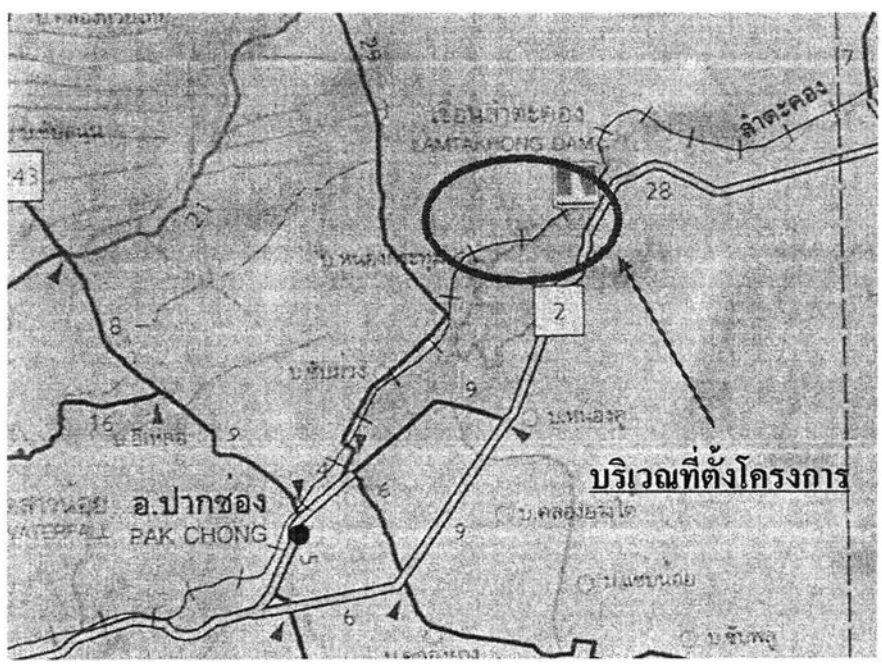
สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

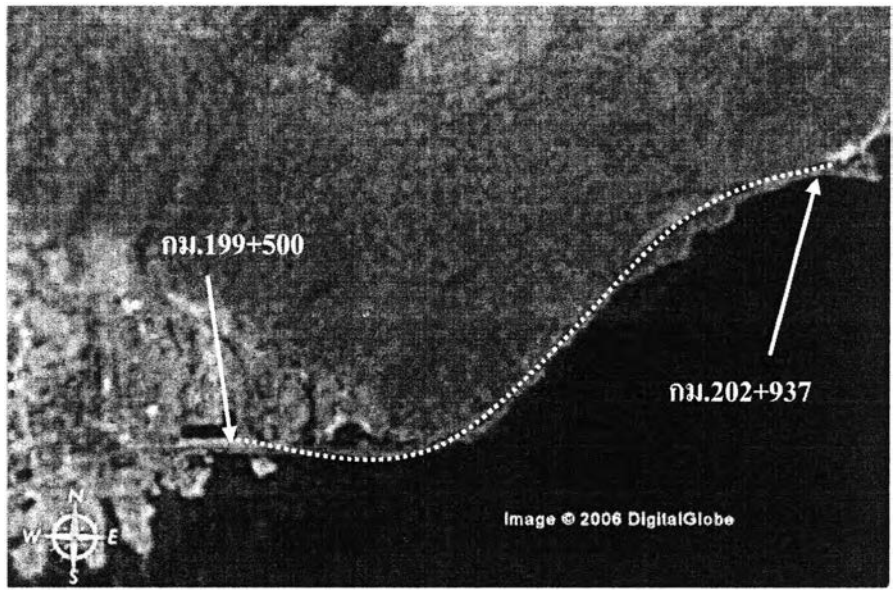
การรวบรวมและวิธีการดำเนินการทดลอง

3.1 บทนำ

ข้อมูลสำหรับการทำการศึกษาและทดลองเป็นข้อมูลที่ได้มาจากโครงการงานแก้ไขคันทางยุบตัว ที่ช่วง กม.199+500 ถึง กม.202+937 รวมเป็นระยะทางทั้งหมดยาว 3,437 เมตร อยู่ในบริเวณย่านสถานีคลองขนานจิตร อยู่ในช่วงพื้นที่แขวงบำรุงทางปากช่อง กองบำรุงทางเขตสุรินทร์ ศูนย์บำรุงทางสายตะวันออก ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย ตามรูปที่ 3.1 โดยเดิมที่คันทางรถไฟได้ทำการก่อสร้างในบริเวณที่เลาะผ่านไหล่เขาบริเวณรมเขื่อนลำคะคองทำให้คันทางที่ก่อสร้างจะมีลักษณะเป็นคันดินถมและก่อสร้างปิดกั้นเส้นทางน้ำไหลจากไหล่เขาลงสู่เขื่อน จากการก่อสร้างดังกล่าวทำให้คันทางในบางบริเวณมีลักษณะคล้ายเขื่อนดินกั้นทางน้ำ ดังแสดงในภาพถ่ายทางดาวเทียมรูปที่ 3.2 และในส่วนของคันทางได้ทำการก่อสร้างมาเป็นระยะเวลานานและวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเป็นดินที่ได้จากในบริเวณใกล้เคียงมาเป็นวัสดุในการก่อสร้างโดยดินดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นดินกระจายตัว เมื่อเวลาผ่านไปน้ำได้ไหลซึมผ่านของน้ำได้พัดพาเอาเม็ดดินในส่วนของตัวคันทางทำให้เกิดโพรงดินใต้ทางส่งผลให้คันทางเกิดการยุบตัว โดยการรถไฟแห่งประเทศไทยได้ออกแบบป้องกันปัญหาดินกระจายตัว พร้อมทั้งทำการปรับปรุงสภาพโดยรวมของคันทางโดยได้ทำ Soil Treatment ด้วยวิธี Jet Grouting มาเพิ่มเสถียรภาพของคันทาง



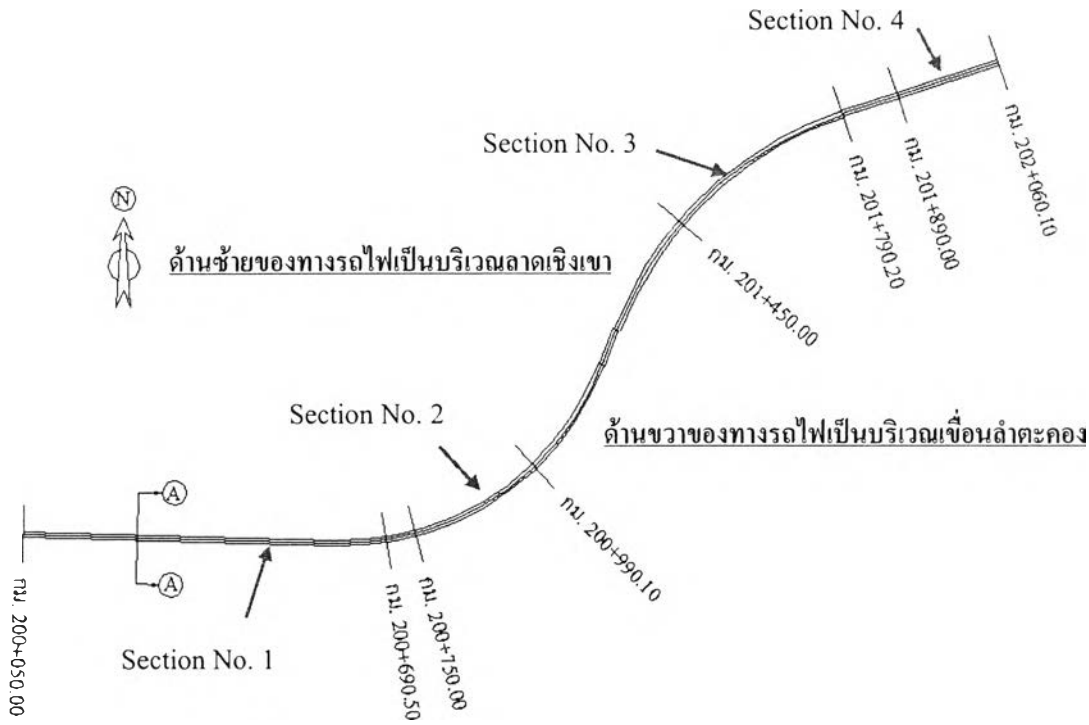
รูปที่ 3.1 แผนที่โครงการงานแก้ไขคันทางยุบตัว อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายจากดาวเทียมโครงการงานแก้ไขคันทางยุบตัว ที่ช่วง กม.199+500 ถึง กม. 202+937 (Google Earth, 2006)

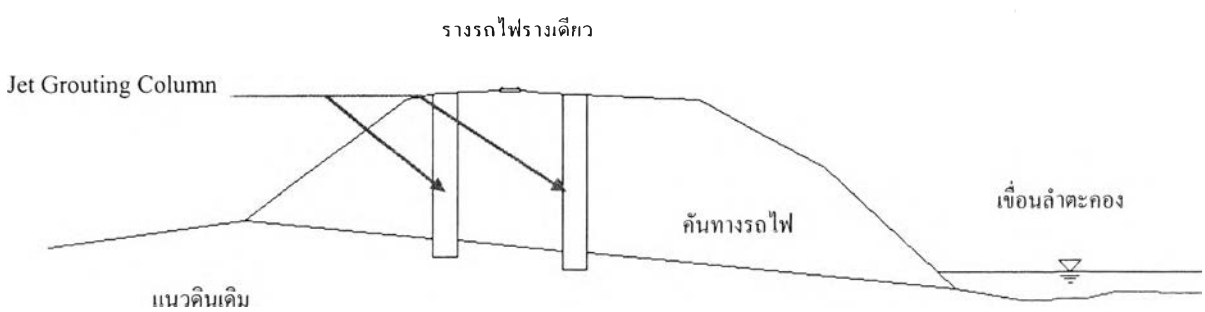
3.2 งานซ่อมคันทางโดยวิธีปรับปรุงคุณภาพดิน แบบ Jet Grouting

การซ่อมคันทางโดยวิธีปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Stabilization) ให้เป็นวัสดุทึบน้ำเนื้อเดียวกันอย่างต่อเนื่อง (Homogenous Impermeable Curtain Wall) ด้วยวิธี Jet Grouting โดยกำหนดให้ Jet Grouting Column ให้เป็นลักษณะเป็นแนวแผงมีความหนา 1.50 เมตร โดยมีความยาวของ Jet Grouting Column ในแนวดิ่งแปรตามระดับจากปลายตีนลาดเชิงเขา การปรับปรุงมีระยะทางในการทำJet Grouting Column รวมเป็นระยะทาง 1390.50 เมตร โดยมีตำแหน่ง Jet Grouting Column อยู่ห่างจากศูนย์กลางออกไปด้านซ้ายและขาวข้างละ 4.00 เมตร ในช่วง Section No. 1 (ตั้งแต่ กม.200+050.00 ถึง กม.200+690.50 โดยครอบคลุมตำแหน่งเสา Jet Grouting ต้นที่ 1 ถึง 1,830 ทั้งด้านซ้าย และด้านขวาของทางรถไฟ) ในช่วง Section No. 2 (ตั้งแต่ กม.200+750.00 ถึง กม.200+990.10โดยครอบคลุมตำแหน่งเสา Jet Grouting ต้นที่ 1,831 ถึง 2,518 ทั้งด้านซ้าย และด้านขวาของทางรถไฟ) และมีตำแหน่ง Jet Grouting Column อยู่ห่างจากศูนย์กลางออกไปด้านซ้ายและขาวข้างละ 3.00 เมตร ในช่วง Section No. 3 (ตั้งแต่ กม.201+450.00 ถึง กม.201+790.20โดยครอบคลุมตำแหน่งเสา Jet Grouting ต้นที่ 2,519 ถึง 3,491 ทั้งด้านซ้าย และด้านขวาของทางรถไฟ) ในช่วง Section No. 4 (ตั้งแต่ กม.201+890.00 ถึง กม.202+060.10โดยครอบคลุมตำแหน่งเสา Jet Grouting ต้นที่ 3,492 ถึง 3,978 ทั้งด้านซ้าย และด้านขวาของทางรถไฟ) โดยภาพรวมตำแหน่ง Section ต่างๆได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 และภาพที่ 3.4 แสดงตัวอย่างรูปตัดคันทางในช่วง Section No. 1 กม.ที่ 200+200(ภาพตัด A-A) ทั้งก่อน(ภาพที่ 3.4ก)และภายหลังทำการปรับปรุงเสถียรภาพของคันทางโดยวิธี Jet Grouting Column(ภาพที่ 3.4ข) และในส่วนของการระบุชื่อของ Jet Grouting Column ทำการระบุตามตำแหน่งที่ตั้งเช่น 185R หมายถึงเสาต้นที่ 185 อยู่ด้านขวาของคันทางรถไฟโดยหันหน้าปลายทาง



รูปที่ 3.3 แสดงภาพรวมของ Section ต่างๆ ของโครงการปรับปรุงคันทางรถไฟ

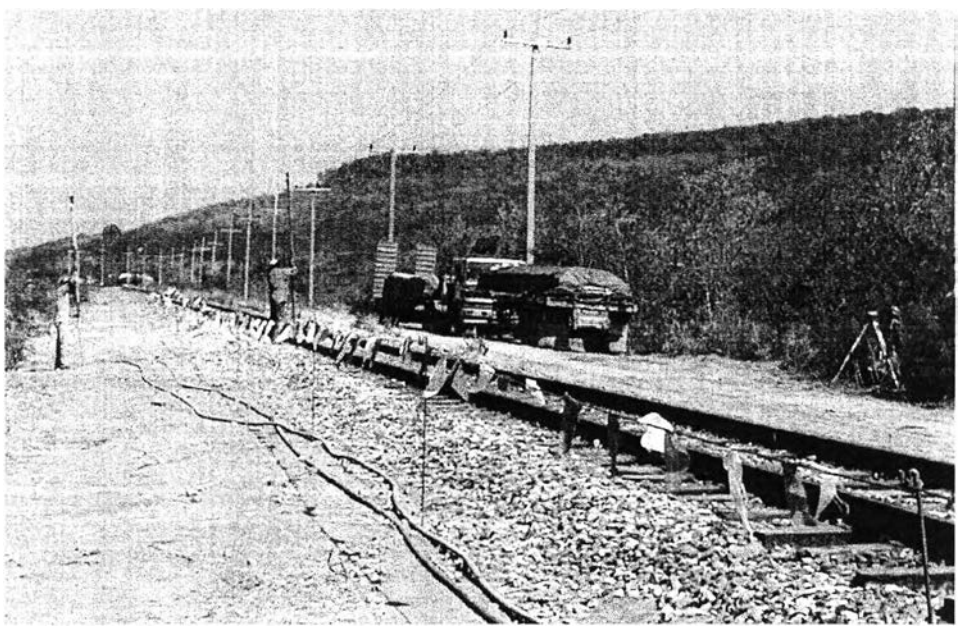
รูปที่ 3.4ก แสดงตัวอย่างรูปตัดคันทาง กม.ที่ 200+200(ภาพตัด A-A) ก่อนการปรับปรุงคุณภาพ



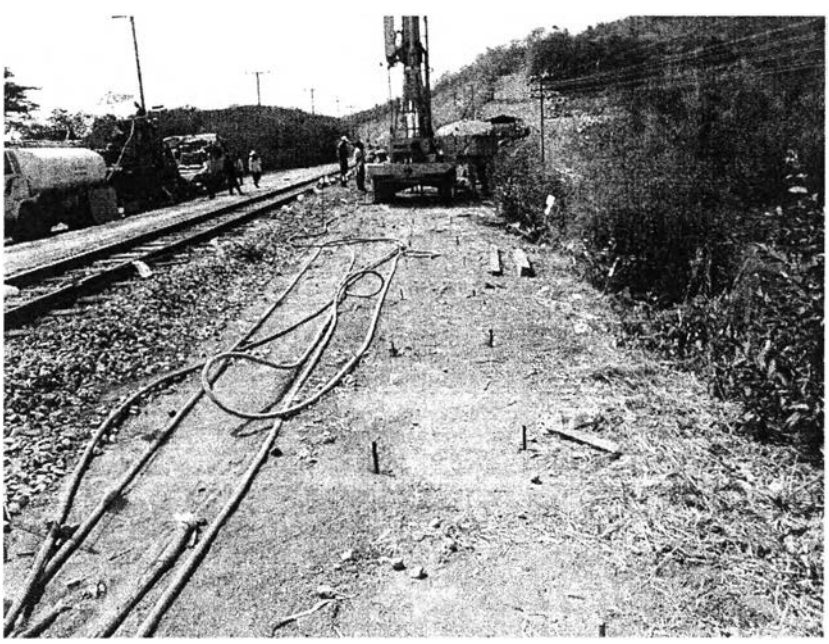
รูปที่ 3.4ข แสดงตัวอย่างรูปตัดคันทาง กม.ที่ 200+200(ภาพตัด A-A) หลังการปรับปรุงคุณภาพ

โดยขั้นตอนและวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินคันทางตามโครงการปรับปรุงคุณภาพดินใต้ทางรถไฟตามโครงการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการ Jet Grouting สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

3.2.1 ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดที่จะทำการฉีดน้ำปูนด้วยหมุดไม้ หรือวัสดุที่มองเห็นได้ชัดเจนทุกจุด ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ในแต่ละ Section โดยการกำหนดตำแหน่งของการทำ Jet Grouting Column นั้นต้องทำการสำรวจหาหน้าตัดคันทางก่อนจากนั้นทำการสำรวจหาระดับและตำแหน่งของจุดตามภาพที่ 3.5 เมื่อได้ตำแหน่งตามที่กำหนดแล้วต้องปักหมุดให้สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนเพื่อความสะดวกในการทำงานและง่ายต่อการตรวจสอบดังภาพที่ 3.6

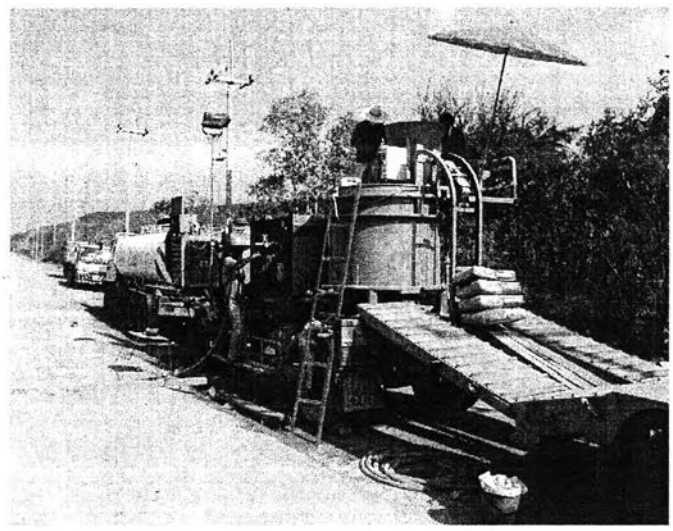


รูปที่ 3.5 ทำการสำรวจเพื่อกำหนดตำแหน่งของการทำ Jet Grouting

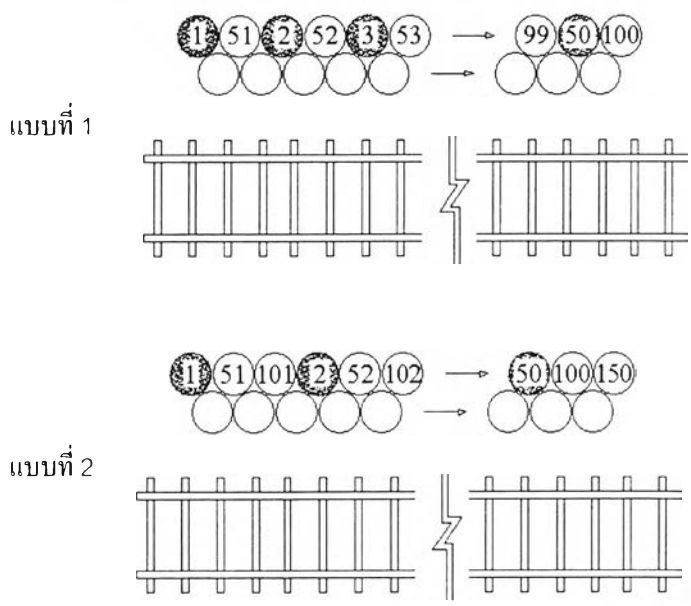


รูปที่ 3.6 ตัวอย่างตำแหน่งหมุดต้นเสาขณะเตรียมการเพื่อทำการ Jet Grouting

3.2.2 ทำการติดตั้งเครื่องจักรในส่วนของชุดชุดถังผสมปูนซีเมนต์และชุดอัดแรงดันน้ำปูนซีเมนต์ บนคันทางในบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ทำงานดังรูปที่ 3.7 หากในกรณีที่คันทางที่มีบ่าทางแคบ เพื่อความปลอดภัยให้สร้างนั่งร้านชั่วคราวสำหรับเครื่องจักรเพื่อป้องกันการกีดขวางการเดินรถและเพื่อความปลอดภัยในการทำงาน โดยในการทำ Jet Grouting Column ให้ทำการฉีดน้ำปูนในแนวนอกสุดของขอบคันทางทั้งสองข้างก่อนแล้วเคลื่อนเข้าหาศูนย์กลางของราวรถไฟเพื่อป้องกันปัญหาการขาดเสถียรภาพของคันทาง และเพื่อให้เกิดเป็นกำแพงกักดิน (Confining Wall) ไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวออกด้านข้างของลาดคันทาง และในการฉีดน้ำปูนเพื่อทำ Jet Grouting Column ในแนวเดียวกันนั้นจะต้องทำการฉีดเว้นระยะตามลำดับตำแหน่งตามรูปที่ 3.8 เป็นลำดับของการทำ Jet Grouting Column โดยเริ่มจากลำดับที่1 จากนั้นเรียงลำดับตามแบบที่กำหนด เพื่อไม่ให้เป็นการรบกวนการก่อตัวของเสาเข็ม



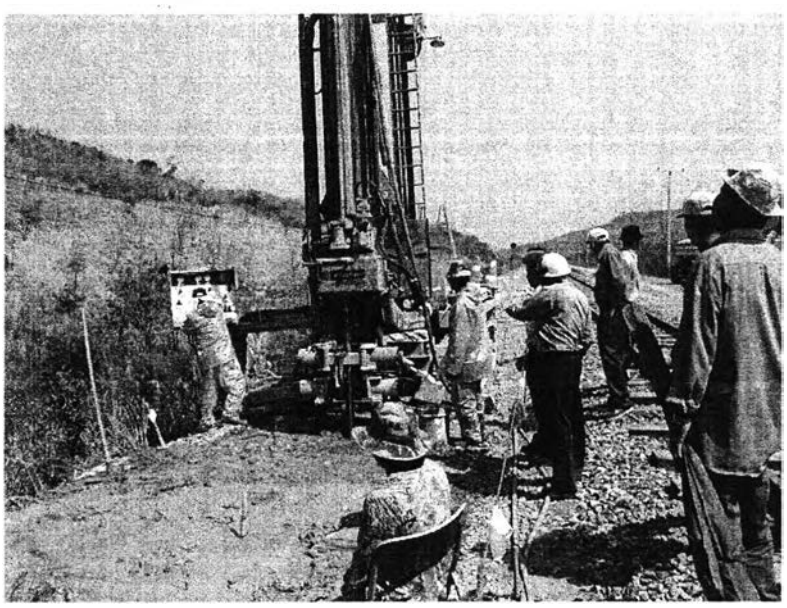
รูปที่ 3.7 ชุดถังผสมปูนซีเมนต์และชุดอัดแรงดันน้ำปูนซีเมนต์



รูปที่ 3.8 รูปแบบลำดับของการทำ Jet Grouting Column

3.2.3 ทำการตั้งก้านเจาะ ณ ตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ข้างต้นเพื่อเริ่มทำ Jet Grouting Column (หากในกรณีที่ดินแห้งและแข็งมากให้ทำการ Pre-water Jet ในแนวดิ่งก่อน) จากนั้นเริ่มหมุนและทำการกดก้านเจาะลงไปให้ถึงระดับตามที่ได้กำหนดออกแบบไว้ เมื่อได้ระดับตามลึกที่ต้องการแล้วจากนั้นจึงเริ่มทำการฉีดน้ำปูนในแรงดันตามที่กำหนดเพื่อให้น้ำปูนผสมกับดินพร้อมทั้งปั่นโดยการหมุนก้านเจาะด้วยความเร็วรอบตามที่กำหนดและดึงก้านเจาะขึ้นโดยอัตราการยกตามที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ขณะทำ Jet Grouting Column โดยได้เว้นระยะห่างระหว่างต้นตามข้อกำหนดข้างต้น โดยภาหลังทำการปรับปรุงแล้วลักษณะของ Column จะทำให้เกิดแผงทึบน้ำขนาดกว้าง 1.5 เมตรทั้งสองข้างทางรถไฟ โดยมีความยาวของ Column ในแนวดิ่งแปรตามระดับจากปลายตีนลาดเชิงเขา โดยมีรายละเอียดในส่วนของ Jet Grouting Column ดังนี้

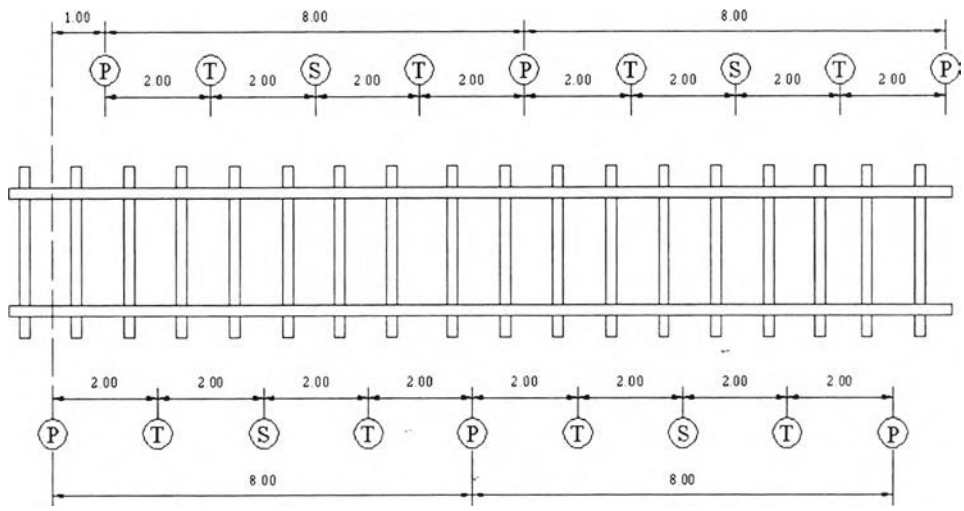
- ฉีดเป็นเสาซีเมนต์ขนาด 0.80 เมตร
- ระยะการฉีดระหว่างเสาที่ติดกัน 0.70 เมตร
- อัตราการผสมปูนซีเมนต์และน้ำ 1:2 โดยน้ำหนัก
- ปริมาณปูนซีเมนต์ ที่ใช้ 100 กิโลกรัมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของดินเดิม



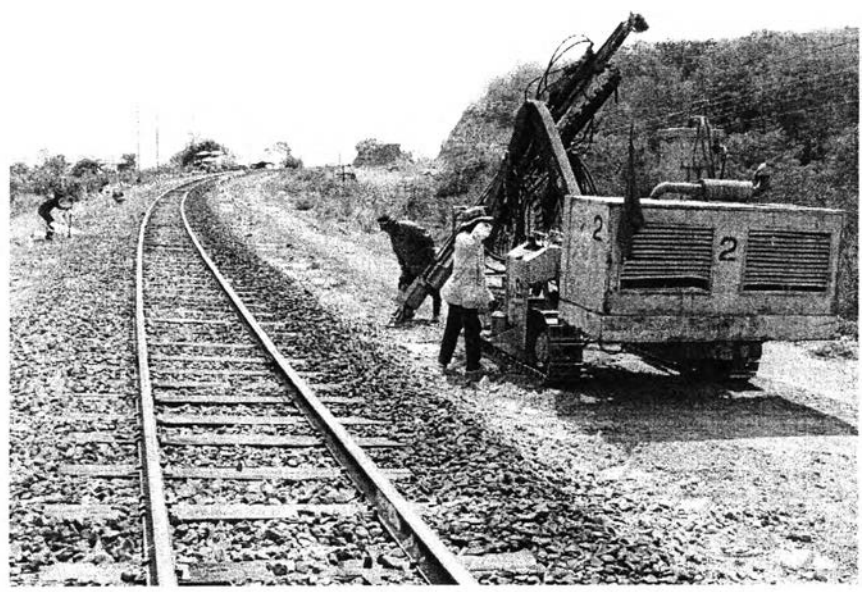
รูปที่ 3.9 ขณะทำ Jet Grouting Column ในบริเวณไหล่คันทางด้านซ้าย

3.2.4 บริเวณผิวบนของคันทางให้ตั้งก้านเจาะสำหรับทำการฉีดน้ำปูนในแนวเฉียงประมาณ 45 องศา เพื่อทำแผงทึบน้ำด้านบนผิวหน้าคันทางรถไฟ มีอัตราการผสมปูนซีเมนต์และน้ำ 1:2 โดยน้ำหนัก และปริมาณปูนซีเมนต์ ที่ใช้ 100 กิโลกรัมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของดินเดิม โดยมีความหนาไม่น้อยกว่า 1.00 เมตร โดยมีความกว้าง 8.00 เมตรหรือห่างจากศูนย์กลางออกไปข้างละ 4.00 เมตร โดยมีขอบเขตของงานครอบคลุมในช่วง Section No. 1 (ตั้งแต่ กม.200+050.00 ถึง กม.200+690.50) ในช่วง Section No. 2 (ตั้งแต่ กม.200+750.00 ถึง กม.200+990.10) และมีความกว้าง 6.00 เมตร หรือความกว้างห่างจากศูนย์กลางออกไปข้างละ 3.00 เมตร โดยมีขอบเขตของงานครอบคลุมในช่วง

Section No. 3 (ตั้งแต่ กม.201+450.00 ถึง กม.201+790.20) ในช่วง Section No. 4 (ตั้งแต่ กม. 201+890.00 ถึง กม.202+060.10) ซึ่งลำดับขั้นตอนในการเจาะเริ่มจากหลุม Primary Hole (P) โดยในแถวเดียวกันห่างกัน 8 เมตรเพื่อรอให้ดินซีเมนต์มีกำลังความแข็งแรง และดำเนินการพร้อมกันทั้งสองฝั่งทั้งซ้ายและขวาของทางรถไฟ (สลับฟันปลา) เมื่อทำหลุม Primary Hole (P) แล้วเสร็จ จะดำเนินการในลำดับหลุม Secondary Hole (S) และ Tertiary Hole (T) ต่อไปตามลำดับจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ตามรูปที่ 3.10 และเครื่องจักรที่ใช้ในการทำแผงทึบน้ำด้านบนผิวหน้าคันทางรถไฟแสดงในรูปที่ 3.11



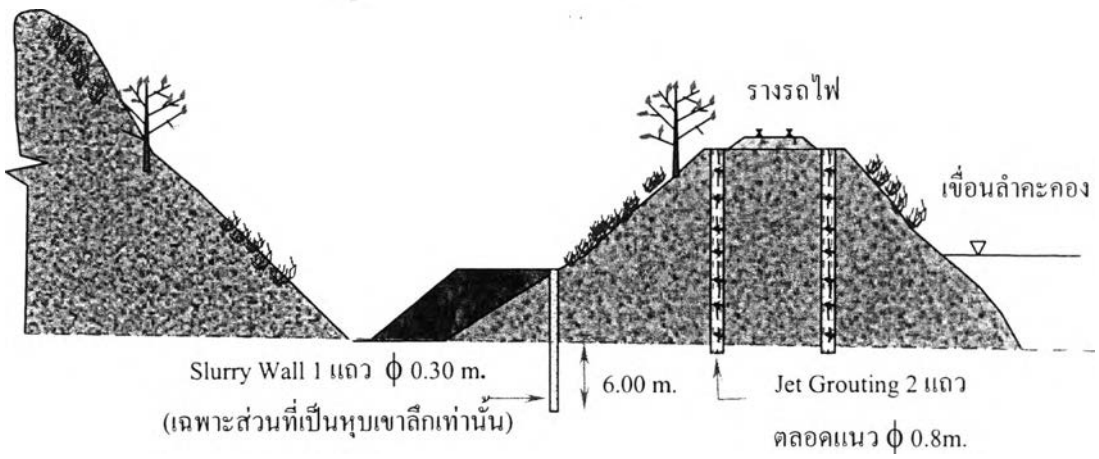
รูปที่ 3.10 รูปแบบขั้นตอนการทำ Jet Grouting เพื่อทำแผงทึบน้ำด้านบนผิวหน้าคันทางรถไฟ



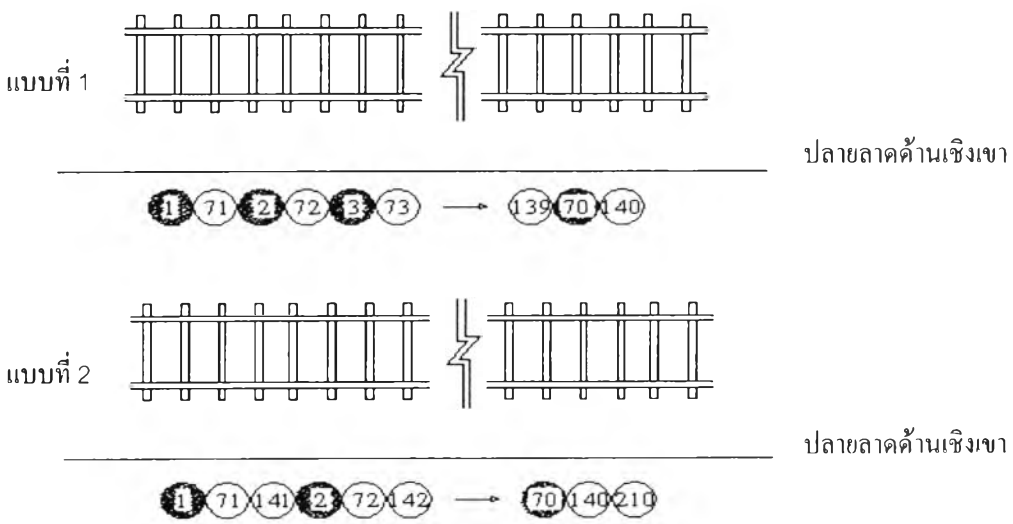
รูปที่ 3.11 ขณะทำ Jet Grouting เพื่อทำแผงทึบน้ำบริเวณผิวหน้าคันทาง

3.2.5 ในส่วนของบริเวณด้านซ้ายของคันทางซึ่งบางส่วนได้ทำการก่อสร้างติดกับหุบเขานั้น ได้ทำการปรับปรุงโดยใช้ Slurry Wall ในช่วง กม.200+130 ถึง กม.200+270 ช่วง กม.200+480 ถึง กม.200+630 ช่วง กม.201+840 ถึง กม.200+960 ช่วง กม.201+480 ถึง กม.201+610 และช่วง กม.201+930 ถึง กม.202+010 ดังแสดงในภาพที่ 3.12 เพื่อกันมิให้น้ำซึมผ่านคันทางและป้องกันการพัดพาอนุภาคที่กระจายตัวของดิน โดย Slurry Wall นั้นมีแถวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 0.30 เมตร โดยมีความลึกไม่น้อยกว่า 6.00 เมตร ซึ่งลักษณะวิธีและเครื่องจักรที่ใช้เป็นแบบเดียวกันกับวิธีทำ Jet Grouting Column จะต่างกันก็เพียงแต่ค่าแรงดันของน้ำปูน ค่าความเร็วรอบหมุนของก้านเจาะ และอัตราการยกก้านเจาะ โดยลำดับการฉีดน้ำปูนในแนวเดียวกันจะทำการฉีดเว้นตามลำดับตำแหน่งตามตามที่กำหนดในรูปที่ 3.13 โดยรายละเอียดในส่วนของ Slurry Wall ดังนี้

- ฉีดเป็นเสาซีเมนต์ขนาด 0.30 เมตร
- ระยะการฉีดระหว่างเสาที่ติดกัน 0.20 เมตร
- อัตราการผสมปูนซีเมนต์และน้ำ 1:1.5 โดยน้ำหนัก
- ปริมาณปูนซีเมนต์ ที่ใช้ 200 กิโลกรัมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของดินเดิม



รูปที่ 3.12 รูปตัดของคันทางรถไฟที่ทำการปรับปรุงคุณภาพดินแสดงให้เห็นแนว Slurry Wall



รูปที่ 3.13 รูปแบบขั้นตอนการทำ Slurry Wall

3.2.6 ข้อกำหนดในส่วนของโครงการงานแก้ไขคันทางยุบตัว ทั้งในส่วนของการทำ Jet Grouting Column และ Slurry Wall โดยมีส่วนประกอบและความข้นเหลวของน้ำซีเมนต์ อัตราการปั๊ม ความดันของการอัดฉีดจะต้องใช้ไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ ดังนี้

3.2.6.1 Jet Grouting Column

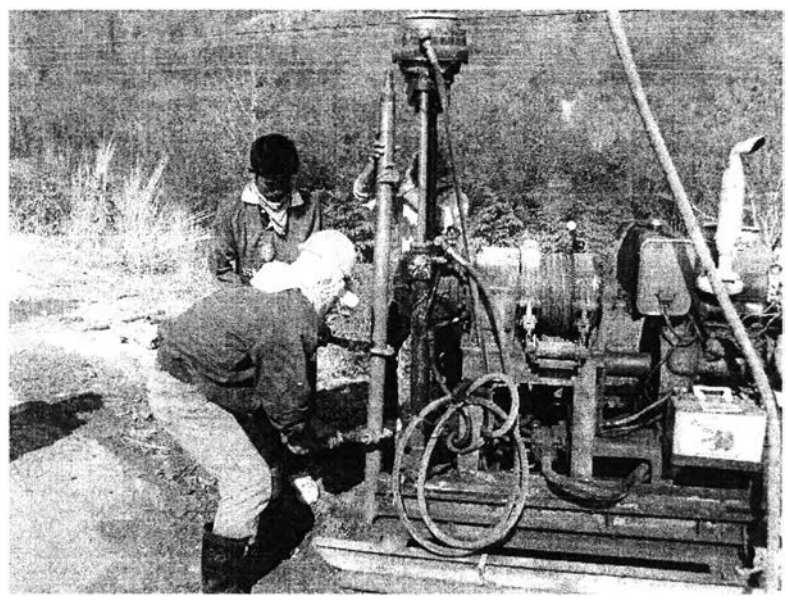
- ใช้ปูนซีเมนต์ปอนด์แลนด์ ประเภทที่ 1 ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก
- ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องไม่น้อยกว่า 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินเดิม
- ค่าอัตราการอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์ด้วยแรงประมาณ 100 – 200 bar หรือแรงที่เหมาะสม
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Jet Grouting Column ต้องไม่น้อยกว่า 0.80 เมตร มีระยะเหลื่อมระหว่างแต่ละต้น ประมาณ 0.10 เมตร หรือมีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางระหว่างต้นไม่มากกว่า 0.70 เมตร ทำให้ภายหลังการปรับปรุงแล้วเสร็จ Jet Grouting Column ต้องมีลักษณะเป็นแผงยาวตลอดแนวตามที่กำหนดและมีความกว้างประมาณ 1.50 เมตร
- ค่า Unconfined Compressive Strength ของตัวอย่างที่ระดับความลึก 3, 6, 9 และ12 เมตร เมื่ออายุ 14 วันหรือ 28 วัน ของทุกตัวอย่างต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและ 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับทั้งนี้การทดสอบต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 2166
- ค่าการกระจายตัวของดินในสนามมี่ระดับความลึก 3, 6, 9 และ12 เมตร ด้วยวิธี Pinhole Test ต้องมีค่าการกระจายตัวไม่เกินชั้น ND 2 ทั้งนี้การทดสอบต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 4647 Method A

3.2.6.2 Slurry Wall

- ใช้ปูนซีเมนต์ปอนด์แลนด์ ประเภทที่ 1 ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1.5 โดยน้ำหนัก
- ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องไม่น้อยกว่า 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินเดิม
- ค่าอัตราการอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์ด้วยแรงประมาณ 200 bar
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Slurry Wall ต้องไม่น้อยกว่า 0.30 เมตร มีระยะเหลื่อมระหว่างแต่ละต้น ประมาณ 0.10 เมตร หรือมีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางระหว่างต้นไม่มากกว่า 0.20 เมตร
- ค่า Unconfined compressive strength ของตัวอย่าง เมื่ออายุ 14 วันหรือ 28 วัน ของทุกตัวอย่างต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและ 6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยการเจาะเก็บตัวอย่างตำแหน่งที่ทำการเจาะห่างจากจุดศูนย์กลางของ Column ระหว่าง 1/6 กับ 2/6 เท่าของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง และขนาดของตัวอย่างต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม้น้อยกว่า 45 มิลลิเมตร ทั้งนี้การทดสอบต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 2166
- ค่าความรั่วซึมของน้ำของ Slurry Wall ทำการทดสอบโดยวิธี Lugeon Test โดยใช้ความดัน (P) 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีลำดับการให้แรงดันในแต่ละความดันดังนี้ 0.4P, 0.7P, 1.0P, 0.7P, และ 0.4P ตามระบบของ Houlsby's Method โดยผมการทดสอบความรั่วซึมของน้ำต้องไม่น้อยกว่า 10^{-7} เมตรต่อวินาที

3.2.6 การทดสอบงานการปรับปรุงคุณภาพดินคันทางรถไฟ

ในการปรับปรุงคุณภาพดินคันทางรถไฟต้องทำการตรวจสอบคุณภาพทั้งอัตราส่วนผสมของน้ำและซีเมนต์ ตรวจสอบอัตราการยกก้านเจาะ ความเร็วรอบของการหมุน เพื่อให้ได้ค่ากำลังของ Column มีค่า Unconfined Compressive Strength ได้ตามที่กำหนดไว้ และต้องได้ Jet Grouting Column ที่มีความสม่ำเสมอทั้งต้นโดยการ Coring เก็บตัวอย่างขึ้นมาโดยใช้เครื่องเจาะเก็บตัวอย่าง และนำส่งตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 3.14 และ 3.15 โดยตัวอย่างที่นำขึ้นมาได้ไปทำการทดสอบคุณสมบัติการกระจายตัวโดยการทดสอบ Pinhole Test(ASTM D 4647 Method A) และทดสอบค่ากำลังอัดโดยวิธี Unconfined Compressive Test(ASTM D 2166) ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.14 ทำการเจาะเก็บตัวอย่างหน้างานโยใช้เครื่องมือเจาะเก็บตัวอย่าง

รูปที่ 3.15 ตัวอย่างที่เจาะเก็บขึ้นมาเพื่อเตรียมส่งไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.2.6.1 ผลการทดสอบตัวอย่างในส่วนของ Jet Grouting Column

ได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ได้จากตัวอย่างที่เจาะนำขึ้นมาในช่วงแรกเริ่มของขั้นตอนของการทำ Jet Grouting Column ซึ่งได้มีการอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวด้วยระบบ Single Tubeโดยในทำการ Jet Grouting Column ในช่วงนี้ใช้อัตราส่วนผสมและเทคนิคการก่อสร้างดังนี้

แรงดันที่ใช้ในการฉีดน้ำปูน	250 bar
อัตราการยกก้านเจาะ	4 ซม. /10 วินาที
ความเร็วรอบในการหมุนก้านเจาะ	30 รอบ/นาที
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	2: 1

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างที่เจาะขึ้นมาของการทำ Jet Grouting Column ด้วยระบบ Single Tubeซึ่งมีการอัดฉีดน้ำปูนเพียงอย่างเดียว

ตำแหน่ง	Column No.	ระดับความลึก	Unconfined Compressive Strength (ksc.)	คุณสมบัติการกระจายตัว (Pinhole Test)
กม.200+114.40	185R	3 ม.	13.27	ND 1
ด้านขวา		6 ม.	2.51	ND 1
ของทางรถไฟ		9 ม.	2.77	ND 1
กม.200+123.50	211R	3 ม.	6.70	ND 1
ด้านขวา		6 ม.	7.23	ND 1
ของทางรถไฟ		9 ม.	7.78	ND 1
กม.200+137.50	251R	3 ม.	13.42	ND 1
ด้านขวา		6 ม.	11.69	ND 1
ของทางรถไฟ		9 ม.	11.72	ND 2

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในส่วนของค่ากำลังความสามารถในการรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) และคุณสมบัติการกระจายตัว (Pinhole Test) นั้นพบว่ามีค่าเป็นไปตามที่กำหนดไว้ข้างต้น แต่ผลจากค่าอัตราการยกของก้านเจาะจะสังเกตได้ว่ามีอัตราการยกต่อ 10 วินาทีที่ค่อนข้างช้าทำให้ใช้ระยะเวลาในการทำ Jet Grouting Column ในแต่ละต้นข้องใช้เวลาค่อนข้างมาก ซึ่งจากระยะเวลาดังกล่าวได้ส่งผลโดยตรงให้เกิดความล้าช้าของงานในภาพรวมทั้งหมด จึงได้มีการปรับเปลี่ยนระบบของการทำ Jet Grouting โดยใช้ระบบ Double Tube ซึ่งเป็นการใช้ระบบแรงดันลมเข้ามาช่วยผสมเพื่อที่จะให้ได้ความสมบูรณ์ของ Jet Grouting Column ให้ดีขึ้น และได้ทำการปรับค่าเทคนิคที่ใช้ในการก่อสร้างและอัตราส่วนผสม ดังนี้

แรงดันที่ใช้ในการฉีดน้ำปูน	250 bar
อัตราการยกก้านเจาะ	8 ซม. /10 วินาที
ความเร็วรอบในการหมุนก้านเจาะ	40 - 45 รอบ/นาที
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	2: 1

ภายหลังได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างขึ้นมาทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยผลการเจาะตัวอย่างไปทดสอบได้แสดงไว้ตามตารางที่ 3.2 ซึ่งเมื่อพิจารณาผลทดสอบที่ได้พบว่าค่ากำลังความสามารถในการรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) มีค่าที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างที่เจาะขึ้นมาของการทำ Jet Grouting Column ด้วยระบบ Double Tubeซึ่งมีการอัดฉีดน้ำปูน

ตำแหน่ง	Column No.	ระดับความลึก	Unconfined Compressive Strength (ksc.)	คุณสมบัติการกระจายตัว (Pinhole Test)
กม.200+231.30	519L	3 ม.	27.54	ND 1
ด้านซ้าย		6 ม.	25.69	ND 1
ของทางรถไฟ		9 ม.	50.27	ND 1
กม.200+471.40	1205R	3 ม.	25.73	ND 1
ด้านขวา		6 ม.	21.81	ND 1
ของทางรถไฟ		9 ม.	29.11	ND 1
		12 ม.	36.40	ND 1
กม.200+518.30	1339L	3 ม.	25.77	ND 1
ด้านซ้าย		6 ม.	29.17	ND 1
ของทางรถไฟ		9 ม.	25.58	ND 1
กม.200+603.00	1581L	3 ม.	31.16	ND 1
ด้านซ้าย		6 ม.	35.98	ND 1
ของทางรถไฟ		9 ม.	29.72	ND 2
กม.200+617.00	1621R	3 ม.	18.18	ND 1
ด้านขวา		6 ม.	37.73	ND 1
ของทางรถไฟ		9 ม.	32.53	ND 1
		12 ม.	32.75	ND 1

3.2.6.2 ผลการทดสอบตัวอย่างในส่วนของ Slurry Wall

ได้แสดงผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 3.3 ซึ่งเป็นผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ได้จากตัวอย่างที่เจาะนำขึ้นมา ในส่วนของ Slurry Wall นั้นจะต้องทำการก่อสร้างคันดินด้านล่างเสริมบริเวณหุบเขาลึก(กม.200+130 ถึง กม.200+270 ช่วง กม.200+480 ถึง กม.200+630 ช่วง กม.201+840 ถึง กม.200+960 ช่วง กม.201+480 ถึง กม.201+610 และช่วง กม.201+930 ถึง กม.202+010) เพื่อทำการก่อสร้างกำแพงทึบน้ำลงในคันดินที่ก่อสร้างเสริมด้านล่าง โดยกำแพง

Slurry Wall oyho มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร ต่อเนื่องกัน โดยทำการอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวด้วยระบบ Single Tube จากการทดสอบและตรวจสอบในสนาม พบว่าได้อัตราส่วนผสมและเทคนิคที่เหมาะสมดังนี้

แรงดันที่ใช้ในการฉีดน้ำปูน	200 bar
อัตราการยกก้านเจาะ	10 ซม./10 วินาที
ความเร็วรอบในการหมุนก้านเจาะ	30 รอบ/นาที
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	1.5: 1

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างที่เจาะขึ้นมาในส่วนของ Slurry Wall

ตำแหน่ง	Column No.	Unconfined Compressive Strength (ksc.)
กม.200+131	212L	2.12
ด้านซ้าย		14.45
ของทางรถไฟ		40.20
กม.200+270	380L	3.410
ด้านซ้าย		32.82
ของทางรถไฟ		27.73

จากค่ากำลังความสามารถในการรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) ข้างต้นพบว่ามีค่าเป็นไปตามที่กำหนด และได้ทำการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ โดยวิธี Lugeon Test โดยต้องมีอัตราการซึมผ่านของน้ำน้อยกว่า 0.02 Lu ($2x10^{-7}$ เซนติเมตรต่อวินาที) ซึ่งผลการทดสอบได้ตามที่กำหนดและได้ทำการขุดเปิดสภาพ Slurry Wall เพื่อตรวจดูด้วยตาเปล่า ปัจจุบันการก่อสร้างได้แล้วเสร็จตั้งแต่เดือน กันยายน 2546 และฤดูฝนที่ผ่านมาจากการตรวจสอบสภาพคันทางโดยการรถไฟแห่งประเทศไทยพบว่าไม่เกิดการทรุดตัวของคันทาง

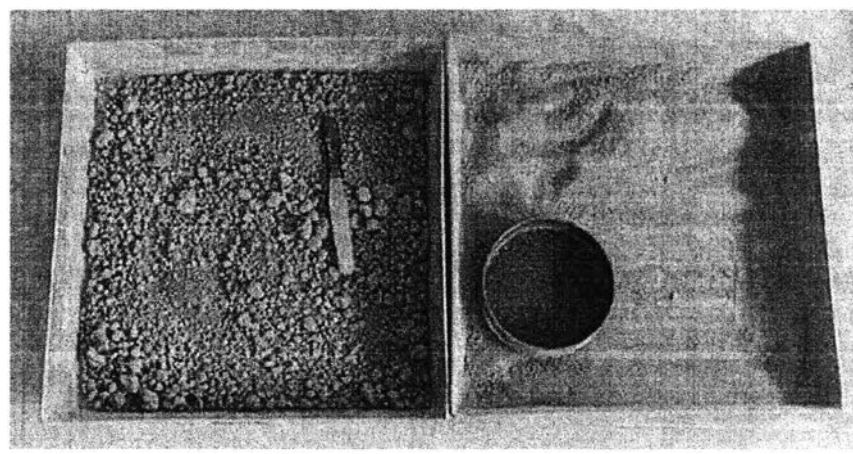
3.3 การเก็บตัวอย่างดินบริเวณคันทางเพื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพดินในห้องปฏิบัติการ

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลขั้นตอนวิธีการและผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพดินคันทางรถไฟดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินบริเวณคันทางรถไฟในส่วนของดินเดิมที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงโดยแสดงในรูปที่ 3.16 เพื่อนำมาศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินเดิมและศึกษาคุณสมบัติด้านการกระจายตัวของตัวอย่างที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายตัวให้ดีขึ้นโดยการผสม เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ และ ปูนขาว ในอัตราส่วน เถ้าลอย ที่ร้อยละ 1, 3, 5, 7 และ 9 โดยน้ำหนักดินแห้ง ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักดินแห้ง และในอัตราส่วนปูนขาวที่ร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักดินแห้ง

รูปที่ 3.16 ตัวอย่างที่ขุดเก็บขึ้นมาเพื่อเตรียมไปทดสอบ

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบเป็นดินที่ถูกรบกวนแล้ว (Disturbed Soil) นำมาตากหรืออบให้แห้งโดยใช้ความร้อนต่ำ จากนั้นนำมาย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ตามรูปที่ 3.17 ก่อนที่นำตัวอย่างมาทดสอบหาคุณสมบัติต่างๆ



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างดินที่ย่อยและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10

3.3.2 โดยมีเงื่อนไขของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบดังนี้

1) มีค่าร้อยละของดินเหนียวไม่น้อยกว่าร้อยละ 12

2) มีค่า Plastic Index มากกว่า 4

ถ้าดินที่นำมาทดสอบไม่อยู่ในเงื่อนไขข้างต้นความเสียหายที่ อาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยอื่นๆ โดยไม่จัดเป็นผลมาจากคุณสมบัติการกระจายตัวของดิน

3.3.2โดยวิธีการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

3.3.2.1 คุณสมบัติของดินตัวอย่างก่อนทำการปรับปรุงคุณสมบัติทำการทดสอบดังนี้

1) วิธีการทดสอบดินทางด้านวิศวกรรมปฐพีกลศาสตร์

1.1) Atterberg Limit Determination เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า Plastic limit (PL), Liquid limit (LL), และค่า Plasticity index (PI) ของดิน

1.2) การทดสอบการบดอัด (Compaction Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า ความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content, OMC.) และค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density, γ_d) ของดิน

1.3) การทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด (Unconfined Compression Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงของดิน

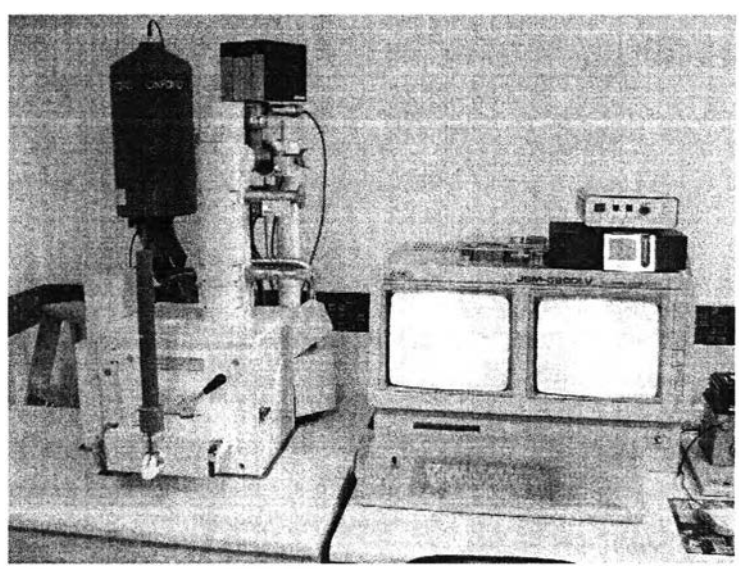
2) วิธีการทดสอบคุณสมบัติการกระจายตัว

2.1) Double Hydrometer Test

2.2) Pinhole Test

3) การวิเคราะห์โครงสร้างของดินระดับจุลภาค

โดยภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยนำตัวอย่างไปทำการทดสอบ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรองที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.3.2.2 คุณสมบัติของดินตัวอย่างภายหลังทำการปรับปรุงคุณสมบัติทำการทดสอบดังนี้

1) วิธีการทดสอบคุณสมบัติการกระจายตัว

1.1) Double Hydrometer Test

1.2) Pinhole Test

2) การวิเคราะห์โครงสร้างของดินระดับจุลภาค

โดยภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.6 มาตรฐานการทดสอบ

3.6.1 Atterberg Limits Determination	ASTM D 423,424
3.6.2 Compaction Test	ASTM D 698
3.6.3 Unconfined Compression Test	ASTM D 2166
3.6.4 Double Hydrometer Test	ASTM D 422, 4221
3.6.5 Pin Hole Test	ASTM D 4647

3.7 วัสดุที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพ

3.7.1 วัสดุที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพจะเป็นวัสดุที่พบทั่วไปในท้องถิ่น ซึ่งคุณภาพและราคาอาจแตกต่างกันในแต่ละท้องถิ่น วัสดุที่เลือกใช้ในโครงงานนี้ได้แก่

3.7.1.1 เถ้าลอย (Fly Ash) ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งมีปริมาณ SO_3 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C 618 และจัดเป็นประเภท Pozzolan Class C

3.7.1.2 ปูนซีเมนต์ (Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่หนึ่ง ชนิดผงแห้งละเอียดที่มีส่วนประกอบทางเคมีและมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 150

3.7.1.3 ปูนขาว (Lime) เป็นประเภท Hydrated Lime ชนิดผงละเอียดที่มีส่วนประกอบทางเคมีและมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.241-2520 หรือ ASTM C 25 และมีปริมาณแคลเซี่ยมออกไซด์ (CaO) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60