การปรับปรุงสภาพธรณีวิทยาฐานรากที่มีความยุ่งยาก กรณีศึกษา โครงการอ่างเก็บน้ำคลองขลุง อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี

วัชรพล นิตสูงเนิน[1], สุทธาสินี อนุสรหิรัญการ[2], สุเมธ อินทร์ไชย[3],
กัมปนาท ขวัญศิริกุล[4], รุจรินทร์ ธุรารัตน์[5] และธวัชชัย บรรเทา[6]
ส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน
Email: wn.tao33@gmail.com[1], spidy__phy@hotmail.com[2], sumetoa@gmail.com[3],
kwansirikul@gmail.com[4], rujjarin@gmail.com[5], tiatorteam@gmail.com[6]

บทคัดย่อ

โครงการอ่างเก็บน้ำคลองขลุง อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี มีชั้นหินฐานราก (Bed Rock) เป็นหินแกรนิต (Granite) และถูกปิดทับด้วยชั้นดินฐานราก (Overburden) ที่มีความหนาค่อนข้างมาก มีความแน่นสูง เป็นดินที่เกิดจากการผุพังอยู่กับที่ (Residual Soil) และพบก้อนหินมนใหญ่ (Boulder) ปะปนอยู่ มีระดับน้ำใต้ดินค่อนข้างตื้น ค่าความรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินอยู่ในเกณฑ์รั่วซึมสูงถึงสูงมาก จากสภาพธรณีวิทยาฐานรากดังกล่าว ส่งผลให้ไม่สามารถขุดเปิดร่องแกนไปถึงชั้นหินแข็งหรือทำการปรับปรุงฐานรากด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การปรับพื้นที่เพื่อปู Upstream Impervious Blanket การทำ Slurry Trench หรือการทำ Soil Cement Columns ได้ รวมถึงไม่สามารถใช้ซีเมนต์ ในการอัดฉีดผ่านชั้นดินได้ เนื่องจากอนุภาคของซีเมนต์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถเดินทางผ่านช่องว่างของเม็ดดินได้ดีพอ มีความจำเป็นต้องทำการปรับปรุงชั้นดินฐานราก โดยวิธีการอัดฉีดสารเคมี (Chemical Grouting) ที่มีอนุภาค ขนาดเล็กและมีค่าความหนืด (Viscosity) ต่ำใกล้เคียงกับน้ำ ส่วนวิศวกรรมธรณี สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยาได้เข้าดำเนินการปรับปรุงสภาพชั้นดินฐานรากโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมีด้วยโซเดียมซิลิเกตผสมกับ โซเดียมไบคาร์บอเนตและน้ำ (Silicate - Based Grout) ซึ่งเหมาะสมต่อการอัดฉีดเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดินของ ชั้นดินฐานรากที่มีช่องว่างขนาดเล็กมาก เมื่อทำการอัดฉีดสารเคมีผ่านเข้าไปในชั้นดินฐานรากแล้ว สารเคมีดังกล่าว จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็น Soft Gel ทำให้ชั้นดินฐานรากมีความแน่นทึบ จากการศึกษาและทดลองในพื้นที่บริเวณ กม.0+453 ถึง กม.0+485 ซึ่งประกอบด้วยหลุมเจาะ-อัดฉีด จำนวน 5 แถว พบปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีด มีแนวโน้มลดลงจากหลุมเจาะ-อัดฉีดลำดับที่หนึ่งไปหาหลุมเจาะ-อัดฉีดลำดับที่สอง และมีแนวโน้มลดลงจากหลุมเจาะ-อัดฉีดในแถวที่ทำการปฏิบัติงานในลำดับแรก ไปหาหลุมเจาะ-อัดฉีดในแถวที่ทำการปฏิบัติงานในลำดับสุดท้าย การปฏิบัติงานเจาะ-อัดฉีดสารเคมี สามารถประเมินผลได้จากการเปรียบเทียบค่าปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีดกับ

Effective Radius และความลึกของหลุมเจาะ-อัดฉีด โดยกำหนดระยะ Effective Radius ไม่น้อยกว่า 1.00 เมตร และมีความลึกของกำแพงทึบน้ำจากระดับร่องแกนอยู่ในช่วง 12.00 ถึง 21.00 เมตร ตามแบบ ทั้งนี้การตรวจสอบผลการปฏิบัติงาน จะใช้วิธีการเจาะหลุมตรวจสอบแล้วทำการทดสอบความรั่วซึมของน้ำในชั้นดินด้วยวิธี Open-end Test โดยภายหลังเสร็จสิ้นการปรับปรุง ชั้นดินฐานรากจะต้องมีค่าความรั่วซึมของน้ำน้อยกว่า 5.00 x 10-5 เซนติเมตร/วินาที

คำสำคัญ: *ดินที่เกิดจากการผุพังอยู่กับที่ (Residual Soil), ก้อนหินมนใหญ่ (Boulder), การอัดฉีดสารเคมี (Chemical Grouting)*

1. บทนำ

โครงการอ่างเก็บน้ำคลองขลุง ตั้งอยู่ที่ หมู่ที่ 9 บ้านคลอง ตำบลเกวียนหัก อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี ในเขื่อนดินประเภท Zone Type มีความยาวสันเขื่อน 565 เมตร ความสูง 24.80 เมตร ความจุอ่างฯที่ระดับกักเก็บ 4.24 ล้านลูกบาศก์เมตร พื้นที่รับประโยชน์ 2,500 ไร่ เดิมในปี พ.ศ. 2539 แผนงานก่อสร้างเป็นโครงการขนาดเล็ก แต่ไม่สามารถดำเนินการได้เนื่องจากราษฎรไม่ยอมอุทิศที่ดินให้ แต่หากจะดำเนินการโดยมีการจ่ายค่าที่ดินหรือค่าทดแทน จะต้องจัดเข้าแผนงานก่อสร้างขนาดกลาง โดยขยายขอบเขตการออกแบบใหม่ เพื่อให้มีพื้นที่รับประโยชน์เพิ่มมากขึ้น จึงได้ดำเนินการศึกษาและพิจารณาวางโครงการอ่างเก็บน้ำคลองขลุงและจัดทำรายงานแล้วเสร็จเมื่อเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2545 จนกระทั่งมีการประชุมของคณะรัฐมนตรีเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2548 ให้มีการปรับโครงสร้างการผลิตพืชสวนและผลไม้ภาคตะวันออก ตลอดจนการบริหารจัดการน้ำและแก้ไขวิกฤตินำ้ภาคตะวันออก จึงมีมติให้โครงการอ่างเก็บน้ำคลองขลุงเป็นโครงการเร่งด่วน โครงการพัฒนาและปรับปรุงแหล่งน้ำ โดยมีข้อสรุปข้อคิดเห็นจากทางสำนักงานก่อสร้างชลประทานขนาดกลางที่ 9 ว่าควรมีการปรับปรุงฐานรากเขื่อนใหม่ทั้งหมดโดยใช้รายงานปรับปรุงฐานรากที่ออกแบบไว้ พ.ศ. 2548

รูปแบบปัญหาที่พบ เนื่องจากสภาพธรณีวิทยาฐานรากของโครงการอ่างเก็บน้ำคลองขลุง จังหวัดจันทบุรี ประกอบด้วย ชั้นดิน (Overburden) ที่มีความหนาตั้งแต่ 17.00 เมตร ถึงมากกว่า 28.00 เมตร ปรากฏระดับน้ำใต้ดินค่อนข้างตื้น (รูปที่ 1ก) สภาพของชั้นดินดังกล่าว ส่วนใหญ่พบเป็นดินทรายปนทรายแป้ง (Silty Sand, SM) ซึ่งเป็นดินที่เกิดจากการผุพังอยู่กับที่ (Residual Soil) ของหินแกรนิต โดยพบลักษณะโครงสร้างของเนื้อหินแกรนิตที่ยังคงสภาพอยู่ และพบก้อนหินมนใหญ่ (Boulder) ของหินแกรนิตปะปนอยู่ ซึ่งลักษณะของสภาพธรณีวิทยาในชั้นดินที่ปรากฏนั้นเป็นผลมาจากน้ำที่ผ่านรอยแตกรอยแยกของหินแกรนิต ส่งผลให้หินแกรนิตเกิดการผุพังสลายตัวไปเป็นดิน ค่าอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นดินอยู่ในเกณฑ์รั่วซึมสูงถึงสูงมาก (รูปที่ 1ข) ส่วนชั้นหินฐานรากเป็น ชั้นหินแกรนิต (Granite) สีเทา

มีผลึกขนาดปานกลางถึงหยาบ มีเนื้อดอก อัตราการผุพังอยู่ในขั้นเล็กน้อยถึงปานกลาง (Slightly to Moderately Weathered) มีความแข็งอยู่ในเกณฑ์แข็ง ค่าอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านชั้นหินฐานรากจัดอยู่ในเกณฑ์รั่วซึมเล็กน้อยถึงรั่วซึมสูง ซึ่งชั้นหินแกรนิตอยู่ในระดับลึกมากไม่สามารถขุดเปิดร่องแกนไปถึงได้

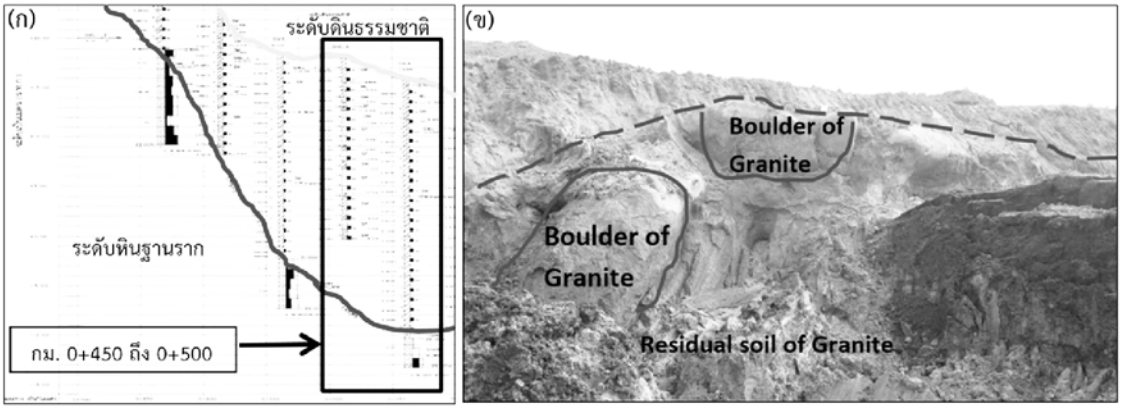
จากสภาพธรณีวิทยาฐานรากที่พบว่าชั้นดินมีความหนามาก และปะปนไปด้วยก้อนหินมนใหญ่ที่กระจายตัวอยู่ในบริเวณพื้นที่ร่องแกน รวมทั้งพบน้ำใต้ดินในปริมาณมากและมีระดับตื้น ทำให้ไม่สามารถทำการปรับปรุงฐานรากด้วยวิธีการใช้ซีเมนต์ในการอัดฉีดผ่านชั้นดินได้ เนื่องจากอนุภาคของซีเมนต์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของเม็ดดินได้ดีพอ อีกทั้งชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ส่งผลให้ผนังหลุมเจาะเกิดการพังทลาย ไม่สามารถคงสภาพเป็นผนังหลุมสำหรับการจับ Packer เพื่อการอัดฉีดสารผสมได้ เมื่อทำการประเมินและพิจารณาข้อดี-ข้อเสีย รวมทั้งเทคนิคในการดำเนินการปรับปรุงฐานราก พบว่า การปรับปรุงฐานรากโดยวิธีการอัดฉีดสารเคมีเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานครั้งนี้

2. วิธีการปรับปรุงฐานรากโดยการอัดฉีดสารเคมีและผลการปฏิบัติงาน

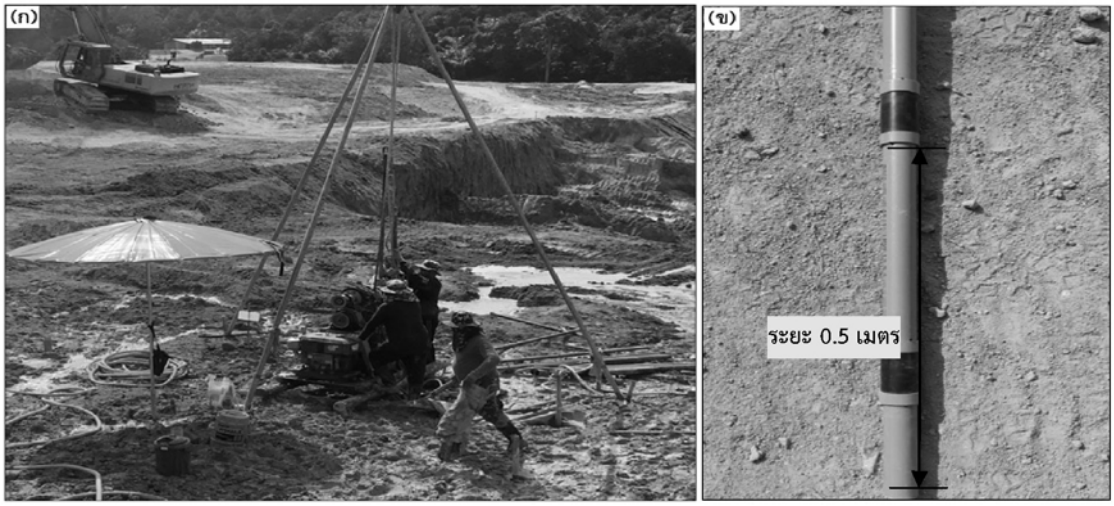
การปฏิบัติงานปรับปรุงฐานรากมีขั้นตอนและหลักเกณฑ์ในการปฏิบัติงาน (กรมชลประทาน, 2557) ดังนี้

2.1 การเจาะหลุมเพื่อการอัดฉีด

2.1.1 การเจาะเพื่อการอัดฉีด (รูปที่ 2ก) ชั้นดินฐานรากซึ่งไม่สามารถคงสภาพหลุม เมื่อดำเนินการเจาะจะติดตั้งท่อกรุเพื่อรักษาสภาพหลุมเจาะเพื่อติดตั้ง Sleeve Grout Pipe (รูปที่ 2ข) และทำการรื้อถอนออกทันทีที่เสร็จงานอัดฉีดน้ำปูนหุ้มท่อ (Cement Sheet) ท่อกรุเป็นเหล็กปลายท่อด้านล่างอยู่เท่ากับความลึกของหลุม



รูปที่ 1 (ก) รูปตัดธรณีวิทยาฐานรากตามแนวศูนย์กลางเขื่อนบริเวณ กม. 0+450 ถึง 0+500
(ข) ลักษณะชั้นดินที่ถูกเปิดตามแนวศูนย์กลางเขื่อนโครงการอ่างเก็บน้ำคลองขลุง จังหวัดจันทบุรี



รูปที่ 2 (ก) แสดงลักษณะการเจาะหลุมสร้างหลุมเพื่อการอัดฉีดสารเคมี
(ข) แสดงลักษณะของ Sleeve Grout Pipe

2.1.2 รูปแบบของหลุมอัดฉีด (Pattern of Grout Hole) ประกอบด้วย หลุมเจาะ-อัดฉีด จำนวน 3 - 5 แถว ระยะห่างระหว่างแถว 1.0 ถึง 2.0 เมตร ตำแหน่งหลุมเจาะ-อัดฉีดในแต่ละแถว ประกอบด้วยหลุมเจาะ-อัดฉีดลำดับที่หนึ่ง ระยะห่างกัน 4.0 เมตร และหลุมเจาะ-อัดฉีดลำดับที่สอง ซึ่งอยู่ระหว่างหลุมเจาะ-อัดฉีดลำดับที่หนึ่ง ระยะห่างกัน 2.0 เมตร รายละเอียดแสดงไว้ในแบบงานปรับปรุงฐานราก หมายเลข สชป. 9 - กธว. - ฐ - 002 (กรมชลประทาน, 2549)

2.1.3 การแบ่งช่วงความลึก (Stage) ของการอัดฉีด แบ่งออกเป็นช่วงความลึก ตามตำแหน่งของ Rubber Sleeve (ท่อยาง) โดยแต่ละ Rubber Sleeve มีระยะห่างกัน 0.5 เมตร

2.2 การทดสอบการรั่วซึมของน้ำในชั้นดิน

ดำเนินทดสอบแบบ Open-End Test ตามแบบ Designation E-18 ตาม "EARTH MANUAL" ของ USBR (1963) ซึ่งสูตรที่ใช้ (1) คือ

$$K = \frac{Q}{5.5rH} \quad (1)$$

โดยที่ K = Permeability coefficient (cm/sec)

Q = Constant rate of flow into hole (cc/sec)

r = Internal radius of casing (Nw size = 3.81 cm)

H = Differential head of water (cm)

2.3 งานติดตั้ง Sleeve Grout Pipe และงานอัดฉีดน้ำปูนหุ้มท่อ

Sleeve Grout Pipe ประกอบด้วยท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.5 นิ้ว โดยความยาวขึ้นอยู่กับช่วงความลึกหรือความหนาของชั้นดินฐานราก ซึ่งปลายท่อด้านล่างต้องปิดไว้ โดยทำการเจาะรูขนาด 6 มิลลิเมตร บริเวณข้างท่อจำนวน 4 รู ทุกระยะ 0.50 เมตร แล้วจึงทำการติดตั้ง Rubber

Sleeve โดยครอบให้ตรงกับตำแหน่งที่ทำการเจาะรู แล้วจึงใช้วงแหวน PVC วางรองไว้ทั้งสองด้านของ Rubber Sleeve

งานอัดฉีดน้ำปูนหุ้มท่อ จะเริ่มหลังจากทำการเจาะหลุมอัดฉีดแล้วเสร็จ โดยจะดำเนินการเจาะหลุมอัดฉีดให้แล้วเสร็จทั้งหมดตามแบบ จึงเริ่มทำการอัดฉีดน้ำปูนหุ้มท่อ โดยดำเนินการอัดฉีดน้ำปูนผสมกับน้ำโคลน Bentonite (อัตราส่วนผสม น้ำ : ปูน = 5 : 1 โดยปริมาตร + น้ำโคลน 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และน้ำโคลนที่ใช้ผสมต้องผ่านการบ่ม อย่างน้อย 24 ชั่วโมง) ระหว่างท่อ Casing และ Sleeve Grout Pipe พร้อมกันกับการถอนท่อ Casing ขึ้น จากนั้นจะต้องทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน แล้วจึงดำเนินการอัดฉีดสารเคมีเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพชั้นดินฐานรากผ่าน Sleeve Grout Pipe

2.4 การอัดฉีดสารเคมี

การอัดฉีดสารเคมีของโครงการอ่างเก็บน้ำคลองขลุง จังหวัดจันทบุรี (รูปที่ 3) คือ การอัดฉีดโซเดียมซิลิเกตผสมกับโซเดียมไบคาร์บอเนตและน้ำ (Silicate - Based Grout) ที่อยู่ในสถานะของเหลวในช่วงแรกลงไปในชั้นดินฐานรากที่มีค่าการรั่วซึมสูงแต่ไม่สามารถอัดฉีดน้ำปูนเข้าไปได้ เนื่องจากข้อจำกัดของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน จึงต้องทำการอัดฉีดด้วยสารเคมี เมื่อทำการอัดฉีดผ่านเข้าไปในชั้นดินฐานรากแล้ว สารเคมีจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็น Soft Gel เมื่อค่าความหนืด (Viscosity) เพิ่มขึ้น

รูปที่ 3 แสดงลักษณะการดำเนินการอัดฉีดสารเคมี

2.4.1 วัสดุและอัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีด

วัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงชั้นดินฐานราก ประกอบด้วย

โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) เป็นสารละลายประเภท Alkaline Colloidal ชนิด Silicium มีสูตรคือ $nSiO_2$, Na_2O คุณลักษณะของโซเดียมซิลิเกต ประกอบด้วย Ponderal Ratro Rp = SiO_2, Na_2O และสามารถวัดค่าความหนาแน่นในหน่วยของ Degree Baume′ (oBe′) หรือ Degree

Twaddle (OTW) ซึ่งโดยทั่วไปโซเดียมซิลิเกตจะมีค่า Ponderal Ratio (Rp) อยู่ในช่วง 3-4 และมีค่าความหนาแน่นจำเพาะอยู่ในช่วง 30^{O} ถึง 42^{O} Be (52^{O} - 82^{O}Tw) โดยคุณสมบัติของโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ คือ

รายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของสารเคมีโซเดียมซิลิเกต

อัตราส่วนระหว่าง SiO_2 : Na_2O	= 3.2 - 3.4
ความถ่วงจำเพาะที่ 20^{O} c	= 1.32 - 1.35
ความหนาแน่นที่ 20^{O} c	= 35 - 37 Be′
ส่วนผสมของน้ำ	= 63 - 67 %
ส่วนผสมของ Na_2O	= 7.5 - 8.5 %
ส่วนผสมของ SiO_2	= 25.6 - 26.6 %
ความหนืดของสารเคมีที่ 20^{O} c	= 60 - 90 CP
ความเป็นกรดด่างของสารเคมี	= 10.5 - 11.5

โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium Bicarbonate, $NaHCO_3$) มีคุณสมบัติเป็นกรดเมื่อผสมกับโซเดียมซิลิเกตซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่างจะทำให้ได้โซเดียมคาร์บอเนตและ Silica Gel ดังสมการนี้

$$nSiO_2Na_2O + 2Na_2HCO_3 \longrightarrow 2Na_2CO_3 + nSiO_2 + H_2O$$

เมื่อความเป็นกรดอ่อนๆ ของไบคาร์บอเนต ทำการละลายอย่างเหมาะสม จะทำให้ Setting Time สอดคล้องกับสภาวะการแทรกซึม กล่าวคือ Soft Gel ที่ได้จะมีความหนืดมีค่าต่ำใกล้เคียงกับน้ำ ซึ่งเหมาะสมต่อการอัดฉีดเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดินของชั้นดินฐานรากที่มีช่องว่างขนาดเล็กมากทำให้มีความแน่นทึบ (Water Tightening Effect) ซึ่งมีความต้านทานแรงกดได้น้อย และยังสามารถใช้ในชั้นหินที่มีการผุพังสูง โดยแทรกซึมเข้าไปตามแนวรอยแตกรอยแยกเล็กๆ ได้ดี ซึ่งปริมาณที่ใช้อย่างเหมาะสม คือ

- โซเดียมซิลิเกต (Rp : 3.3d = 30^{O} ถึง 37^{O} Be′) : 100 - 200 ลิตร/ลูกบาศก์เมตร
- โซเดียมไบคาร์บอเนต : 15 - 30 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
- น้ำ ใช้ในการผสมสารเคมี น้ำกร่อยหรือน้ำทะเลไม่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของ Silicate-Based Grout ได้

2.4.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงานอัดฉีดสารเคมี

การอัดฉีดจะทำแบบ Pressure Grouting โดยวิธี Upstage Grouting Method ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้

2.4.2.1. การอัดฉีดจะทำงานแบบ Split Spacing Method ซึ่งเริ่มดำเนินการในหลุมเจาะลำดับที่หนึ่ง (Primary Grout Holes, P) ก่อน โดยการทำการอัดฉีดตามช่วงระดับความลึกที่ได้ติดตั้ง Rubber Sleeve (ช่วงละ 0.5 เมตร) เสร็จแล้วจึง เริ่มดำเนินการอัดฉีดในหลุมเจาะลำดับที่สอง (Secondary Grout Holes, S) เป็นลำดับต่อไป

2.4.2.2. ทำการดัน Rubber Sleeve ที่ติดตั้งไว้ด้วยความดัน 2 - 7 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งทำให้เกิดภาวะของ Hydraulic Fracturing

2.4.2.3. จากนั้นทำการอัดฉีดสารเคมีผ่านรอยแตกของน้ำปูนด้วยความดันที่กำหนดไว้

หมายเหตุ

- การใช้แรงดันคำนวณจาก 0.23 - 0.46 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร คูณความลึกที่ทำการอัดฉีด
- ความลึกของช่วงอื่นๆ ให้ใช้หลักการนี้แล้วปรับตามความเหมาะสม

1) การอัดฉีดจะหยุดชั่วคราวแล้วทำการอัดฉีดในช่วงระดับความลึกถัดไปเมื่อพบว่า ช่วงความลึกนั้นๆ มีค่า Grout Take มากกว่า 400 ลิตร ต่อ ช่วงระดับความลึกนั้นๆ หรือพบว่า มีการรั่วซึมขึ้นบนพื้นผิวของการทำงานของสารเคมี

2) ในระหว่างทำการอัดฉีดสารเคมี ถ้าพบว่า สารเคมีในสภาวะที่เป็นของเหลวมีความหนืดสูงหรือเริ่มเข้าสู่สภาวะ Start to Thicken ให้หยุดการอัดฉีด ทำการผสมสารเคมีใหม่แล้วจึงทำการอัดฉีดต่อไป

3) เมื่อทำการอัดฉีดในหลุมเจาะลำดับที่หนึ่งและหลุมเจาะลำดับที่สองเสร็จแล้ว จึงมาพิจารณาการอัดฉีดซ้ำ (Regrouting) จากหลักเกณฑ์ที่ว่า หากมีการรั่วซึมขึ้นบนพื้นผิวของการทำงานของสารเคมี และหลักเกณฑ์ต่อไปนี้

การอัดฉีดสารเคมี ครั้งที่ 1 : หากช่วงการทำงานระดับใดมีค่า Grout Take มากกว่า 400 ลิตร/ช่วงการอัดฉีด ให้หยุดการอัดฉีดชั่วคราว

การอัดฉีดสารเคมี ครั้งที่ 2 : หากช่วงการทำงานระดับใดมีค่า Grout Take มากกว่า 200 ลิตร/ช่วงการอัดฉีด ให้หยุดการอัดฉีดชั่วคราว

การอัดฉีดสารเคมี ครั้งที่ 3 : หากช่วงการทำงานระดับใดมีค่า Grout Take มากกว่า 200 ลิตร/ช่วงการอัดฉีด ให้ถือว่าเสร็จสิ้นการอัดฉีดในช่วงการทำงานนั้นๆ

- การทำงานของช่วงการทำงานใดๆ จะเสร็จสิ้นก็ต่อเมื่อมีค่า Grout Take รวมมากกว่า 800 ลิตร/ช่วงการอัดฉีด หรือไม่มีค่า Grout Take เมื่อทำการอัดฉีดด้วยแรงดันที่กำหนดแล้ว

2.4.2.4. การอัดฉีดสารเคมีในหลุมเจาะลำดับที่สาม (Tertiary Grout Holes, T) และหลุมเจาะลำดับที่สี่ (Quaternary, Q) จะกระทำก็ต่อเมื่อช่วงความลึกใดๆ ในหลุมเจาะลำดับที่หนึ่ง และหลุมเจาะลำดับที่สองมีค่า Grout Take มากกว่า 800 ลิตร/ช่วงการอัดฉีด

2.4.2.5. ขณะทำการอัดฉีด ถ้าพบว่าสารเคมีรั่วขึ้นผิวบนได้ให้ปฏิบัติ ดังนี้

- อุดรอยรั่วด้วยลิ่ม หรือจุกไม้ เหล็ก ถุงปูน
- เมื่อไม่สามารถหยุดการรั่วของสารเคมีด้วยการอุดได้ให้ทำการลดความดันของการอัดฉีดลง 1 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร หรือน้อยกว่า และลดอัตราเร็วในการอัดฉีดให้เหลือน้อยกว่า 10 ลิตร/นาที

- เมื่อพบว่าการรั่วเกิดขึ้นนาน โดยไม่มีลักษณะที่แสดงให้เห็นว่าอัตราการรั่วจะลดลง แม้จะได้ใช้วิธีการดังกล่าวแล้ว ก็ให้หยุดการอัดฉีดในช่วงนั้น

2.4.2.6. เมื่อดำเนินการอัดฉีดสารเคมีตลอดความลึกหลุมเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะต้องดำเนินการอุดหลุมให้เต็ม (Grout Plug) ด้วยน้ำปูนเข้มข้น (อัตราส่วน น้ำ : ปูน = 2 : 1 โดยปริมาตร + น้ำโคลน 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยน้ำโคลนที่ใช้ผสมต้องผ่านการบ่มอย่างน้อย 24 ชั่วโมง)

2.5 การเจาะหลุมตรวจสอบ (Check Holes, CH)

การเจาะหลุมตรวจสอบ เป็นการปฏิบัติงานขั้นตอนสุดท้ายของงานปรับปรุงดินฐานราก หลังจากทำการอัดฉีดแบบต่างๆ จนเสร็จสิ้นหมดแล้ว จึงเริ่มทำการเจาะหลุมตรวจสอบพร้อมทั้งทดสอบความรั่วซึมของน้ำในชั้นดินแบบ Open-end Test สำหรับวัตถุประสงค์ของการเจาะของหลุมตรวจสอบ เพื่อตรวจสอบว่าผลการอัดฉีดสารเคมีได้ผลและมีประสิทธิภาพตามเป้าหมายที่ตั้งไว้หรือไม่ หลุมตรวจสอบจะวางในตำแหน่งที่ครอบคลุมขอบเขตการอัดฉีดทั้งหมด ซึ่งอัดฉีดสารเคมีเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยเจาะผ่านบริเวณที่มีการรั่วซึมสูงๆ และปริมาณสารเคมีที่อัดฉีดลงไปมีปริมาณมาก เพื่อตรวจผลการอัดฉีดในบริเวณดังกล่าว ถ้าผลจากหลุมตรวจสอบยังมีบริเวณที่ยังไม่ได้ผลตามเป้าหมายก็จะมีการพิจารณาวางแผนและดำเนินการอัดฉีดสารเคมีเพิ่มเติม เพื่อให้งานบรรลุตามเป้าหมาย ระยะห่างระหว่างหลุมตรวจสอบสำหรับการปฏิบัติงานในสนามนั้นยังไม่ได้มีการกำหนด ซึ่งจะพิจารณาจากผลการรั่วซึมและการอัดฉีดสารเคมีในสนามเป็นสำคัญ

2.6 เป้าหมายและเกณฑ์กำหนดสำหรับงานปรับปรุงดินฐานราก (Target of Improvement)

ภายหลังทำการปรับปรุงดินฐานรากเสร็จสิ้นแล้ว จะพิจารณาผลการปฏิบัติงานว่าอยู่ในเกณฑ์ใช้ได้หรือไม่ โดยพิจารณาจากเกณฑ์ค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ค่าอัตราการรั่วซึมของน้ำในชั้นดินของหลุมเจาะหลุมตรวจสอบ มีค่าน้อยกว่า 5.0×10^{-5} เซนติเมตร/วินาที หรือมีจำนวนช่วงที่มีค่าอัตราการรั่วซึมของน้ำในชั้นดินของหลุมเจาะหลุมตรวจสอบมีค่ามากกว่า 5.0×10^{-5} เซนติเมตร/วินาที รวมกันแล้วต้องมีค่าน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์

2.7 หลักเกณฑ์การพิจารณาเพิ่มหลุมเจาะอัดฉีดสารเคมี

ตามรายละเอียดที่กำหนดไว้ในแบบงานปรับปรุงฐานรากหมายเลข สชป.9-กธว.-ฐ-002 การปฏิบัติงานอัดฉีดสารเคมีกำหนดเพียงหลุมอัดฉีดลำดับที่หนึ่งและหลุมอัดฉีดลำดับที่สองเท่านั้น เมื่อทำการอัดฉีดจนกระทั่งถึงหลุมอัดฉีดลำดับที่สองเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะพิจารณาผลการอัดฉีดทั้งหลุมอัดฉีดลำดับที่หนึ่งและหลุมอัดฉีดลำดับที่สอง เมื่อผลที่ได้ยังมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ก็จะพิจารณาเพิ่มหลุมอัดฉีดลำดับที่สามแทรกระหว่างหลุมอัดฉีดลำดับที่หนึ่งและหลุมอัดฉีดลำดับที่สอง หรือหลุมลำดับต่อๆ ไปตามลำดับ

ผลการทดสอบการรั่วซึมของน้ำในชั้นดินแบบ Open-end Test ในหลุมตรวจสอบ ซึ่งกระทำภายหลังการอัดฉีดสารเคมีในบริเวณต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้วนั้น จะนำผลมาพิจารณากับเป้าหมายและกฎเกณฑ์ที่กำหนดไว้ดังกล่าวมาข้างต้น ถ้าหากไม่บรรลุตามวัตถุประสงค์ ก็ทำการพิจารณาวางแผนและกำหนดวิธีการในการเพิ่มงานอัดฉีดสารเคมี เพื่อให้งานบรรลุตามเป้าหมายที่วางไว้ เช่น เพิ่มหลุมหรือเพิ่มแถวในการอัดฉีดลงไปอีก

2.8 ผลการปฏิบัติงานเจาะ-อัดฉีดสารเคมี

จากการศึกษาและทดลอง ในพื้นที่บริเวณ กม.0+453 ถึง กม.0+485 ซึ่งประกอบด้วย หลุมเจาะ-อัดฉีด จำนวน 5 แถว คือหลุม Consolidation และ Blanket บริเวณเหนือน้ำและท้ายน้ำ อย่างละ 1 แถว และหลุม Curtain 1 แถว (รูปที่ 4) พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม สำหรับนำไปใช้ในการอัดฉีดสารเคมี คือ

Water	:	Sodium Silicate	:	Sodium Bicarbonate
180 ลิตร	:	25 ลิตร	:	4 กิโลกรัม

โดยปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีด มีแนวโน้มลดลงจากหลุมเจาะ-อัดฉีดลำดับที่หนึ่ง ไปหาหลุมเจาะ-อัดฉีดลำดับสอง และมีแนวโน้มลดลงจากหลุมเจาะ-อัดฉีดในแถวที่ทำการปฏิบัติงานในลำดับแรกไปหาหลุมเจาะ-อัดฉีดในแถวที่ทำการปฏิบัติงานในลำดับสุดท้าย

รูปที่ 4 พื้นที่ศึกษาและทดลอง บริเวณ กม.0+453 ถึง กม.0+485
ประกอบด้วยหลุมเจาะ-อัดฉีด จำนวน 5 แถว

3. สรุปผล

การปฏิบัติงานเจาะ-อัดฉีดสารเคมี สามารถประเมินผลได้จากการเปรียบเทียบค่า ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการอัดฉีดกับ Effective Radius และความลึกของหลุมเจาะอัดฉีด โดยกำหนดระยะ Effective Radius ไม่น้อยกว่า 1 เมตร และมีความลึกของกำแพงทึบน้ำอยู่ในช่วง 12 ถึง 21 เมตร ตามแบบ ทั้งนี้การตรวจสอบผลการปฏิบัติงานจะใช้วิธีการเจาะหลุมตรวจสอบ แล้วทำการทดสอบความรั่วซึมของน้ำในชั้นดิน โดยวิธี Open-end Test ตามมาตรฐานของ Designation E-18 ตาม "EARTH MANUAL" ของ USBR ภายหลังการปรับปรุงชั้นดินจะต้องมีค่าความรั่วซึมของน้ำน้อยกว่า 5.0×10^{-5} เซนติเมตร/วินาที

4. บรรณานุกรม

[1] USBR. (1963), Earth Manual. U.S. Government Printing Office, Washington D.C. กรมชลประทาน. (2557), รายงานงานซ่อมแซมและเสริมความมั่นคงลาดเขื่อนดิน โดยวิธีการเจาะและอัดฉีดสารเคมีโครงการปรับปรุงประสิทธิภาพการเก็บกักน้ำอ่างเก็บน้ำลำปาว อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์, กลุ่มปฐพีและ ธรณีวิทยา ส่วนวิศวกรรมบริหาร สำนักชลประทานที่ 2.

[2] กรมชลประทาน. (2549), รายงานงานการสำรวจธรณีวิทยาฐานรากโครงการอ่างเก็บน้ำคลองขลุง อำเภอขลุง จังหวัด จันทบุรี,กลุ่มปฐพีและธรณีวิทยา ส่วนวิศวกรรมบริหาร สำนักชลประทานที่ 9.