.00	มิลลิเมตร
ปริมาณน้ำทั้งปีที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำ	70.00	ล้านลูกบาศก์เมตร
ทำนบกิน สูง	17.00	เมตร
ทำนบกิน กว้าง	8.00	เมตร
ทำนบกิน ยาว	3,200.00	เมตร
ระดับสันทำนบ	+108.00	เมตร (รสม.)
ระดับน้ำสูงสุด	+106.70	เมตร (รสม.)
ระดับน้ำเก็บกัก	+105.00	เมตร (รสม.)

ความจุอ่างเก็บน้ำ	60.00	ล้านลูกบาศก์เมตร
ความจุอ่างเก็บน้ำที่ระดับต่ำสุด (+97.000 เมตร (ร.ท.ก.))	4.00	ล้านลูกบาศก์เมตร
ความจุอ่างเก็บน้ำสำรองใช้งาน	56.00	ล้านลูกบาศก์เมตร
พื้นที่ผิวน้ำที่ระดับน้ำสูงสุด (ประมาณ 11,375 ไร่)	18.20	ตารางกิโลเมตร

ระบบส่งน้ำและอาคารประกอบ

อาคารระบายน้ำล้น สันกว้าง 14.00 เมตร Qmax	175.00	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
ทรบ.ปากคลองส่งน้ำฝิ่งซ้าย ท่อ คสล. Qmax	1.709	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
ทรบ.ปากคลองส่งน้ำฝิ่งขวา ท่อ คสล. Qmax	6.221	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
ทางระบายน้ำล้น Morning Glory Spillway ϕ 14.00 ม. ยาว 164.80 เมตร		
Qmax	175.00	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
อาคารระบายน้ำลงลำน้ำเดิม ยาว 125.20 เมตร		
Qmax	1.10	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
อาคารส่งน้ำเข้าคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝิ่งซ้าย ยาว 3.67 เมตร		
ส่งน้ำได้	1.709	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
อาคารส่งน้ำเข้าคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝิ่งขวา ยาว 68.87 เมตร		
ส่งน้ำได้	6.221	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
ระบบส่งน้ำฝิ่งขวา คลองส่งน้ำ 3 สาย ยาว 47.63 กิโลเมตร มีอาคารในคลอง 239 แห่ง		
ระบบส่งน้ำฝิ่งซ้าย คลองส่งน้ำ 1 สาย ยาว 5.07 กิโลเมตร มีอาคารในคลอง 27 แห่ง		
คลองระบายน้ำคลองขุด 3 สาย ยาว 17.256 กิโลเมตร มีอาคารในคลอง 57 แห่ง		
ขุดลอกคลองห้วยยาง ยาว 1.80 กิโลเมตร อาคารในคลอง 19 แห่ง		
พื้นที่ชลประทาน 40,000 ไร่ ฝิ่งขวา 37,480 ไร่ ฝิ่งซ้าย 2,520 ไร่		

ค่าลงทุน

ทำนบดินพร้อมอาคารประกอบ	169.269	ล้านบาท
งานระบบส่งน้ำและระบบระบายน้ำพร้อมอาคารประกอบ	301.267	ล้านบาท
งานเบื้องต้น	5.263	ล้านบาท
รวม	475.799	ล้านบาท

1.4.4 ผลประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถส่งน้ำช่วยเหลือพื้นที่เพาะปลูกในเขตอำเภอตาพระยา จำนวน 40,000 ไร่ ช่วยให้มีน้ำสำหรับอุปโภค-บริโภคแก่ราษฎรประมาณ 100,000 คน สามารถบรรเทาและลดอันตรายจากอุทกภัยในพื้นที่โครงการ อ่างเก็บน้ำจะเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ปลาน้ำจืดขนาดใหญ่ และเป็นสถานที่พักผ่อนหย่อนใจ

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ข้อมูลธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่โครงการ

สภาพธรณีวิทยาทั่วไปของโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยาง อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว จากแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตราส่วน 1:250,000 (กรมทรัพยากรธรณี, 2541) พบว่าบริเวณพื้นที่โครงการฯ และพื้นที่โดยรอบ ประกอบด้วย ชุดหิน 2 ชุด และชุดตะกอน 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 2-1 โดยเรียงลำดับอายุจากแก่ไปอ่อน ได้ดังนี้

ชุดหิน

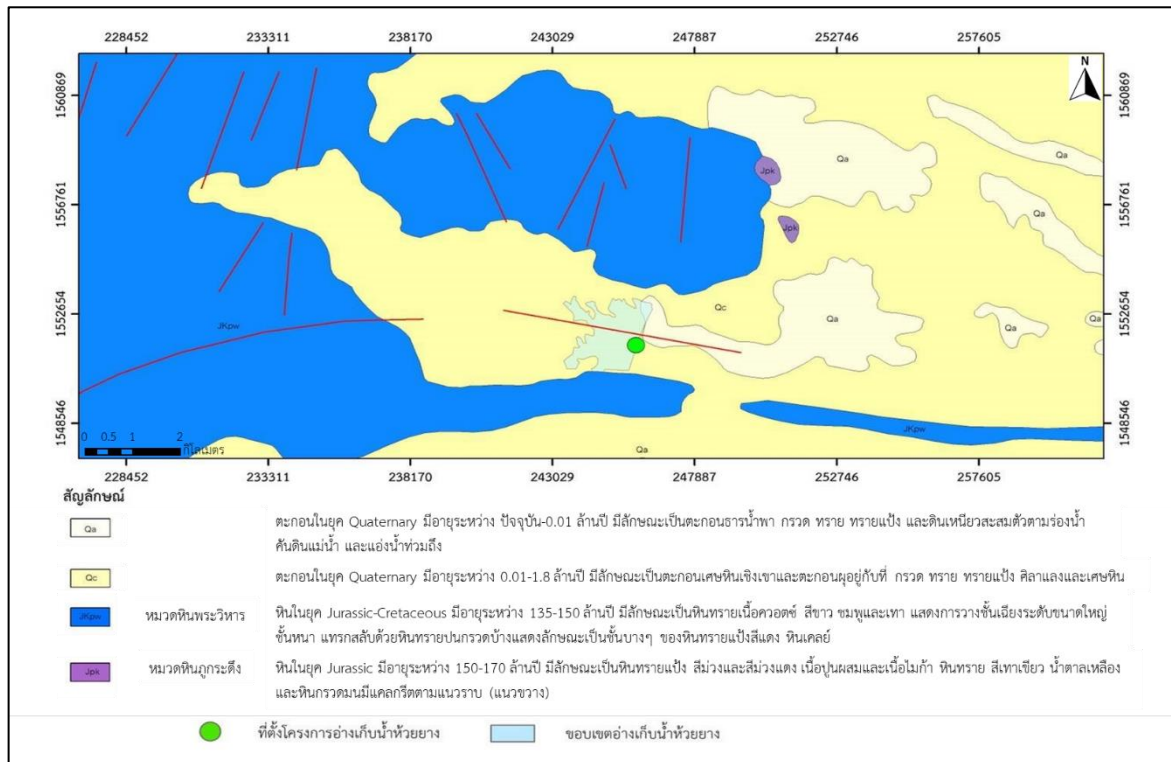
1) หมวดหิน Jpk (หมวดหินภูกระดึง) เป็นชั้นหินทรายกลุ่มหินโคราช อายุจูแรสซิก (Jurassic age) ประกอบด้วย หินทรายแป้งสีม่วง และม่วงแดง เป็นเนื้อปูนผสมและเนื้อไมก้า หินทรายสีเทาเขียว น้ำตาลเหลือง และพบหินกรวดมีเนื้อเชื่อมประสานเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตมาก (Calcrete) ตามแนวราบ (แนวขวาง)

2) หมวดหิน JKpw (หมวดหินพระวิหาร) เป็นชั้นหินทรายกลุ่มหินโคราช อายุจูแรสซิก-ครีเทเชียส (Jurassic-Cretaceous age) ประกอบด้วย หินทรายเนื้อควอตซ์สีขาว ชมพู และเทา แสดงการวางชั้นเฉียงระดับขนาดใหญ่ มีชั้นหนา แทรกสลับด้วยหินทรายปนกรวด นอกจากนี้มีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ ของหินทรายแป้งสีแดง และหินเคลย์

ชุดตะกอน

1) ชุดตะกอน Qa ยุคควอเทอร์นารี (Quaternary Period) เป็นตะกอนธารน้ำพา ประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว สะสมตัวตามร่องน้ำและพื้นที่น้ำท่วมถึง

2) ชุดตะกอน Qc ยุคควอเทอร์นารี (Quaternary Period) เป็นตะกอนเศษหินเชิงเขา ประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายแป้ง ศิลาแลง และเศษหิน



รูปที่ 2-1 แผนที่ธรณีวิทยาบริเวณเขื่อนห้วยยาง อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว (กรมทรัพยากรธรณี, 2541)

2.2 การพิบัติของเขื่อน

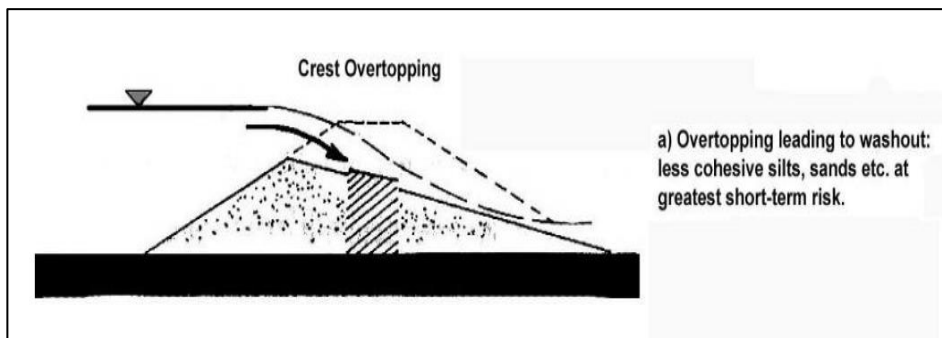
การพิบัติของเขื่อนแบ่งเป็น 2 ระดับของความรุนแรง ได้แก่

1) การพิบัติเพียงเล็กน้อย (Minor damage) หรือความเสียหายที่แก้ไขได้ (Repairable damage) โดยทั่วไปการพิบัติของเขื่อนดังกล่าวจะมีความเสียหายที่ปรากฏหรือข้อบ่งชี้ให้เห็นล่วงหน้า ซึ่งเมื่อสามารถตรวจพบล่วงหน้าก็จะเป็นความเสียหายที่สามารถซ่อมแซมแก้ไขได้ แต่ถ้าละเลยก็อาจขยายตัวเป็นการพิบัติที่รุนแรงขึ้นได้

2) การพิบัติที่รุนแรง (Catastrophic failure) หมายถึง การพิบัติที่เกิดขึ้นฉับพลัน มีความรุนแรงมาก และทำความเสียหายอย่างกว้างขวาง ได้แก่ น้ำล้นสันเขื่อน การกัดเซาะภายในตัวเขื่อนและฐานราก การเคลื่อนพังของลาดเขื่อน

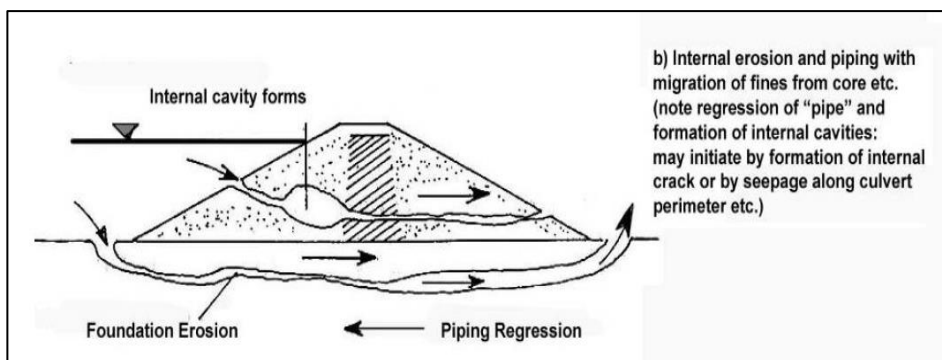
ลักษณะการพิบัติของเขื่อนมีความสำคัญในการวิเคราะห์แก้ไขปัญหา เพราะหากทราบสาเหตุที่แท้จริงในการพิบัติก็สามารถตั้งสมมติฐานเพื่อแก้ไขปรับปรุงปัญหาดังกล่าวได้ อนุกรรมการเขื่อนใหญ่ของสหรัฐอเมริกา (USSD) ได้สรุปการพิบัติของเขื่อนดินไว้ 6 ลักษณะ (ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์, 2550) ได้แก่

1) น้ำล้นข้ามสันเขื่อน (Overtopping) และกัดเซาะพัดพาเนื้อวัสดุบริเวณสันเขื่อนออกไป การพิบัติลักษณะนี้จะเกิดในเวลาอันรวดเร็ว เนื่องจากวัสดุไม่สามารถต้านทานความเร็วของน้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-2



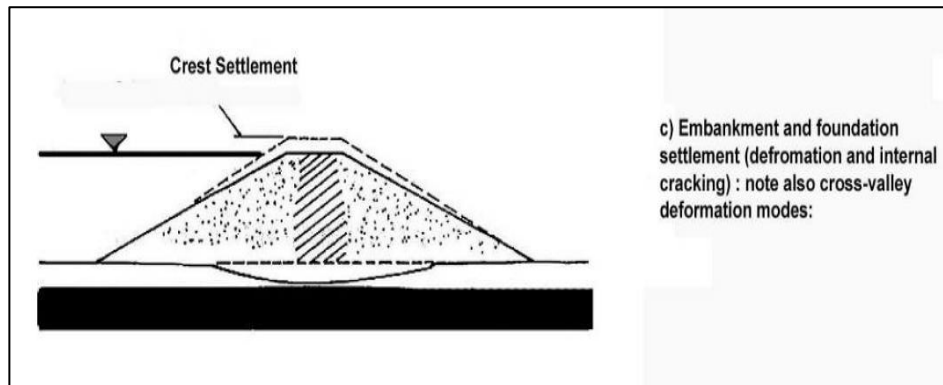
รูปที่ 2-2 ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากน้ำล้นสันเขื่อน (Crest overtopping)

2) การกัดเซาะภายใน (Internal erosion or piping) ทำให้เกิดรูโพรงในตัวเขื่อนหรือฐานราก น้ำจะกัดเซาะรูโพรงให้ขยายใหญ่ขึ้นจนกลายเป็นการพิบัติอย่างสมบูรณ์ หรือจนกว่าความต่างศักย์ของน้ำจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3-2



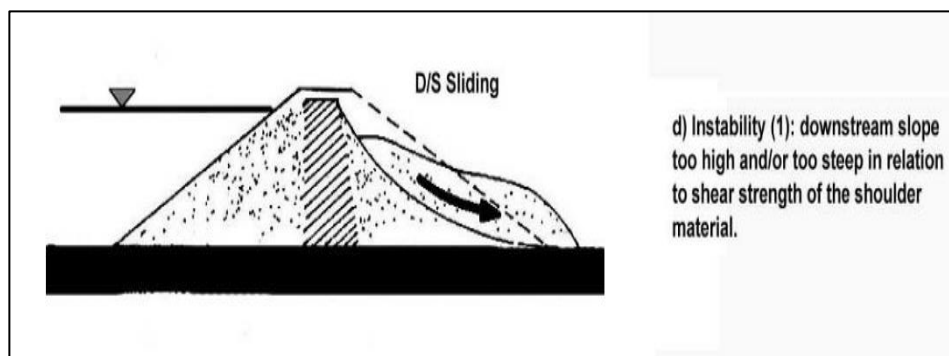
รูปที่ 2-3 ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากการกัดเซาะภายใน (Internal erosion or piping)

3) การทรุดของตัวเขื่อนและฐานราก (Embankment and foundation settlement) อันเนื่องมาจากการทรุดตัว ที่ทำให้เกิดรอยแตกในตัวเขื่อนหรือฐานยันเขื่อน ดังแสดงในรูปที่ 2-4



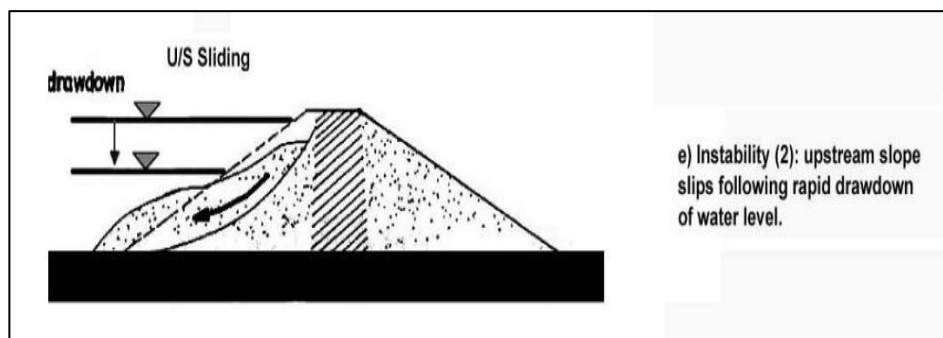
รูปที่ 2-4 ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากการทรุดของตัวเขื่อนและฐานราก (Embankment and foundation settlement)

4) ความไม่เสถียรภาพของลาดชันดิน (Slope Instability : I) ด้านท้ายน้ำอันเนื่องมาจากการออกแบบให้เขื่อนมีความลาดชันมากเกินไปและคัดเลือกวัสดุก่อสร้างไม่เหมาะสม ทำให้มีแรงยึดรั้งไม่เพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 2-5



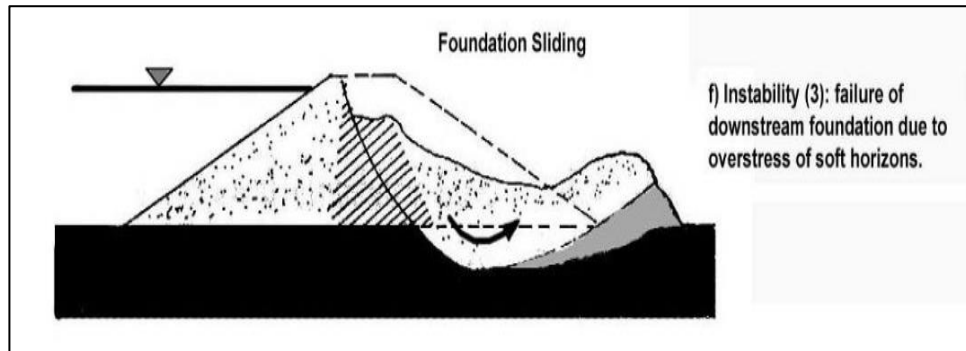
รูปที่ 2-5 ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากความไม่เสถียรภาพของลาดชันดิน (Slope Instability : I)

5) ความไม่เสถียรภาพของลาดชันดิน (Slope Instability : II) ด้านเหนือน้ำอันเนื่องมาจากการลดระดับน้ำอย่างรวดเร็ว ดินวัสดุมมีการเปลี่ยนสภาวะอย่างรวดเร็ว ทำให้มีกำลังลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 ภาพแสดงลักษณะการพิบัติเนื่องจากความไม่เสถียรภาพของลาดชันดิน (Slope Instability : II)

6) ความไม่เสถียรภาพของลาดชันดิน (Slope Instability : III) ด้านท้ายน้ำอันเนื่องมาจากดินฐานรากมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมหรือไม่ได้รับการปรับปรุงฐานรากที่ได้มาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 ภาพแสดงลักษณะการพังทลายเนื่องจากความไม่เสถียรภาพของลาดชันดิน (Slope Instability : III)

Glen R. Andersen et al. (2001) จำแนกการพังทลายของเขื่อนเป็น 4 สาเหตุหลัก คือ

1) น้ำล้นสันเขื่อน (Overtopping) เนื่องมาจากการออกแบบทางชลศาสตร์ไม่เพียงพอ เช่น การออกแบบอาคารระบายน้ำล้นมีขนาดทางระบายน้ำกว้างไม่เพียงพอ หรืออาจเกิดมาจากภัยธรรมชาติ เช่น เกิดฝนตกหนัก

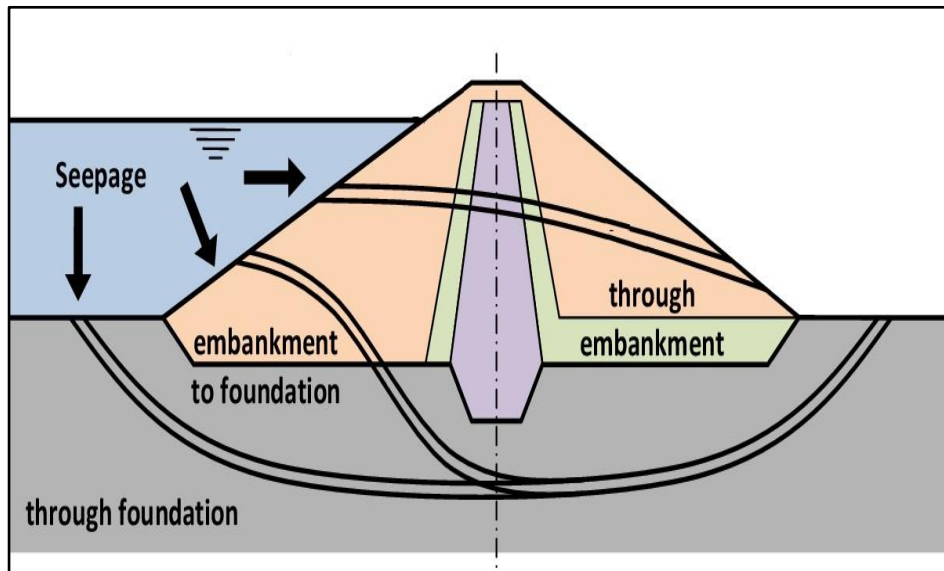
2) การกัดเซาะภายนอก (External Erosion) เนื่องมาจากดินวัสดุทำตัวเขื่อนไม่ได้มาตรฐาน หรือเป็นเหตุการณ์ต่อเนื่องมาจากการที่น้ำล้นสันเขื่อนจนกัดเซาะเนื้อวัสดุจนทำให้เกิดการพังทลาย

3) การกัดเซาะภายใน (Piping) ซึ่งเกิดจากน้ำเดินทางผ่านรอยแยกต่าง ๆ ภายในตัวเขื่อนหรือฐานรากของเขื่อน เกิดเป็นรูโพรงและขยายใหญ่ขึ้น จนทำให้เขื่อนพังทลาย

4) เสถียรภาพความลาดชัน (Slope Stability) เนื่องมาจากการวิเคราะห์ไม่เพียงพอ ก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน หรือใช้ดินวัสดุไม่เหมาะสม

USSD ได้กำหนดรูปแบบปัญหาของการกัดเซาะภายในตัวเขื่อนดินถม (Internal erosion) ได้เป็น 4 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2-8 ดังนี้

- 1) การไหลรั่วผ่านตัวเขื่อน (Through embankment)
- 2) การไหลรั่วผ่านฐานราก (Through foundation)
- 3) การไหลรั่วผ่านตัวเขื่อนลงสู่ฐานราก (Through embankment to foundation)
- 4) การไหลรั่วในช่องว่างที่ทะลุทะลวงต่อเนื่องในโครงสร้าง (Through penetrating structure)

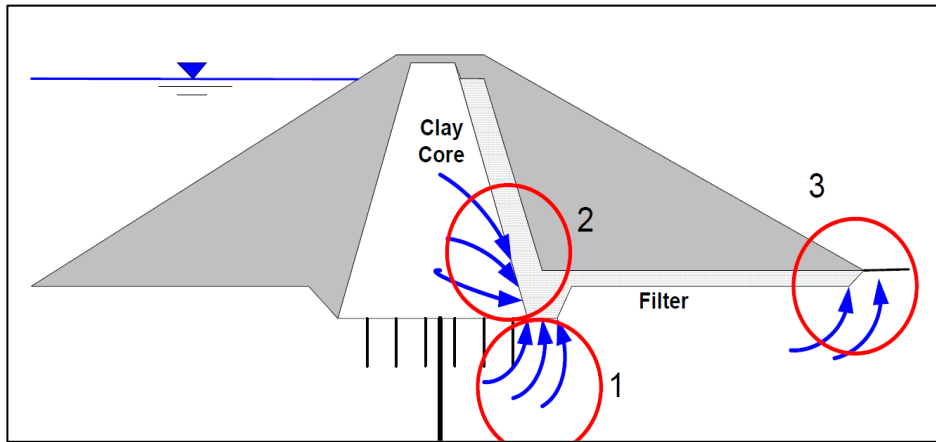


รูปที่ 2-8 รูปแบบการเกิด Internal erosion ในตัวเขื่อนดินถม

2.3 การรั่วซึมผ่านฐานรากและตัวเขื่อนดินถม

ในการกักเก็บน้ำของเขื่อนทำให้เกิดความแตกต่างของระดับน้ำในอ่าง และระดับน้ำด้านท้ายน้ำ น้ำจะมีการไหลซึมผ่านวัสดุตัวกลางที่มีรูพรุน (Porous media) จากระดับสูงไปต่ำ โดยไหลผ่านทั้งตัวเขื่อนและฐานราก ซึ่งการออกแบบจะพยายามลดการรั่วซึมนี้ให้น้อยที่สุด โดยการבודัดดินเหนียวหรือวัสดุที่บ่งน้ำเป็นแกนเขื่อนและอัดฉีดน้ำปูนในชั้นฐานราก แต่น้ำก็พยายามหาช่องทางที่จะซึมผ่านง่ายที่สุด โดยหากมีความเร็วหรือแรงดันมากพอก็จะกัดเซาะพาเอาเม็ดดินไหลออกไปพร้อมกันด้วย การกัดเซาะภายในตัวเขื่อน ไม่สามารถตรวจพบได้โดยง่าย ซึ่งส่วนใหญ่จะพบเมื่อมีการกัดเซาะและมีน้ำไหลออกมาแล้ว การกัดเซาะนี้เรียกว่าการเกิด Piping ถ้าเกิดการกัดเซาะอย่างต่อเนื่องอาจเป็นสาเหตุทำให้เขื่อนพังในที่สุด ตำแหน่งในตัวเขื่อนที่เกิดการกัดเซาะได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2-9

- 1) บริเวณที่ 1 รอยต่อของฐานราก แกนดินเหนียว (Clay core) และ Filter น้ำจากชั้นฐานรากที่ไหลผ่านแนว Grout จะไหลเข้าสู่ Filter โดยเร็ว
- 2) บริเวณที่ 2 รอยต่อของแกนดินเหนียว และ Filter ด้านท้ายน้ำ โดยน้ำจะไหลซึมผ่านแกนดินเหนียวเข้าสู่ Filter
- 3) ฐานรากด้านท้ายน้ำ โดยน้ำที่ซึมผ่านชั้นฐานรากจะไหลขึ้นสู่ผิวดินอาจทำให้เกิดการลอยตัวของเม็ดดิน (Boiling)



รูปที่ 2-9 การรั่วซึมของตัวเขื่อนและฐานราก

ในบริเวณที่ 1 และ 2 ถ้ามีการออกแบบ Filter ที่ดีพอ การกัดเซาะจะไม่เกิดขึ้น ส่วนกรณีที่เกิดในบริเวณที่ 3 อาจต้องทำ Relief well หรือ Toe drain จะทำให้น้ำระบายออกจากฐานรากได้โดยไม่เกิดการกัดเซาะ นอกจากสาเหตุดังกล่าวแล้ว การรั่วซึมสามารถเกิดได้จากขั้นตอนการก่อสร้างโดยคุณภาพการบดอัดที่ไม่ได้มาตรฐาน และการเลือกใช้วัสดุถมตัวเขื่อนที่เป็นดินกระจายตัวมาใช้ในการบดอัด (Dispersive soil)

2.4 การอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมี

2.4.1 ทฤษฎีการอัดฉีด (Grouting theory)

Grouting หรือการอัดฉีดเป็นกระบวนการอัดฉีดของผสม/สารแขวนลอยเพื่ออุดรอยแตกหรือช่องว่าง โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ในการการอัดฉีด ได้แก่ ทราย ดินเหนียว และ Cement วัสดุดังกล่าวเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำแต่เมื่อนำมาเป็นวัสดุสำหรับอัดฉีด จะนำมาผสมกับน้ำเพื่อสร้างสารแขวนลอย น้ำทำหน้าที่เป็นพาหนะในการเคลื่อนที่นำอนุภาคของแข็งเหล่านั้นเข้าไปในช่องว่างซึ่งเรียกว่า การอัดฉีดของผสม (สารแขวนลอย)

ข้อพิจารณาสำหรับการอัดฉีด นอกจากจะพิจารณาวัตถุประสงค์ของงานแล้ว จะต้องพิจารณาคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ (Mechanical properties) ของดิน หิน และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้อัดฉีด เพื่อการตัดสินใจเลือกวิธีการและชนิดของการอัดฉีด ได้แก่

- ความพรุน (Porosity) ของดิน หิน คือจำนวนของช่องว่างต่อปริมาตรของมวลดิน หิน ทั้งหมด โดยแสดงในรูป Percentage
- ขนาด รูปร่าง ของกรวดทรายและส่วนประกอบแร่ของหิน
- ค่าการซึมผ่าน (Permeability) ของดิน หิน ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางแสดงการประเมินการไหลของน้ำผ่านช่องว่าง แนวแตกของหินที่มีขนาดต่าง ๆ ที่ระดับแรงดันน้ำ (Water pressure) 20 เมตร และ 100 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 แสดงค่า Permeability ของดิน หินชนิดต่าง ๆ (Gary B. Hemphill, 2013)

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

Source: Adapted from Bear (1972).

ตารางที่ 2-2 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).

การพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุ และวิธีการอัดฉีด จากคุณภาพมวลหิน และอัตราการรั่วซึม ซึ่งจะช่วยในการตัดสินใจเลือกชนิดซีเมนต์ (Cement type) และวัสดุสำหรับการอัดฉีด ดังแสดงในตารางที่ 2-3

Cement particle ที่ใช้ในการอัดฉีดจะต้องมีขนาดเล็กกว่าช่องว่าง 3-5 เท่า ซึ่งในงาน 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 ดังแสดงในรูปที่ 2-10

ตารางที่ 2-3 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			

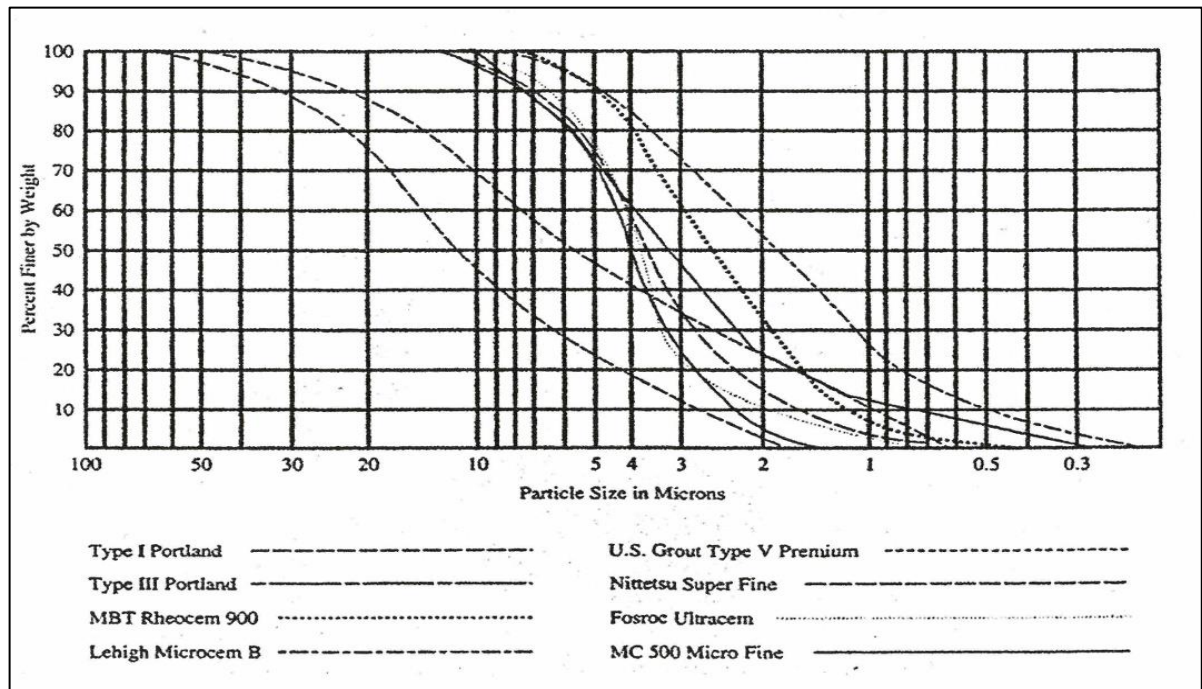
OPC = Ordinary portland cement, maximum grain size range 120-14 μm

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 2-10 แผนภาพ Grain size distribution of Cements (Gary B. Hemphill, 2013)

2.4.2 การปฏิบัติงานอัดฉีดน้ำปูนและสารผสม (Cement grouting)

วิธีการเจาะอัดฉีดน้ำปูน เริ่มจากการเจาะหลุมนำ (Pilot hole) การเจาะหลุมเพื่ออัดฉีดน้ำปูน การทดสอบการรั่วซึมนี้ด้วยความดัน (Water pressure test) การอัดฉีดน้ำปูน (Grouting) และสุดท้ายเป็นการเจาะหลุมตรวจสอบ (Check hole)

1) การเจาะ (Drilling)

ก. การเจาะหลุมนำ (Pilot hole)

เพื่อศึกษาสภาพลักษณะและคุณสมบัติของทำนบดินและค่าการรั่วซึมในบริเวณชั้นฐานราก โดยจะทำการเจาะเพื่อให้ได้ข้อมูลเพิ่มเติม ทำการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างดินของทำนบและทำการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ เพื่อนำข้อมูลมาประเมินสภาพชั้นฐานรากเป็นการเบื้องต้นต่อไป

ข. การเจาะหลุมเพื่อการอัดฉีดน้ำปูน

การเจาะหลุมเพื่อการอัดฉีดน้ำปูน เริ่มต้นที่แถวท้ายน้ำ เหนือน้ำ และสิ้นสุดที่แถวกลาง ตามลำดับ โดยรูปแบบของหลุมอัดฉีด (Pattern of grout holes) ตำแหน่งหลุมอัดฉีดในแต่ละแถวประกอบด้วย หลุม P คือหลุมเพื่อการอัดฉีดชุดลำดับที่ 1 (Primary grout holes) ห่างกัน 6.00 เมตร และมีหลุม S คือหลุมเพื่อการอัดฉีดชุดลำดับที่ 2 (Secondary grout holes) แทรกอยู่กึ่งกลางระหว่างหลุม P ทำให้มีระยะห่างเป็น 3.00 เมตร การปฏิบัติงานเจาะหลุมเพื่อการอัดฉีดน้ำปูน ดำเนินการแบบ Split spacing method คือขั้นตอนแรกทำการเจาะหลุม P ในระยะห่าง 6.00 เมตร แล้วทำการเจาะหลุม S แทรกระหว่างหลุม P ทำให้ระยะห่างระหว่างหลุมเป็น 3.00 เมตร และถ้าค่าการรั่วซึมของน้ำมากกว่า 5 lugeon และหรือค่าปริมาณปูนที่ใช้อัดฉีด (Cement take) มากกว่า 50 กิโลกรัม/เมตร ซึ่งยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์กำหนด จะทำการพิจารณาเพิ่มหลุมอัดฉีดหลุม T ซึ่งเป็นหลุมเพื่อการอัดฉีดชุดลำดับที่ 3 (Tertiary grout holes) แทรกระหว่างหลุม P และหลุม S ทำให้ระยะห่างระหว่างหลุมเป็น 1.50 เมตร และพิจารณาเพิ่มหลุมอัดฉีด หลุม Q ซึ่งเป็นหลุมเพื่อการอัดฉีดชุดลำดับที่ 4 (Quaternary grout holes) แทรกระหว่างหลุม P หรือ S และหลุม T

ทำให้ระยะห่างระหว่างหลุมเป็น 0.75 เมตร ไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าการรั่วซึมและปริมาณปูนที่ใช้อัดฉีดมีค่าตามเกณฑ์ที่กำหนด

2) การอัดฉีดน้ำปูน

ก. ชนิดของการอัดฉีดน้ำปูน

การอัดฉีดน้ำปูนเป็นขั้นตอนหลักของการแก้ไขปัญหาน้ำไหลรั่วผ่านทำนบดินหรือชั้นหินฐานราก ขั้นตอนนี้ คือ การอัดฉีดน้ำปูนเข้าไปในหลุมเจาะผ่านระบบท่อ สิ่งสำคัญที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการอัดฉีด คือ ความดันที่ใช้ในการอัดฉีด และอัตราส่วนผสมของน้ำปูน โดยทำการอัดฉีดแบบ Curtain เป็นการอัดฉีดเพื่อลดและป้องกันการไหลซึมของน้ำที่จะไหลลอดผ่านใต้ตัวเขื่อน และช่วยลดแรงยกตัว (Uplift pressure) ของน้ำใต้เขื่อน

ข. วิธีการอัดฉีดน้ำปูน

วิธีการอัดฉีดน้ำปูนขึ้นอยู่กับสภาพทำนบดินและสภาพธรณีวิทยาฐานราก และความเหมาะสมในการปฏิบัติงาน วิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปฏิบัติ แบ่งได้ 2 แบบ คือ

- การอัดฉีดด้วยวิธี Downstage grouting method เป็นวิธีการอัดฉีดช่วงบนให้เสร็จก่อนแล้วจึงทำการอัดฉีดช่วงล่างลงไปทีละช่วงจนถึงระดับที่ต้องการ วิธีนี้เหมาะสำหรับสภาพฐานรากที่พังง่าย มีรอยแตกมาก ๆ หรือเป็นชั้นหินอ่อน (Soft rock) รวมทั้งในกรณีที่พบการไหลรั่วของน้ำ (Water bearing formation) การอัดฉีดวิธีนี้ใช้เวลาในการรอให้น้ำปูนแข็งตัวอย่างน้อย 12 ชั่วโมง เมื่อทำเสร็จจะได้ผลดีกว่าวิธีอื่น ข้อดี คือ ลดปัญหาการรั่วซึมขึ้นผิวหน้า เพราะช่วงบนได้อัดฉีดไว้ดีแล้ว ลดปัญหาหลุมพังในช่วงบนในขณะที่เจาะเพื่ออัดฉีดในช่วงล่าง สามารถติดตั้งลูกยาง Packer ได้ดีเนื่องจากช่วงบนได้ทำการอัดฉีดไว้ดีแล้ว ข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการรอให้น้ำปูนแข็งตัวนานอย่างน้อย 12 ชั่วโมง และเสียค่าใช้จ่ายมากเพราะต้องเจาะผ่านชั้นที่อัดฉีดไปแล้ว (Redrilling)

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

ค. วัสดุและอัตราส่วนของน้ำปูน

การอัดฉีดน้ำปูน เป็นการอัดฉีดส่วนผสมของน้ำและปูนในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเข้าไปแทรกตามรอยแตกของชั้นดินและหิน โดยเริ่มจากอัตราส่วนที่เจือจางไปถึงอัตราส่วนที่เข้มข้น ตามลำดับอัตราส่วนปูนซีเมนต์:น้ำ เป็น 1:10, 1:9, 1:8, 1:7, 1:6, 1:5, 1:4, 1:3, 1:2 โดยปริมาตรของปูน หลักเกณฑ์ในการเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำปูน ดังแสดงในตารางที่ 2-4 ดังนี้

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

อย่างไรก็ตาม พบว่าโอกาสที่ชั้นหินที่อัดฉีดน้ำปูนจะไม่สามารถทำการอัดฉีดให้เสร็จสมบูรณ์ในครั้งนั้น ๆ ได้ เนื่องจากมีการรั่วซึมของน้ำปูนขึ้นสู่ผิวหน้าดิน และไม่สามารถทำการอุดการรั่วได้ แม้จะใช้วิธีการต่าง ๆ แล้วก็ตาม การพบชั้นฐานรากที่มีค่าการรั่วซึมสูงผิดปกติ เช่น กรณีพบโพรง รอยแตกที่ใหญ่และยาวต่อเนื่องกัน และพบชั้นน้ำใต้ดิน เป็นต้น กรณีดังกล่าวนี้ต้องหยุดการอัดฉีดชั่วคราว (Interrupted)

แล้วปล่อยให้ น้ำปูนแข็งตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จึงเจาะและอัดฉีดซ้ำในชั้นนั้น ๆ อีกครั้ง (RegROUT) และดำเนินการต่อไปจนกระทั่งชั้นนั้น ๆ สามารถอัดฉีดได้เสร็จสิ้น

ตารางที่ 2-4 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 92 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	

2.4.3 การปฏิบัติงานอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting)

1) หลักการอัดฉีดสารเคมี

การอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) เพื่อหยุดการไหลร่วนของน้ำผ่านทำนบดินและฐานรากเชื่อมเป็นการอัดฉีดโดยใช้สารเคมีในรูปของสารละลายที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสมไม่ผสมกับวัสดุอื่น (Pure solution; no particles in suspension) เข้าไปในชั้นทำนบดินที่มีความละเอียดต่างชนิดกัน หรือช่องว่างของดินที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งไม่สามารถทำการอัดฉีดโดยใช้น้ำปูนหรือ Cement Portland ได้ โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

- เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดิน-หินฐานราก
- เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและ/หรือลดการรั่วซึม ของชั้นดิน-หินฐานราก
- ลดการบีบอัดของชั้นดิน หิน (Reduce the compressibility of ground)
- อุดรอยแตก รอยแยกของชั้นฐานราก

วัสดุทั่วไปที่ใช้ในการอัดฉีดเป็นของเหลวที่ไม่มีอนุภาคของแข็งแขวนลอย เรียกว่า การอัดฉีดสารเคมี แต่ในทางปฏิบัติมักจะเติมสารแขวนลอยลงในสารเคมี เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติและแรงปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลาย ซึ่งเป็นสารเติมแต่ง (Additive) แต่ก็ยังเรียกว่าการอัดฉีดสารเคมี ความแตกต่างของ

การอัดฉีดน้ำปูนหรือของผสม (Cement grouting) และการอัดฉีดด้วยสารเคมี (Chemical grouting) คือความสามารถในการซึมผ่านของอนุภาคและความหนืดของสารละลาย ภาพแสดงการเปรียบเทียบวิธีการอัดฉีดโดยพิจารณาจากชนิดของชั้นดิน/หินฐานราก ดังแสดงในรูปที่ 2-11

ความแตกต่างของการอัดฉีดด้วยสารเคมี (Chemical grouting) และการอัดฉีดของผสมหรือซีเมนต์ (Cement grouting) คือ การอัดฉีดของผสมหรือซีเมนต์ เป็นการอัดฉีดโดยใช้แรงดันเข้าไปในช่องว่างในรูปของสารแขวนลอย (Suspensions) ของอนุภาคซีเมนต์ในตัวของเหลวหรือน้ำ ส่วนการอัดฉีดสารเคมี (Chemical grouting) เป็นการอัดฉีดสารเคมีโดยใช้แรงดันเพื่ออุดช่องว่างของดินหรือหิน ในรูปของสารละลาย (Solutions) โดยสารเคมีจะทำปฏิกิริยาภายในเวลาที่กำหนดไว้ในรูปของของแข็ง กึ่งของแข็งหรือเจล (Gel) และต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์เฉพาะในการอัดฉีด

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

GRAVEL		SAND		COARSE SILT	SILT (Nonplastic)
Fine	Coarse	Medium	Fine	CLAY SOIL	
Cement					
Bentonite					
Polyurethane and Polyacrylamide					
Silicates - high concentration					
Silicates - low concentration					
Aminoplast					
Phenoplasts					
Acrylates					
Acrylamide					
Compressed Air					

รูปที่ 2-11 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบวิธีการอัดฉีด (Grouting) โดยพิจารณาชนิดวัสดุของชั้นดิน/หินฐานราก (Comparison of grouts) (คัดลอกจาก Reuben H. Karol, 2003)

2) การพิจารณาวัสดุและคุณสมบัติของสารเคมี

การอัดฉีดด้วยสารเคมี ซึ่งสารเคมีที่ใช้มีขนาดอนุภาคเล็กมากใกล้เคียงกับน้ำสามารถแทรกผ่านช่องว่างขนาดเล็กที่น้ำไหลผ่านได้ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องของความหนืดและแรงดันที่จะใช้ในการ Grout ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาความเหมาะสมและข้อจำกัดของการอัดฉีดด้วยสารเคมี

คุณสมบัติของสารเคมีที่นำมาใช้ให้ตรงกับวัตถุประสงค์ในการอัดฉีดที่จะต้องพิจารณา ได้แก่ ความคงทนถาวร/อายุการใช้งาน (Permanence) ความสามารถในการแทรกซึม (Penetrability) ความแข็งแรง (Strength) ระยะเวลาในการเซตตัว (Gel time control) ความอ่อนไหวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Sensitivity) ความเป็นพิษ (Toxicity) รวมทั้งปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic factors)

คุณสมบัติของสารเคมีที่นำมาใช้ให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการอัดฉีดที่ต้องพิจารณา ได้แก่

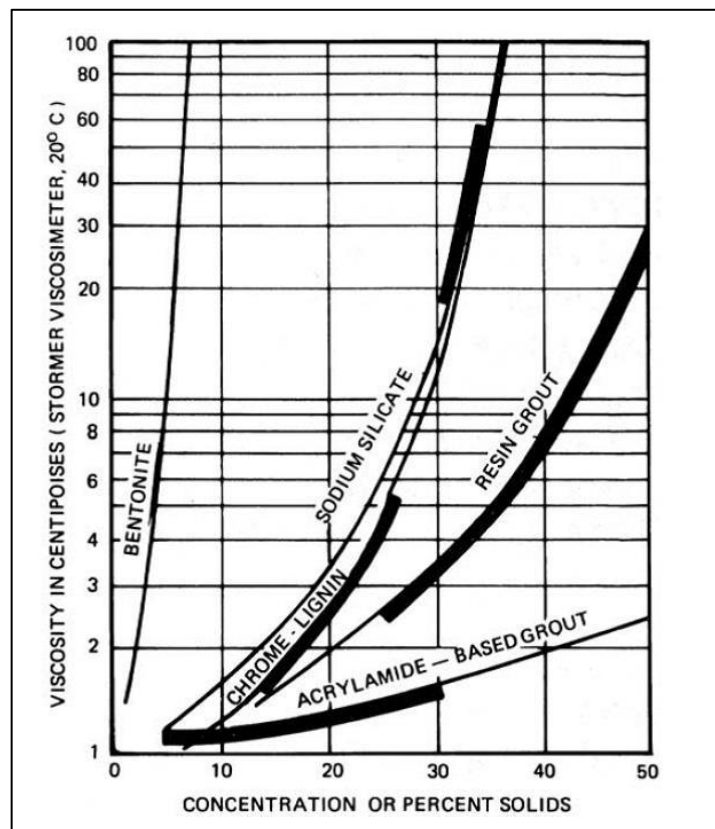
I. ความคงทน (Permanence)

ความคงทน คือ ความสามารถภายหลังการอัดฉีด (Grout) ให้ทนต่อสภาวะต่าง ๆ เช่น ภายใต้อุณหภูมิเปียก สภาวะแห้ง และการละลายซ้ำ ๆ ที่อาจเกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศหรือสิ่งแวดล้อม สารเคมีที่พบบางชนิดในดินหรือน้ำใต้ดินอาจทำให้สารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีดเสื่อมสภาพได้

II. ความสามารถในการแทรกซึม (Penetrability)

ความสามารถในการแทรกซึมของสารเคมีเข้าไปในช่องว่างขนาดเล็กของชั้นดิน หิน ขึ้นอยู่กับค่าความหนืดของสารเคมี (Viscosities) ที่ใช้อัดฉีด เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสารเคมี สามารถต้านทานการไหลของน้ำหรือน้ำใต้ดิน และต้านทานการเกิด Internal shear force

- ความหนืดมีหน่วยเป็น dyne-seconds/cm² หรือ Poises (P)
- 1 Poise (P) = แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 cm² หนา 1 cm เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/sec (1 Poise = 100 Centipoise, cP)
- แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนืดและค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่นิยมใช้ในการอัดฉีด ดังแสดงในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนืดและค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่นิยมใช้ในการอัดฉีด (Reuben H. Karol, 2003)

ความสามารถในการแทรกซึม (Penetrability) ของสารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีด ขึ้นอยู่กับค่าการซึมผ่าน (Hydraulic conductivity; K) ถ้าดินมีค่า ตามหลักการ ของดิน หิน K มีค่า 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

III. ความแข็งแรง (Strength)

การอัดฉีดสารเคมีเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ช่องว่างของรอยแตกเป็นการเพิ่มความแข็งแรง และเสถียรภาพให้กับมวลดิน

IV. การควบคุมเวลาการเกิดเจล (Gel time control)

เวลาในการเกิดเจล คือช่วงเวลาระหว่างการผสมส่วนประกอบของสารเคมีตั้งต้นถึงเวลาการก่อตัวของเจล เวลาจึงสำคัญในการอัดฉีด เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อส่วนประกอบของสารเคมี ได้แก่ ตัวกระตุ้น ตัวยับยั้ง และตัวเร่งปฏิกิริยา สัดส่วนของส่วนประกอบทางเคมีที่ต่างกัน สามารถเปลี่ยนเวลาการเกิดเจลได้ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องทราบความแปรผันของเวลาการเกิดเจล ช่วงเวลาที่ทำให้เกิดเจลนี้เรียกว่า การบ่ม (Cure time)

V. ความอ่อนไหว (Sensitivity) ต่อสภาพแวดล้อม

สารเคมีบางชนิดมีความอ่อนไหว หรือไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเจือจางโดยน้ำใต้ดิน สภาพทางเคมีรวมถึง pH ของน้ำใต้ดิน ความอ่อนไหวต่อปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อเวลาการเกิดเจล

VI. ลักษณะที่เป็นพิษ (Toxicity)

การอัดฉีดด้วยสารเคมีจะต้องตระหนักถึงสมบัติของสารเคมีที่จะเป็นพิษหรืออันตรายหากไม่ได้ใช้อย่างเหมาะสม แนวทางพื้นฐานควรปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตอย่างรอบคอบ

3) ข้อจำกัดของการอัดฉีดสารเคมี (Limitations of chemical grouts)

ความหนืดของสารเคมีที่อัดฉีดโดยทั่วไปจะมีความหนืดต่ำกว่าการอัดฉีดของผสมหรือซีเมนต์ ประกอบกับสารเคมีไม่เหมือนภาคที่เป็นของแข็ง จึงสามารถอัดฉีดเข้าไปในช่องว่างที่มีขนาดเล็กเกินกว่าของผสมและซีเมนต์จะแทรกซึมเข้าไปได้ การอัดฉีดโดยสารเคมีจึงใช้เพื่อควบคุมการไหลของน้ำ และเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุที่ไม่สามารถอัดฉีดโดยของผสมหรือซีเมนต์ได้ การอัดฉีดโดยสารเคมีจึงนิยมนำมาใช้ในการเติมช่องว่างของวัสดุเม็ดละเอียด และยังมีประสิทธิภาพในการปิด อุด รอยแยกหรือรอยร้าวของผนังซีเมนต์ได้ ใช้เพื่อรักษาเสถียรภาพหรือเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุเนื้อละเอียดในชั้นดิน หินฐานราก และสำหรับการควบคุมน้ำในงานอุโมงค์ ปล่อง ร่องลึก และการขุดเจาะอื่น ๆ นอกจากนั้น ยังใช้ร่วมกับวัสดุสำหรับอุดช่องว่างอื่น ๆ สำหรับงานปรับปรุงฐานรากเขื่อน ที่เป็นชั้นกรวด ทหยาที่มีค่าการรั่วซึมสูง

ข้อจำกัดของการอัดฉีดด้วยสารเคมี คือมีราคาแพงกว่าวิธีการอัดฉีดโดยวัสดุอื่น ๆ โดยทั่วไปช่องว่างขนาดใหญ่จะถูกอัดฉีดด้วยของผสมและซีเมนต์เป็นหลัก การอัดฉีดด้วยสารเคมีจะกระทำตามความจำเป็นเท่านั้น และในบางกรณีอาจเกิดผลกระทบที่อาจเป็นพิษ เช่น มลพิษทางด้านน้ำใต้ดินที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งต้องถือเป็นข้อพิจารณาหลักในการเลือกชนิดของสารเคมีที่จะใช้ในการอัดฉีด

เพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายของการอัดฉีดสารเคมี ต้องมีการกำหนดคุณสมบัติพื้นฐาน ดังนี้

- I. การเลือกใช้ชนิดของสารเคมีในการอัดฉีด
 - มีลักษณะเป็นผง สามารถละลายในน้ำได้ (ลักษณะที่เป็นผงจะสะดวกในการขนส่ง)
 - สะดวกในการใช้งานและมีราคาที่ถูกกว่า
 - ราคาไม่แพง มีจำหน่ายตามท้องตลาด
 - ไม่เปลี่ยนแปลงสภาพในสภาวะการเก็บ
 - ไม่มีคุณสมบัติที่เป็นพิษ
 - ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน
 - ไม่ระเบิด
- II. การใช้สารละลายในการอัดฉีด
 - มีความหนืดต่ำ ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
 - มีความเสถียรในสภาวะอุณหภูมิปกติ
 - ไม่ไวต่อปฏิกิริยาของเกลือที่พบในน้ำใต้ดิน
 - มีค่า pH ค่อนข้างคงที่
 - สามารถควบคุมเวลาในการเปลี่ยนเป็นเจล (Gel time)
 - ทนต่อการทำละลายของน้ำใต้ดิน (ภายหลังการ Grout)
- III. ภายหลังการ Grout
 - มีสภาพเป็นเจลแบบถาวร
 - ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารละลายที่พบในน้ำใต้ดินภายหลังการ Grout
 - ไม่เป็นพิษ ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน
 - มีความมั่นคง แข็งแรง

4) สารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีด (Chemical grout materials)

สารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีดมีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย ที่นิยมมากที่สุด คือ Sodium silicate, Acrylate, Lignin, Urethane และ Resin ชนิดของสารเคมีและคุณสมบัติที่นิยมในการอัดฉีด ดังแสดงในตารางที่ 2-5 วัตถุประสงค์ของการเลือกใช้สารเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2-6

การอัดฉีดโดยใช้ Sodium silicate เป็นที่นิยมมากที่สุดในการปรับปรุงฐานรากเขื่อนและงานก่อสร้างอุโมงค์ เนื่องจากมีความปลอดภัยและไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม Sodium silicate ถูกพัฒนาให้เป็นสารเคมีในการทำ Chemical grout ในรูปแบบต่าง ๆ สารละลาย Sodium silicate ประกอบด้วย Silica ที่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติในการยึดเกาะ รวมทั้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบต่าง ๆ มีขนาดอนุภาคเล็ก แทรกซึมเข้าไปในพื้นที่ รูพรุน ช่องว่างขนาดเล็กได้ง่าย สามารถปรับความหนืด ให้เหมาะสมต่อการอัดฉีดในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีขนาดเล็กได้ โดยมีพื้นฐานจากการทำปฏิกิริยาของสารละลาย Sodium silicate ซึ่งเป็นอัลคาไลน์ (Alkaline) ทำหน้าที่เป็นสารทำปฏิกิริยาเมื่อสารละลายถูกทำให้เป็นกลาง Colloid ของซิลิกาจะรวมตัวกันเพื่อสร้างเจล (Gel) ซึ่งจะเกิดขึ้นหาก Sodium silicate มีความเข้มข้นโดยปริมาตรมากกว่า 1-2 % ทำให้สามารถเกาะยึดอนุภาคดินหรือตะกอนเข้าด้วยกันรวมทั้งเติมช่องว่างโดยแทรกตัวในช่องว่างของเม็ดดินป้องกันการไหลผ่านของน้ำได้

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

ตารางที่ 2-5 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 2-6 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.

สารเคมีและอัตราส่วนที่ใช้ในการอัดฉีดของการปรับปรุงฐานรากเชื่อม ประกอบด้วย โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) เป็นสารละลายประเภท Alkaline colloidal มีสูตรทางเคมีคือ $n\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$ คุณสมบัติของ Sodium silicate ประกอบด้วย Ponderal Ratio (Rp) = $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ และสามารถวัดความหนาแน่นในหน่วยของ Degree Baume' (Be') หรือ Degree Twaddle ($^{\circ}\text{TW}$) ซึ่งโดยทั่วไปโซเดียมซิลิเกตจะมีค่า Ponderal Ratio (Rp) อยู่ในช่วง 3-4 และมีความหนาแน่นจำเพาะอยู่ในช่วง 30-40 Be' (30-42 $^{\circ}\text{TW}$) และมีคุณสมบัติ ดังนี้

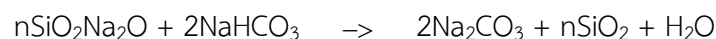
- อัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O} = 3.2-3.4$
- ความถ่วงจำเพาะที่ $20^{\circ}\text{C} = 63-67\%$
- ส่วนผสมของ $\text{SiO}_2 = 25.6-26.6\%$
- ส่วนผสมของ $\text{Na}_2\text{O} = 7.5-8.5\%$
- ความหนืดของสารเคมีที่ $20^{\circ}\text{C} = 60-90\text{ cP}$
- $\text{pH} = 10.5-11.5$

กระบวนการอัดฉีดสารโซเดียมซิลิเกตและสารละลายสารผสมสามารถฉีดได้ทั้งแบบการอัดฉีดแบบ 2 สารผสม และการอัดฉีดแบบสารละลายเดียว (แบบผสมกับสารตั้งต้นเพื่อสร้างเป็นสารตัวเดียวกัน) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การอัดฉีดแบบ 2 สารผสม (Two-solution process) หรือที่เรียกว่าเทคนิค Jooste 2-shot วิธีการนี้ Sodium silicate จะถูกฉีดเข้าไปก่อนแล้วจึงอัดฉีดตัวทำปฏิกิริยา (Reactant solution) เข้าไปในขั้นตอนที่สอง (นิยมใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์; Calcium chloride) วิธีการนี้จะทำให้ชั้นดินมีความมั่นคงแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่ก็เป็นเทคนิคที่มีราคาแพงที่สุดเช่นกัน หรือในบางครั้งใช้การอัดฉีดแบบ The two-component technique โดยการอัดฉีดสารโซเดียมซิลิเกตและแคลเซียมคลอไรด์แยกกัน โดยให้ไปผสมกันที่บริเวณจุดที่ต้องการทำให้เกิดการก่อตัวของเจลที่รวดเร็วและแข็งเกือบจะทันที ใช้ประโยชน์ในการหยุดการไหลของน้ำและวิธีการนี้มีความคงทนอย่างน้อย 20 ปี โดยไม่มีการเสื่อมสภาพ

2) การอัดฉีดแบบสารละลายเดียว (One-solution process) เป็นการผสมสารโซเดียมซิลิเกต และสารทำปฏิกิริยาซึ่งนิยมใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งทำให้โซเดียมซิลิเกตกลายเป็นเจลในระยะเวลาที่ควบคุมการเกิดเจลตามอัตราส่วนของสารละลาย กระบวนการนี้มีข้อดีคือการสร้างเจลที่สม่ำเสมอ สามารถควบคุมปริมาณเจลได้ในระหว่างการอัดฉีด

โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate; $n\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$) มีคุณสมบัติเป็นต่าง เมื่อผสมกับโซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate; NaHCO_3) จะทำให้ได้โซเดียมคาร์บอเนตและเจล (Silica gel) และมีคุณสมบัติเป็นกลาง ดังสมการนี้



เมื่อทำการละลายอย่างเหมาะสมความเป็นกรดอ่อนๆ ของไบคาร์บอเนต จะทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Setting time) สอดคล้องกับสภาวะการแทรกซึม กล่าวคือ เจลที่ได้จะมีค่าความหนืดต่ำ (Low viscosity) ไกล่เคียงกับน้ำซึ่งเหมาะต่อการอัดฉีดเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีช่องว่างขนาดเล็กหรือช่องว่างขนาดเล็กของรอยแตกของหิน ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมที่นิยมใช้ คือ

- โซเดียมซิลิเกต (30 -37 Be') : 100-200 litres/m³
- โซเดียมไบคาร์บอเนต : 15-30 kg/m³

- น้ำ (ในการผสมสารเคมี น้ำกร่อยหรือน้ำทะเลไม่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของ Silicate-based grout ได้)

โดยทั่วไปความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการอัดฉีดอยู่ในช่วง 10 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรากหรือวัสดุที่ต้องการอัดฉีดและผลลัพธ์ที่ต้องการ ความเข้มข้นจะถูกกำหนดโดยเวลาของการจับตัวเป็นเจล (Gel time) ความหนืดของสารละลายโซเดียมซิลิเกตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตและความหนืดเมื่อเทียบกับน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต และความหนืดเมื่อเทียบกับน้ำ (คัดลอกจาก J.Paul Guyer, 2015)

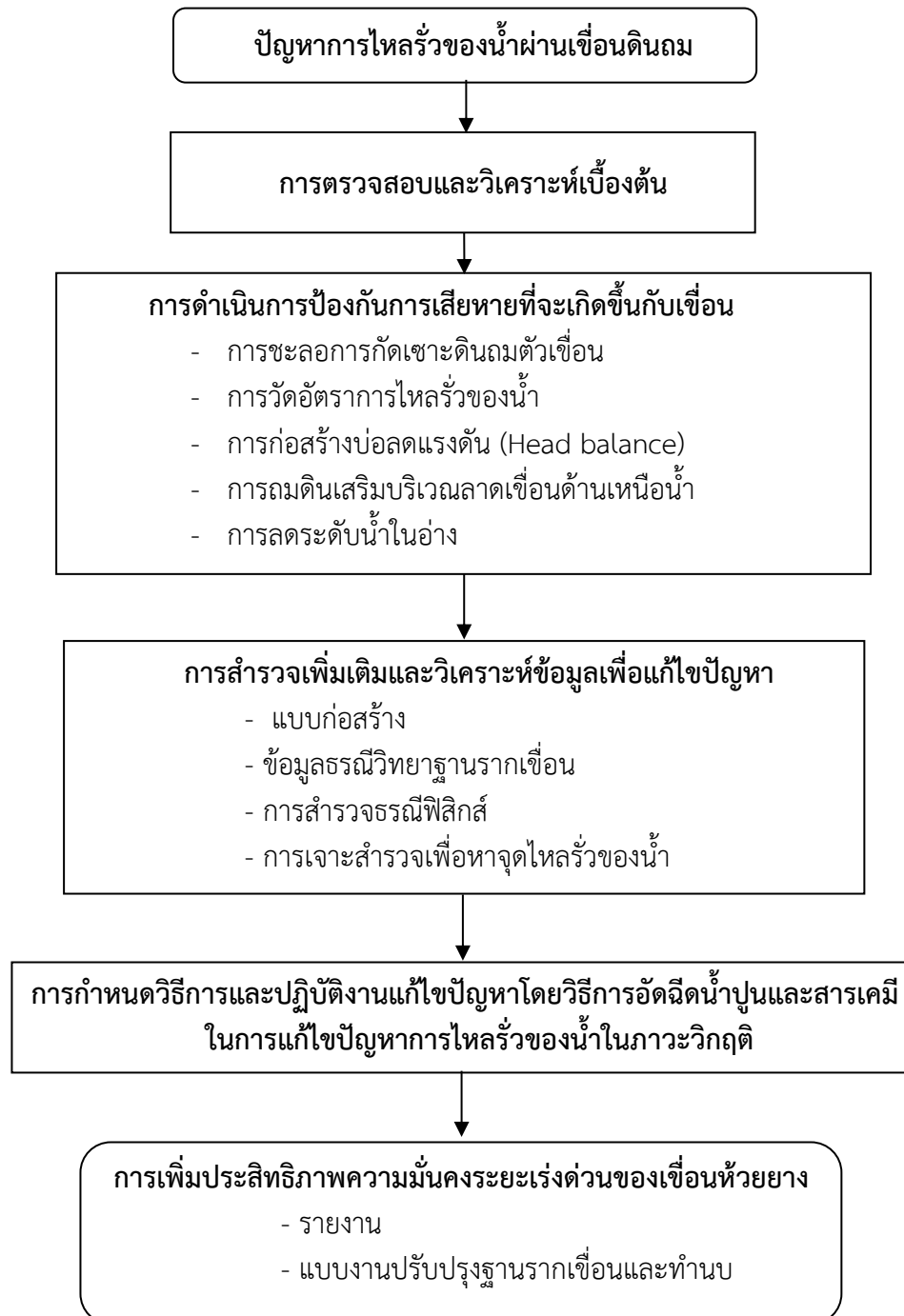
Sodium Silicate Concentration, percent	Viscosity (as Compared with Water) Factor
10	2.5
20	3.2
30	3.5-4.5
40	4.0-6.0
50	5.2-12
60	8.0-20
70	92

บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

การแก้ไขปัญหาน้ำไหลร่วผ่านเขื่อนดินถมของโครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยางอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว มีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานสรุปได้ดังนี้



3.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์เบื้องต้น

ข้อมูลเบื้องต้นจากเจ้าหน้าที่โครงการผู้ที่ปฏิบัติงานในพื้นที่ จากการตรวจสอบด้วยสายตา และจากการตรวจสอบจุดที่เกิดการไหลรั่วของน้ำ พบว่า จุดที่เกิดการไหลรั่วของน้ำบริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ กม.2+158 อยู่ระดับ +100 เมตร (รสม.) อัตราการไหลของน้ำเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 3-1 รูปที่ 3-2 และรูปที่ 3.3 น้ำที่ไหลรั่วออกมา มีลักษณะขุ่นมาก มีการกัดพาเม็ดดินออกมาด้วย จากการตรวจสอบพบว่า มีทรายและกรวดขนาดเล็กไหลออกมาพร้อมกับน้ำ แสดงให้เห็นว่าน้ำที่ไหลรั่วออกมาสามารถพัดพาเอาเม็ดดินขนาดใหญ่ออกมาได้ ต้องมีแรงดันน้ำค่อนข้างสูง ซึ่งสัมพันธ์กับระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำที่มีระดับน้ำในอ่างสูงกว่าจุดที่น้ำไหลรั่วประมาณ 4.00 เมตร (ระดับน้ำในอ่างอยู่ที่ระดับ +104.50 เมตร (ร.ท.ก.)



รูปที่ 3-1 บริเวณตำแหน่งที่พบการไหลรั่วของน้ำ

ข้อมูลจากการเจาะสำรวจตัวเขื่อนโดยส่วนปฐพีกลศาสตร์ ใกล้กับจุดที่น้ำรั่วด้วยสว่านมือ (Hand auger) เพื่อดูขอบเขตและความต่อเนื่องของน้ำที่ไหลรั่ว โดยหลุมเจาะมีความลึก 4.00 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 3-1 ที่ตำแหน่งด้านซ้ายและด้านขวาของจุดที่น้ำไหลรั่ว ปรากฏว่าไม่พบน้ำที่เกิดจากการไหลรั่วนี้ แสดงให้เห็นว่าการไหลรั่วเกิดขึ้นเฉพาะจุดและมีเส้นทางการไหลของน้ำคล้ายกับการไหลในท่อ (Pipe flow)



รูปที่ 3-2 สภาพการไหลร่วนของน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ กม.2+158
ระดับ +100.00 เมตร (รสม.) เมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563 เวลา 21.00 น.



รูปที่ 3-3 สภาพการไหลร่วนของน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ กม.2+158 ระดับ +100.00 เมตร (รสม.)
เมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2563

ตารางที่ 3-1 ผลการเจาะสำรวจชั้นดินด้วยสว่านมือ (Hand Auger)

หลุมเจาะ	ความลึก (ม.)		ชนิดดิน	หมายเหตุ
	จาก	ถึง		
HA.1	0.00	4.00	CL, ML (Stiff to very stiff)	Dry
HA.2	0.00	4.00	CL, ML (Stiff to very stiff)	Dry

จากข้อมูลการสำรวจธรณีพิภพศาสตร์ที่พบนำมาตั้งสมมติฐานได้ว่าการไหลร่วนของน้ำที่เกิดขึ้นนี้ น่าจะเป็นผลมาจากปัญหาการกัดเซาะภายในตัวเขื่อน (Internal erosion) การไหลของน้ำทำให้เกิดการไหลร่วนในลักษณะของการกัดพา (Piping) บริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ

3.3 การดำเนินการป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อน

3.3.1 การชะลอการกัดเซาะดินถมตัวเขื่อน

ในช่วงแรกของเหตุการณ์เมื่อพบการไหลร่วนของน้ำที่บริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ ได้ดำเนินการถมวัสดุเม็ดหยาบ ได้แก่ กรวด และทราย เพื่อชะลอการกัดเซาะดินถมตัวเขื่อนในบริเวณโดยรอบจุดที่พบการไหลร่วนของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 การชะลอการกัดเซาะดินถมตัวเขื่อนในช่วงแรกของเหตุการณ์ด้วยการถมวัสดุเม็ดหยาบ

3.3.2 การวัดอัตราการไหลของน้ำ

เพื่อทำการตรวจวัดอัตราการไหล และการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำ รวมทั้งประเมินอัตราการกัดเซาะจากภายในดินถมตัวเขื่อน จึงได้ก่อสร้างบ่อล้อมจุดที่น้ำไหลออกมาโดยใช้อิฐบล็อก กระจอบทราย และติดตั้งท่อเพื่อวัดปริมาณการไหลร่วนของน้ำ เมื่อเวลา 17.00 น. วันที่ 22 ตุลาคม 2565 ดังแสดงในรูปที่ 3-5 และรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-5 การก่อสร้างป้อล้อมจุดที่น้ำไหลรั่วออกมาเพื่อวัดอัตราการไหลรั่วของน้ำ

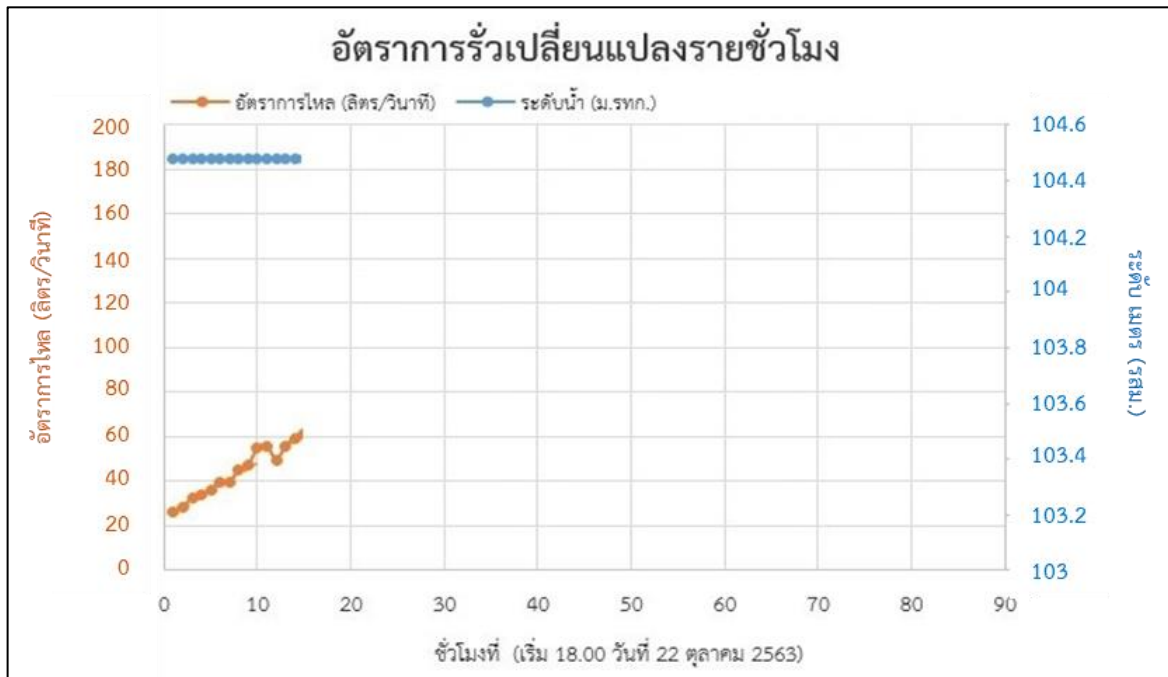


รูปที่ 3-6 ติดตั้งท่อเพื่อวัดอัตราการไหลรั่วของน้ำ

3.3.3 การก่อสร้างป้อลดแรงดัน (Head balance)

จากการตรวจสอบพบจุดไหลรั่วของน้ำบริเวณลาดเขื่อนท้ายน้ำ ตั้งแต่เวลา 21.00 น. ของวันที่ 21 ตุลาคม 2563 และเริ่มวัดปริมาณการไหลรั่วของน้ำรายชั่วโมง เวลา 18.00 น. วันที่ 22 ตุลาคม 2563 ผลการตรวจวัดพบปริมาณการไหลรั่วเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3-7 ประกอบกับ

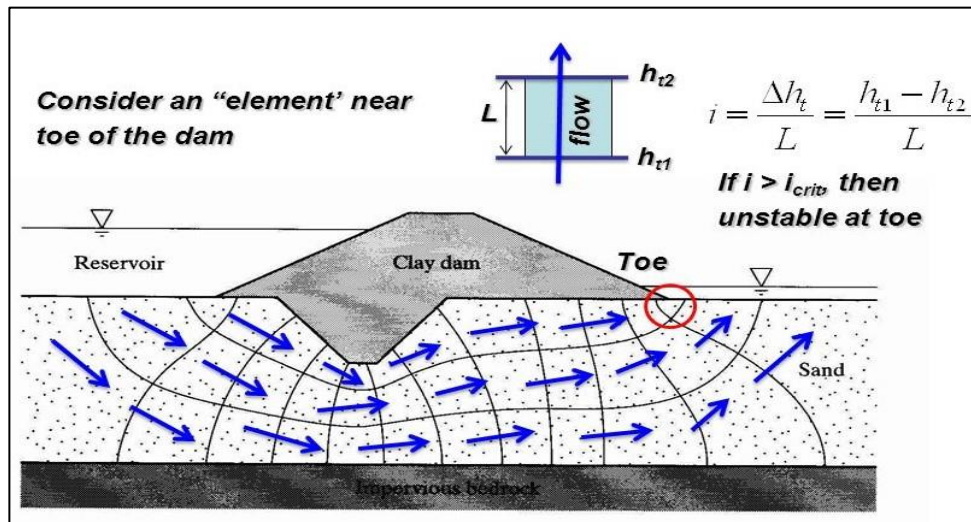
พบอนุภาคของดินที่ไหลออกมาพร้อมกับน้ำที่แสดงให้เห็นถึงการกัดเซาะภายในทำนบดิน (Internal erosion) จึงต้องทำการวางกระสอบทราย เพื่อเพิ่มความสูงของระดับน้ำสำหรับลดแรงดันและความเร็วในการไหลของน้ำ (Head balance) ดังแสดงในรูปที่ 3-8 ตามหลักการ Piping and critical exit gradient ดังแสดงในรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-7 ข้อมูลอัตราการไหลรั่วของน้ำรายชั่วโมง (เริ่มวัด เวลา 18.00 น. วันที่ 22 ตุลาคม 2563)



รูปที่ 3-8 การก่อสร้างบ่อเพื่อเพิ่มความสูงของระดับน้ำสำหรับลดแรงดันและความเร็วในการไหลของน้ำ



รูปที่ 3-9 หลักการ Piping and critical exit gradient

3.3.4 การถมดินเสริมบริเวณลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ

ในขณะเดียวกันสำนักงานชลประทานที่ 9 ได้ดำเนินการถมดินเสริมบริเวณลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ ในแนวตั้งฉากกับบริเวณจุดที่น้ำไหลรั่วและพื้นที่ข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 การถมดินเสริมบริเวณลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำ

3.3.5 การลดระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ

การลดระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำซึ่งจะเป็นการลดแรงดันน้ำที่ไหลรั่ว และลดการกัดเซาะดินถมตัวเขื่อนได้ โดยการระบายน้ำผ่านท่อส่งน้ำฝั่งซ้ายและฝั่งขวาเต็มศักยภาพของคลองส่งน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3-11 และเพิ่มศักยภาพในการระบายน้ำด้วยวิธีการกักน้ำบริเวณอาคารระบายน้ำล้น (Spillway) ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากสำนักเครื่องจักรกล ดังแสดงในรูปที่ 3-12 และรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-11 การระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำผ่านคลองส่งน้ำฝั่งขวา



รูปที่ 3-12 การระบายน้ำด้วยวิธีการกักน้ำบริเวณอาคารระบายน้ำล้น (Spillway)



รูปที่ 3-13 การระบายน้ำด้วยวิธีการกักน้ำบริเวณอาคารระบายน้ำล้น (Spillway)

3.4 การสำรวจเพิ่มเติมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแก้ไขปัญหา

การวิเคราะห์สาเหตุและตำแหน่งของการรั่วซึมต้องทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่จะหาได้นำมาวิเคราะห์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการสำรวจเพิ่มเติม และวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแก้ไขปัญหา โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) แบบก่อสร้าง

แบบหมายเลข หย-ท-002, หย-ท-001, หย-ท-032, หย-ท-033, หย-ท-034, หย-ท-035, หย-ท-036 และหย-ท-037 ได้ถูกรวบรวมและนำมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ (ภาคผนวก ก)

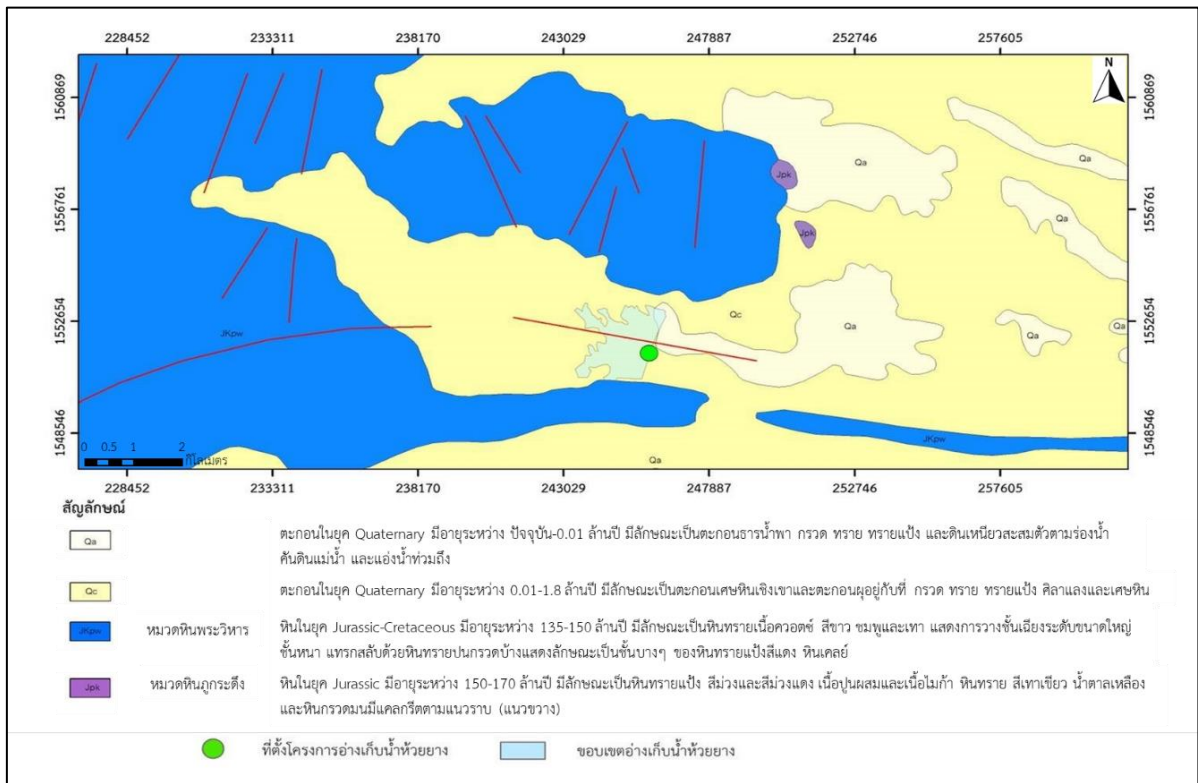
2) ข้อมูลธรณีวิทยาสถานราก

เขื่อนห้วยยางตั้งอยู่บริเวณพื้นที่ที่มีสภาพธรณีวิทยาเป็นชั้นตะกอนเศษหินเชิงเขา (Qc) ประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายแป้ง คีลาแลง และเศษหิน ชั้นตะกอนธารน้ำพา(Qa) ประกอบด้วย กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว สะสมตัวตามร่องน้ำ และพื้นที่น้ำท่วมถึง ชั้นหินฐานรากที่รองรับเป็นชั้นหินทรายกลุ่มหินโคราช ประกอบด้วย หมวดหินภูกระดึง และหมวดหินพระวิหาร ดังแสดงในรูปที่ 3-14

3) การสำรวจธรณีฟิสิกส์

ฝ่ายธรณีฟิสิกส์ ส่วนธรณีวิทยา สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน ได้เข้าดำเนินการสำรวจธรณีฟิสิกส์ โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity survey) ของดินถมตัวเขื่อนและฐานรากตามแนวศูนย์กลางเขื่อน ช่วง กม.2+055 ถึง กม.2+245 เพื่อให้ครอบคลุมบริเวณที่พบการไหลรั่วของน้ำบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ (กม.2+158) การสำรวจธรณีฟิสิกส์ดังแสดงในรูปที่ 3-15

ผลการแปลความหมายจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ดังแสดงในรูปที่ 3-16 ผลการแปลความหมาย พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดินถมตัวเขื่อนชั้นดินและหินฐานราก โดยสามารถแบ่งสภาพชั้นดิน ออกได้เป็น 3 ชั้น คือ



รูปที่ 3-14 แผนที่ธรณีวิทยาบริเวณเขื่อนห้วยยาง อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว (กรมทรัพยากรธรณี, 2541)

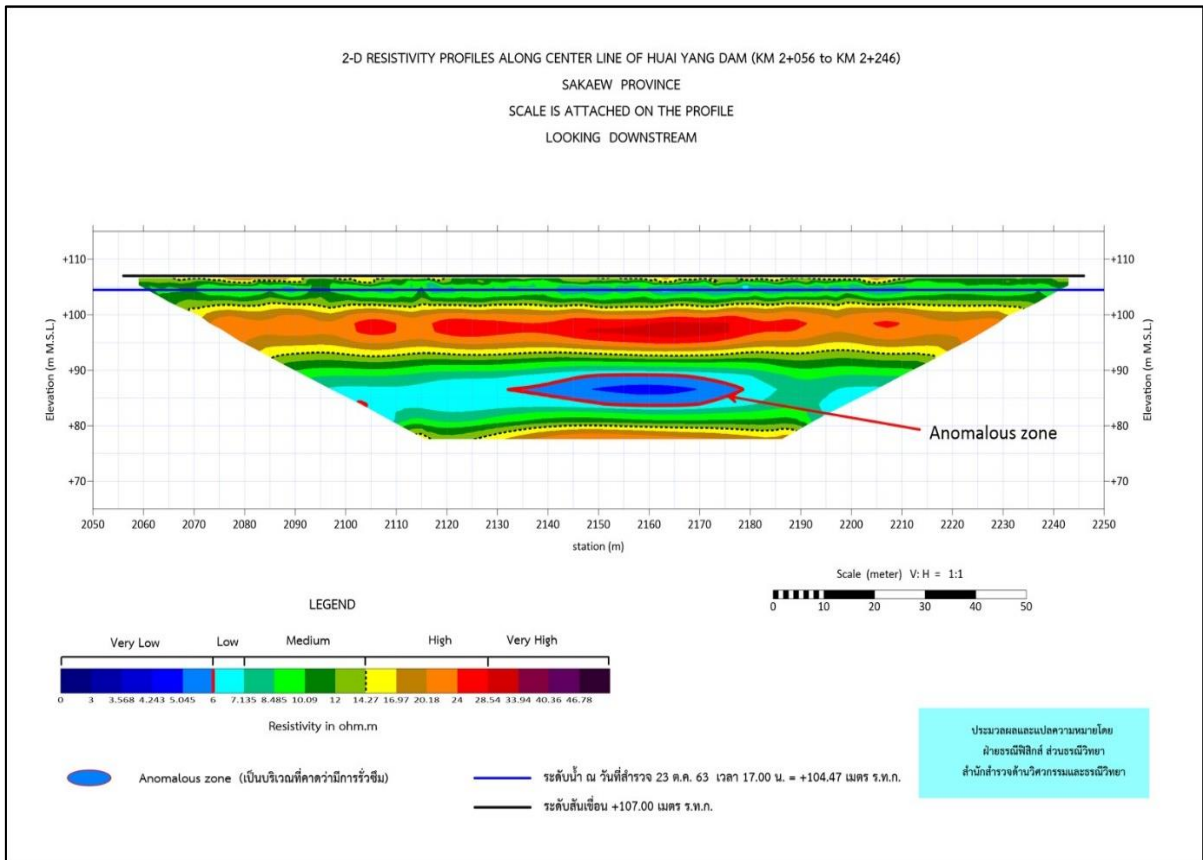
ชั้นที่ 1 จากระดับสันเขื่อน ที่ระดับ +107.00 เมตร (รสม.) ระดับสันเขื่อนต่ำกว่าแบบก่อสร้าง เนื่องจากการขุดเปิดเพื่อดำเนินการปรับปรุงตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ลึกลงไปจนถึงระดับ +102.00 เมตร (รสม.) มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปานกลางและค่อนข้างสม่ำเสมอ ประเมินได้ว่าชั้นดินชั้นนี้น่าจะเป็นดิน ถมตัวเขื่อน ไม่พบบริเวณผิดปกติที่คาดว่าจะมีการไหลรั่วของน้ำ

ชั้นที่ 2 ที่ระดับต่ำกว่า +102.00 เมตร (รสม.) ลึกลงไปจนถึงระดับ +93.00 เมตร (รสม.) มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะค่อนข้างสูง ประเมินได้ว่าเป็นชั้นดินเดิมและชั้นหินฐานราก ไม่มีลักษณะที่ผิดปกติที่จะพบการไหลรั่วของน้ำหรือสภาพชั้นดินที่มีความชื้น

ชั้นที่ 3 ลึกลงไปที่ระดับต่ำกว่า +93.00 เมตร (รสม.) เป็นชั้นหินฐานรากที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปานกลาง แต่พบบริเวณที่มีค่าผิดปกติ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำ (กม.2+140 ถึง กม. 2+170) ซึ่งอาจเป็นบริเวณที่มีการไหลรั่วของน้ำหรือเป็นชั้นที่มีความชื้นสูง อย่างไรก็ตามบริเวณที่มีค่าผิดปกติ (Anomalous zone) นี้ อยู่ลึกลงไปมาก และไม่มี ความต่อเนื่องของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่ต่ำจากชั้น ดินด้านบน อาจเป็นไปได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่ต่ำนี้อาจจะเป็นชั้นหินดินดาน (Shale) ที่มีความชื้น อย่างไรก็ตามผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์นี้ ได้ถูกนำไปใช้เป็นแนวทางในการเจาะสำรวจเพื่อหา บริเวณที่น้ำไหลรั่วเพื่อทำการอุดรอยรั่วต่อไป



รูปที่ 3-15 การสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity survey)

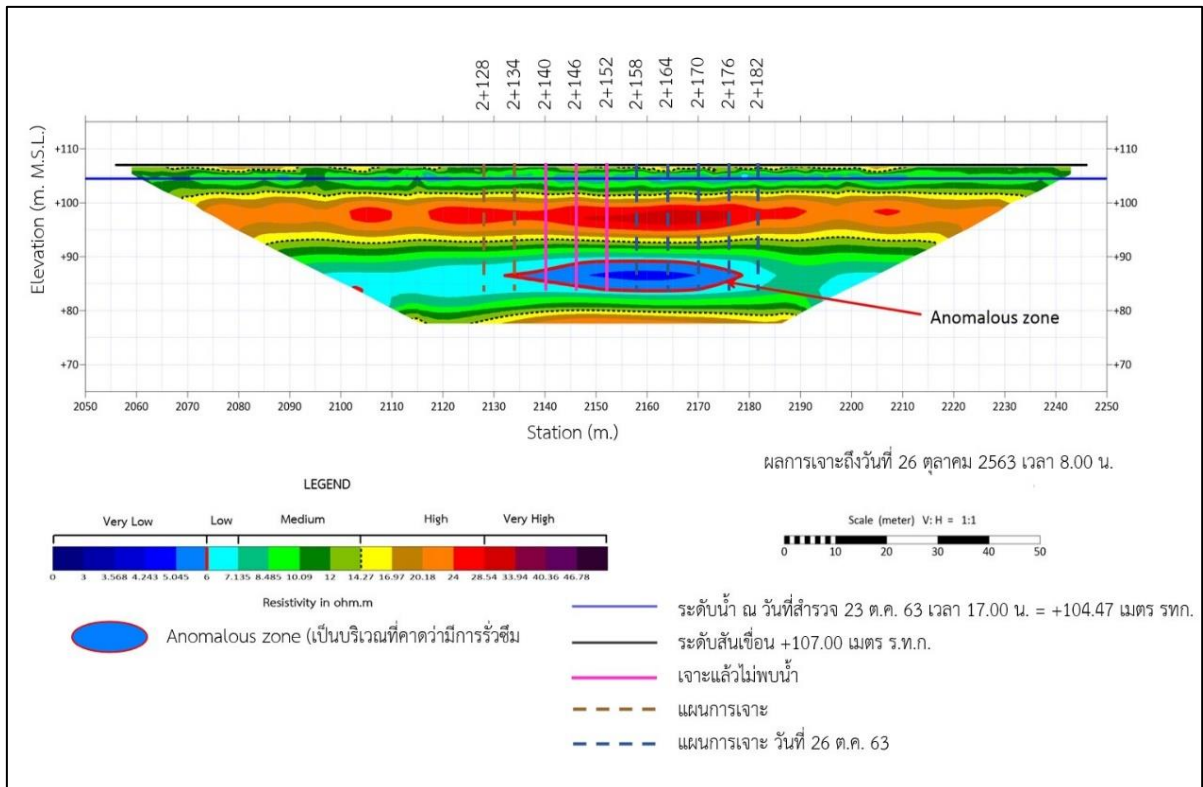


รูปที่ 3-16 ผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

4) การเจาะสำรวจเพื่อหาจุดไหลรั่วของน้ำ

การเจาะสำรวจตามแนวศูนย์กลางเขื่อนได้ดำเนินการเจาะ โดยส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา (ผู้ขอรับการประเมินทำหน้าที่ผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมธรณี) ในบริเวณที่มีผลการแปลความหมายจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำ หรือ Anomalous zone ดังแสดงในรูปที่ 3-17 ที่คาดว่าจะพบแนวการไหลรั่วของน้ำ โดยใช้เครื่องเจาะแบบกระแทก (Air track drilling rig) ดังแสดงในรูปที่ 3-18 และใช้เครื่องเจาะแบบหมุน (Rotary drilling machine) ดังแสดงในรูปที่ 3-19 นอกจากนี้ ยังดำเนินการเจาะสำรวจด้วยวิธีการตอกทดลองแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) เพื่อตรวจสอบสภาพความแข็งแรงของชั้นดินถมตัวเขื่อน และเก็บตัวอย่างดินถมเพื่อใช้พิจารณาวิธีการอุดรอยรั่ว

การเจาะสำรวจตามแนวศูนย์กลางเขื่อนดำเนินการในลักษณะของการลองผิดลองถูก (Trial & Error) จากข้อมูลที่มีอยู่ ผลการเจาะพบชั้นดินถมตัวเขื่อนและชั้นหินฐานรากที่แห้ง แม้จะเป็นบริเวณที่คาดว่าจะเป็จุดที่มีการรั่วซึมตามผลการแปลความหมายของการสำรวจธรณีฟิสิกส์ โดยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ซึ่งผลการเจาะสำรวจพบเป็นหินดินดาน (Shale) ที่มีสภาพแห้งและไม่พบการรั่วซึมของน้ำ การดำเนินการเจาะเพื่อหาแนวรอยรั่วเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ด้วยปริมาณน้ำที่ไหลรั่วเพิ่มมากขึ้นตลอดเวลา ดังนั้นจึงได้พิจารณาข้อมูลสภาพภูมิประเทศจากแปลนรูปตัด ตามแบบหมายเลข หย-ห-034 พบบริเวณพื้นที่ที่เกิดการไหลรั่วของน้ำ ในอดีตก่อนการสร้างเขื่อนเป็นแนวเส้นทางน้ำไหลติดกับแนวเนินหิน จึงพิจารณาเจาะหลุมสำรวจตามแนวนี้ จนพบจุดที่เป็นแนวการไหลรั่วของน้ำที่ตำแหน่ง กม.2+182 ที่ระดับประมาณ +98.50 เมตร (รสม.) ดังรูปที่แสดงในรูปที่ 3-20 รูปที่ 3-21 และรูปที่ 3-22



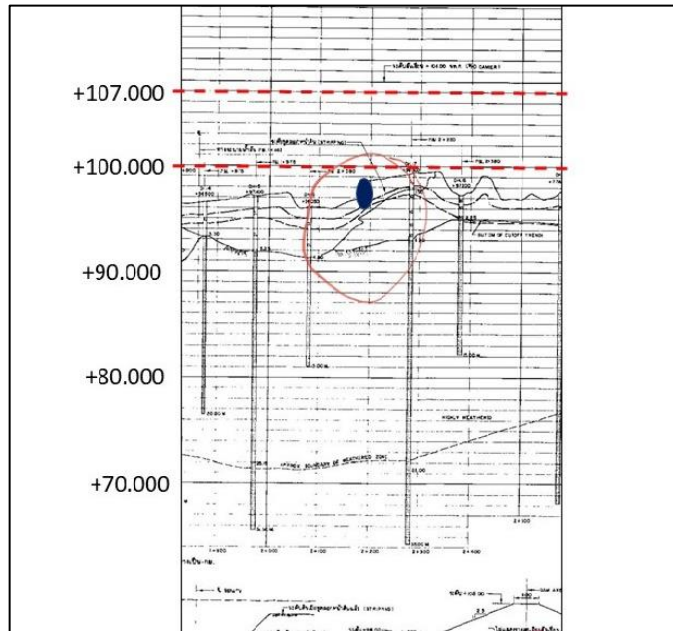
รูปที่ 3-17 ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจในบริเวณที่มีผลการแปลความหมายจากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำหรือ Anomalous zone



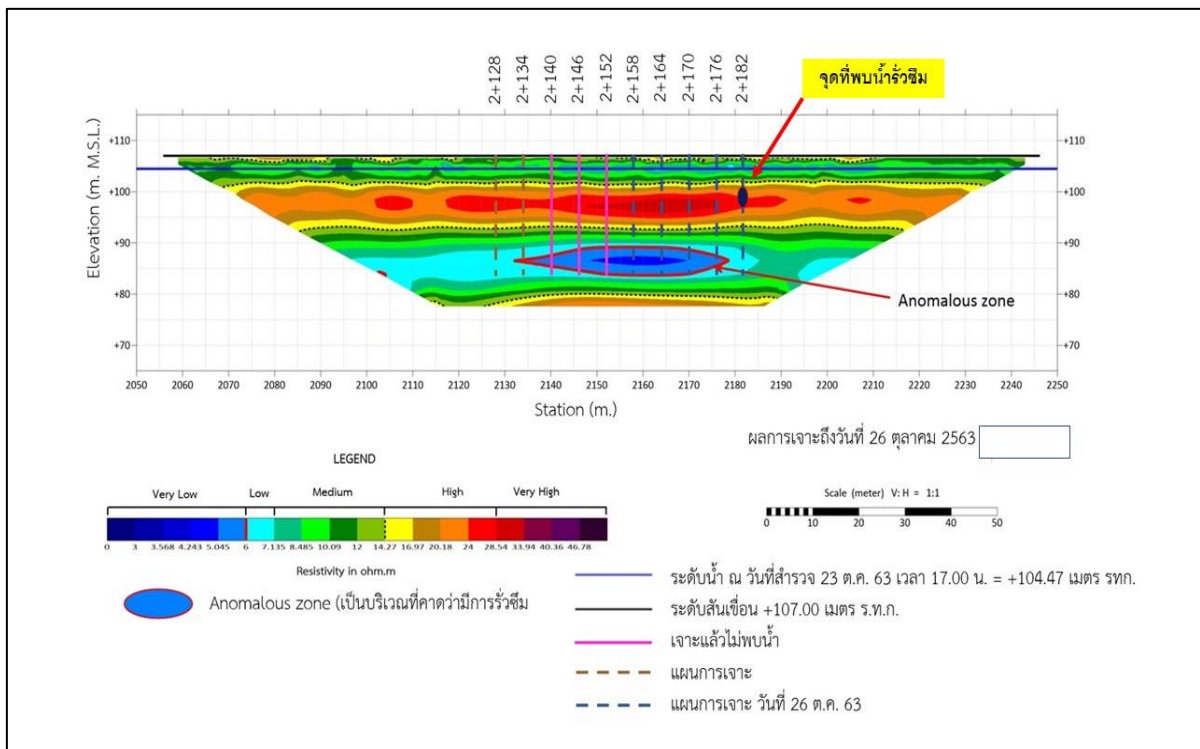
รูปที่ 3-18 เจาะเพื่อหาแนวรูรั่วของน้ำโดยใช้เครื่องเจาะแบบกระแทก



รูปที่ 3-19 เจาะเพื่อหาแนวรูรั่วของน้ำโดยใช้เครื่องเจาะแบบหมุน



รูปที่ 3-20 จุดเจาะสำรวจโดยพิจารณาจากข้อมูลสภาพภูมิประเทศจากแปลนรูปตัดตามแบบหมายเลข หย-ท-034



รูปที่ 3-21 จุดที่เป็นแนวการไหลรั่วของน้ำที่ตำแหน่ง กม.2+182 ที่ระดับประมาณ +98.50 เมตร (رسم.)



รูปที่ 3-22 จุดที่เจาะสำรวจพบการไหลร่วนของน้ำที่ตำแหน่ง กม.2+182
ที่ระดับประมาณ +98.50 เมตร (รสม.)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 การอัดฉีดน้ำปุ๋ยมูลและสารเคมีในการแก้ไขปัญหการไหลรั่วของน้ำในภาวะวิกฤติ

วัตถุประสงค์ของการอัดฉีดเพื่อต้องการให้น้ำปุ๋ยและสารเคมีเข้าไปอุดรูรั่ว ช่องว่างหรือรอยแตก รอยแยกของดินถมหรือทำนบดิน โดยต้องเลือกวัสดุที่ใช้ฉีดให้เหมาะสมกับขนาดและสภาพของรอยแตกนั้น ๆ โดยต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ขนาดของวัสดุที่จะใช้ฉีดจะต้องมีขนาดเล็กมาก
- การอัดฉีดจะต้องแพร่กระจายไปอย่างสม่ำเสมอตามช่องว่างรอยแตก รอยแยก ตามธรรมชาติของการไหลในการอัดฉีดกำหนดแรงดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้อยกว่า 0.5 เมกะปาสคาล (5 Bar)
- การอัดฉีดจะไม่ทำลายโครงสร้างของดินถม
- หลังจากการอัดฉีดดินถมจะต้องเกิดความแกร่ง (Strength) และที่บ้น้ำ

การอัดฉีดเพื่อแก้ไขปัญหการไหลรั่วของน้ำในครั้งนี้ เป็นการแก้ไขปัญหในภาวะวิกฤติเร่งด่วน เนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลรั่วที่ตรวจวัดเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563 มีอัตราการไหลรั่วอยู่ที่ 25 ลิตรต่อวินาที เพิ่มมากขึ้นเป็น 176 ลิตรต่อวินาที ในวันที่ 26 ตุลาคม 2563 ดังแสดงในรูปที่ 4-1 จึงต้องมีการกำหนดวิธีหรือกระบวนการในการอัดฉีด และเลือกใช้วัสดุในการอัดฉีดที่มีคุณสมบัติในการหยุดการไหลของน้ำได้อย่างรวดเร็ว โดยต้องเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็ก สามารถแทรกเข้าไปในรอยแตก ช่องว่างของดินถมได้ และภายหลังการอัดฉีดดินถมต้องที่บ้น้ำและมีความแกร่งเพิ่มขึ้น กระบวนการในการอัดฉีดมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 4-1 แสดงอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลา

ขั้นตอนการอัดฉีดเริ่มด้วยการอัดฉีดแบบ 2 สารผสม (Two-solution process) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหยุดการไหลร่วนของน้ำอย่างรวดเร็วที่สุด โดยการอัดฉีดน้ำปูนและสารโซเดียมซิลิเกตแยกกันเป็น 2 Lines ลงในหลุมอัดฉีดเดียวกัน ซึ่ง Line 1 เป็นการอัดฉีดน้ำปูนที่เป็นการผสมกันของน้ำและซีเมนต์ (W:C) Line 2 เป็นสารผสมของน้ำและโซเดียมซิลิเกต (W:S) โดยให้ไปผสมกันที่บริเวณจุดหรือความลึกที่ต้องการ ทำให้เกิดการก่อตัวที่รวดเร็วและแข็งเกือบจะทันที ส่งผลให้น้ำมีการหยุดไหลอย่างรวดเร็ว การดำเนินการอัดฉีดในขั้นตอนนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อหาอัตราส่วน (Grout mix ratio) และระยะเวลาการแข็งตัว (Setting time) ที่เหมาะสมกับสภาพปัญหาหน้างานที่ต้องหยุดการไหลของน้ำให้เร็วที่สุด ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-1

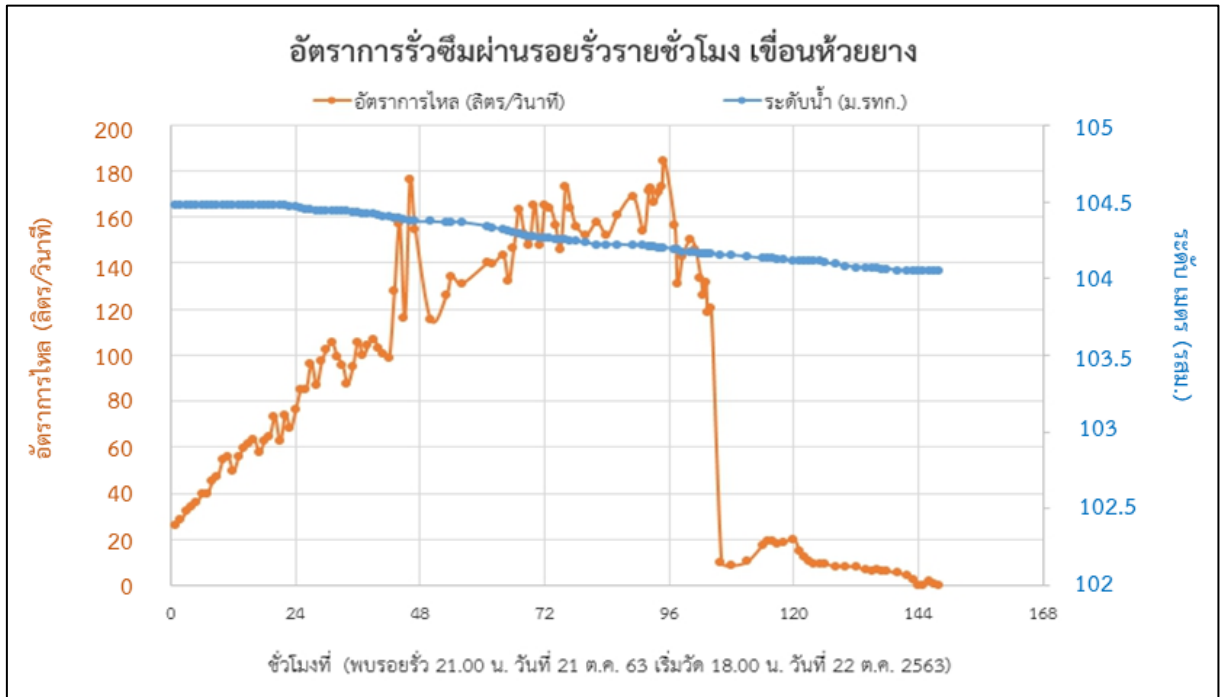
ในระหว่างการอัดฉีดเลือกใช้สัดส่วนของสารผสม Mix 2 ปรากฏอย่างชัดเจนว่ามีสารผสมที่ใช้อัดฉีดปูนออกมากับน้ำที่ไหลร่วน จึงเปลี่ยนสารผสมเป็น Mix 10 และปริมาณน้ำที่ไหลร่วนลดลงอย่างชัดเจน จึงแน่ใจว่าเส้นทางของน้ำที่ไหลร่วนอยู่ในบริเวณพื้นที่นี้ จึงได้กำหนดและออกแบบตำแหน่งและความลึกของหลุมอัดฉีดของผสมโดยรอบจุดที่น้ำไหลร่วน (กม.2+182) จำนวน 12 หลุม โดยมีระยะห่างระหว่างหลุม 3 เมตร จำนวน 3 แถว แถวละ 4 หลุม โดย offset ออกจากแนวศูนย์กลางเขื่อนด้านละ 3 เมตรและใช้กระบวนการอัดฉีดเป็นแบบสารละลายเดียว (One-solution process) ได้แก่ ซีเมนต์ (Cement Portland) เป็นวัสดุในการอัดฉีดและใช้สารโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) เป็นสารผสม (Additive) ซึ่งเป็นสารที่จะช่วยควบคุมเวลาการแข็งตัวของซีเมนต์หรือน้ำปูนได้และเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของดินถมตัวเขื่อน เมื่อประเมินสภาพหน้างานและเตรียมความพร้อมของเครื่องจักรเครื่องมือแล้ว จึงเริ่มการปฏิบัติงานอัดฉีด จนกระทั่งสามารถหยุดการไหลร่วนของน้ำได้ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4-2 และรูปที่ 4-3

การอัดฉีดน้ำปูนและสารโซเดียมซิลิเกตในขั้นตอนนี้ต้องให้สารผสมในการอัดฉีดไหลไปอย่างสม่ำเสมอและไม่ตกตะกอนง่าย เพื่อให้การปฏิบัติงานอัดฉีดที่ต้องการให้น้ำปูนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงต้องใช้เครื่องกวน (Grout mixer) ที่มีความเร็วรอบสูงในการผสม กำหนดส่วนผสมระหว่างน้ำปูนและสารโซเดียมซิลิเกตเพื่อให้แข็งตัวในเวลา 1-10 นาที โดยสามารถปรับเวลาในการแข็งตัวตามสภาพหน้างาน

ตารางที่ 4-1 แสดงอัตราส่วนของวัสดุที่เหมาะสม (Grout mix ratio) และระยะเวลาการเซตตัวของวัสดุ (Setting time)

Mix	Line- A (Water : Cement)					Line- B (Water : Sodium silicate)					% Sodium silicate/ น้ำปูน	Setting time (sec) กรณี line-A : Line-B (1 : 1)
	Water	Cement	น้ำ (ลิตร)	ปูน (ลิตร)	น้ำปูน (ลิตร)	Water	Sodium silicate	น้ำ (ลิตร)	Sodium silicate (ลิตร)	สารผสม Sodium silicate (ลิตร)		
1	0.7	1	70	32	102	3	1	30	10	40	9.80 %	> 120 sec
2	0.6	1	60	32	92	3	1	30	10	40	10.86 %	> 120 sec
3	0.6	1	60	32	92	2	1	20	10	30	10.86 %	15 Sec
4	0.6	1	60	32	92	2	1	20	10	30	10.86 %	14 sec
5	0.6	1	60	32	92	1	1	10	10	20	10.86 %	16 sec
6	0.6	1	60	32	92	1	1	10	10	20	10.86 %	16 sec
7	0.6	1	60	32	92	0	1	0	10	10	10.86 %	22 sec
8	0.6	1	60	32	92	0	1	0	10	10	10.86 %	22 sec
9	0.5	1	50	32	82	3	1	0	10	40	12.19 %	17 sec
10	0.5	1	50	32	82	0	1	0	10	10	12.19 %	22 sec
11	0.6	1	60	32	92	1	1	10	10	20	10.86 %	33 Sec (A:B=1:2)

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์ ขนาดถุงละ 50 กก. 2 ถุง = 100 กก. มีปริมาตร 32 ลิตร ความหนาแน่น 3.125



รูปที่ 4-2 แผนภาพแสดงอัตราการรั่วซึมผ่านรอยรั่วของน้ำ



รูปที่ 4-3 ภาพแสดงการหยุดไหลรั่วของน้ำได้ทั้งหมด

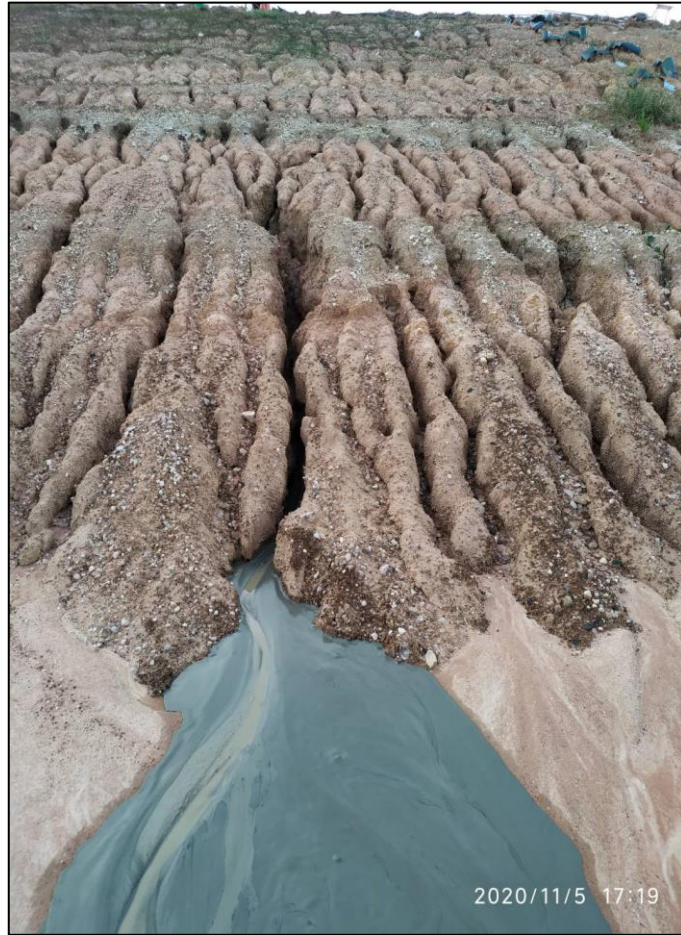
4.2 การเพิ่มประสิทธิภาพความมั่นคงระยะเร่งด่วนของเขื่อนห้วยยาง

จากปัญหาน้ำไหลร่วนผ่านดินถมตัวเขื่อนที่เกิดขึ้น ประกอบกับวัสดุดินถมที่พบร่องรอยการกัดเซาะของน้ำฝนบริเวณลาดด้านท้ายเขื่อน แสดงให้เห็นว่าดินถมตัวเขื่อนมีสภาพเป็นดินกระจายตัว (Dispersive soil) ดังแสดงในรูปที่ 4-4 ดังนั้นจึงได้เสนอแนวคิดให้ผู้บริหารกรม เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพความมั่นคงระยะเร่งด่วนของเขื่อนห้วยยาง โดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมี โดยส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา ได้ทำการออกแบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน ตามแบบหมายเลข สสธ.-ส.7-0323 และได้ดำเนินการปรับปรุงฐานรากและทำนบดิน ในช่วง กม.2+101 ถึง กม.2+399.5 รวมระยะทาง 300 เมตร (แบบงานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดินแสดงในภาคผนวก ก)

ในระหว่างการดำเนินการอัดฉีดของผสม (น้ำปูนและสารเคมี) เพื่ออุดช่องว่าง รอยแยกของชั้นดินถมตัวเขื่อน พบว่าในแต่ละบริเวณต้องใช้ปริมาณของผสมอัดฉีดแตกต่างกัน กล่าวคือบริเวณใดที่ชั้นดินถมตัวเขื่อนมีความแน่นที่บดก็จะอัดฉีดของผสมในปริมาณน้อย แต่หากบริเวณใดมีช่องว่างในชั้นดินถมตัวเขื่อนต้องอัดฉีดของผสมในปริมาณมาก ลักษณะเช่นนี้พบได้หลายจุดตลอดช่วงระยะของการอัดฉีดของผสม โดยพบว่าของผสมที่อัดฉีดมีการไหลออกมาบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำและด้านเหนือน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4-5 ซึ่งช่องว่างหรือรอยแตกเหล่านี้ถ้าต่อเนื่องกันก็จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการไหลร่วนของน้ำ และยังพบหลุมยุบบริเวณสันเขื่อนอีกหลายจุด ดังแสดงในรูปที่ 4-6 และรูปที่ 4-7 ซึ่งเป็นลักษณะของการกัดเซาะชั้นดินถมออกจากตัวเขื่อนเนื่องจากดินถมมีสภาพเป็นดินกระจายตัว ส่วนปริมาณการอัดฉีดของผสมในชั้นหินฐานรากเขื่อนมีปริมาณไม่มาก แสดงให้เห็นว่าชั้นฐานรากเขื่อนมีสภาพที่แน่นและที่บดน้ำดี



รูปที่ 4-4 ภาพแสดงร่องรอยการกัดเซาะของน้ำฝนบริเวณลาดด้านท้ายเขื่อน



รูปที่ 4-5 การไหลร่วนของสารผสมที่อัดฉีดบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ



รูปที่ 4-6 หลุมยุบบริเวณสันเขื่อนด้านเหนือหน้า



รูปที่ 4-7 หลุมยุบบริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำ

ภายหลังการอัดฉีดของผสมได้ทำการเจาะสำรวจและเก็บตัวอย่างชั้นดินถมด้วยวิธีการตอกทดลองแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test: SPT) บริเวณ กม.2+095 เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงและประสิทธิภาพการแทนที่ของผสมที่อัดฉีดในชั้นดินถมตัวเขื่อน ผลการตอกทดลองแสดงให้เห็นว่าชั้นดินถมตัวเขื่อนมีสภาพปานกลางถึงแข็งมาก (Medium to very stiff) และชั้นหินฐานรากค่าตอกทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความมั่นคงแข็งแรงดี ข้อมูลการตอกทดลองแบบมาตรฐาน (Standard Penetration test : SPT) แสดงใน **ภาคผนวก ข** ตัวอย่างดินที่ได้จากกระบอกตอกทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4-8 รูปที่ 4-9 และรูปที่ 4-10 แสดงให้เห็นช่องว่างในชั้นดิน และสภาพการแทนที่ของผสมในชั้นดินที่เป็นไปในลักษณะการไหลเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างที่เป็นรอยแตก รอยแยกของชั้นดิน แต่ช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่มีขนาดเล็กนั้นของผสมไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปได้



รูปที่ 4-8 ตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะทดสอบภายหลังการอัดฉีด



รูปที่ 4-9 ตัวอย่างดินที่ได้จากการเจาะทดสอบภายหลังการอัดฉีด



รูปที่ 4-10 การแทนที่ของของผสมในชั้นดินที่เข้าไปเติมเต็มในช่องว่างที่เป็นแนวแตก รอยแยกของชั้นดิน

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การแก้ไขปัญหาหน้าไหลร่วนผ่านเขื่อนดินถมประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินงาน ได้แก่ (1) การตรวจสอบและวิเคราะห์เบื้องต้น จากข้อมูลโครงการ แบบก่อสร้าง ข้อมูลธรณีวิทยาฐานราก การตรวจสอบสภาพพื้นที่และปริมาณน้ำไหลร่วน (2) การดำเนินการป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเขื่อน โดยการถมวัสดุเม็ดหยาบเพื่อชะลอการกัดเซาะดินถมตัวเขื่อนในบริเวณโดยรอบจุดที่พบน้ำไหลร่วนและก่อสร้างบ่อลดแรงดัน รวมทั้งการถมดินเสริมบริเวณลาดเขื่อนด้านเหนือน้ำและการลดระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ (3) การสำรวจข้อมูลเพิ่มเติมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแก้ไขปัญหา โดยวิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะตามแนวศูนย์กลางเขื่อน และดำเนินการเจาะเพื่อหาจุดไหลร่วนของน้ำ (4) การกำหนดวิธีการแก้ไขปัญหาโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมีในการแก้ไขปัญหารั่วไหลของน้ำในภาวะวิกฤติ

การอัดฉีดเพื่อแก้ไขปัญหารั่วไหลของน้ำในครั้งนี้เป็นการแก้ไขปัญหารั่วไหลในภาวะวิกฤติเร่งด่วน เนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลร่วนที่ตรวจวัดเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2563 มีอัตราการไหลร่วนอยู่ที่ 25 ลิตรต่อวินาที เพิ่มมากขึ้นเป็น 176 ลิตรต่อวินาที ในวันที่ 26 ตุลาคม 2563 จึงต้องมีการกำหนดวิธีหรือกระบวนการในการอัดฉีดและเลือกใช้วัสดุในการอัดฉีดที่มีคุณสมบัติในการหยุดการไหลของน้ำได้อย่างรวดเร็วและต้องเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็ก สามารถแทรกเข้าไปในรอยแตก ช่องว่างของดินถมได้ ภายหลังจากการอัดฉีดดินถมต้องที่บ้น้ำและมีความแกร่งเพิ่มขึ้น โดยกระบวนการในการอัดฉีดเริ่มต้นด้วยการอัดฉีดแบบ 2 สารผสม (Two-solution process) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหยุดการไหลร่วนของน้ำอย่างรวดเร็วที่สุด โดยการอัดฉีดน้ำปูนและสารโซเดียมซิลิเกตจะแยกกันเป็น 2 Lines ลงในหลุมอัดฉีดเดียวกัน ซึ่ง Line 1 เป็นการอัดฉีดน้ำปูนที่เป็นการผสมกันของน้ำและซีเมนต์ (W:C) Line 2 เป็นสารผสมของน้ำและโซเดียมซิลิเกต (W:S) โดยให้ผสมกันที่บริเวณจุดหรือความลึกที่ต้องการทำให้เกิดการก่อตัวที่รวดเร็วและเกือบจะแข็งทันที ส่งผลให้น้ำมีการหยุดไหลอย่างรวดเร็ว การดำเนินการอัดฉีดในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาอัตราส่วน (Grout mix ratio) และระยะเวลาการแข็งตัว (Setting time) ที่เหมาะสมกับสภาพปัญหาหน้างานที่ต้องหยุดการไหลของน้ำให้เร็วที่สุด จึงได้กำหนดและออกแบบตำแหน่งและความลึกของหลุมอัดฉีดของผสมโดยรอบจุดที่น้ำไหลร่วน (กม.2+182) จำนวน 12 หลุม โดยมีระยะห่างระหว่างหลุม 3 เมตร จำนวน 3 แถว แถวละ 4 หลุม โดย offset ออกจากแนวศูนย์กลางเขื่อนด้านละ 3 เมตรและในขั้นตอนต่อมาใช้กระบวนการอัดฉีดเป็นแบบสารละลายเดียว (One-solution process) ได้แก่ ซีเมนต์ (Cement Portland) เป็นวัสดุในการอัดฉีดและใช้สารโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) เป็นสารผสม (Additive) ซึ่งเป็นสารที่จะทำให้ควบคุมเวลาการแข็งตัวของซีเมนต์หรือน้ำปูนได้และเป็นการเพิ่มความแข็งแรงของดินถมตัวเขื่อน การปฏิบัติงานอัดฉีดดังกล่าวได้ดำเนินการจนกระทั่งสามารถหยุดการไหลร่วนของน้ำได้ทั้งหมด

5.2 ข้อเสนอแนะ

การแก้ไขปัญหาหน้าไหลร่วนผ่านเขื่อนดิน โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยางอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอตาพระยา จังหวัดสระแก้ว เป็นการปฏิบัติงานภายใต้การกำกับดูแลของผู้บริหารกรม (ประกอบด้วย วิชาการ อธิบดี รองอธิบดีฝ่ายก่อสร้าง และรองอธิบดีฝ่ายวิชาการ) และประสานงานอย่างใกล้ชิดระหว่างผู้เขียน

ซึ่งปฏิบัติงานในตำแหน่งผู้อำนวยการส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา ได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ร่วมรับผิดชอบในการแก้ไขปัญหาในครั้งนี้ ร่วมกับเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องจากสำนักงานชลประทานที่ 9 สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา สำนักเครื่องจักรกล และโครงการชลประทานสระแก้ว โดยสามารถแก้ไขปัญหาหยุดการไหลร่วนของน้ำได้สำเร็จ โดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมี ลดความเสียหายของเขื่อนที่จะขยายความรุนแรง ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน อย่างไรก็ตามเมื่อได้พิจารณาผลการดำเนินงานและข้อมูลที่พบทั้งหมด จึงได้มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1) เนื่องจากวัสดุถมของเขื่อนห้วยยางเป็นดินกระจายตัว (Dispersive soil) รวมทั้งเขื่อนได้มีการก่อสร้างและใช้งานมานานกว่า 30 ปี ส่งผลให้เกิดปัญหาน้ำไหลร่วนดังกล่าว การดำเนินการแก้ไขปัญหาหน้าไหลร่วนผ่านเขื่อนดินถมโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนและสารเคมีในบริเวณที่เกิดการไหลร่วน และพื้นที่บริเวณข้างเคียงในช่วง กม.2+101 ถึง กม.2+399.5 รวมระยะทาง 300 เมตร เป็นการแก้ไขปัญหาในภาวะวิกฤติ และการเพิ่มประสิทธิภาพความมั่นคงระยะเร่งด่วนของเขื่อนห้วยยางเท่านั้น ดังนั้นหน่วยงานผู้รับผิดชอบควรมีแนวทาง และแผนงานเพิ่มประสิทธิภาพความมั่นคงของเขื่อนห้วยยางในระยะยาว ตลอดความยาวของตัวเขื่อน

2) เขื่อนห้วยยางเป็นเขื่อนดินถมที่มีการใช้ดินเป็นวัสดุในการก่อสร้างในปริมาณมาก จึงมีความจำเป็นต้องใช้ดินกระจายตัวในการก่อสร้าง แม้ว่าจะมีการปรับปรุงคุณภาพดิน และควบคุมคุณภาพการก่อสร้างไว้อย่างดีแล้ว ภายหลังจากก่อสร้างและใช้งานเขื่อน ควรมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินถม และตรวจสอบการป้องกันผิวหน้าของโครงสร้างดินถม เพื่อป้องกันผิวหน้าที่สัมผัสกับน้ำและอากาศโดยตรงไม่ให้เม็ดดินถูกพัดพาไปกับน้ำได้ง่าย เป็นการป้องกันผิวหน้าของดินแห้งและแตกร้าวนั้นจะก่อให้เกิดการกัดเซาะได้ง่าย

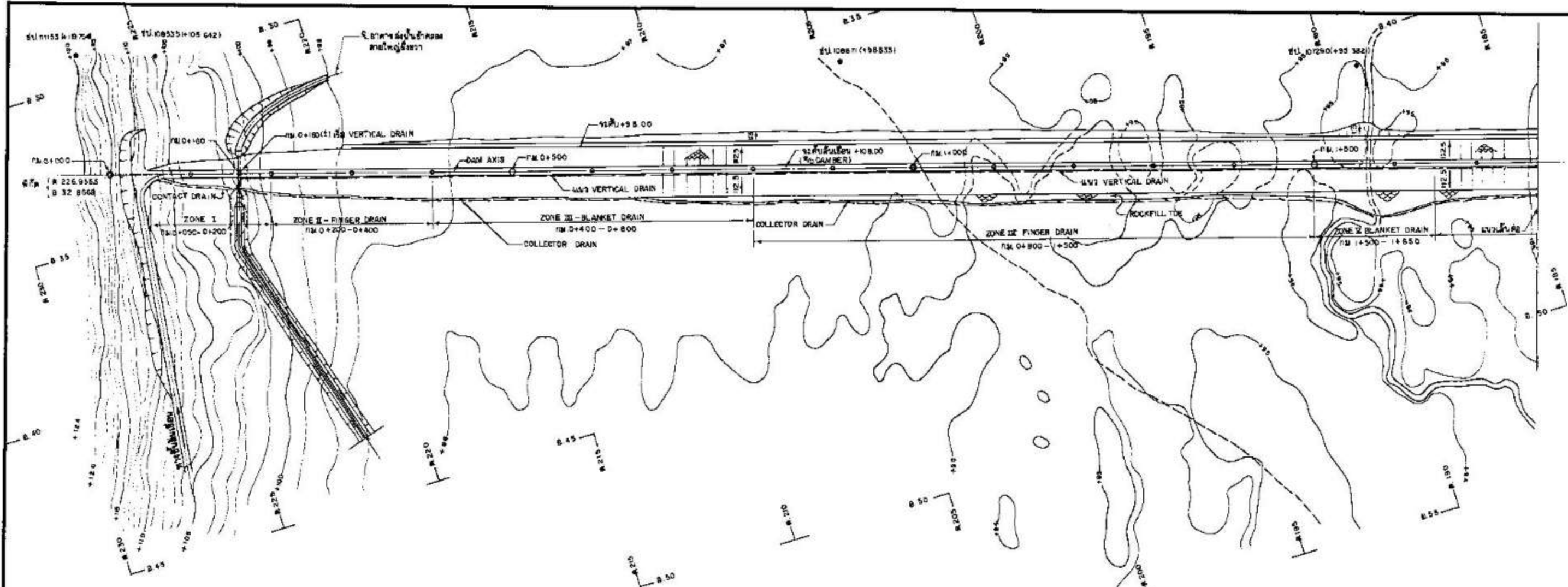
เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี, 2541. แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดปราจีนบุรี มาตรฐาน 1: 250,000 กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี
- ผศ.ดร. สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ และ รศ.ดร. วรากร ไม้เรียง, 2550. การพิบัติของเขื่อน เอกสารโครงการอบรม ความปลอดภัยในสภาวะปกติและสภาวะอันตราย ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- Gary B. Hemphill, 2013. Practical Tunnel Construction, John Wiley & Sons, United State of America, 415 Page
- Glen R. Andersen, Luc E. Choinard, Willi am H.Hover, and Chard W. Cox, 2001. Risk Indexing Tool to Assist in Prioritizing Improvements to Emblankment Dam Inventories, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- 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.
- J. Paul Guyer, 2015. An Introduction to chemicals for Grouting of Soils. (ww.PDHonline.com)
- Reuben H. Karol, 2003. Chemical Grouting and Soil Stabilization, CRC Press, New Jersey, U.S.A.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลของโครงการและแบบก่อสร้าง



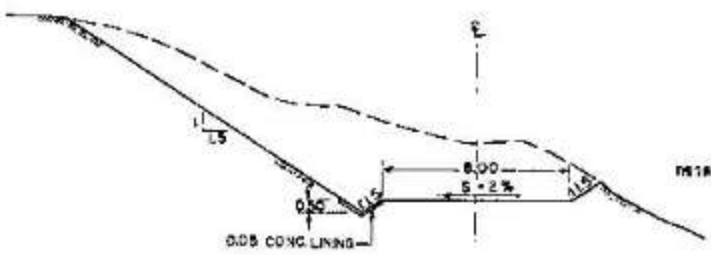
แผน
มาตราส่วน "ก"

หมายเหตุ

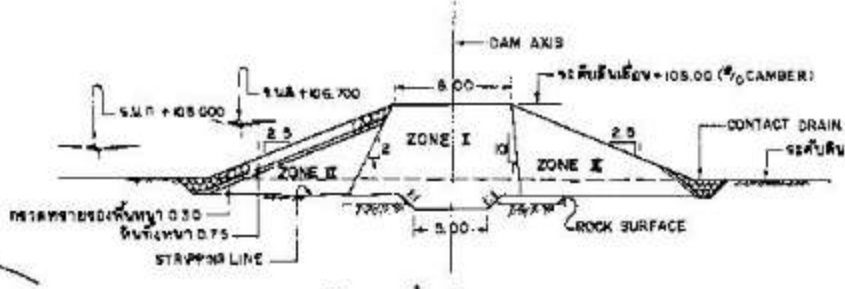
1. ดินและระดับ (จ.ต.ก.) กำหนดเป็นเมตร นอกจากเลขไว้เป็นอังกฤษ
2. แนวถนนข้างเขื่อน อาจเปลี่ยนแปลงไม่ได้ตามความต้องการหรือความเห็นชอบของนายช่างโครงการ
3. จุดระบายน้ำที่ต่อจาก COLLECTOR DRAIN ให้พิจารณาเป็นแนวตามความเหมาะสมกับลักษณะภูมิประเทศ และตามความเห็นชอบของนายช่างโครงการ

แบบประกอบ

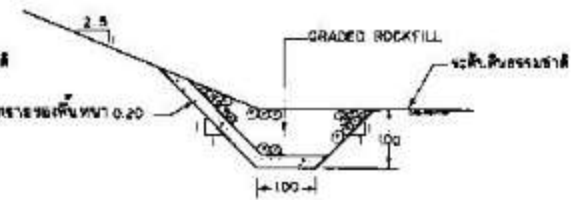
1. เขื่อนดิน
- 1.1 แบบแสดงตอนหัวเขื่อนและรูปตัด แบบเลขที่ ทบ-ท-028
 - 1.2 แบบแสดงตอน รูปตัด และรายละเอียด แบบเลขที่ ทบ-ท-034 แผ่นที่ 2
 - 1.3 แบบแสดงสภาพทางของผิวจราจรบนเขื่อน แบบเลขที่ ทบ-ท-035 แผ่นที่ 1/2
 - 1.4 แบบแสดงสภาพทางของผิวจราจรบนเขื่อน แบบเลขที่ ทบ-ท-036 แผ่นที่ 1/2



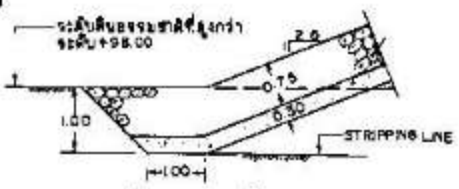
รูปตัดถนนชั้นดินเขื่อน
มาตราส่วน "ข"



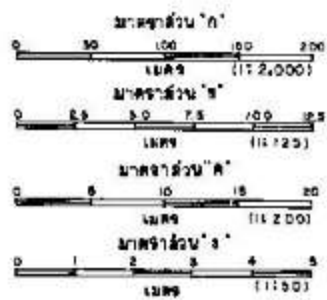
รูปตัดขวางเขื่อนดิน กม. 0+100
มาตราส่วน "ค"



TYPICAL CONTACT DRAIN
มาตราส่วน "ง"



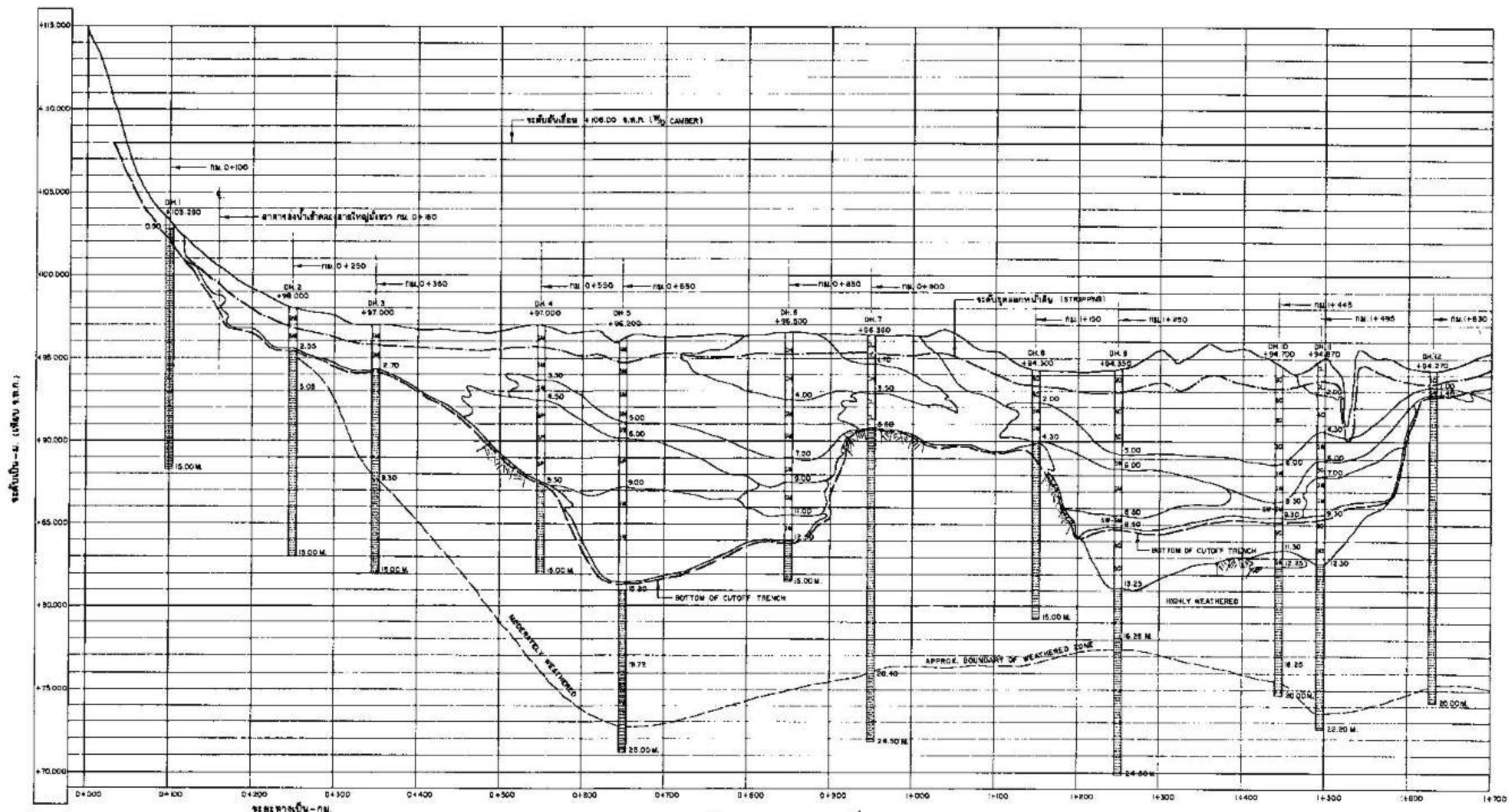
หินทิ้งด้านเหนือน้ำ
มาตราส่วน "ง"



กรมชลประทาน
โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยาง จ.ปราจีนบุรี
เขื่อนดิน
แสดงแบบ รูปตัด และรายละเอียด

บริษัท	เชียงใหม่ เอ็ม ซี จำกัด	กรมชลประทาน
สัญญา	...	เลขที่
วันที่	...	วันที่
ผู้จัดทำ	...	ผู้ตรวจสอบ
ผู้ควบคุม	...	ผู้ตรวจ
ผู้เขียน	...	ผู้ร่าง
ผู้พิมพ์	...	ผู้พิมพ์

ทบ-ท-033



สัญลักษณ์

- SC** SC-Clayey Sand; Approx. 60%-85% fine to medium sand, approx. 15%-40% low to medium plasticity fines, yellowish brown to dark brown, dark gray, dry to moist.
- SM** SM-Silty Sand; Approx. 60%-85% subangular to angular fine to coarse sand, approx. 15%-40% non plasticity fines, brown to reddish brown, grayish brown, dry to moist.
- CH** CH-Fat Clay; Approx. 90%-95% high plasticity fines, approx. 5%-10% fine sand, high dry strength, some roots, reddish brown, dry to moist.
- SW** SW-Well Graded Sand; Approx. 90%-95% fine to coarse sand, approx. 5%-10% non to low plasticity fines, yellowish brown, reddish brown to dark brown, dry to wet.
- GM-SM** GM-SM Silty Gravel; Approx. 40% subrounded fine gravel, approx. 40% fine to coarse sand, approx. 20% low plasticity fines, some organic matter, dark brown, dry.
- CL** CL-Sandy Clay; Approx. 65%-80% low to high plasticity fines, approx. 20%-35% fine to medium sand, grayish brown, reddish brown to dark brown, dry. Some part are Gravelly Clay, approx. 55% medium plasticity fines, 30% medium size gravel.
- SP** SP-Poorly Graded Sand; Approx. 95% subangular to subrounded fine sand, approx. 5% non plasticity fines, brown, dry to wet.

- GW-GM** GW-GM Well Graded Gravel; Approx. 55% subangular to subrounded gravel, approx. 35% fine sand, approx. 10% non plasticity fines, some organic matter, brown, dry.
- SW-SM** SW-SM Well Graded Sand; Approx. 70% fine to coarse sand, approx. 25% subangular to angular fine gravel, some organic matter, yellowish brown to brown, dry.
- Silstone**; micaceous siltstone, grayish purple to reddish purple, slightly weathered, moderately hard, partly friable.
- Sandstone**; mainly sandstone and conglomeratic sandstone, yellowish brown to pinkish brown, strongly (highly) weathered, fine to coarse grained, poor sorted, poor cementation, feldspar and other minerals are highly weathered to clay minerals, iron-bearing minerals are highly weathered to iron oxides, some mica.
- Sandstone**; mainly micaceous sandstone, gray, faintly weathering to fresh, fine grained, well sorted and cementation, faint iron oxide along fracture and surface of core, feldspar and other minerals are faintly weathered to clay minerals, there are mostly cross lamination.

Sandstone; argillaceous sandstone, yellowish brown, strongly (highly) weathered, fine grained, friable, iron minerals are highly weathered to iron oxides, feldspar and other minerals are highly weathered to clay minerals.

แบบประกอบ

- 1. 1:1
- 2. 1:1

รูปตัดตามยาวตามแนวแกนเขื่อน
และสภาพทางธรณีวิทยาของฐานราก
มาตราส่วน 1:100
จำนวน 1:2000

หมายเหตุ

1. ระดับ (จ.พ.ค.) และระดับการกำหนดไว้กับระดับถนน
2. หลุมเจาะและสภาพทางธรณีวิทยาของฐานราก คือออกจากฐานราก การสำรวจทางธรณีวิทยาของฐานราก โครงการก่อสร้าง จ. ปราชญ์บุรี หนองจอกและธรณีวิทยา เป็นวิทยานาม พ.ศ. 2535 MEMO-8 132
3. ฐานราก STANDARD PENETRATION RESISTANCE TEST ให้ดูจากแบบที่ 00-NY-4 ของกองปกติและธรณีวิทยา กรมชลประทาน

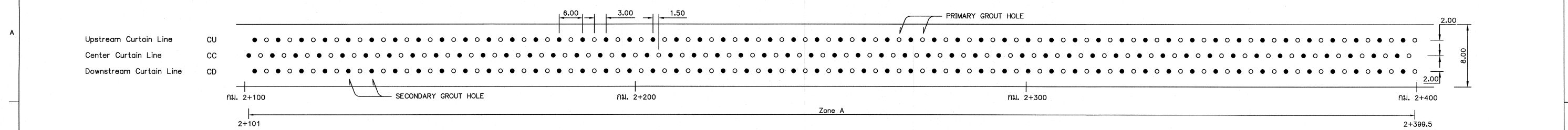
กรมชลประทาน
โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยาง จ.ปราชญ์บุรี
เขื่อนดิน
แสดงรูปตัดสภาพทางธรณีวิทยาของฐานราก

นายวิชาญ วัฒนศิริ	นายวิชาญ วัฒนศิริ	นายวิชาญ วัฒนศิริ	นายวิชาญ วัฒนศิริ
นายวิชาญ วัฒนศิริ	นายวิชาญ วัฒนศิริ	นายวิชาญ วัฒนศิริ	นายวิชาญ วัฒนศิริ

หมายเลข 035

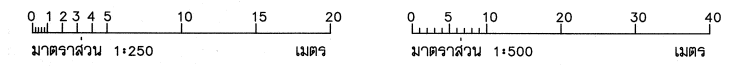
ภาคผนวก ข

แบบปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน หมายเลข สสธ.-สธ.7-0323



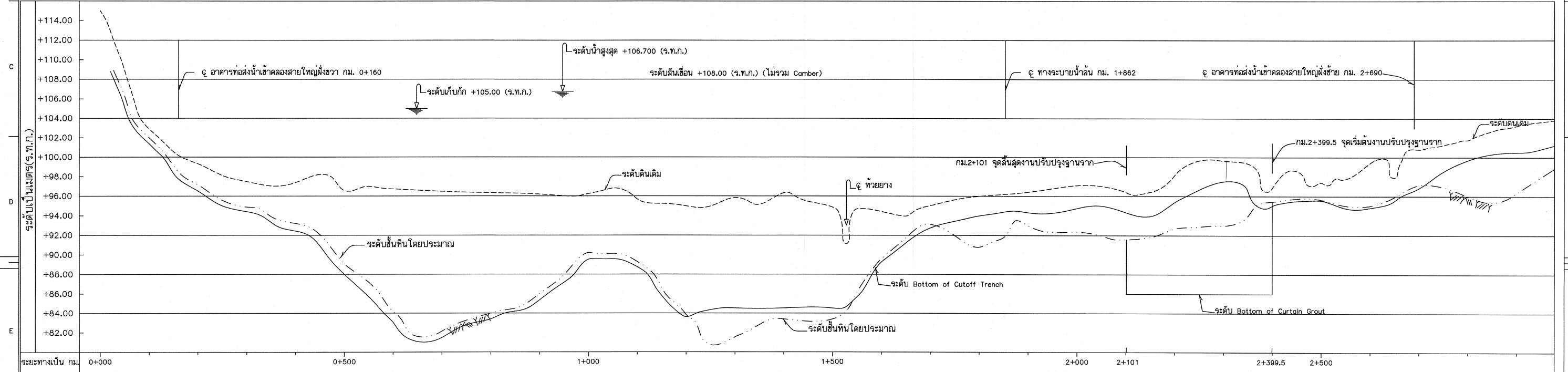
แปลนงานปรับปรุงฐานราก

มาตราส่วน { ทางตั้ง 1:250
ทางราบ 1:500



ฐานยันฝั่งขวา

ฐานยันฝั่งซ้าย



ระยะทางเป็น กม	0+000	0+500	1+000	1+500	2+000	2+101	2+399.5	2+500
ZONE							A	
DEPTH OF CURTAIN								
GROUT HOLE (เมตร)	21							

หมายเหตุ

- ระดับ (ร.ท.ก.) และมีค่าง ๑ กำหนดไว้เป็นเมตร ระยะทางเป็นกิโลเมตร นอกจากแสดงไว้เป็นอย่างอื่น
- ระดับดินธรรมชาติ ระดับชั้นหินโดยประมาณ ระดับท้องร่องเขื่อน คัดลอกจากแบบเขื่อนดิน แบบแสดงแปลนทั่วไปและรูปตัดของบริษัฯ เอ็มไพร์ เอ็ม ที จำกัด เลขที่ พย.-ท-028
- งานปรับปรุงฐานรากเขื่อน จะดำเนินการโดยวิธีใดก็ตามที่ผู้ทำางจะเห็นว่าเหมาะสมและระดับที่ดำเนินการปรับปรุงฐานรากได้
- กรณีที่มีงานระดับชั้นหินในบริเวณหัวเขื่อนหรือบริเวณใกล้เคียงซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่องานปรับปรุงฐานรากเขื่อน ก่อนเริ่มดำเนินการปรับปรุงฐานรากเขื่อนจะต้องทำการระดับชั้นหินให้เสร็จเรียบร้อยก่อน หรือให้อยู่ในคู่มือพิมพ์ และพิจารณาเห็นชอบจากนักธรณีวิทยาควบคุมงานในสนาม
- ให้ดำเนินการเจาะ - อัดฉีดน้ำปูนปรับปรุงฐานรากเขื่อนแบบ Split Spacing Method โดยตรงวิธี
- ในกรณีที่มีการเจาะผ่านดินบดอัด ให้ทำการเจาะโดยใช้น้ำ แล้วฝัง Grout Pipe ด้วย Casing จนถึงหน้าหินแข็ง และเมื่อดำเนินการ Grout ที่ฐานรากเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการถอน Casing ออกแล้วทำการอุดหลุมให้เต็ม ด้วยส่วนผสมของ Plastic Concrete ที่เหมาะสมทันที
- ตำแหน่ง ความลึก ทิศทาง ตลอดจนปริมาณของหลุมเจาะ - อัดฉีดน้ำปูนและสารเคมี เป็นการกำหนดไว้โดยประมาณ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่พบในสนามเป็นสำคัญ ทั้งนี้โดยให้อยู่ในคู่มือพิมพ์ และพิจารณาเห็นชอบจากนักธรณีวิทยาควบคุมงานในสนาม

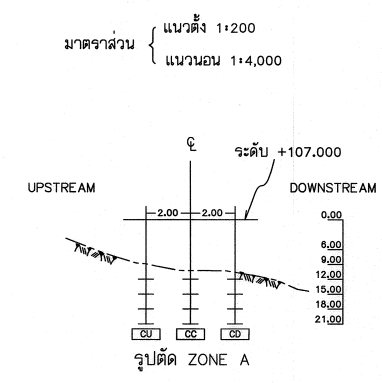
แบบประกอบ

แบบหมายเลข

เขื่อนดิน แบบแสดงแปลนทั่วไปและรูปตัด

พย.-ท-028

รูปตัดตามยาวตามแนวศูนย์กลางเขื่อน (มองเห็นอนน้ำ)



รูปตัดขวางตำแหน่งหลุมเจาะอัดฉีดของผสม (ไม่แสดงมาตราส่วน)



กรมชลประทาน
โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยยาง
ต.ทัพราช อ.ตาพระยา จ.สระแก้ว
(เพิ่มประสิทธิภาพความมั่นคงระยะเร่งด่วน)
งานปรับปรุงฐานรากเขื่อนดิน
แปลนและรูปตัด

ออกแบบ	พิกัง รัตติกง	เสนอ	พิกัง รัตติกง	ทอ.3 ศอ.					
เขียน	พิกัง รัตติกง	ผ่าน	พิกัง รัตติกง	ทอ.ศอ.					
ลอก	พิกัง รัตติกง	เห็นชอบ	พิกัง รัตติกง	ทอ.ศอ.					
ตรวจ	พิกัง รัตติกง	อนุมัติ	พิกัง รัตติกง	ทอ.ศอ.					
ครั้งที่	ตำแหน่ง	รายการแก้ไข	วันที่	ตรวจ	ผ่าน	อนุมัติ	สำนักสำรวจคำนวณวิศวกรรมและธรณีวิทยา ส่วนวิศวกรรมธรณี	วันที่	สสอ.-ส.๗-0323

ภาคผนวก ค

ข้อมูลตอกทดลองแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test ; SPT)

ผลการเจาะสำรวจโดยวิธีการตอกทดลองแบบมาตรฐานในแนวศูนย์กลางเขื่อน บริเวณ กม.2+095

ความลึก (ม.)		ค่าตอกทดลอง (จำนวนครั้ง)
จาก	ถึง	
0.85	1.00	9
1.00	1.15	16
1.15	1.30	19
1.85	2.00	5
2.00	2.15	6
2.15	2.30	8
2.85	3.00	5
3.00	3.15	7
3.15	3.50	10
3.85	4.00	9
4.00	4.15	11
4.15	4.30	13
4.85	5.00	7
5.00	5.15	7
5.15	5.30	12
5.85	6.00	6
6.00	6.15	9
6.15	6.30	15
6.85	7.00	7
7.00	7.15	9
7.15	7.30	17
7.85	8.00	5
8.00	8.15	9
8.15	8.30	15
8.85	9.00	9
9.00	9.15	17
9.15	9.30	12
9.85	10.00	9
10.00	10.15	14
10.15	10.30	11

ผลการเจาะสำรวจโดยวิธีการตอกทดลองแบบมาตรฐานในแนวศูนย์กลางเขื่อน บริเวณ กม.2+095 (ต่อ)

ความลึก (ม.)		ค่าตอกทดลอง (จำนวนครั้ง)
จาก	ถึง	
10.85	11.00	9
12.00	12.15	6
12.15	12.30	12
12.85	13.00	10
13.00	13.15	14
13.15	13.30	20
13.85	14.00	40
14.00	14.06	50/6

