

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคโนโลยีการปรับปรุงดินอ่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูง
ในประเทศไทย

JET GROUTING TECHNOLOGY IN THAILAND



โดย

นายกฤษณ์

เจ็ดวรรณะ

นายกิตติ

สันติธรรักษ์

นายอานัติ

ดิงสง่า

ปก.
ก.

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 33947
วัน, เดือน, ปี 23 ก.ย. 2542

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีการปรับปรุงดินอ่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูง
ในประเทศไทย



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

JET GROUTING TECHNOLOGY IN THAILAND

BY

MR. KRIT JEDWANNA
MR. KITTI SANTITHARARAK
MR. ANAT TINGSA-NGA



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE
BACHELOR FOR CONSTRUCTION ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

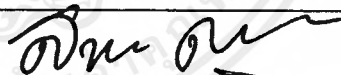
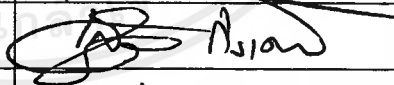

หัวข้อโครงการพิเศษ (ภาษาไทย) เทคโนโลยีการปรับปรุงดินอ่อนโดยวิธีการอัดฉีดน้ำปูนด้วย
แรงดันสูง ในประเทศไทย

(ภาษาอังกฤษ) Jet Grouting Technology In Thailand

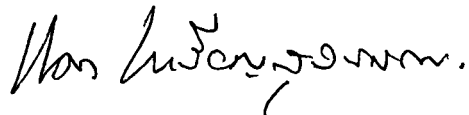
นักศึกษา นายกฤษณ์ เจ็ดวรรณะ รหัสประจำตัว 38014014
นายกิตติ สันติธรรักษ์ รหัสประจำตัว 38014024
นายอาณัติ ดิงสง่า รหัสประจำตัว 38014647

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการก่อสร้าง

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ สมเกียรติ ขวัญพุกษ์
ดร. เขียว เทียนโฮ

| คณะกรรมการสอบหัวข้อโครงการพิเศษ | ลายมือชื่อ |
|---------------------------------|--|
| อาจารย์ สุพจน์ ศรีนิล |  |
| อาจารย์ สุวัฒน์ ทิรเศรษฐ์ |  |
| อาจารย์ สมเกียรติ ขวัญพุกษ์ |  |

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.แดง เจริญสุวรรณ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ เดือน พ.ศ. 2542

หัวข้อโครงการพิเศษ เทคโนโลยีการปรับปรุงดินอ่อนด้วยการอัดฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูงในประเทศไทย

นักศึกษา นายกฤษณ์ เจ็ดวรรณ รหัสประจำตัว 38014014
นายกิติ สันติธรรักษ์ รหัสประจำตัว 38014024
นายอาณัติ ติงสง่า รหัสประจำตัว 38014647

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ สมเกียรติ ขวัญพฤษ
ดร. เขี้ย เขียนโฮ

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

บทคัดย่อ

เทคนิคการปรับปรุงดินโดยการอัดฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูงได้นำมาใช้ในงานปรับปรุงดินเพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น เพื่อวัตถุประสงค์ในการทึบน้ำ การเพิ่มกำลังหรือความแข็งแรงให้แก่ดินหรือหินเพื่อรับน้ำหนัก สิ่งพิเศษสำหรับเทคนิคนี้ก็คือการให้ความมั่นใจในน้ำปูนที่ฉีดลงไปดินว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะส่งผลให้เกิดการปรับปรุงดินตามที่ได้ออกแบบไว้ ประกอบกับการสามารถนำวิธีการนี้ไปใช้อย่างกว้างขวางในดินหลายชนิดอีกด้วย ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงได้ทำการศึกษาหลักการ ข้อมูลงานวิจัย การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีการอัดฉีดด้วยแรงดันสูง การนำวิธีการนี้ไปใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ การควบคุมและตรวจสอบคุณภาพ กรณีตัวอย่างการนำเอาวิธีการนี้ไปใช้งาน

และจากข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวนี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการทดสอบค่า Unconfined Compressive Strength ของดินเดิมและดินหลังการปรับปรุงคุณภาพของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร ถนนเทอดพระเกียรติ และโครงการประตูระบายน้ำปากพอง จ.นครศรีธรรมราช การเปรียบเทียบผลการทดสอบค่า Unconfined Compressive Strength ค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้จากการทำงานจริงและที่ได้จากการผสมในห้องปฏิบัติการ การศึกษากลไกการทำงานของวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีการอัดฉีดด้วยแรงดันสูง แนวทางในการกำหนดมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดคุณภาพของดิน ซีเมนต์ การทดสอบกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ การเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานกำแพงกันดินเมื่อเปรียบเทียบกับเข็มพืดเหล็ก และการเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างวิธีการอัดฉีดด้วยแรงดันสูงกับวิธีปั่นผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|-----------------|---------------------------------------|---------------|
| Project Title | Jet Grouting Technology in Thailand | |
| Students | Mr. Krit | Jedwanna |
| | Mr. Kitti | Santithararak |
| | Mr. Anat | Tingsa-nga |
| Project Adviser | Mr.Somkiat | Khwanpruk |
| | Dr. Seah | Tian Ho |
| Circumstance | Bachelor for Construction Engineering | |

ABSTRACT

Geotechnical improvement by jet grouting is normally employed to achieve improvement in watertightness, strength or stiffness of natural soil or rock foundation. A key problem is to ensure that the grout can enter the ground sufficiently well to effect the design improvement. Jet Grouting offer radically difference approach, employing erosion to enable grouting to proceed across a very wide range of soil types. This special project attempt to study the principles and research papers about soil improvement by jet grouting. Wide range of applications used by jet grouting .Any verification and quality control procedures during use this method to apply in the soil improvement works. Thailand experience on the application of jet grouting technique in various field of geotechnical engineering.

From primary information, this special project would study comparison between unconfined compressive strength of in-situ soil and soil cement column in MRTA project, Therdprekiet Rd. and Pakpanang Sluice Gate project, Nakomsrithammarach prov. Comparison unconfined compression test, modulus of elasticity (E50) of soil cement column from field test and laboratory test. The study mechanism of jet grouting. Path of determination in quality standard of soil property, cement property and soil cement column strength test. Comparison using soil cement column by jet grouting in the applications with sheet pile and rotary mixing.

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาโครงการพิเศษเรื่องนี้ ทางคณะผู้ศึกษาขอขอบพระคุณ ดร.เชี้ย เทียนโฮ ที่กรุณาให้คำแนะนำที่มีคุณค่าซึ่งจุดประกายความคิดให้เกิดประเด็นการศึกษาในเรื่องนี้ และขอขอบพระคุณ อาจารย์ สมเกียรติ ชวัญพฤษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาการทำโครงการพิเศษนี้ ตลอดระยะเวลาการศึกษาโครงการพิเศษ ทางคณะผู้ศึกษาได้มีโอกาสรับฟังความคิดเห็น คำแนะนำ ตลอดจนจนข้อมูลต่างๆ จากนักวิชาการและผู้เชี่ยวชาญหลายๆท่าน ดังรายนามต่อไปนี้

- อาจารย์ อุปะ ศิริแก้ว ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สจล.
- คุณนิรภัย วงศ์ประทุม รองผู้อำนวยการฝ่าย Jet Grouting บริษัท เพาเวอร์-พี จำกัด (มหาชน)
- คุณโชคชัย อุกฤษฏชน วิศวกรปฐพี Joint Venture BCKT
- คุณสมชัย กกก้าแหง ที่ปรึกษาคณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วสท. (ประจำปี 2541-2542) วิศวกรระดับ 10 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- คุณสุชาติ สุริยวิจิตรเศรษฐี รองผู้จัดการ บริษัท ซอยล์กรีด เทคโนโลยี จำกัด
- ดร.นภดล กรณ์ศิลป์ อนุกรรมการและผู้ช่วยเลขานุการสาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี วสท. (ประจำปี 2541-2542)
- คุณวราห์ ศิริปุ่นย์ วิศวกรโครงการ บริษัท ซอยล์กรีด เทคโนโลยี จำกัด
- คุณทวิช พูลเงิน วิศวกร บริษัท ซอยล์กรีด เทคโนโลยี จำกัด
- คุณวิชาญ เข้มมะลัง วิศวกร บริษัท แอล บี จีโอเทค จำกัด
- คุณนิรันดร์ แสงสุวรรณาว วิศวกรโยธา Joint Venture BCKT
- รศ.เกษม เพชรเกตุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สจธ.
- คุณศิราโรจน์ เกตุโรจน์ วิศวกรโยธา Joint Venture BCKT

นอกจากผู้มีพระคุณข้างต้นแล้ว ทางคณะผู้ศึกษายังได้รับความอนุเคราะห์ ทางด้านข้อมูลจากหน่วยงานและองค์กรต่างๆ ดังรายนามต่อไปนี้

- ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สำนักหอสมุดกลาง สจล.
- สำนักหอสมุดกลาง มก.
- สำนักหอสมุดกลาง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สำนักหอสมุดกลาง สจว.
- Joint Venture BCKT
- บริษัท ซอยล์กรีน เทคโนโลยี จำกัด
- บริษัท แอล บี จีโอเทค จำกัด
- บริษัท เพาเวอร์-พี จำกัด (มหาชน)
- บริษัท พี บี ซี เอนจิเนียริง จำกัด
- กรมชลประทาน กระทรวงเกษตร และสหกรณ์
- กรมทางหลวง
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

นอกจากบุคคลและองค์กรต่างๆข้างต้น ทางคณะผู้ศึกษายังได้รับคำแนะนำที่ดีจากคณาจารย์ภายในภาควิชาโดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ สมเกียรติ ขวัญพุกฤษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สุพจน์ ศรีนิล อาจารย์สุวัฒน์ ธิรเศรษฐ์ อาจารย์แหลมทอง เหล่าคงถาวร ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ข้อมูลเพิ่มเติมอย่างสม่ำเสมอ คณะผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณทุกท่านทุกหน่วยงานไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ และคุณประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาโครงการพิเศษในครั้งนี้ให้กับบุคคลผู้มีพระคุณอันยิ่งใหญ่ต่อคณะผู้ศึกษา อันได้แก่ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีอุปการะคุณ และเงินภาษีอากรของประชาชนที่ได้รับจากการจัดสรร เพื่อสนับสนุนการศึกษาในระดับอุดมศึกษา ขอขอบคุณประโยชน์เหล่านี้เพื่อน้อมรำลึกถึงพระคุณอันยิ่งใหญ่ของบุคคลดังกล่าวข้างต้น ที่ได้กรุณามอบความรัก ความผูกพัน ความอบอุ่น ตลอดจนให้การอบรม สั่งสอนและการศึกษาแก่คณะผู้ศึกษา จนได้รับความสำเร็จในขั้นต้น มีโลกทรรศน์ที่เปิดกว้างให้ตระหนักถึงคุณค่าของการดำรงชีวิต เพื่อทำหน้าที่เป็นสมาชิกส่วนเล็กของสังคมอันแสนกว้างใหญ่ ณ เวลาปัจจุบันของชีวิต

นายกฤษณ์ เจ็ดวรรณะ

นายกิตติ สันติธรรักษ์

นายอานัติ ดิงสง่า

8 เมษายน 2542

สารบัญ

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ | 2 |
| 1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในโครงการพิเศษ | 2 |
| 1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ | 3 |
| 1.5 วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ | 3 |
| 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| บทที่ 2 บทปริทัศน์ | 4 |
| 2.1 ทั่วไป | 4 |
| 2.2 Jet Grouting คืออะไร | 5 |
| 2.3 กลไกการพัฒนากำลังของ Jet Grouting Pile | 5 |
| 2.4 ประวัติและความเป็นมา | 7 |
| 2.4.1 ต่างประเทศ | 7 |
| 2.4.2 ประเทศไทย | 7 |
| 2.5 ลำดับขั้นตอนการทำ Jet Grouting | 9 |
| 2.6 Jet Grouting Method | 10 |
| 2.6.1 ระบบท่อเดี่ยว(Single Tube system หรือ S) | 10 |
| 2.6.2 ระบบท่อดู(Double Tubes system หรือ D) | 11 |
| 2.6.3 ระบบ 3 ท่อ(Triple Tubes system หรือ T) | 11 |
| 2.7 ลักษณะการจัดตำแหน่งของการทำเสาเข็มดินซีเมนต์(Matrix For Jetting) | 14 |
| 2.8 ข้อดี-ข้อเสีย ของการทำ Jet Grouting | 16 |
| 2.8.1 ข้อดีของงาน Jet Grouting | 16 |
| 2.8.2 ข้อเสีย | 17 |

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 การประยุกต์ใช้ Jet Grouting | 19 |
| 3.1 ในต่างประเทศ | 19 |
| 3.1.1 งานควบคุมกันซึมของน้ำใต้ดิน (Groundwater Control) | 19 |
| 3.1.2 งานโครงสร้างฐานราก (Underpinning) | 22 |
| 3.1.3 Tunnels and Shafts | 25 |
| 3.2 ในประเทศไทย | 30 |
| 3.2.1 ใช้เป็นส่วนโครงสร้างฐานราก (Foundation Member) | 30 |
| 3.2.2 ใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพของฐานราก (Foundation Improvement) | 31 |
| 3.2.3 ใช้ในงานระบบกำแพงกั้นน้ำและกันดิน (Retaining System & Cutoff) | 32 |
| 3.2.4 ใช้ในงานอุโมงค์ (Tunneling) | 33 |
| บทที่ 4 การออกแบบ | 35 |
| 4.1 การออกแบบเสาเข็ม Jet Grouting Pile แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ ขึ้นกับประเภทการใช้งาน | 35 |
| 4.1.1 การออกแบบเสาเข็ม Jet Grouting Pile เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของความลาด (Slope Stability) | 35 |
| 4.1.2 การออกแบบ Jet Grouting Pile เพื่อป้องกันการทรุดตัวของโครงสร้างดิน (Settlement) | 39 |
| 4.1.3 การออกแบบ Jet Grouting Pile เพื่อเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดิน (Bearing Capacity) | 43 |
| 4.1.4 การออกแบบ Jet Grouting Pile เป็นกำแพงกั้นน้ำ (Cut - Off Wall) | 43 |
| 4.2 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบ | 45 |
| 4.3 การออกแบบ Soil Cement ในห้องทดลอง | 50 |
| 4.4 การออกแบบพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการทำ Jet Grouting Pile | 51 |
| 4.5 การคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินที่ทำด้วย Jet Grouting Pile | 52 |
| 4.6 การหาค่าพารามิเตอร์ Jet Grouting สนาม (Trial Test) | 55 |
| 4.7 การทำ Jet Grout เป็นกำแพงต่อเนื่อง | 57 |

| เรื่อง | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 5 เครื่องจักร อุปกรณ์ และวัสดุ | 59 |
| 5.1 วัสดุ | 59 |
| 5.1.1 Cement Grout | 59 |
| 5.1.2 วัสดุอื่น ๆ | 59 |
| 5.1.3 การเก็บวัสดุ | 59 |
| 5.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์ | 61 |
| 5.2.1 Cement Silo | 61 |
| 5.2.2 Mixing Plant | 61 |
| 5.2.3 High Pressure Pump | 62 |
| 5.2.4 Manual-Automatic control Plant | 62 |
| 5.2.5 Grouting Swivel Head | 62 |
| 5.2.6 ก้านเจาะ (Rod) และหัวเจาะ (Drilling Rig) | 63 |
| 5.2.7 เครื่องเจาะ (Jet Grout Machine) | 64 |
| | |
| บทที่ 6 การควบคุมคุณภาพ | 69 |
| 6.1 การตรวจสอบคุณภาพของ Jet Grouting Pile | 72 |
| 6.1.1 การตรวจสอบคุณภาพโดยวิธีการ Coring | 72 |
| 6.1.2 การตรวจสอบคุณภาพโดยวิธี Pullout Test | 80 |
| 6.2 การตรวจการรับน้ำหนักของ Jet Grouting Pile โดยวิธี Pile Load Test | 84 |
| 6.3 วิธีการทำงานและการควบคุม (Execution and Control Procedures) | 86 |
| 6.3.1 ส่วนผสม (Grout Mixing) | 86 |
| 6.3.2 การเจาะ (Drilling) | 88 |
| 6.3.3 การฉีด (Jetting) | 90 |
| 6.4 การคำนวณตรวจสอบปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับงาน Jet Grouting Pile | 94 |
| 6.5 ข้อกำหนดของการทำ Jet Grouting Pile | 96 |
| | |
| บทที่ 7 กรณีศึกษา | 98 |
| 7.1 โครงการรถไฟฟ้ามหานครระยะแรก สถานีหัวลำโพง-ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์-บางซื่อ (สายสีน้ำเงิน) | 98 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| 7.1.1 ความเป็นมาของโครงการ | 98 |
| 7.1.2 งานก่อสร้างในโครงการที่ใช้ Jet Grouting | 98 |
| 7.1.3 ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน | 99 |
| 7.1.4 กระบวนการทำ Jet Grouting และการตรวจสอบในแต่ละส่วนของโครงการ | 100 |
| 7.1.4.1 ตำแหน่งที่อุโมงค์เชื่อมต่อกับสถานี | 100 |
| 7.1.4.2 ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ | 102 |
| 7.1.4.3 จุดต่อระหว่าง Sheet pile กับ Diaphragm wall | 105 |
| 7.2 โครงการประตุน้ำปากฝิ่ง จ. นครศรีธรรมราช | 113 |
| 7.2.1 ความเป็นมาของโครงการ | 113 |
| 7.2.2 งานก่อสร้างในโครงการที่ใช้ Jet Grouting | 113 |
| 7.2.3 ผลการเจาะสำรวจดิน | 114 |
| 7.2.4 กระบวนการทำ Jet Grouting ในโครงการประตุน้ำปากฝิ่ง | 116 |
| 7.2.5 การเก็บตัวอย่างและการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์ | 117 |
| 7.2.6 ผลการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength | 118 |
| 7.3 โครงการทำเทียบเรือขนถ่ายอุปกรณ์หนัก จ. สุราษฎร์ธานี | 125 |
| 7.3.1 ความเป็นมาของโครงการ | 125 |
| 7.3.2 ข้อมูลการสำรวจดิน | 125 |
| 7.3.3 กระบวนการทำงาน Jet Grouting | 126 |
| 7.3.4 การออกแบบและวิเคราะห์ความมั่นคงของท่าเทียบเรือ | 127 |
| 7.3.5 การควบคุมคุณภาพการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ | 128 |
| 7.3.5.1 หลักเกณฑ์และวิธีการที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ก่อนนำวิธีการผลิตไปใช้ในงานก่อสร้าง | 128 |
| 7.3.5.2 แนวทางการควบคุมคุณภาพการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในระหว่างการก่อสร้าง | 130 |
| 7.3.5.3 ผลจากการควบคุมงานผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในงานก่อสร้างท่าเทียบเรือ คลองท่าทอง | 130 |

| เรื่อง | หน้า |
|--|------------|
| 7.3.5.4 ผลการตรวจสอบคุณภาพด้านกำลังอัดของเนื้อวัสดุจากงานก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ | 133 |
| 7.3.5.5 ผลการดึงถอนเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ | 133 |
| 7.3.5.6 ผลการทดสอบความสามารถในการแบกรับน้ำหนักของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ | 133 |
| 7.4 โครงการทำอากาศยานสากลแห่งที่ 2 (หนองงูเห่า) | 137 |
| 7.4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโครงการ | 137 |
| 7.4.2 แนวคิดหลักในการนำ Soil Cement Column ไปประยุกต์ในโครงการ | 140 |
| 7.4.3 การออกแบบ Soil Cement Column | 140 |
| 7.4.4 ลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง | 148 |
| 7.4.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และแนวโน้มการใช้งานในอนาคต | 148 |
| 7.5 โครงการอื่นๆ ที่ใช้ Jet Grouting ในงานก่อสร้าง | 153 |
| บทที่ 8 บทวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ | 159 |
| 8.1 การวิเคราะห์ผลจากการปรับปรุงคุณภาพดินโครงการรถไฟฟ้ามหานคร | 159 |
| 8.1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ | 159 |
| 8.1.2 วิเคราะห์กราฟ | 163 |
| 8.1.3 ผลการทดสอบกำลังของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ (จากผลการศึกษาของ รัชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.Tปีการศึกษา 2540) ให้ค่าสูงกว่าการทำงานจริงในสนามอาจมีสาเหตุมาจาก | 165 |
| 8.2 การวิเคราะห์ผลการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting โครงการประตुरบายน้ำปากพั้ง | 167 |
| 8.2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ | 167 |
| 8.2.2 วิเคราะห์กราฟ | 170 |
| 8.3 องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อขนาด Jet Grouting Pile | 171 |
| 8.3.1 คุณสมบัติของน้ำปูนซีเมนต์ | 171 |
| 8.3.2 ชนิดของดิน (Soil Type) | 171 |
| 8.3.3 ความลึก (Depth) | 171 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| เรื่อง | หน้า |
|---|------------|
| 8.3.4 อัตราการหมุนก้านเจาะ (Rotation velocity) | 171 |
| 8.3.5 พลังงานในการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ | 172 |
| 8.4 ASTM ที่เกี่ยวข้องกับงาน Jet Grouting | 179 |
| 8.5 จำนวนคนที่ใช้ต่อเครื่องมือการทำ Jet Grouting 1ชุด | 179 |
| 8.6 เปรียบเทียบการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ (Jet Grouting Pile) เป็นกำแพงกันดินกับการใช้เข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile) | 180 |
| 8.7 เปรียบเทียบการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ (Jet Grouting Pile) เป็นกำแพงกันดินกับการใช้เข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile) ในด้านแนวโน้มของราคา ซึ่งแปรผันตามขนาดและระยะเวลาการก่อสร้างของโครงการ | 181 |
| 8.8 เปรียบเทียบวิธีการปรับปรุงดินระหว่างวิธี Rotary Mixing กับ วิธี Jet Grouting | 181 |
| 8.9 เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนโดยวิธี Jet Grouting เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ในงานปรับปรุงฐานรากถนน | 182 |
| 8.10 ลักษณะการทำงานของ nozzle | 184 |
| 8.11 ข้อเสนอนแนะในการตรวจสอบค่า Core Recovery | 184 |
| 8.12 แนวทางในการแก้ไขปัญหาความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเสาเข็มดินซีเมนต์ | 187 |
| บรรณานุกรม | 189 |
| ภาคผนวก | 192 |
| ก) ตัวอย่างการศึกษา Soil Cement ในห้องทดลอง | 193 |
| ข) ภาพตัวอย่างการนำวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting ไปใช้งาน | 209 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.1 | ลำดับขั้นตอนการทำ Jet Grouting | 10 |
| 2.2 | Jet Grouting Method (Burke et al , 1989) | 13 |
| 3.1 | แสดงชนิดและการวางตำแหน่งของ Jet Grouting Pile | 19 |
| 3.2 | การประยุกต์ใช้ Jet Grouting Pile ในงานกำแพงทึบน้ำ | 20 |
| 3.3 | การสร้าง Jet Grouting Pile ที่ฐานเพื่อกันการขี้นร่วมกับผนัง | 21 |
| 3.4 | แบบและหน้าตัดของ Jet Grouting Pile สำหรับงานกันขี้นที่ฐาน | 22 |
| 3.5 | การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานโครงสร้างฐานราก | 23 |
| 3.6 | การใช้ Jet Grouting Pile ในงานโครงสร้างฐานรากเพื่อรองรับงานขุดดินและควบคุมน้ำใต้ดิน | 24 |
| 3.7 | Jet Grout block เพื่องานขุดอุโมงค์ | 27 |
| 3.8 | การสร้างเสถียรภาพแก่อุโมงค์โดยการสร้าง Jet Grouting Pile ในแนวขวาง | 28 |
| 3.9 | การสร้างเสถียรภาพแก่ Shaft ในงานอุโมงค์ | 29 |
| 4.1 | การคำนวณ Slope Stability ก่อนการปรับปรุงดิน | 37 |
| 4.2 | การคำนวณ Slope Stability หลังการปรับปรุงดิน | 38 |
| 4.3 | การคำนวณ Bearing Capacity | 44 |
| 4.4 | รูปตัดงานถนนเข้าโครงการปากพั้ง | 45 |
| 4.5 | Finite Element Mesh สำหรับการคำนวณ | 47 |
| 4.6 | Output แสดงการทรุดตัวจาก FEM | 49 |
| 4.7 | การคำนวณ Slope Stability โดยใช้โปรแกรม Computer | 49 |
| 4.8 | เครื่องผสมดินซีเมนต์ | 53 |
| 4.9 | การบ่มตัวอย่าง Beam โดยใช้กระสอบและผ้าชุบน้ำ | 53 |
| 4.10 | ตัวอย่างดินซีเมนต์ในแบบหล่อ Beam | 54 |
| 5.1 | เครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทำ Jet Grout | 60 |
| 5.2 | ไซโลเก็บซีเมนต์และน้ำ | 61 |
| 5.3 | Mixing Plant | 62 |
| 5.4 | High Pressure Pump | 63 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.5 หัวเจาะ (Drilling rig) | 64 |
| 5.6 เครื่องเจาะแบบ Girder | 64 |
| 5.7 เครื่องเจาะตีนตะขาบ | 65 |
| 5.8 แสดงผลของพารามิเตอร์ในการ Jet Grout | 67 |
| 5.9 ตัวอย่างกราฟแสดงผลของพารามิเตอร์ในการ Jet Grout ที่ระดับความลึก ต่างๆ | 68 |
| 6.1 แนวทางในการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงดิน | 71 |
| 6.2 กระจกเก็บตัวอย่างโดยวิธี Coring | 72 |
| 6.3 การประกอบกระจกเก็บตัวอย่าง | 73 |
| 6.4 แสดงตำแหน่งหลุมเจาะเก็บตัวอย่าง | 74 |
| 6.5 ตำแหน่งหลุมเจาะเก็บตัวอย่าง | 75 |
| 6.6 แสดงค่า Core Recovery ของหลุมเจาะเก็บตัวอย่าง | 76 |
| 6.7 แสดงค่า Core Recovery ของหลุมเก็บตัวอย่าง (ต่อ) | 77 |
| 6.8 แสดงตัวอย่างที่ได้จากการ Coring | 79 |
| 6.9 แสดงตัวอย่างที่ได้จากการ Coring ตลอดทั้งต้น และมีการป้องกันการ ระเหยของน้ำโดยการหุ้มด้วยพลาสติก | 80 |
| 6.10 แสดงการขุดเพื่อตรวจสอบขนาดของ Jet Grouting Pile | 81 |
| 6.11 แสดงการวัดขนาดของ Jet Grouting Pile | 81 |
| 6.12 แสดงการทำ Pile Load Test | 85 |
| 7.1 ผังบริเวณโครงการ (รถไฟฟ้ามหานคร) | 106 |
| 7.2 แบบแสดงตำแหน่ง Jet Grout ,ตำแหน่งที่อุโมงค์เชื่อมต่อกับสถานี (โครง การรถไฟฟ้ามหานคร) | 107 |
| 7.3 รูปตัดเสาดินซีเมนต์ ,ตำแหน่งที่อุโมงค์เชื่อมต่อกับสถานี (โครงการรถไฟ ฟ้ามหานคร) | 108 |
| 7.4 แบบแสดงตำแหน่ง Vertical Jet Grout ,ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินต้อง ลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ (โครงการรถไฟฟ้ามหานคร) | 109 |
| 7.5 แบบแสดงตำแหน่ง Inclined Jet Grout ,ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินต้อง ลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ (โครงการรถไฟฟ้ามหานคร) | 110 |

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 7.6 รูปตัด section B-B ,ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินต้องลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ (โครงการรถไฟฟ้ามหานคร) | 111 |
| 7.7 แบบแสดงตำแหน่ง Jet Grout ,จุดต่อระหว่าง sheet pile กับ Diaphragm wall (โครงการรถไฟฟ้ามหานคร) | 112 |
| 7.8 ผังบริเวณโครงการ (โครงการประตुरะบายน้ำปากพนัง) | 120 |
| 7.9 แบบงานก่อสร้าง Jet Grouting ในส่วนของ ถนนเข้าห้วงาน (โครงการประตुरะบายน้ำปากพนัง) | 121 |
| 7.10 แบบงานก่อสร้าง Jet Grouting ในส่วนของ คลองลัด (โครงการประตुरะบายน้ำปากพนัง) | 122 |
| 7.11 แบบงานก่อสร้าง Jet Grouting ในส่วนของ ประตูเรือสัญจร (โครงการประตुरะบายน้ำปากพนัง) | 123 |
| 7.12 แบบงานก่อสร้าง Jet Grouting ในส่วนของ ทำนบกั้นแม่น้ำ (โครงการประตुरะบายน้ำปากพนัง) | 124 |
| 7.13 ผังบริเวณงานก่อสร้างทำเทียบเรือขนถ่ายอุปกรณ์หนัก และรูปตัดแสดงสภาพชั้นดิน | 135 |
| 7.14 ผังและรูปแบบการจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์ ในงานก่อสร้างทำเทียบเรือขนถ่ายอุปกรณ์หนัก และกราฟแสดง F.S. ในกรณีมีน้ำหนักกดจาก MOBILE CRANE 100 ตัน ที่ระยะห่างต่างๆจากขอบท่า และตารางแสดงคุณสมบัติ | 136 |
| 7.15 แสดงที่ตั้งโครงการท่าอากาศยานกรุงเทพแห่งที่ 2 (หนองงูเห่า) | 138 |
| 7.16 แสดงสภาพชั้นดินอ่อนบริเวณหนองงูเห่า | 139 |
| 7.17 แสดงค่าของ α ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า UNDRAINED COHESION ของ CLAY | 143 |
| 7.18 ลักษณะชั้นดินที่ใช้ในการออกแบบ | 144 |
| 7.19 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบดินซีเมนต์ | 146 |
| 7.20 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบดินซีเมนต์ | 147 |
| 7.21 แสดงแนวคิดในการนำเสาเข็มดินซีเมนต์ไปใช้ในงานฐานรากสนามบิน | 150 |
| 8.1 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ Column 7C (Age 18 days) | 160 |

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 8.2 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ ของ Column 6H (Age 20 days) | 160 |
| 8.3 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ Column 3H (Age 31 days) | 161 |
| 8.4 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ Column 9H (Age 38 days) | 161 |
| 8.5 กราฟแสดงค่า Modulus of Elasticity (ksc) กับ อายุบ่ม สำหรับปริมาณซีเมนต์ 300 kg/m ³ ของโครงการรถไฟใต้ดินกับผลการศึกษาของ รชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวราพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.Tปีการศึกษา 2540 | 162 |
| 8.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ อายุบ่ม สำหรับปริมาณซีเมนต์ 300 kg/m ³ ของโครงการรถไฟใต้ดินกับผลการศึกษาของ รชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวราพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.Tปีการศึกษา 2540 | 163 |
| 8.7 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ sample A (Age 28 days) | 168 |
| 8.8 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ sample B (Age 28 days) | 168 |
| 8.9 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ sample C (Age 28 days) | 169 |
| 8.10 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ที่ตำแหน่งกลางกับขอบของเสาเข็มดินซีเมนต์ | 169 |
| 8.11 WORK DIAGRAM ของ CCP PUMPS | 173 |
| 8.12 แสดงองค์ประกอบที่มีผลต่อขนาดของเสาเข็ม | 174 |
| 8.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยกกับขนาดของ Jet Grouting Pile โดย A.L. BELL (1993) | 175 |
| 8.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยกก้านเจาะกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ของโครงการต่างๆ ที่ทำในประเทศไทย | 178 |

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| ผ1 เครื่องผสมดินซีเมนต์ | 194 |
| ผ2 การบ่มตัวอย่าง Beam โดยใช้กระสอบและผ้าชุบน้ำ | 195 |
| ผ3 ตัวอย่างดินซีเมนต์ในแบบหล่อ Beam | 196 |
| ผ4 การบ่มตัวอย่าง Beam โดยใช้กระสอบและผ้าชุบน้ำ | 196 |
| ผ5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับซีเมนต์ | 197 |
| ผ6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of Elasticity กับปริมาณซีเมนต์ | 197 |
| ผ7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of Rupture | 198 |
| ผ8 ตัวอย่าง Cylinder พร้อมทั้งจะทดสอบ Unconfined Compressive Test | 198 |
| ผ9 ตัวอย่าง Beam พร้อมทั้งจะทดสอบ Flexural Te | 199 |
| ผ10 เครื่องทดสอบ Slake Durability Test | 200 |
| ผ11 ดินซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบ Slake Durability Test รอบที่ 1 | 201 |
| ผ12 ดินซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบ Slake Durability Test รอบที่ 2 | 201 |
| ผ13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Slake Durability Index กับปริมาณซีเมนต์ | 202 |
| ผ14 กราฟผลการทดสอบหาแร่ธาตุในดินเดิม ด้วยเครื่อง X – Ray Diffraction | 204 |
| ผ15 กราฟผลการทดสอบหาแร่ธาตุในดินซีเมนต์ C – 350 ที่อายุการบ่ม 21 วัน | 205 |
| ผ16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่า Undrained Shear Strength เมื่อค่า pH Value เท่ากับ 5, 6, 7, 8 และ 9 | 206 |
| ผ17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH Value กับค่า Undrained Shear Strength ที่อายุการบ่มต่างๆ | 206 |
| ผ18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่า Undrained Shear Stregth เมื่อปริมาณโซเดียมคลอไรด์(NaCl) เท่ากับ 0.04,0.08,0.12,0.17 และ 0.21% | 207 |
| ผ19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)กับค่า Undrained Shear Strength ที่อายุการบ่มต่างๆ | 207 |

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| ผ20 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่า Undrained Shear Strength เมื่อปริมาณ Organic เท่ากับ 8,9,10,12 และ 14% | 208 |
| ผ21 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Organic กับค่า Undrained Shear Strength ที่อายุการบ่มต่างๆ | 208 |
| ผ22 | เสริมความมั่นคงของฐานรากอาคารเดิมในงานขุดดินลึกประชิดอาคารข้างเคียง | 210 |
| ผ23 | ทำเป็นกำแพงป้องกันดินพังทลายโดยเสริมเหล็กในเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานขุดดินก่อสร้างอาคารซึ่งอยู่ประชิดอาคารเดิมหลังบน | 210 |
| ผ24 | ฉีดน้ำปูนสร้างเป็นกำแพงกันดินและเสริมความมั่นคงของฐานรากเพื่อป้องกันความเสียหายของอาคารเดิมในงานขุดดินสร้างอุโมงค์สำหรับทางรถไฟใต้ดิน | 211 |
| ผ25 | ฉีดน้ำปูนปรับปรุงดินใต้ฐานรากเพื่อเสริมความแข็งแรงของอาคาร | 212 |
| ผ26 | ทำแนวกำแพงล้อมรอบฐานรากของสะพานข้ามแม่น้ำ เพื่อป้องกันการกัดเซาะของน้ำ | 212 |
| ผ27 | ฉีดน้ำปูนทำผนังกันน้ำและต้านแรงกัดเซาะของน้ำและต้านแรงกัดเซาะ | 213 |
| ผ28 | ปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้ดินรอบอุโมงค์ป้องกันไม่ให้ดินยุบตัวลงมา ในขณะที่ขุดและสามารถทำผนังอุโมงค์ถาวรที่มีความหนาแน่นกว่าปกติ | 213 |
| ผ29 | ทำเป็นสมอยึดรั้งกำแพงกันดินตามไหล่เขาดินตัดที่มีความชันมาก | 214 |
| ผ30 | เสริมความแข็งแรงให้ฐานรากอาคารเก่าที่มีการทรุดตัวสูง | 214 |
| ผ31 | ฉีดน้ำปูนสร้างผนังกันน้ำโดยรอบบริเวณที่จะขุดดินในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงและชั้นดินมีก้อนวัสดุขนาดใหญ่ใช้ระบบเข็มเหล็กฉีดไม่ได้ | 215 |
| ผ32 | ทำเป็นแนวกำแพงป้องกันการรั่วซึมผ่านคันดินของคลองส่งน้ำและอ่างเก็บน้ำ | 215 |
| ผ33 | ทำเป็นเสาเข็มเพื่อเสริมความแข็งแรงให้ดินและเพิ่มเสถียรภาพให้ไหล่ดินตัด | 216 |
| ผ34 | สร้างกำแพงกันดินพังทลายในขณะที่ขุดร่องวางท่อในบริเวณที่คับแคบ | 216 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า | |
|----------|---|-----|
| 2.1 | แสดงการจำแนก Jet Grouting แบ่งตามจำนวนของเหลวหรือจำนวนท่อที่ใช้ | 12 |
| 2.2 | แสดงพารามิเตอร์มาตรฐานที่ใช้ในการทำงาน Jet Grouting | 12 |
| 2.3 | กำลังและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ | 16 |
| 3.1 | การประเมินค่า Compressive strength ของดินซีเมนต์ที่ได้จากการทำ Jet Grouting | 23 |
| 4.1 | ผลการปรับปรุงคุณภาพของดินหลังการทำ Jet Grouting โดยใช้ซีเมนต์ในอัตรา 200 กก/ม ² ของเสาเข็มที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว | 41 |
| 4.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์ของระยะเหลี่ยม (b) และค่าความน่าจะเป็นที่ต้องการเสาหรือกำแพงที่บ่อน้ำที่ใช้เสาแถวเดียว (Vogel, Kauschinger 1989) | 58 |
| 6.1 | แสดงส่วนผสมของน้ำปูนซีเมนต์ | 86 |
| 6.2 | วิธีการทำงานและการควบคุมส่วนผสม (Grout Mixing) | 87 |
| 6.3 | วิธีการทำงานและการควบคุมการเจาะ(Drilling) | 89 |
| 6.4 | วิธีการทำงานและการควบคุมการฉีด (Jetting) | 92 |
| 7.1 | แสดงค่าพารามิเตอร์ในการฉีดน้ำปูน | 101 |
| 7.2 | แสดงค่าพารามิเตอร์ในการฉีดน้ำปูน | 103 |
| 7.3 | แสดงผลการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength | 104 |
| 7.4 | แสดงค่าพารามิเตอร์ในการฉีดน้ำปูน | 117 |
| 7.5 | แสดงผลการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength | 118 |
| 7.6 | กำลังอัดของตัวอย่างที่เจาะเก็บจากเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในระหว่างปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต | 131 |
| 7.7 | กำลังอัดของตัวอย่างที่เจาะเก็บจากเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในระหว่างที่ก่อสร้างจริง | 132 |
| 7.8 | แสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของตัวอย่างที่จะเจาะเก็บจากเสาเข็มดินซีเมนต์ | 145 |

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 7.9 แสดงการคาดคะเนการทรุดตัวของลานบินที่ก่อสร้างบนชั้นดินอ่อนหนา 23 เมตร | 151 |
| 7.10 แสดงการคาดคะเนการทรุดตัวของลานบินซึ่งรองรับด้วยกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์ 15 เมตร | 152 |
| 7.11 ข้อมูลทั่วไปของโครงการต่างๆ | 153 |
| 7.12 Jet Grouting Operative Parameters | 155 |
| 7.13 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ | 157 |
| 8.1 ผลการทดสอบค่า Unconfined Compressive Strength ของดินเดิมและดินหลังการปรับปรุงคุณภาพ (Soil Cement) | 159 |
| 8.2 แสดงค่า Modulus of Elastic ที่ระดับความลึกต่างๆ | 162 |
| 8.3 ผลการทดสอบค่า Unconfined Compressive Strength ของดินเดิมและดินหลังการปรับปรุงคุณภาพ (Soil Cement) ที่ระดับความลึกต่างๆ | 167 |
| 8.4 แสดง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง , อัตราการถอนก้านเจาะ และแรงดันของตัวอย่างโครงการ | 176 |
| 8.5 ASTM ที่เกี่ยวข้องกับการงาน Jet Grouting | 179 |
| ผ1 ค่าพารามิเตอร์ของดินธรรมชาติผสมกับดินซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 200 กก./ม ³ ของดินเปียก | 203 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting มีจุดมุ่งหมายหลักที่จะปรับปรุงดินอ่อนในที่ (soil in situ) ซึ่งมีคุณภาพต่ำ หรือไม่เหมาะสมที่จะใช้ในงานก่อสร้าง ให้เปลี่ยนสภาพไปเป็นดินที่แข็งตัวขึ้นอย่างมาก (soil solidification) และปรับปรุงให้มีความที่บ้น้ำเพิ่มขึ้นด้วย ในกรณีของดินทราย เมื่อได้มวลดินที่มีคุณสมบัติดีขึ้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างได้อย่างกว้างขวาง เทคนิคหลักในการทำงานจะใช้การฉีดน้ำปูนซีเมนต์ด้วยความดันสูงในระดับ 200-400 bar เข้าไปกวนผสมกับดินในสนามจนเป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดการเชื่อมประสานทางเคมี (chemical bond) ขึ้นระหว่างอนุภาคของดินกับซีเมนต์ ซึ่งในเวลาต่อมามวลดินจะมีความแข็งแรงสูงขึ้น มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปมากขึ้น ทั้งยังมีความที่บ้น้ำเพิ่มขึ้นในการปรับปรุงดินจำพวก cohesionless soil

ในปัจจุบันเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ได้รับการยอมรับเพื่อนำมาใช้แก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมปฐพีในประเทศไทยมากขึ้น เนื่องจากเทคนิคการทำงานได้รับการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น สามารถจัดปัญหาความเสียหายที่เคยมีผู้ทำให้เกิดกับสิ่งก่อสร้างข้างเคียงลงได้ ทั้งยังสามารถช่วยแก้ปัญหาในการก่อสร้างหลายประการได้สำเร็จภายในเวลาอันสั้น มีประสิทธิผลดี และมีค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่าการใช้วิธีแบบดั้งเดิมอีกด้วย สิ่งต่างๆ เหล่านี้จึงประกอบกันเป็นสภาวะที่เอื้ออำนวยให้งานปรับปรุงคุณภาพดินด้วย Jet Grouting Technique กลายเป็นทางเลือกใหม่ซึ่งเป็นข้อเด่นหลายประการที่มุ่งใจให้วงการก่อสร้างหันมาเลือกใช้มากขึ้นในระยะนี้ และในอนาคตอันใกล้มีแนวโน้มที่เทคนิคดังกล่าวจะได้รับการพัฒนาไปใช้กับงานประเภทต่างๆ ที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น จนในที่สุดวิธี Jet Grouting อาจกลายเป็นวิธีพื้นฐานที่สามารถประยุกต์ใช้แก้หรือป้องกันปัญหาทั่วไปที่มักเกิดกับงานวิศวกรรมปฐพีในประเทศไทย

ดังนั้น การศึกษาและรวบรวมข้อมูลจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการตัดสินใจเลือกใช้วิธีการก่อสร้างเทคนิคการก่อสร้าง การควบคุมและการตรวจสอบคุณภาพ รวมถึงปัญหาและแนวทางแก้ไขที่เกิดขึ้นในโครงการใหญ่ๆ ที่ทำในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการ ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting
- 1.2.2 เพื่อเป็นการศึกษาแนวคิดในการนำวิธีการ Jet Grouting ไปใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆในประเทศไทย
- 1.2.3 เพื่อการศึกษามาตรฐานทางวิศวกรรมเพื่อใช้ในการควบคุมงาน Jet Grouting ในอนาคต
- 1.2.4 เพื่อเป็นการศึกษาแนวคิดของกรณีตัวอย่างในประเทศไทยที่นำเอาวิธี Jet Grouting ไปใช้ในด้าน
 - 1.2.4.1 ปัญหา และเหตุผลที่เลือกใช้การก่อสร้างด้วยวิธี Jet Grouting
 - 1.2.4.2 ขั้นตอนในการก่อสร้างด้วยวิธี Jet Grouting
 - 1.2.4.3 การควบคุมและการตรวจสอบคุณภาพ

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในโครงการพิเศษ

Jet Grouting Technique เป็นวิธีการทำให้ดินแข็งแรงขึ้นโดยการฉีดน้ำปูนเข้าไปผสมรวมกับดินด้วยความดันในระดับสูงมากผ่านทางรูเล็กๆ ซึ่งมีขนาดประมาณ 1.8-3.5 มม. และเรียงตัวอยู่ในแนววนรอบส่วนปลายล่างของก้านเจาะ ในขณะที่ทำงานเครื่องเจาะฉีดน้ำปูนจะหมุนก้านเจาะที่ปลายล่างปิด เจาะแหวกดินลงไปช้าๆ พร้อมทั้งฉีดน้ำตัดดินลงไปด้วยความเร็วสูง เมื่อถึงชั้นความลึกที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดิน จะหมุนก้านเจาะพร้อมทั้งดึงก้านเจาะขึ้นช้าๆ ในขณะเดียวกันจะฉีดน้ำปูนซีเมนต์ด้วยความดันสูงในระดับ 200-400 bar ผ่านรูเล็กๆ ออกไปกวนผสมกับดิน กระแสน้ำปูนที่มีความเร็วประมาณ 200 ม./วินาที หรือสูงกว่า จะทำงานในลักษณะคล้ายใบพัดของเหลวที่มีกำลังทะลุทะลวงสูง ตัดย่อยดินทั้งอ่อนและแข็งให้ผสมรวมกับน้ำปูนเป็นเนื้อเดียวกันในขณะที่หมุนก้านเจาะขึ้นช้าๆ วัสดุผสมซีเมนต์จะก่อรูปทรงกระบอกในลักษณะคล้ายเสาเข็มซึ่งอาจเรียกว่า เสาเข็มดินซีเมนต์ (soil-cement column)

พลังงานจลน์ของน้ำปูนจะลดลงเนื่องจากถูกแรงเสียดทานภายในมวลดิน จนสลายหมดไปในชั่วระยะเวลาทางหนึ่งที่น้ำปูนได้แหวกผ่านเนื้อดินออกไป ระยะเวลาของการฉีดน้ำปูนจะขึ้นอยู่กับ การอัดแน่นของเนื้อดินออกสู่ระยะเวลาของการฉีดน้ำปูนจะขึ้นอยู่กับ การอัดตัวแน่นของเนื้อดิน ระยะเวลาที่คงการฉีดน้ำปูนไว้ระยะหนึ่งๆ ความดันของน้ำปูน และขนาดของรูเล็กๆ ที่ปล่อยน้ำปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไปจากก้านเจาะ วัสดุผสมดิน-ซีเมนต์จะกลายเป็นของผสมที่มีเนื้อสม่ำเสมอและในช่วงระยะเวลาเพียง 1-2 สัปดาห์ความแข็งแรงจะพัฒนาสูงขึ้นถึงระดับ hard clay ในกรณีของดินเหนียว และในกรณีของดินทรายจะมีคุณสมบัติความที่บ้น้ำเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งคุณสมบัติที่ได้เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินเดิม ชนิดและปริมาณสารเชื่อมประสาน (ส่วนใหญ่เป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1) ในหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุผสมดิน-ซีเมนต์

1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โดยการศึกษาจากโครงการต่างๆ ในประเทศไทยที่ได้เลือกใช้วิธี Jet Grouting ซึ่งจะเลือกโครงการที่มีเทคนิคและปัญหาที่น่าสนใจ เพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุป ปัจจัยที่ทำให้เลือกใช้วิธี Jet Grouting เทคนิคและขั้นตอนที่ใช้ การควบคุมและการตรวจสอบคุณภาพ รวมทั้งปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในแต่ละโครงการ โดยอาศัยแหล่งข้อมูลจากทั้งภาครัฐและภาคเอกชน

1.5 วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting

1.5.2 ศึกษาโครงการต่างๆ ที่ใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้ทราบหลักการของ Jet Grouting

1.6.2 ทำให้ทราบแนวคิดในการนำเอาวิธี Jet Grouting ไปใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ในงานด้านวิศวกรรม

1.6.3 ทำให้ทราบถึงแนวทางของมาตรฐานที่จะใช้ในการควบคุมงาน Jet Grouting

1.6.4 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยในประเด็นอื่นๆที่น่าสนใจและนำศึกษา เกี่ยวกับเรื่อง Jet Grouting อันที่จะทำให้เกิดการศึกษารายละเอียดมากยิ่งขึ้น จนกลายเป็นมาตรฐานสำหรับเรื่อง Jet Grouting ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำเอาหลักการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานในอนาคต

บทที่ 2

บทปริทัศน์

2.1 ทัวไป

วิศวกรรมการก่อสร้าง มีการพัฒนาอย่างสม่ำเสมอ ในหลายปีที่ผ่านมาบริเวณที่ต้องการจะสร้างสิ่งก่อสร้างมักจะครอบคลุมถึงพื้นดิน ลึกลงไปในดิน และสูงขึ้นระฟ้า (Kamon, 1997) ความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงดินที่ยังมีสภาพไม่เป็นตามที่ต้องการให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้าง เพราะฉะนั้น มีหลายวิธีด้วยกันที่จะถูกใช้เพื่อการปรับปรุงดินที่ยังไม่เหมาะสมสำหรับก่อสร้าง ซึ่งเทคนิคการปรับปรุงดินโดยวิธี Jet Grouting เป็นวิธีที่น่าสนใจมากที่สุดทีเดียว เนื่องจากการปรับปรุงดินโดยวิธี Jet Grouting สามารถประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงดินทุกประเภท ทั้งดินประเภท cohesive soil และประเภท cohesionless soil หรือดินที่เป็นดินส่วนผสมระหว่าง 2 ประเภทนั้น จนกระทั่งถึงดินปนกรวด หรือดินปนก้อนหินขนาดใหญ่ (boulder clay) ไม่ว่าจะชั้นดินเหล่านั้นจะอยู่ในสภาพแห้งหรือเปียก หรืออยู่ใต้ระดับน้ำก็ตาม แม้แต่ชั้นหินผุซึ่งแตกเป็นก้อนเล็กก้อนน้อย (highly weathered to completely weathered rocks) (สมชัย กกกำแหง, 2538)

โดยเริ่มต้นการประยุกต์ใช้วิธี Jet Grouting ถูกนำมาใช้ในประเทศญี่ปุ่นก่อนปี 1960 กลไกพื้นฐานสำหรับ Jet Grouting คือการฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูงลงไปในดินเหนียว เพื่อทำการแทนที่ดินหรือเข้าไปผสมกับดินผ่านหัวฉีดพิเศษ (nozzle) หลังจากนั้นจะผสมกันกับ Stabilizer ที่เหมาะสม ทำให้ดินอ่อนมีความที่บ่มน้ำสูงขึ้น

ประเทศไทยเพิ่งนำเทคนิคการปรับปรุงดินโดยวิธี Jet Grouting มาใช้ประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา โดยตอนเริ่มต้นได้นำวิธีและเครื่องจักรของบริษัท Broms มาใช้แต่ไม่ค่อยบรรลุผล เนื่องมาจากการหักของเสาเข็มดินและการเคลื่อนตัวของดิน ประกอบกับการขาดทักษะความชำนาญในการใช้เครื่องจักร ซึ่งต่อมากการศึกษาและวิจัยได้ถูกพัฒนาเรื่อยมาและเรียนรู้ถึงเทคนิคใหม่ ๆ โดยที่งานก็ดำเนินต่อไป

ปัจจุบันนี้หลายหน่วยงานทั้งในส่วนของภาครัฐและเอกชนได้นำ Jet Grouting มาใช้เพื่อการก่อสร้าง เช่น กรมทางหลวง นำวิธีการนี้มาปรับปรุงดินถนนทางหลวงสายบางนา-ตราด การรถไฟแห่งประเทศไทยนำวิธีการนี้มาปรับปรุงดิน เพื่อทำเป็นกำแพงกันน้ำ ณ สถานีรถไฟบางซื่อ กรมชลประทานประยุกต์เทคนิคนี้ในการปรับปรุงดินในโครงการพัฒนาลุ่มแม่น้ำปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

2.2 Jet Grouting คืออะไร

Jet Grouting Method คือ วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินอีกวิธีหนึ่ง โดยการฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูงลงไปดินเหนียวเพื่อทำการแทนที่ดินหรือเข้าไปผสมกับดิน ซึ่งโดยทั่วไปแรงดันที่ใช้ประมาณ 200-400 บาร์ ผ่านหัวฉีดพิเศษที่ส่วนปลายของท่อน้ำปูนซีเมนต์ซึ่งหมุนในแนวตั้งและเลื่อนระดับขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามอัตราเร็วที่ได้คำนวณไว้ล่วงหน้า มวลดินจะถูกทำลายด้วยแรงกระทำเนื่องจากการฉีดน้ำปูน อนุภาคดินจะถูกผสมกับน้ำปูน ในขณะที่ส่วนผสมของมวลดินและน้ำปูนส่วนเกินจะถูกเคลื่อนย้ายและแทนที่ พลังงานจลน์ของน้ำปูนจะลดลงเนื่องจากถูกแรงเสียดทานภายในมวลดินจนสลายหมดไปในชั่วระยะเวลาหนึ่งที่น้ำปูนได้แหวกผ่านเนื้อดินออกไป ผลของการปรับปรุงคุณภาพดินจะทำให้เราได้เสาเข็มรูปทรงกระบอกที่มีความแข็งแรง เป็นวัสดุผสมดินซีเมนต์ที่มีเนื้อสม่ำเสมอ หลังจากทำการติดตั้งเสาเข็ม Jet Grouting Pile ให้มีระยะห่างเหมาะสมจะทำให้เราได้ชั้นดินที่มีการปรับปรุงและมีค่า คุณสมบัติการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นตามที่วิศวกรออกแบบต้องการ

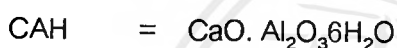
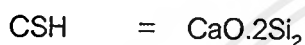
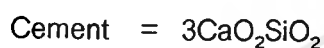
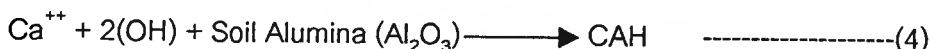
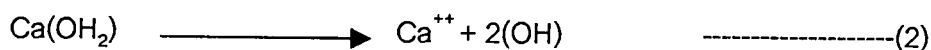
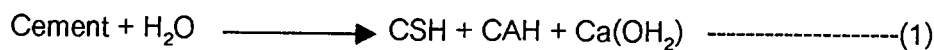
2.3 กลไกการพัฒนากำลังของ Jet Grouting Pile

การเพิ่มเสถียรภาพของดินด้วยซีเมนต์เป็นวิธีการหนึ่งของการเพิ่มเสถียรภาพของดิน โดยการทำให้ปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนไป โดยที่ปฏิกิริยาของดินกับซีเมนต์จะเกิดขึ้น 2 กระบวนการ คือ

- 1) Cement Hydration เป็นกระบวนการแรกที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ
- 2) Pozzolanic Reaction and Carbonization เป็นกระบวนการที่สอง ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของดินเหนียวและปูนขาวซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยา Cement Hydration

หลังการพัฒนากำลังรับแรงอัดของ Soil cement เกิดจากปฏิกิริยา Cement Hydration ซึ่งจะคล้ายกับปฏิกิริยา Cement Hydration ที่เกิดในคอนกรีต กล่าวคือเมื่ออนุภาคซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ปฏิกิริยา Cement Hydration ผลของปฏิกิริยาดังกล่าว จะก่อให้เกิดสาร Calcium Silicate Hydrate (CSH) Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Hydroxide $[Ca(OH)_2]$ สาร CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึดมวลเม็ดดินเข้าด้วยกัน ทำให้รวมตัวกันเป็นมวลดินขนาดใหญ่ ที่มีความแข็งแรงสูงภายในเวลา 2-4 สัปดาห์

[Ca(OH₂)] ที่เกิดจะทำปฏิกิริยากับ Soil Silica และ Soil Alumina ในดินต่อไปอีกทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง ปฏิกิริยา Cement Hydration สามารถเขียนออกมาในรูปสมการได้ต่อไปนี้ (Herzog ,A และ Mitchell ,T.K. ,1963)



ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลของปฏิกิริยา Cement Hydration ในดินจะก่อให้เกิดสาร CSH และ CAH มีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึด ดังแสดงในสมการ 1,2,3 และ 4

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์แห้งจะประกอบไปด้วย CS เป็นส่วนมาก และมีตัวอื่นๆ คือ C₄S ,C₃A และของแข็งในรูป C₄AF ในระหว่างกระบวนการแรกส่วนประกอบเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดซิลิเกตซึ่งมีน้ำอยู่ด้วย อะลูมิเนียม และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยบทบาทของซีเมนต์ในส่วนผสมของดินซีเมนต์ ก็มีบทบาทเหมือนในส่วนผสมของคอนกรีต

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ จะช่วยยึดอนุภาคของดินเข้าด้วยกัน ทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนไป ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของซีเมนต์ที่ถูกใช้ เช่น ถ้าใช้ปริมาณซีเมนต์ต่ำ (ต่ำกว่า 2 % โดยน้ำหนักของดินเหนียวแห้ง) จะมีผลเล็กน้อยต่อกำลังดินและมีแนวโน้มที่จะลดความเหนียว (Plasticity) ของดินลง ดินที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์จะถูกเรียกว่า Cement Modified Soil สำหรับปริมาณซีเมนต์ที่สูงขึ้นจะให้กำลังของดินเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันในคอนกรีตผลที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะแปรผกผันกับปริมาณสารอินทรีย์ในดิน ความสะอาดของน้ำ หรือปริมาณเกลือในน้ำ

2.4 ประวัติและความเป็นมา

2.4.1 ต่างประเทศ

Chemical Grouting ได้แสดงบทบาทหลักในเรื่องของการปรับปรุงคุณภาพดินในช่วงก่อนปี 1960 ในประเทศญี่ปุ่น อย่างไรก็ตาม Chemical Grouting ก็ยังมีข้อเสีย อย่างเช่น ขนาดรูปร่างที่ไม่คงที่และกำลังที่ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอหลังการปรับปรุง และด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงได้มีการกระตุ้นให้สร้างเทคนิคการปรับปรุงดินวิธีใหม่ คือ Jet Grouting Method นวัตกรรมครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยการอัดฉีดน้ำ หรือน้ำซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง ลงไปในดินจนถึงความลึกที่ต้องการเพื่อทำลายโครงสร้างของดินเป็นรูปทรงกระบอก

หลักการนี้ได้ถูกพัฒนาเรื่อยมาจนราวปี 1965 การใช้ระบบ Water Jet เพื่อประโยชน์ในงานขุดดินเหมืองถ่านหิน ซึ่งตอนนั้นการทำงานโดยวัสดุ Grout ได้ใช้ที่แรงดัน 200 บาร์ แต่เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่ได้จากการปรับปรุงก็สามารถทำได้เพียง 0.5 เมตรเท่านั้น

ดังนั้นการพัฒนาในระยะต่อมามีเป้าหมายในเรื่องการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้ใหญ่ขึ้นโดยการใช้แรงอัดอากาศร่วมกับของเหลว ซึ่งมีกระบวนการทำงานที่แตกต่างกันอยู่ 2 วิธี คือ Two Fluid Method กับ Three fluid Method ทั้ง 2 วิธีได้เป็นที่นิยมแพร่หลายอย่างรวดเร็วในปี 1970 วิธี Jet Grouting จึงได้ถูกเสนอไปยังประเทศแถบตะวันตกและใช้กันทั่วโลกในปี 1980 เป็นต้นมา

ในปี 1990 การสร้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้ใหญ่ขึ้น ได้กลายมาเป็นเรื่องหลัก และมีการทดสอบในแต่ละวิธีเกี่ยวกับเรื่องนี้จนสำเร็จผลอย่างหนึ่งคือ Super Jet ซึ่งสามารถสร้างขนาดการปรับปรุงดินเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-8 เมตร โดยการเพิ่มพลังงานแก่ของเหลว แม้ว่ากระบวนการ Jet Grouting จะเฉพาะเจาะจงไปที่พลังงานของของเหลว เพื่อปรับปรุงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแต่ มันยังขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นดินด้วย ความต้องการขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและคุณสมบัติของตัวดินที่ทำการปรับปรุงเป็นสิ่งที่เป็นประโยชน์ในด้านความน่าเชื่อถือของวิธีการนี้

2.4.2 ประเทศไทย

ในบริเวณภาคกลางของไทย โดยเฉพาะกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีชั้นดินเหนียวอ่อนที่หนามากวางอยู่บนชั้น Stiff Clay และ Sand layer และอาจมี Bed rock อยู่บ้าง มีปัญหามากมายเกี่ยวกับเรื่องเสถียรภาพและการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นกับดินในบริเวณนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี 1978 ศาสตราจารย์ Bengt B. Broms ได้เสนอวิธีใหม่ในการปรับปรุงฐานรากลึกโดยปูนขาว เพื่อทำเป็น Lime column ดังเช่นที่ประเทศสวีเดน ณ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ต่อมาวิธีการ Broms's Method ได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายและดัดแปลงให้เหมาะสมกับแต่ละประเทศ

ปี 1987 กองทัพเรือโดยกรมอุทกหารเรือให้ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (สจธ.) หาวิธีปรับปรุง Soft Bangkok Clay ให้แข็งแรงและทรุดตัวน้อยลง ภาควิชาจึงเริ่มศึกษาเสาเข็มดินปูนขาว (Lime column) โดยทำเครื่องมือขึ้นมาเอง ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ก็มีลักษณะเหมือนกับเครื่องมือ Broms จากผลการศึกษาได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาในเรื่อง Slope Stability ที่สวนหลวง ร.9 ในระหว่างการก่อสร้าง Lime column ได้มีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งกีดขวางฝังอยู่ใต้ชั้นดินอยู่จำนวนมาก เช่น เสาเข็มหัก ก้อนคอนกรีต ตันไม้ เป็นต้น ดังนั้นหัวเจาะ (drilling rig) จึงถูกดัดแปลงเพื่อฉีดผงซีเมนต์เข้าไปในดิน เวลาต่อมาเครื่องมือและอุปกรณ์ฉีด Grout แบบใหม่ได้ถูกนำมาใช้สำหรับก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์

ปี 1989 ถนนสายหลักในสวนหลวง ร.9 ได้เกิดความเสียหายระหว่างการก่อสร้าง สจธ. โดยการมอบหมายจากมูลนิธิสวนหลวง ร.9 ได้พยายามก่อสร้างเสาเข็มซีเมนต์เพื่อใช้เป็นฐานรากของถนนเพื่อการป้องกันการ Sliding ในขั้นแรก วิธี Rotary Mixing ได้นำมาใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ในบริเวณนี้ได้เพราะมีวัสดุกีดขวางอยู่จำนวนมาก เช่น ก้อนคอนกรีต ตันไม้ เป็นต้น อยู่ข้างใต้ของถนน วิธี Jet Grouting เป็นวิธีหนึ่งที่จะทำเสาเข็มดินซีเมนต์ได้ในเวลาเดียวกัน สจธ. ได้พัฒนาปรับปรุงหัวเจาะ (drilling rig) เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการทำเสาเข็มซีเมนต์ ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ก็สนับสนุน pressure pump และบริษัทชลประทานซีเมนต์ก็ผลิตซีเมนต์ชนิดพิเศษที่เรียกว่า Tough Soil เมื่อการทำ Jet Grouting เสร็จสิ้นลง คันทาง Embankment เกิดความเสียหายสูงประมาณเพียง 1 เมตร และไม่มี Sliding เกิดขึ้นจนกระทั่งถึงทุกวันนี้หลังจากผ่านไปประมาณ 3 เดือน ได้มีการทดสอบ Standard penetration test ทั้งในพื้นที่และนอกบริเวณที่ทำการปรับปรุง ผลแสดงให้เห็นว่า ค่า Undrained shear strength พื้นที่ที่ทำการปรับปรุงมีค่าประมาณ 2 เท่าของพื้นที่รอบนอก

ปี 1992 โครงการวิจัยถนนเลียบชายฝั่งบางบอนได้รับมอบหมายจาก กรุงเทพมหานคร โดยทำการศึกษาดู 2 ส่วน ส่วนแรกอยู่บนเสาเข็มซีเมนต์ ส่วนที่สองอยู่บนดิน Soft Bangkok Clay ผลของการศึกษาพบว่าการทรุดตัวของส่วนแรกจะน้อยกว่าส่วนที่สองประมาณ 9 ซม. ภายในระยะเวลา 7 เดือน หลังจากการวิจัยนี้เสาเข็มซีเมนต์ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในประเทศไทย ด้วยการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในหลายงาน อย่างเช่น งานก่อสร้างกำแพงกันดินชั่วคราว และงาน

เสริมความแข็งแรงของดินที่กั้นบ่อเพื่อต้านทานการยกตัวในงานขุดบ่อดิน งานปรับปรุงดินฐานรากซึ่งเป็นชั้นดินอ่อนที่หนามาก เพื่อให้สามารถรองรับคันดินถมหรือลานดินถม ที่จะใช้เป็นคันทางของถนนหรือลานรองรับน้ำหนักต่าง ๆ ได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดการทรุดตัวเกินเกณฑ์ที่กำหนด งานเสริมความมั่นคงให้กับคันตลิ่งริมน้ำทั้งที่มีหรือยังไม่มีโครงสร้างกำแพงคอนกรีตป้องกันตลิ่ง และงานก่อสร้างกำแพงทึบน้ำ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำผ่านเข้าไปในบริเวณที่ต้องการป้องกัน (Impervious cut-off wall)

ในปัจจุบันเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ได้รับการยอมรับเพื่อนำมาใช้แก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมปฐพีในประเทศไทยมากขึ้น เนื่องจากเทคนิคการทำงานได้รับการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทั้งยังสามารถช่วยแก้ปัญหาในการก่อสร้างหลายประการได้สำเร็จภายในเวลาอันสั้น มีประสิทธิภาพดี และมีค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำกว่าการใช้วิธีการแบบดั้งเดิมอีกด้วย

ราคาการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting ในขณะนี้ได้ลดลงมาอยู่ในระดับเพียง 1,200-1,500 บาทต่อลูกบาศก์เมตรของดินที่ได้รับการปรับปรุงเท่านั้น ซึ่งราคาดังกล่าวได้ลดลงจากราคาในระยะเริ่มแรกประมาณเท่าตัว สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้จึงประกอบกันเป็นสภาวะที่เอื้ออำนวยให้งานปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting Technique กลายเป็นทางเลือกใหม่ซึ่งมีข้อเด่นหลายประการที่มุ่งใจให้วงการก่อสร้างหันมาเลือกให้มากขึ้นในขณะนี้ และในอนาคตอันใกล้มีแนวโน้มที่เทคนิคดังกล่าวจะได้รับการพัฒนาไปใช้กับงานประเภทต่าง ๆ ที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นจนในที่สุดวิธี Jet Grouting อาจกลายเป็นวิธีการพื้นฐานที่สามารถประยุกต์ใช้แก้หรือป้องกันปัญหาทั่วไปที่มักเกิดกับงานวิศวกรรมปฐพีในประเทศไทย

2.5 ลำดับขั้นตอนการทำ Jet Grouting

1) หมุนก้านเจาะ Jet Rod กดลงไปจนถึงระดับที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดินโดยไม่ต้องนำดินออกบางครั้งขณะกดลงไปในดิน อาจใช้น้ำหรือน้ำปูนอัดฉีดแรงดันสูงเพื่อทำลายโครงสร้างดินโดยใช้แรงดันประมาณ 200 บาร์ ฉีดน้ำหรือน้ำปูนผ่าน Jet Rod หมุนรอบๆ แกนพร้อมกดให้จมลงไปถึงความลึกที่ต้องการ

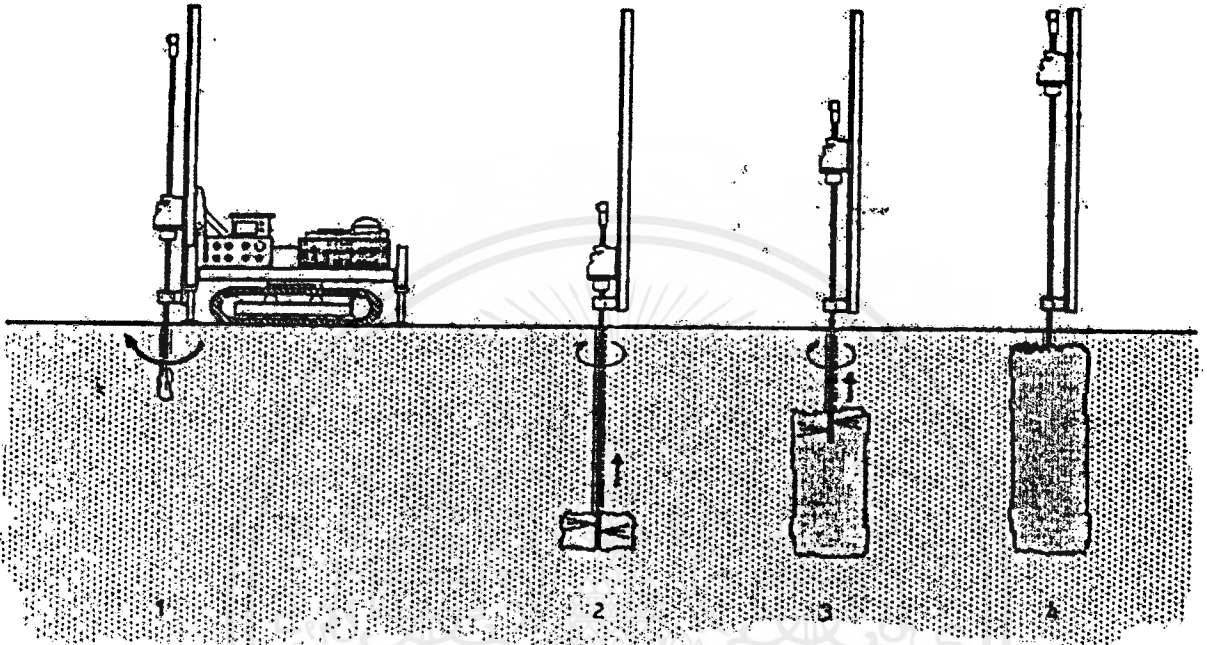
2) ฉีดฉีดน้ำปูนเข้าไปผสมกับดินพร้อมกับกอนและดิ่งก้านเจาะขึ้นเป็นจังหวะซึ่งควบคุมความเร็วรอบของการหมุนก้านเจาะและระยะการดึงขึ้นด้วยระบบคอมพิวเตอร์

3) ฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูงอย่างต่อเนื่องตลอดชั้นดินที่ต้องการปรับปรุง

4) ฉีดน้ำปูนถึงระดับที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าขั้นตอนหลักของการทำเสาเข็ม JGP ได้แก่ ขั้นตอน Drilling, Jetting, Rotation และ Forming a column



รูปที่ 2.1 ลำดับขั้นตอนการทำ Jet Grouting (ชอยกริต, 1996)

2.6 Jet Grouting Method

วิธี Jet Grouting Method สามารถดำเนินการได้ 3 วิธี คือ

- 1 Single Tube Method หรือ Slurry Jetting
- 2 Double Tubes Method หรือ Slurry with Air Jetting
- 3 Triple Tubes Method หรือ Water with Air and Slurry Jetting

2.6.1 ระบบท่อเดี่ยว(Single Tube system หรือ S)

เป็นระบบธรรมดาของวิธี Jet Grouting ที่ท่อ Grout มีรูฉีกลงผ่านศูนย์กลาง 2-4 ซม. ณ ตำแหน่งความลึกที่ต้องการ รูปที่ 2.2(a) Grout จะถูกฉีดผ่านรู Nozzle ด้วยความดันที่อาจสูงถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600 บาร์ ซึ่งจะทำให้ดินโดนกัดเซาะและมี Grout เข้ามาแทนที่ กระบวนการจะคงดำเนินต่อไปโดยคงระยะยกและการหมุนท่อนในอัตราสม่ำเสมอเพื่อที่จะสร้างเสาที่ประกอบด้วยส่วนผสมระหว่าง Grout และ ดินเดิม คุณสมบัติของส่วนผสมนี้ในแต่ละชุดจะถูกนำไปตรวจสอบลักษณะของดินที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว ส่วนที่ล้นออกมาภายใต้แรงดันจะกระจายอยู่ระหว่างท่อ Grout และข้างหลุมซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ ณ ส่วนผิวได้

2.6.2 ระบบท่อคู่(Double Tubes system หรือ D)

ระบบนี้ได้พัฒนารูปแบบขึ้นมาจากระบบเดียวในส่วนที่จะให้เกิดผลการกัดเซาะดินของการ Jet Grouting โดยเพิ่มท่อที่มีแรงกดอากาศชนิดแรงดัน 2-15 บาร์ ทำให้สามารถรักษาปริมาตรระหว่างการฉีดแต่ละ Stroke ได้มากกว่าเมื่อเทียบกับระบบเดียว ท่อฉีดสำหรับระบบ D ประกอบด้วยท่อกลาง 2 ท่อซ้อนกัน ท่อในสำหรับฉีด Grout ส่วนท่อนอกสำหรับอัดอากาศ รูปที่ 2.2(b) สำหรับการนำไปใช้ในสนามจะเหมือนกับระบบเดียว

2.6.3 ระบบ 3 ท่อ(Triple Tubes system หรือ T)

ระบบนี้ใช้ท่อที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่ออากาศเพื่อฉีดกัดเซาะดินและแยกปลายกระบอกฉีด Grout ดังนั้นการจัดการจึงจำเป็นต้องซ้อนท่อ 3 ท่อไว้เพื่อแยกการผ่านของ อากาศ น้ำ และวัสดุ Grout รูปที่ 2.2(c) โดยการฉีดกัดเซาะมีประสิทธิภาพสูงทั้งยังสามารถบรรลุผลในเรื่องคุณสมบัติของดินที่จะเกิดขึ้นจากการปรับปรุงดินในช่วงกว้างกว่า แรงดันและอัตราการไหลของ Grout น้ำ และ อากาศอาจจะเปลี่ยนแปลงได้อิสระเพื่อให้เกิดสัดส่วนตามต้องการ แรงดันน้ำอาจสูงถึง 500 บาร์หากต้องการแรงดันอากาศ 2-15 บาร์ แรงดัน Grout ไม่จำเป็นต้องสูงมากโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 5-30 บาร์ ข้อจำกัดหรืออุปสรรคในการไหลอย่างอิสระที่เกิดขึ้นในระบบ S หรือ D สามารถแก้ไขได้ด้วยระบบ T แต่อาจจะส่งผลในเรื่องการให้แรงดันสูงเกินไปแก่ดินเป็นเหตุให้เกิดการบวมตัวของดิน (Heave Effect) หรือการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral Deformation)

เราสามารถเปรียบเทียบวิธีการทั้ง 3 วิธีดังตารางที่ 2.1 ตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.2 ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนก Jet Grouting แบ่งตามจำนวนของเหลวหรือจำนวนท่อที่ใช้

(Kauschinger and Welsh,1989)

| ระบบ(System) | Desegregating fluid | Consolidating fluid | ชื่อ |
|--------------|-----------------------|---------------------|-------------|
| Single Tube | น้ำปูนซีเมนต์ | | CCP |
| Double Tubes | น้ำปูนซีเมนต์ + อากาศ | | JSG,JSP,JGP |
| Triple tubes | อากาศ + น้ำ | น้ำปูนซีเมนต์ | CJG,SSS-MAN |

ตารางที่ 2.2 แสดงพารามิเตอร์มาตรฐานที่ใช้ในการทำงาน Jet Grouting (Kauschinger and Welsh,1989)

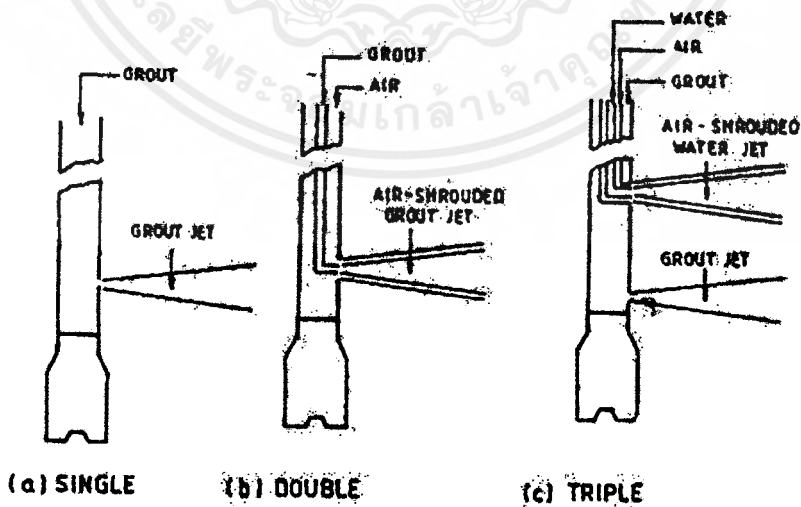
| พารามิเตอร์ สำหรับ Jet Grouting | หน่วย | Single Tube | Double Tubes | Triple Tubes |
|---------------------------------|----------------------|-------------|--------------|--------------|
| แรงดันในการฉีด | | | | |
| แรงดันน้ำ | Mpa | PW | PW | 30-55 |
| แรงดันน้ำปูน | Mpa | 30-55 | 30-55 | 1-4 |
| แรงอัดอากาศ | MPa | Not Used | 0.7-1.7 | 0.7-1.7 |
| อัตราการไหล | | | | |
| แรงดันน้ำ | ลิตร/นาที | PW | PW | 70-100 |
| แรงดันน้ำปูน | ลิตร/นาที | 60-150 | 100-150 | 150-250 |
| แรงอัดอากาศ | ม ³ /นาที | Not Used | 1-3 | 1-3 |
| ขนาดNozzle | | | | |
| ฉีดน้ำ | มิลลิเมตร | PW | PW | 1.8-2.6 |
| ฉีดน้ำปูน | มิลลิเมตร | 1.8-3.0 | 2.4-3.4 | 3.5-6.0 |
| จำนวนของรูฉีดน้ำ | | PW | PW | 1-2 |
| จำนวนของรูฉีดน้ำปูน | | 2-6 | 1-2 | 1 |
| อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ | | | 0.8-1 to 2-1 | |
| ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ | กก/ม | 200-500 | 300-1000 | 500-2000 |
| | กก/ม ³ | 400-1000 | 150-550 | 150-650 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Kauschinger and Walsh , 1989) (ต่อ)

| | | | | |
|-----------------------------|-----------|---------|---------|---------|
| ความเร็วการหมุนก้าน เจาะ | รอบ/นาที | 10-30 | 10-30 | 3-8 |
| อัตราการยก | นาที/เมตร | 3-8 | 3-10 | 10-25 |
| เส้นผ่าศูนย์กลางเสา | | | | |
| ดินเม็ดหยาบ | เมตร | 0.5-1.0 | 1.0-2.0 | 1.5-3.0 |
| ดินเม็ดละเอียด | เมตร | 0.4-0.8 | 1.0-1.5 | 1.0-2.0 |
| กำลังเสาเข็มดินซีเมนต์ | | | | |
| ดินทราย | Mpa | 10-30 | 7.5-15 | 10-20 |
| ดินเหนียว | Mpa | 1.5-10 | 1.5-5.0 | 1.5-7.5 |

* PW= การฉีดน้ำที่ใช้สำหรับการทำลายโครงสร้างของดินเดิม(Kauschinger and Walsh,1989)

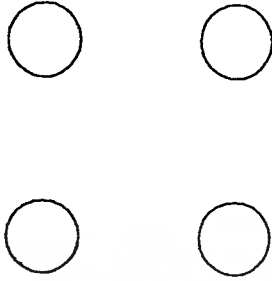


รูปที่ 2.2 Jet Grouting Method (Burke et al , 1989)

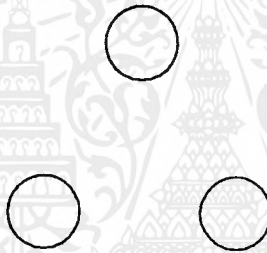
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ลักษณะการจัดตำแหน่งของการทำเสาเข็มดินซีเมนต์(Matrix For Jetting)

1) Square Grid ใช้ในงานฐานราก



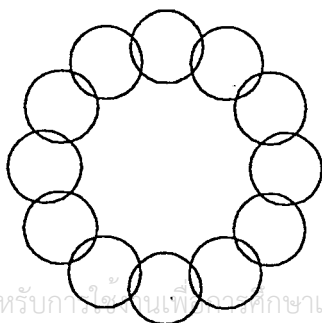
2) Triangular Grid ใช้ในงานฐานราก



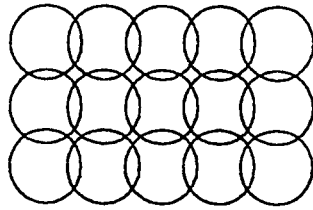
3) Continuous ใช้ในงานกำแพงกันดินและกำแพงที่บ้น้ำ



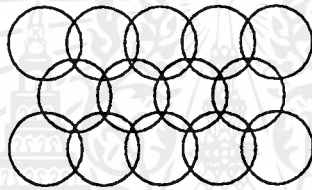
4) Ring ใช้ในงานปล่องและงานอุโมงค์ (Shaft and Tunnel)



5) Continuous Square Grid ใช้ในงานกำแพงกันดิน



6) Continuous Triangular Grid ใช้เป็นกำแพงกันดินและกำแพงที่บ้น้ำ



Jet Grouting ยังสามารถพัฒนาเทคนิคพิเศษ เพื่อให้สามารถควบคุมขนาดหรือเพิ่มขนาดของเสาเข็มซีเมนต์และเพิ่มประสิทธิภาพการผสม อาทิเช่น

1. Slurry With Air Jetting Method เป็นการฉีดพ่นอากาศรอบลำน้ำปูนซีเมนต์ ลดการสูญเสียพลังงานจลน์ของน้ำปูนซีเมนต์ ทำให้ได้เสาเข็มซีเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นประมาณ 2-2.5 เท่าของวิธีปกติ และอากาศจะช่วยให้การผสมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2. Power Swing Jetting Method เป็นการเพิ่มขนาดโดยย้ายตำแหน่งหัวฉีดไปติดตั้งที่ปลายของใบกวาน (Blade) เกิดพฤติกรรม Jet Grouting บริเวณรอบนอก บริเวณภายในเกิดการผสมโดยใบมีดเหล็ก (Mechanical Mixing) ขนาดที่เพิ่มประมาณ 2 เท่าของวิธีปกติ
3. Jetting and Mechanical Mixing Method เป็นการผสมร่วมกันของ Jet Grouting และ Mechanical Mixing ประสิทธิภาพในการผสมจึงดีขึ้นอย่างมาก ทั้งยังสามารถจำกัดขอบเขตการผสมให้คงที่ จึงประกันได้ว่า Soil Cement Column มีความสม่ำเสมอ (Homogeneous) ตลอดต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ข้อดี-ข้อเสีย ของการทำ Jet Grouting

2.8.1 ข้อดีของงาน Jet Grouting

- 1) ใช้ได้กับพื้นดินที่มีขนาดใหญ่ จากดินอ่อนที่มีค่า STP น้อยกว่า 1 จนถึงดินทรายและดินเหนียวที่มีค่า STP จนถึง 50
- 2) ทำงานได้สะดวก รวดเร็ว และในขณะที่มีความต้องการที่จะทำงานในพื้นที่แคบ ๆ
 - พื้นที่วางสำหรับเครื่องยนต์ 3.00 เมตร
 - เครื่องเจาะใช้พื้นที่ 2 x 2 ตารางเมตร
- 3) ระบายดินด้านข้างน้อย การเจาะนี้จะทำให้เกิดการสั่นเพียงเล็กน้อย
- 4) มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี และไม่ทำลายสภาพแวดล้อม เครื่องยนต์จะมีเสียงเบา จึงสามารถทำงานก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ต่อเนื่องกันได้ทั้งกลางวันและกลางคืนโดยไม่รบกวนต่อความสงบสุขของชุมชน
- 5) ช่วยเพิ่มกำลังของดิน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กำลังและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ JGP (สราวุธ จริตงาม, 1998)

| ชนิดของดิน | ดินหลังปรับปรุง Compressive Strength | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Column |
|------------------|---|------------------------------------|
| ดินเหนียวอ่อน | 1-3 N/mm ² | 1600 ± 200 mm |
| ดินเหนียว | 3-5 N/mm ² | 2000 ± 200 mm |
| ทราย N < 15 | | 1600 ± 200 mm |
| ทราย 15 ≤ N < 30 | | 1600 ± 200 mm |
| ทราย 30 ≤ N < 40 | | 1200 ± 200 mm |
| ทราย 40 ≤ N < 50 | | 1000 ± 200 mm |

6) ด้านเศรษฐศาสตร์ สามารถควบคุมคุณภาพและพื้นที่ที่จะทำการ Jet Grouting ได้

7) สามารถทำให้ดินแข็งตัว (Solidification) ได้เฉพาะในช่วงความลึกของชั้นดินที่ต้องการปรับปรุงเท่านั้น จึงสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในงานปรับปรุงดินลงได้เนื่องจากไม่ต้องทำเสาเข็มดินซีเมนต์ให้ยาวต่อเนื่องขึ้นมาถึงชั้นผิวดินเสมอไป โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีความจำเป็นต้องใช้เสาเข็มรับแรงอัดดินในส่วนบน โดยทั่วไปชั้นดินที่ต้องการปรับปรุงมักเป็นดินเหนียวอ่อนดินทรายหรือดินทรายแป้ง (Silt) ที่หลวมหรือมีน้ำซึมผ่านได้ง่าย

8) สามารถปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเครื่องเจาะที่ทำงานได้ทั้งในแนวตั้ง แนวเฉียง แนวราบและในมุมเอียง

9) สามารถเจาะผ่านก้อนหินลอย (Boulder) ที่ฝังจมอยู่ในมวลดินได้ และทำให้ดินรอบก้อนหินแข็งตัวยึดก้อนหินลอยนั้นไว้กับกลุ่ม Jet Grouting Pile

10) Jet Grouting Pile ที่สร้างขึ้นจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามอายุ จะช่วยทำให้ฐานรากมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน

11) เพิ่มปริมาตรให้มวลดินทำให้ดินในบริเวณที่ทำ Jet Grouting Pile สูงมากขึ้น สามารถลดปริมาณงานถม

12) สามารถนำ Jet Grouting มาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินได้ทุกชนิด รวมไปถึง silt, clay และ weak rock

13) สามารถเข้าถึงชั้นดินที่มีปัญหาด้านวิศวกรรม ณ ความลึกต่าง ๆ

14) คุณภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์ แนวเขตการปรับปรุง และราคาสามารถทำนายได้แม่นยำ

15) การปรับปรุงไม่จำเป็นต้องกระทำจนถึงผิวดิน ซึ่งเป็นการก่อสร้างเลย critical load ที่กระทำโดยไม่จำเป็น

16) ไม่เกิดการบวมตัวของดิน (ground heave)

2.8.2 ข้อเสีย

1) ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากในการตรวจสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์

2) กำลังมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต

3) กำลังของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตะกอนทรายและดินเหนียว
ในดินเดิม

4) ถ้าระดับน้ำใต้ดินมีอัตราการรั่วซึมสูงซีเมนต์อาจถูกชะล้างออกก่อนที่จะแข็งตัว

5) เครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้มีราคาแพง

6) ยังไม่มีมาตรฐานกำหนด(วสท.)สำหรับการนำ วิธีการนี้ไปใช้งานในการปรับปรุงดิน

7) เป็นแนวคิดใหม่สำหรับประเทศไทยเป็นเหตุให้ขาดแคลนบุคลากรที่มีความรู้
ความเข้าใจ



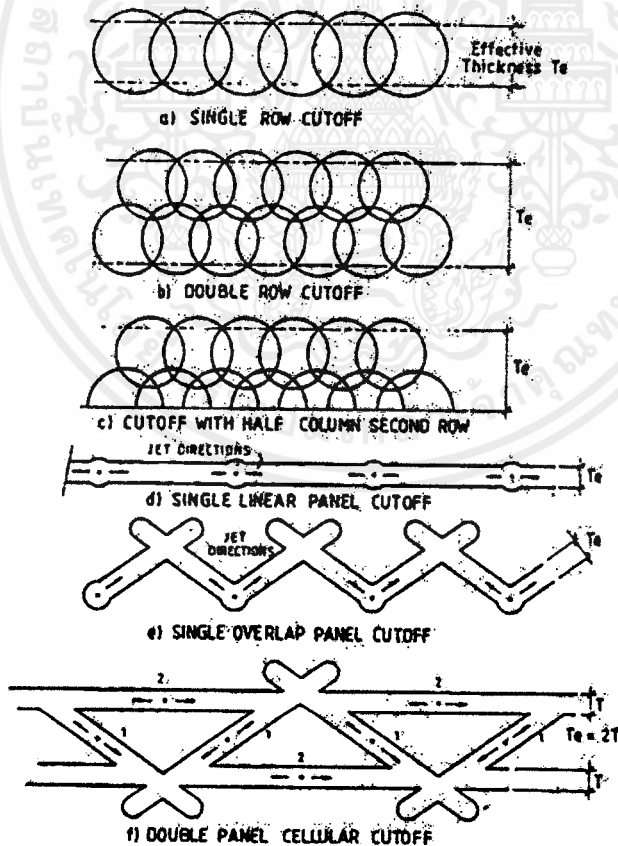
บทที่ 3

การประยุกต์ใช้ Jet Grouting

3.1 ในต่างประเทศ

3.1.1 งานควบคุมกันซึมของน้ำใต้ดิน (Groundwater Control)

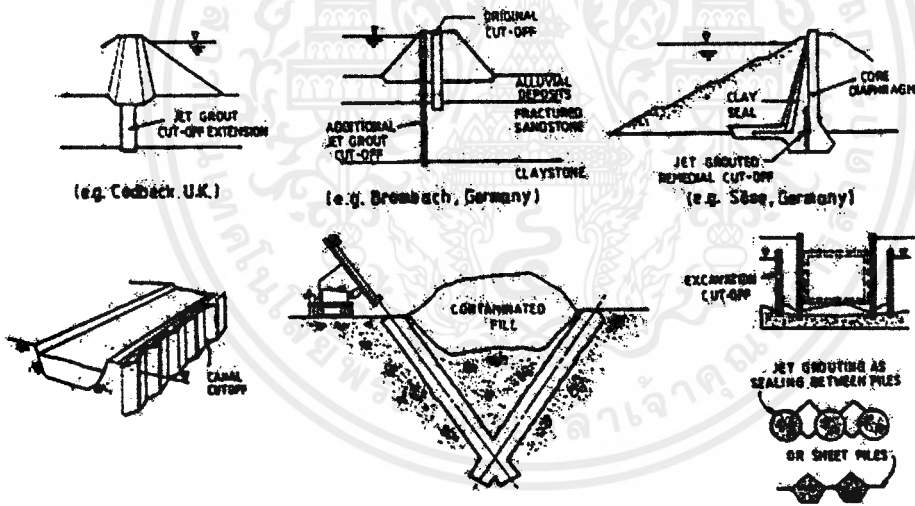
สำหรับการประยุกต์ใช้ Jet Grouting ในงาน Groundwater Control ที่แพร่หลาย เพื่อลดการไหลเข้าของน้ำไม่ว่าจะเป็นงานขุดดินชั่วคราวซึ่งทำเป็นกำแพงกัน (Rudimentary barrier) หรือว่างานกำแพงที่บ่าน้ำถาวรในงานเขื่อน เพื่อให้ความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำน้อยลง และเพิ่มความแข็งแรงให้กับฐานรากเขื่อน



รูปที่ 3.1 แสดงชนิดและการวางตำแหน่งของ Jet Grouting Pile (Bell,A.L.,1992)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำแพงที่บ้น้ำสามารถสร้างเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์เหลื่อมกัน (over lapped column) แผงกัน (panels) หรือ wing โดยวิธี Jet Grouting ดังแสดงในรูป 3.1 โดยทั้ง 3 ลักษณะสามารถทำในระนาบเฉียงได้ดีพอ ๆ กับระนาบตั้ง และไม่จำเป็นที่จะต้องมีการปรับแนวดินซีเมนต์ปรับปรุงทุกทิศทางของพื้นผิว รูปวางขึ้นกับความต้องการ การสร้างกำแพงหนา ๆ โดยใช้ column อาจจำเป็นในกรณีที่ต้องการความมีเสถียรภาพหรือกันการซึม (stability and sealing) ในขณะที่การสร้างโดยใช้ panel cut-off อาจมีความเหมาะสมมากกว่าเมื่อมีความจำเป็นเพียงแต่การลดการไหลของน้ำใต้ดิน (water flows reduced) ความลึกของผนังกำแพงก็เป็นสิ่งที่ต้องการพิจารณาเช่นกัน เนื่องจากลักษณะของปริมาตรดินที่ทำการปรับปรุงและแนวการเจาะอาจเป็นตัวกำหนดชนิดของการสร้างได้เช่นกัน กำแพงที่บ้น้ำที่สร้างขึ้นโดยใช้ Jet Grouting ได้นำไปใช้ในการสร้างเขื่อนใหม่ งานซ่อมบำรุงสำหรับเขื่อนเดิมที่กำลังใช้งานอยู่ ในงานดินถม งานป้องกันการไหลของน้ำในงานขุดดินหรืออุโมงค์ และในงานซ่อมแซมและป้องกันแนวคลองหรือแม่น้ำ ดังแสดงในรูป 3.2

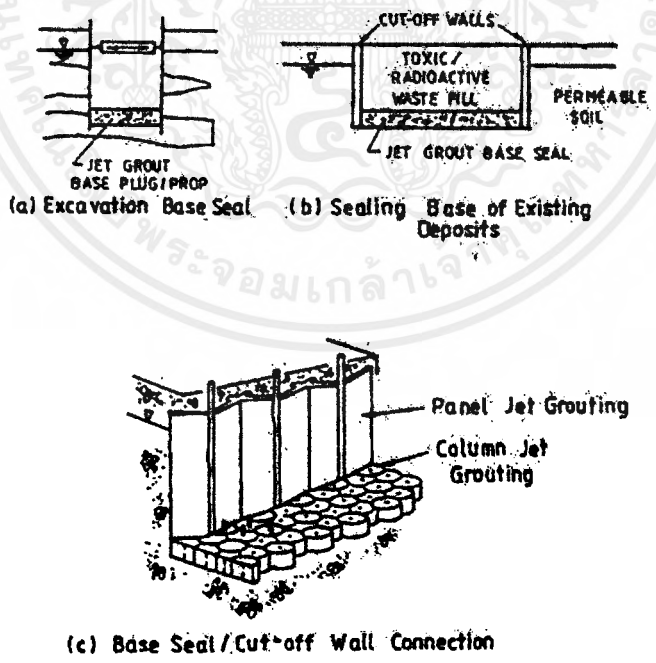


รูปที่ 3.2 การประยุกต์ใช้ Jet Grouting Pile ในงานกำแพงที่บ้น้ำ(Bell,A.L.,1992)

งาน Jet Grouted Base Seal มักใช้กับพื้นที่กว้างมาก เพื่อกันน้ำซึมที่ฐานก็มีการประยุกต์ใช้หลายรูปแบบ ดังแสดงในรูป 3.3 การวางผังเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับกันซึมที่ฐาน แสดงในรูป 3.4 ความหนาต่ำสุด คือ 50 เซนติเมตรได้แนะนำให้ใช้ในงานขุดดินชั่วคราว และสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์ชิดกันในแต่ละต้นดังแสดงข้างต้น เพื่อมั่นใจว่าเพิ่มความสามารถ

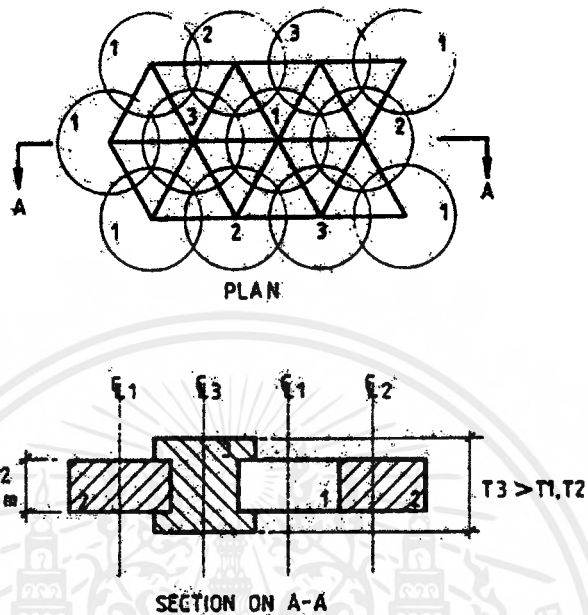
ในการกันซึมได้ดีขึ้น Jet Grouting สามารถนำไปใช้ในการสร้าง base slab สำหรับงานเริ่มต้นขุดดิน โดยสร้างต่อโดยตรงกับผนังกำแพงโดยรอบ (sheet piles, secant piles, diaphragm walls, etc) เพื่อที่จะให้การกันซึมมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพราะว่าในการทำ Erosive Jet เฉพาะที่จะทำความสะอาดผนังกำแพงให้ทั่วก่อนและในขณะที่ทำการ Grout placement สิ่งกีดขวางต่าง ๆ สามารถปล่อยให้อยู่ภายใน Jet Grout Slab โดยไม่จำเป็นต้องเคลื่อนย้ายออก สำหรับการประยุกต์ใช้อื่น ๆ สำหรับ Jet Grout เช่น ใช้เป็น Temporary Props ในงานขุดดินและบริเวณที่เคลื่อนที่จำกัด เนื่องจากมี สารพิษ หรือ ส่วนประกอบของรังสีที่เป็นอันตรายโดยการประยุกต์ใช้ในงานเหล่านี้ จะต้องให้ความหนาพื้นมากกว่า 50 เซนติเมตร ถ้ามีความจำเป็น

ข้อกำหนดของงานกำแพงกันดิน (earth retention) หรือ กำแพงกั้นน้ำ (Cut-Off wall) ที่มีประสิทธิภาพได้นำมาใช้แก้ปัญหาในบริเวณท่อส่งต่างๆ เช่น ก๊าซ, น้ำ, ไฟฟ้า เป็นต้น ในงานขุดดินช่องเปิดที่จำเป็นในงาน Excavation support wall ที่สร้างจาก Diaphragm walls หรือ Piling สามารถป้องกันการซึมได้ง่ายมากเมื่อใช้ Jet Grouting



รูปที่ 3.3 การสร้าง Jet Grouting Pile ที่ฐานเพื่อกันการซึมร่วมกับผนัง (Bell,A.L.,1992)

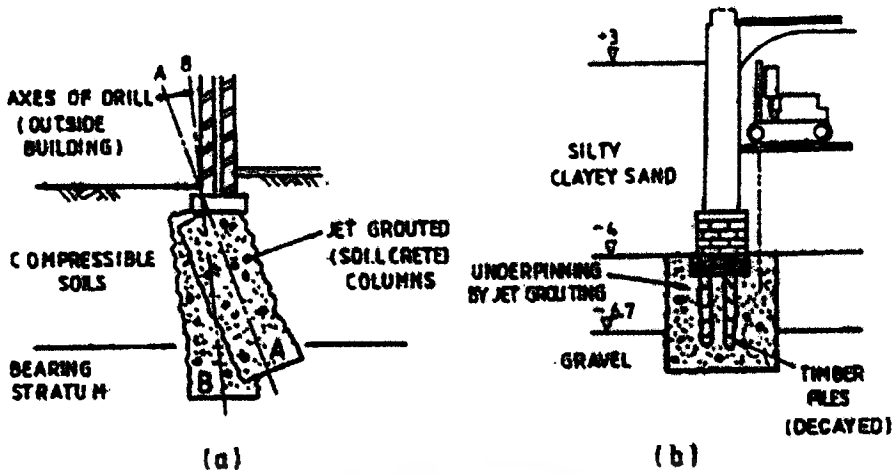
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แบบและหน้าตัดของ JGP สำหรับงานกันซึมที่ฐาน (Bell, A.L., 1992)

3.1.2 งานโครงสร้างฐานราก (Underpinning)

โครงสร้างฐานรากของอาคารต่าง ๆ โดยการใช้ Jet Grouting ได้นำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติด้านลักษณะที่เปลี่ยนแปลงได้ในตัวมันเองและใช้ได้กับดินทุกชนิด และง่ายต่อการเข้าถึงโดยไม่จำเป็นต้องขุดถึงฐานรากที่ใช้อยู่ (e.g. Coomber and Wright, 1984 ; Bunmann and Samol, 1980 ; shibazaki and ohta, 1982) กำลังของดินที่ทำการปรับปรุง ในตารางที่ 3.1 จะเห็นว่ามีความสามารถในการรับแรงได้อย่างมาก การเข้าถึงแนวที่ต้องการปรับปรุง โดยการเจาะในแนวเฉียง โดยผ่านยังส่วนล่างของผนังส่วนนอก และฐานรากเพื่อความมั่นใจในการ grout ที่ดีแก่ฐานรากเดิม ดังรูป 3.5(a) การถ่ายแรงอย่างสม่ำเสมอไปยังชั้นดินต่ำกว่าที่เหมาะสมเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการเจาะมีความลึกอย่างเพียงพอ โครงสร้างฐานรากที่สร้างโดย Jet Grouting ยังสามารถทำได้โดยการเจาะจากภายในอาคารและใต้คอสพาน ซึ่งต่ำกว่าประมาณ 3 เมตร ดังรูป 3.5(b)



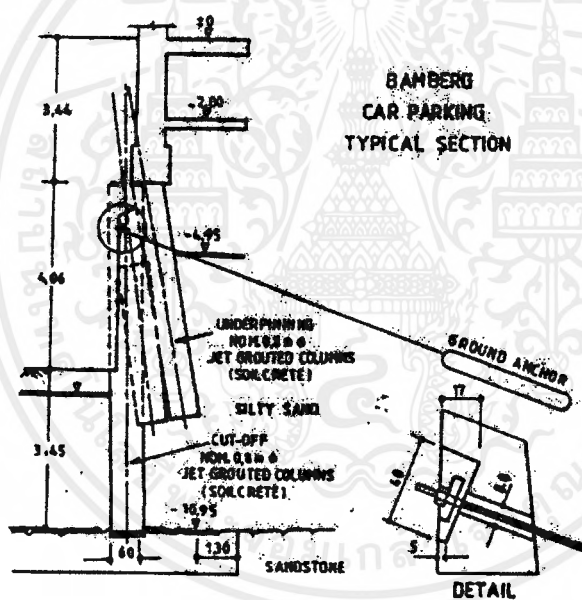
รูปที่ 3.5 การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับงานโครงสร้างฐานราก (Bell,A.L.,1992)

ตารางที่ 3.1 การประเมินค่า Compressive strength ของดินซีเมนต์ที่ได้จากการทำ Jet Grouting (สราวุธ จริตงาม,1998)

| ชนิดของดิน | กำลังอัด (นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร) | ความสามารถในการซึมผ่าน ได้ของน้ำ(K) (เมตร/วินาที) |
|------------|-------------------------------------|---|
| กรวด | 5-30 | $10^{-7} - 10^{-9}$ |
| ทราย | 5-25 | $10^{-7} - 10^{-10}$ |
| ตะกอนทราย | 4-18 | $10^{-7} - 10^{-10}$ |
| ดินเหนียว | 0.5-8 | $10^{-7} - 10^{-10}$ |

Jet Grouting ยังนำมาใช้ในส่วนโครงสร้างฐานรากที่เป็นฐานรากเข็มไม้เก่าแล้ว ซึ่งสามารถเกิดการทรุดตัวได้หลังจากใช้งานมานานหลายปีจนหมดสภาพสำหรับไม้ และตำแหน่งเหนือระดับน้ำใต้ดินถาวรที่อาจเน่าเปื่อยเมื่อถึงเวลา การนำ Jet Grouting มาใช้ขึ้นอยู่กับความกว้างโดยส่วนใหญ่สามารถสร้างเป็นส่วนโครงสร้างได้ดีเชื่อมต่อเชื่อมระหว่างด้านล่างของ pile cap กับ ชั้นความลึกที่เหมาะสมโดยไม่จำเป็นต้องถอนเข็มไม้เก่าออกเลย ซึ่งจะกลายเป็นส่วนที่อยู่ในมวล Jet Grout ดังรูป 3.5(b) ในทำนองเดียวกันกับเสาเข็มชนิดอื่นที่นอกจากเสาเข็มไม้เก่าๆ ก็ สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน

Jet Grouting ได้นำไปประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดี ในงานก่อสร้างห้องใต้ดินหรืองานขุดดิน บริเวณกว้างอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้อาคารหรือส่วนโครงสร้างอื่น ๆ หน้าที่ของดินซีเมนต์ปรับปรุงไม่เพียงแต่ใช้เป็นส่วนรองรับหรือโครงสร้างฐานรากแต่ยังทำหน้าที่เป็นตัวกั้นน้ำหรือกั้นดินถาวรและชั่วคราว ดังรูป 3.6 ความต้องการรองรับแรงทางด้านข้างสำหรับการประยุกต์ใช้ในกรณีนี้ อาจจำเป็นต้องสร้าง Anchor ต่อเชื่อมโดยตรงกับมวล Jet Grout จำนวนและระยะห่างของ Anchor ควรตรวจสอบโดยการคำนวณเสถียรภาพ แรงที่รับโดย Anchor โดยทั่วไปอาจสูงถึง 400 KN โดยปกติจะไม่ต้องการเป็นดินปรับปรุงที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับแรงเค้นจาก Anchor สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 200 มิลลิเมตร ถึง 400 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 การใช้ Jet Grouting Pile ในงานโครงสร้างฐานรากเพื่อรองรับงานขุดดินและควบคุมน้ำใต้ดิน (Bell, A.L., 1992)

ก่อนที่จะประยุกต์ใช้ Jet Grouting เป็นส่วนโครงสร้างฐานราก มีประเด็นต่าง ๆ ที่ต้องทำความเข้าใจดังต่อไปนี้

- การออกแบบ (Design) สภาพของอาคารและโครงสร้าง และความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานรากสำหรับดินซีเมนต์ปรับปรุงที่เมื่อเสร็จใหม่ ๆ จำเป็นต้องยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เส้นผ่านศูนย์กลาง (Column Diameter) เสาค้ำดินซีเมนต์ขนาดเล็ก (ส่วนใหญ่ขนาด 1.2 เมตร หรือเล็กกว่า) ควรนำมาใช้ เมื่อระบบที่กำลังจะใช้สามารถสร้างได้แทนที่การใช้เสาค้ำดินซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า เพื่อลดปริมาตรของดินส่วนไม่จำเป็นต้องรองรับระหว่างการยกแต่ละครั้ง

- การประสานเชื่อมต่อกัน (Interlock) เสาค้ำดินซีเมนต์ ควรได้รับการออกแบบให้ประสานกัน เพื่อสร้างเป็นมวลดินปรับปรุงและลดผลกระทบจากความเปลี่ยนแปลงความแตกต่างของดินเฉพาะแห่งที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งไม่มีใครรู้

- ลำดับการก่อสร้าง (Sequence) ควรมั่นใจว่า เสาค้ำดินซีเมนต์สามารถพัฒนากำลังอย่างเพียงพอ โดยไม่มีอิทธิพลจากการสร้างเสาค้ำดินซีเมนต์ที่ใกล้กัน

- ปริมาณซีเมนต์ (Cement Content) ควรเป็นไปตามสภาพของดิน เพื่อให้มั่นใจว่าส่วนผสมในที่ (In-situ mix) จะให้กำลังอย่างเพียงพอ

- ลักษณะดินประเภทมีแรงยึดเหนี่ยว (cohesive soils) การลดกำลังลงของเสาค้ำดินซีเมนต์ หรือการลดลงของขนาด สามารถยอมรับได้สำหรับถ้าแนวปรับปรุงผ่านดินที่มีปริมาณตะกอนดิน (silt) เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ หรือเป็นดินเหนียว

- พันธะยึดเหนี่ยวระหว่าง grout - ฐานราก (Foundation-grout bond) The Erosive jet จะทำความสะอาดส่วนใต้ของฐานรากเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเหนี่ยวที่ดีกับดินซีเมนต์ และเพื่อให้มั่นใจระดับ Wet grout ต้องอยู่เหนือระดับฐานของฐานรากจนกระทั่งมีการ set ตัวเกิดขึ้น

- การเคลื่อนตัวของอาคารหรือโครงสร้าง (Movement of building/Structures) มันเป็นเรื่องจำเป็นที่ควรตรวจสอบตลอดการทำงาน Jet Grouting ตั้งแต่การเจาะ และ ฉีดน้ำปูน ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สายตาและตัวบ่งชี้เบื้องต้นในการเกิด heave หรือ settlement เกินค่าที่ยอมรับได้

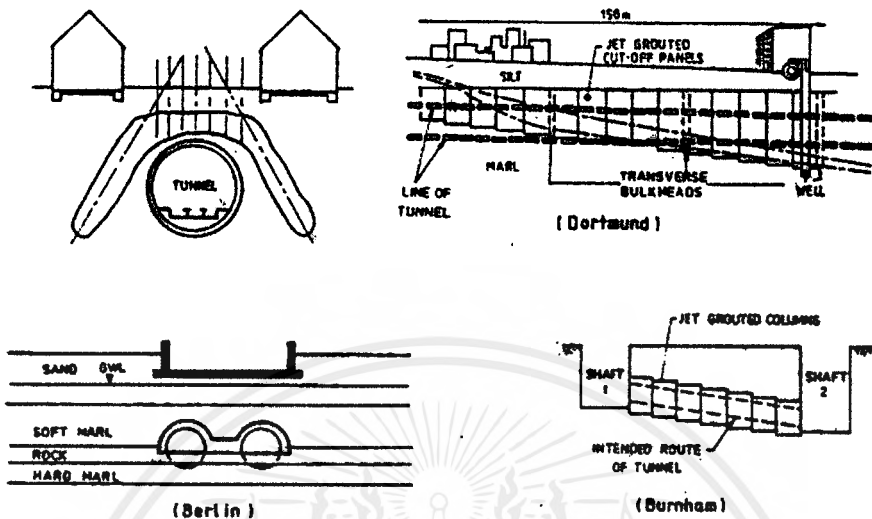
3.1.3 Tunnels and Shafts

การขุดอุโมงค์ไปตามระยะทางไกล ๆ และส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงระดับระหว่างที่สภาพของดินเปลี่ยนแปลงในอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ Jet Grouting จึงเป็นรูปแบบการปรับปรุงที่ตรงกับปัญหาอย่างยิ่ง เนื่องจากความง่ายในการเข้าถึงและความสามารถในการปรับปรุงดินได้ในช่วงกว้าง อีกทั้งไม่มีปัญหาในเรื่องสิ่งกีดขวาง (Obstacles) หรือการขัดขวางในรูปของท่อ (Pipe) และยังใช้ในการอำนวยความสะดวกในการขุดอุโมงค์ในดินที่ขุดยากลดประสิทธิภาพของการจมอยู่ข้างใต้ซึ่งมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุมาจากการขุดอุโมงค์ และในงานซ่อมบำรุงอุโมงค์ที่กำลังใช้งานอยู่ (Coomber, 1985 a ; Tomaghi and Cippo, 1985)

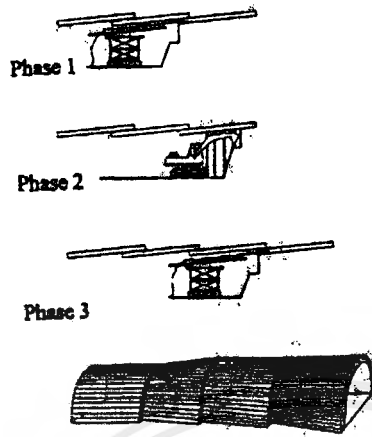
เพื่อให้สามารถขุดอุโมงค์ ณ ความลึกต่าง ๆ ได้อย่างปลอดภัย ควรเสริมฐานรากในส่วนโครงสร้าง และอาคารที่อยู่ใกล้เคียงดังที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้ โครงสร้างฐานรากสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุโมงค์ได้เช่นกัน ในบางกรณีมันถูกใช้เพื่อรับประกันว่าอุโมงค์ที่ใช้งานอยู่จะไม่พังเสียหายระหว่างการสร้างอุโมงค์ใหม่ผ่านบริเวณใกล้ ๆ ในกรณีอื่น ๆ โครงสร้างฐานราก (Underpinning) ยังนำมาใช้ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการทรุดตัวในขนาดต หรือการผิดรูปไป (Distortion) หรืออุโมงค์ที่ใช้อยู่ที่อาจมีปัญหาเกี่ยวกับฐานรากหลังจากผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานานหลายปี (e.g. Coomber, 1985 a, b ; Riddell, 1986) การปรับปรุงสามารถทำให้บรรลุผลโดยการเจาะจากผิวดิน หรือจากภายในอุโมงค์ตามความเหมาะสม

การป้องกันผลกระทบจากการจมตัวของอุโมงค์ที่ขุดสามารถบรรลุได้ โดยการสร้างดินซีเมนต์อาจเป็นแบบ arches หรือ vaults เหนือหลังคาอุโมงค์ ซึ่งสามารถสร้างได้ในหลาย ๆ ทาง ดังรูป 3.7 บล็อกขนาดใหญ่ของดินสามารถสร้างห่อหุ้มล้อมหน้าตัดอุโมงค์ได้พอดีหรือเป็นส่วนในดินที่ไม่มีเสถียรภาพ นี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดการเคลื่อนตัวของดิน เนื่องจากการขุดอุโมงค์ แต่ยังสามารถดำเนินการขุดดินต่อไป แม้จะผ่านบริเวณดินที่ไม่มีเสถียรภาพหรือสภาพที่ต้องกั้นน้ำ (รูป 3.7) (Raabe and Toth, 1989) ในกรณีมวลดินปรับปรุงมีลักษณะบล็อกคั่นข้างใหญ่ ซึ่งจำเป็นในกรณีนี้และโดยทั่วไปมักใช้ระบบ Triple หรือ Double เพื่อสร้างเสาเข็ม Jet Grout ขนาดใหญ่ที่สุดที่เหมาะสมสำหรับสภาพนั้น ๆ โดยส่วนใหญ่มีเกิน 1.2 เมตร กำลังรับน้ำหนักจำเป็นต้องสูงเพียงพอที่จะให้เสถียรภาพแก่ดินและต่ำพอที่จะอำนวยความสะดวกในงานขุดดินอุโมงค์ และโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1 ถึง 5 N/mm² กำแพงที่บ้น้ำกระทำได้ขึ้นเพื่อแยกอาคารต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้แนวอุโมงค์จากผลกระทบของการไหลของน้ำเพื่อช่วยในงานขุดอุโมงค์ (รูป 3.7)



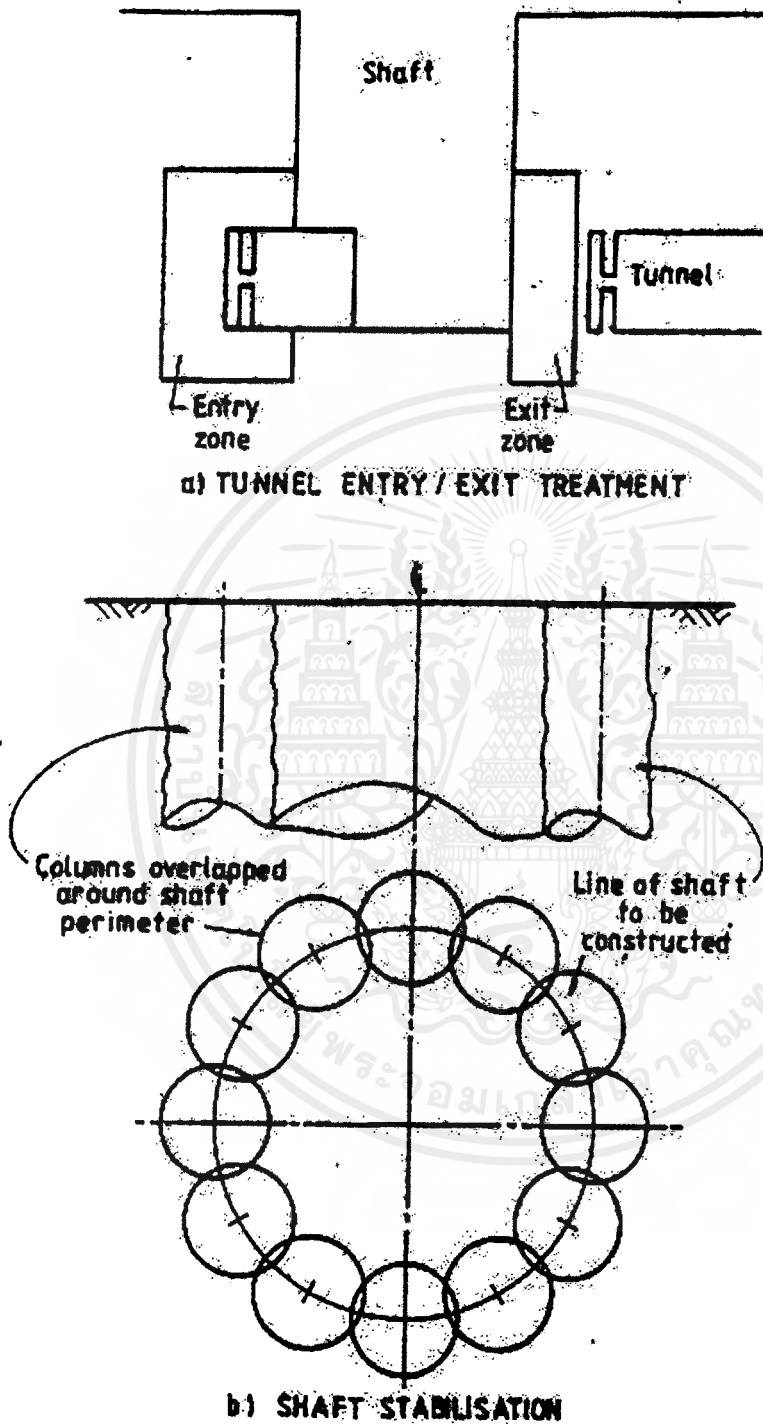
รูปที่ 3.7 Jet Grout block เพื่องานขุดอุโมงค์ (Bell, A.L., 1992)

เมื่อการเข้าถึงจากผิวดินเป็นสิ่งที่ยากลำบาก เนื่องจากผลของการลาดชันของดินหรือการมีอยู่ของถนน รางรถไฟ หรือ อาคารใหญ่ๆ ซึ่งอาจจำเป็นต้องเข้าไปถึงแนวที่จะสร้างเสถียรภาพจากภายในอุโมงค์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการสร้าง arch โดยการใส่เสา Jet Grout ในแนวราบย่อยๆ ระยะประมาณ 10-15 เมตร เหนืออุโมงค์ ดังรูป 3.8 (e.g. Dugnani et al, 1989 ; Tomaghi and Cippo, 1985) เมื่อมีการสร้าง arch ครั้งหนึ่ง การขุดอุโมงค์จะก้าวหน้าไปภายในช่วง 2-3 เมตรของช่วงปลายของความยาวที่ปรับปรุง หลังจากนั้นจึงทำการเจาะ และ ฉีดน้ำปูน เพื่อสร้าง arch ใหม่ การขุดในแต่ละช่วงจะตามด้วยการติดตั้ง steel supports และ shotcreting การสร้างเสาอย่างรวดเร็วโดยการฉีดน้ำในอัตราต่ำสุดและการรบกวนดินต่ำสุดระหว่างการฉีดน้ำปูน สามารถสร้างเสา Jet Grout เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4-0.7 ม. โดยใช้ระบบ Single ซึ่งเหมาะสม



รูปที่ 3.8 การสร้างเสถียรภาพแก่อูโมงค์โดยการสร้าง Jet Grouting Pile ในแนวขวาง
(Bell,A.L.,1992)

Jet Grouting ยังเป็นประโยชน์มาก ณ ตอนเริ่มต้นและสิ้นสุดของการเจาะอุโมงค์ รูปที่ 3.9 ช่องทางเข้าของดินปรับปรุง ทำให้มั่นใจว่าการเคลื่อนที่จากปล่องทางเข้า (access shaft) ไปยังอุโมงค์ และการเริ่มต้นขุดอุโมงค์จะเกิดขึ้นในสภาพที่คาดการได้บล็อค Jet Grout ยังนำไปใช้เป็นส่วนรองรับที่เพียงพอสำหรับงานเริ่มต้นเครื่องจักร



รูปที่ 3.9 การสร้างเสถียรภาพแก่ Shaft ในงานอุโมงค์(Bell,A.L.,1992)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

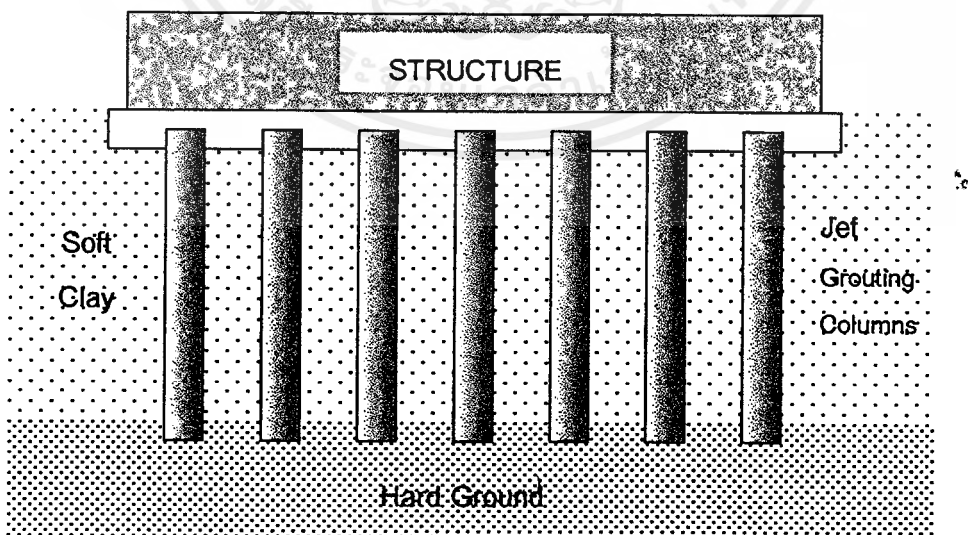
3.2 ในประเทศไทย

เนื่องจากตัวคุณสมบัติของวัสดุผสมซีเมนต์ที่สามารถพัฒนาความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากดินเดิม ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดินโดยรอบ โดยไม่สูญเสียความแข็งแรงไปเมื่อระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นเนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นของโครงสร้างในมวลดินอย่างถาวร และไม่ย้อนกลับสู่สภาพดินอ่อนอีก (irreversible process) แม้เมื่อวัสดุผสมดินซีเมนต์ จะชุ่มน้ำถึงขั้นอิ่มตัว เนื้อของเสาเข็มดินซีเมนต์จะรักษาความแข็งแรงไว้ได้อย่างคงทนเป็นเวลายาวนานตราบเท่าที่ยังไม่มีการรบกวนทางเคมีจากสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อสารเชื่อมประสาน ซึ่งก่อตัวจับยึดโครงสร้างของมวลดินอยู่ (สมชัย กกกำแหง, 2539) อีกทั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์สำหรับการทำ Jet Grouting ที่มีการควบคุมการทำงานอัตโนมัติ และผลลัพธ์ที่น่าพอใจอย่างยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านการรับน้ำหนัก ความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำ การเชื่อมอำนวยการประโชยน์ต่อการทำงาน หรือแม้แต่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรอบข้าง เป็นต้น ทำให้ Jet Grouting ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้นสำหรับประเทศไทย

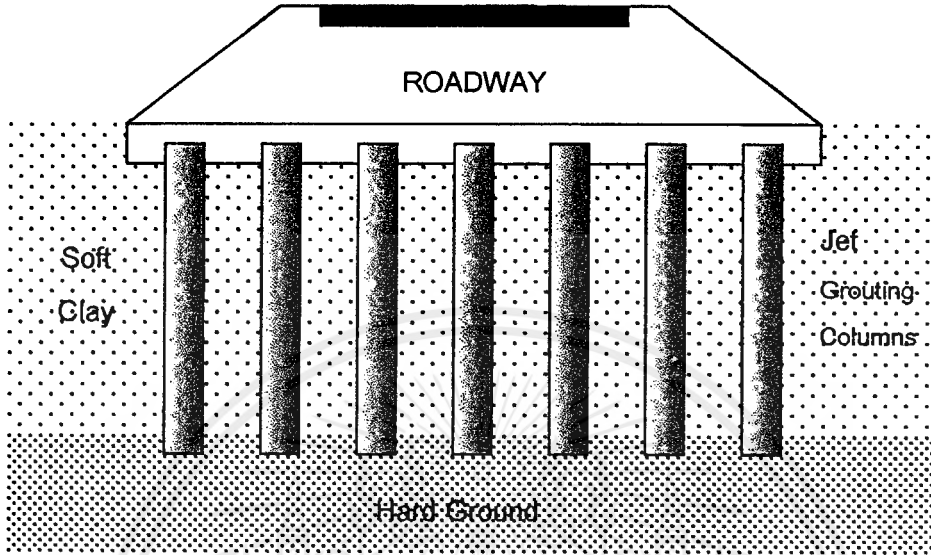
การประยุกต์ใช้ Jet Grouting แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งาน 4 ลักษณะดังนี้

3.2.1 ใช้เป็นส่วนโครงสร้างฐานราก (Foundation Member) ได้แก่

3.2.1.1 ใช้เป็นส่วนฐานรากของโครงสร้างอาคาร (Piles for structure)

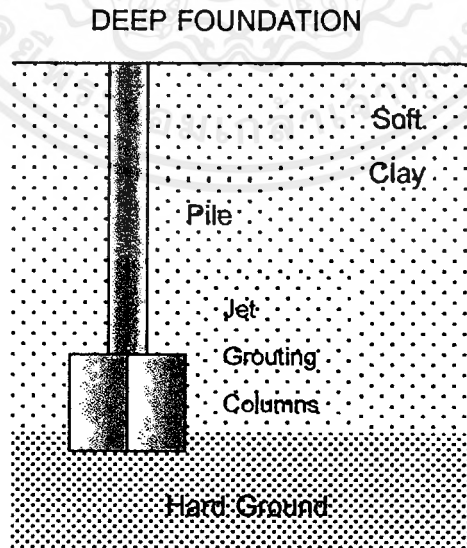


3.2.1.2 ใช้เป็นส่วนฐานรากของถนน (Pile for roadway)

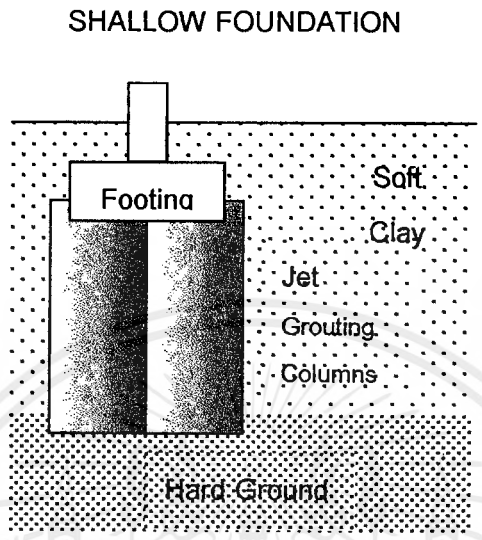


3.2.2 ใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพของฐานราก (Foundation Improvement) ได้แก่

3.2.2.1 ใช้ปรับปรุงฐานรากลึก (improve in deep foundation)



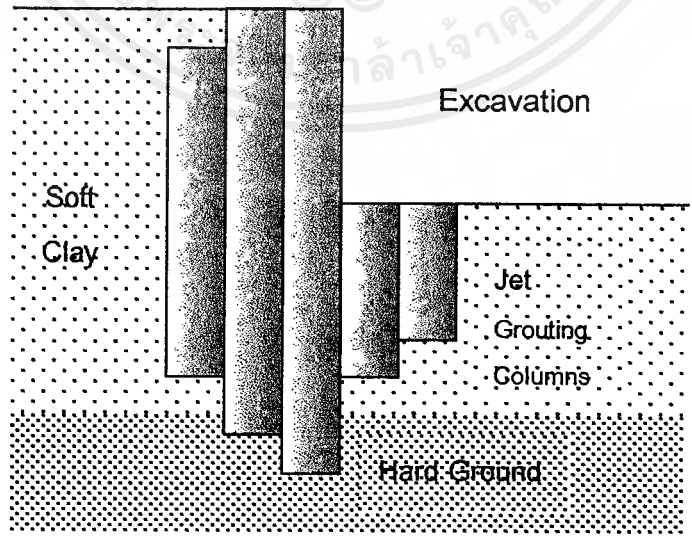
3.2.2.2 ใช้ปรับปรุงฐานรากตื้น (improve in shallow foundation)



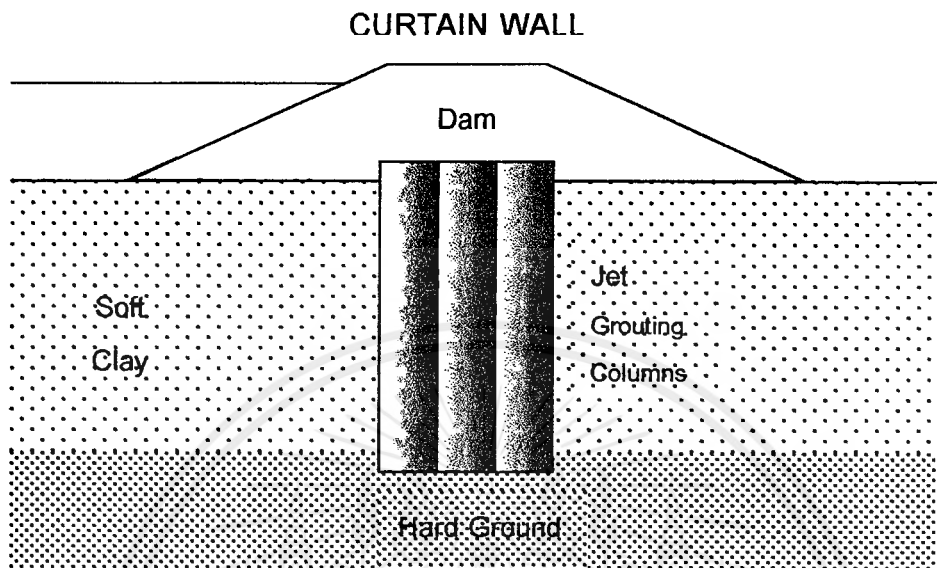
3.2.3 ใช้ในงานระบบกำแพงกั้นน้ำและกันดิน (Retaining System & Cutoff) ได้

แก่

3.2.3.1 สำหรับงานขุดดิน (Excavation)

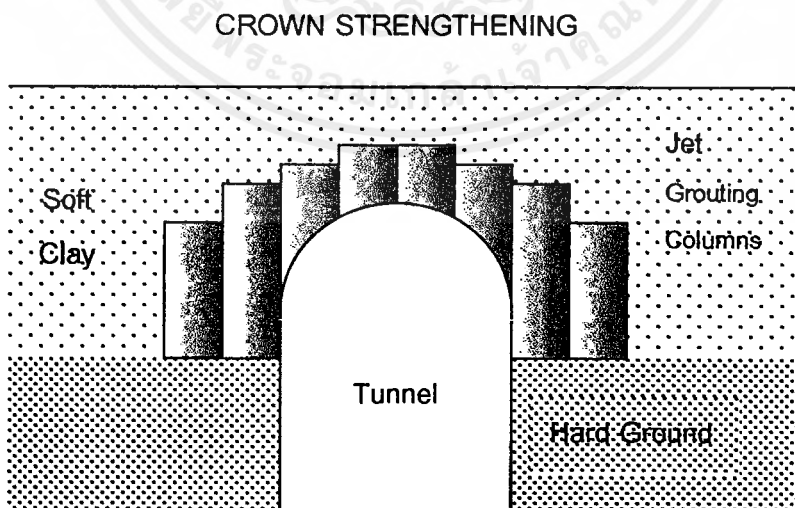


3.2.3.2 สำหรับงานเขื่อน (Curtain wall in dam)



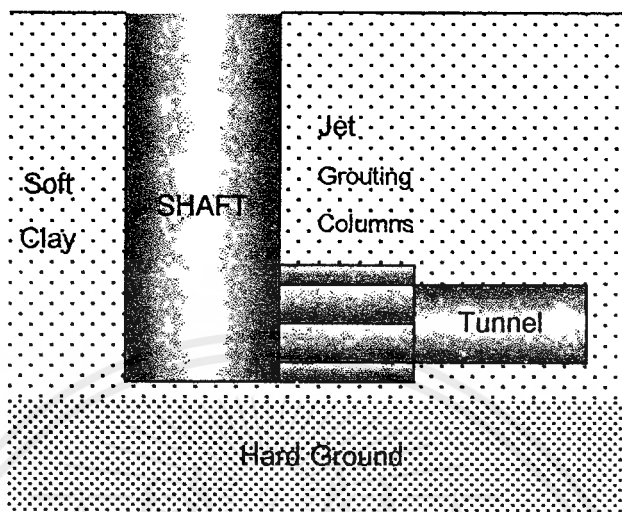
3.2.4 ใช้ในงานอุโมงค์ (Tunneling) ได้แก่

3.2.4.1 งานเสริมความแข็งแรงครอบอุโมงค์ (Crown strengthening)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.2 งานสร้างเสถียรภาพให้แก่ทางเข้าอุโมงค์ (Tunnel approach)



บทที่ 4

การออกแบบ

การออกแบบ Jet Grouting Pile (JGP) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบที่ขึ้นกับประเภทของการใช้งานเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน และการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการ Jet Grout เช่น อัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อปริมาณน้ำ แรงดัน Cement Grout อัตราการหมุนก้านเจาะ เป็นต้น

4.1 การออกแบบเสาเข็ม Jet Grouting Pile แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ ขึ้นกับประเภทการใช้งาน ได้แก่

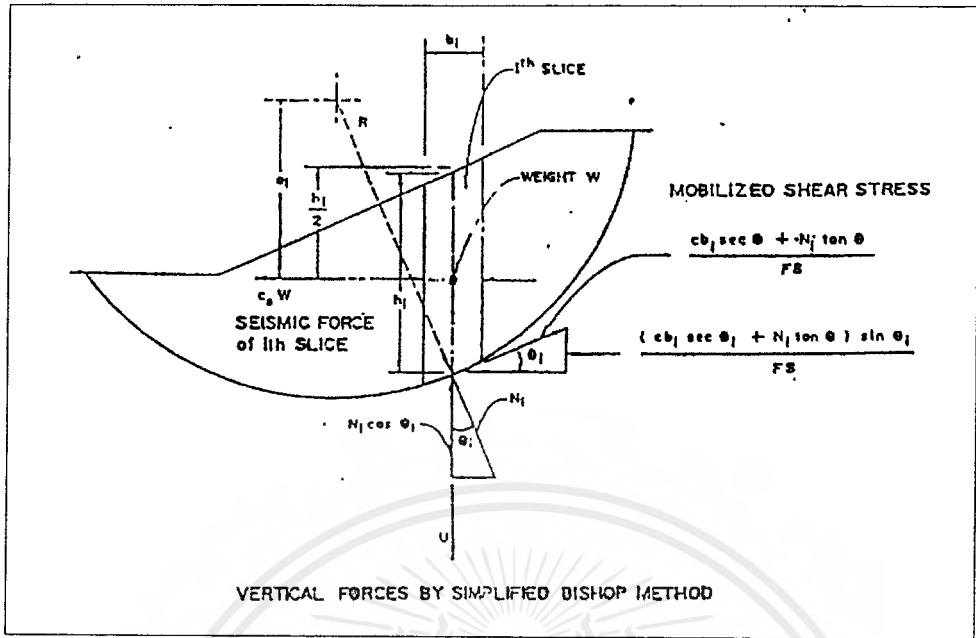
4.1.1 การออกแบบเสาเข็ม Jet Grouting Pile เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของความลาด (Slope Stability)

งานแก้ไขหรือป้องกันการพังทลายของเชิงลาด จะออกแบบโดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาดโดยใช้วิธีการ Bishop หรือวิธีของ Spencer สำหรับงานขุดดินในแนวตั้ง การออกแบบต้องใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงลาด และวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินโดยใช้ Finite Element Method หนึ่งในวิธีการออกแบบ Jet Grouting Pile ให้เป็นฐานรากอาคาร แท่งค้ำขนาดใหญ่เก็บของเหลวหรือฐานรากไฮโดร แล้วยังต้องวิเคราะห์ถึงความเค้นต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่าง Jet Grouting Pile อีกด้วย เพื่อป้องกันการเกิด Base Heave และลดการแอ่นตัวของโครงสร้างชั่วคราวของ Retaining Structure ในกรณีงานขุดลึก สำหรับงานป้องกันตลิ่งพังก็เพื่อปรับปรุง Shear strength ของดินให้แข็งแรงขึ้นและป้องกันการ Slip ของตลิ่ง มีงานประยุกต์ใช้ Jet Grouting Pile เพื่อเสริมความมั่นคงให้ผนังบ่อขุดในชั้นดินอ่อน โดยก่อนการขุดดินจะสร้าง Jet Grouting Pile ขัดต่อเนื่องกันไป ในลักษณะของกำแพงตลอดแนวขอบนอกของบ่อขุด ซึ่งจำนวนแถวอาจมีซ้อนกันมากกว่า 1 แถว ขึ้นกับขนาดของคันดินที่คำนวณได้ และขึ้นอยู่กับช่องว่างที่จะทำงานได้รอบบริเวณที่จะขุด การคำนวณความมั่นคงของผนังต้องให้มีอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการวิบัติ ทั้งการดินเลื่อนไปข้างหน้า (Sliding) การหมุนรอบฐาน (Overturning) และความมั่นคงเชิงลาด (Slope Stability) การใช้ Jet Grouting Pile ทำกำแพงกันดินรอบบ่อขุดมีข้อได้เปรียบบางประการเมื่อเทียบกับการขุดโดยใช้เข็มพืดประกอบกับการค้ำยัน คือสามารถเริ่มงานขุดเปิดบ่อดินเป็นส่วน ๆ ได้เร็วกว่า และมักไม่ต้องการติดตั้งค้ำยันเพิ่มเติมระหว่างการขุดเปิดบ่อดิน เนื่องจากจากผนัง

Jet Grouting Pile มักมี Stiffness (EI) สูงกว่า ทำให้โอกาสที่จะทำให้สิ่งก่อสร้างที่อยู่ประชิดบ่อขุดเกิดความเสียหายจากการขยับตัวมีน้อยลง และเมื่องานก่อสร้างได้ระดับดินเสร็จสิ้นลง ไม่มีภาระการรื้อถอนติดตามมาจึงประหยัดเวลาการทำงาน และไม่ต้องเสี่ยงต่อการทำให้สิ่งก่อสร้างที่อยู่ประชิดบ่อขุดขยับตัวที่มักจะเกิดขึ้นในกรณีที่จะต้องมีการรื้อถอนเข็มพืดเหล็ก นอกจากนี้ผนังกำแพง Jet Grouting Pile ที่ใช้ต้านแรงดันดินด้านข้างในขณะก่อสร้างสามารถช่วงลดแรงดันดินที่กระทำต่อผนังคอนกรีตของโครงสร้างได้ดินถาวรลงได้เป็นอย่างมาก ดังนั้นสามารถออกแบบลดความหนาของโครงการกำแพงคอนกรีตถาวรและปริมาณเหล็กเสริมลงได้อีกบางส่วน

การเสริมกำลังดินด้วยกลุ่มเสาเข็ม Jet Grouting Pile สามารถประยุกต์ใช้เพิ่มความมั่นคงให้เขื่อนกันดินริมน้ำที่สร้างไว้แล้ว เพื่อป้องกันการพังทลายจากการกัดเซาะของน้ำส่วนท้องน้ำด้านหน้าเขื่อนที่มักเกิดขึ้นบ่อย ๆ ในบริเวณโค้งน้ำ ลักษณะการออกแบบต้องคำนึงถึงความมั่นคงในแง่ต่าง ๆ เช่นเดียวกับกรณีก่อน ซึ่งอัตราส่วนความปลอดภัยในแต่ละประเด็นไม่ควรต่ำกว่า 1.5 แต่สิ่งที่ต้องให้ความใส่ใจมากเป็นพิเศษ สำหรับงานเสริมความมั่นคงในลักษณะนี้ คือ ต้องตรวจสอบและควบคุมปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน ไม่ให้เกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อสิ่งก่อสร้างข้างเคียง ซึ่งจะมีความสำคัญและเกณฑ์แตกต่างกันไปในแต่ละงาน ตัวอย่างงานเสริมความมั่นคงให้ดินด้วย Jet Grouting Pile ในลักษณะเป็นกำแพงกันดินคือโครงการนาวินครินทร์ ซอยร่วมฤดี กรุงเทพมหานคร

ในการออกแบบถนนั้น ความชันของลาดถนนสามารถตรวจสอบได้โดยการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดถนน หรือการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) จากการสมมติว่าเนินถนนเกิดการพังทะลาย และมีการเคลื่อนตัวบนผิวเฉือนของเนื้อดินในตัวเขื่อนหรือฐานรากในลักษณะส่วนโค้งของทรงกลม เส้นตรงหรือผิวพื้นลักษณะอื่น ๆ



รูปที่ 4.1 การคำนวณ Slope Stability ก่อนการปรับปรุงดิน (สราวุธ จริตงาม, 1998)

สำหรับการวิเคราะห์ ค่า FS กรณีที่ไม่มีเสาเข็ม Jet Grouting Pile (ก่อนการปรับปรุงดิน) วิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันมักจะเป็นวิธี “Modified Bishop Method” ซึ่งสมมติรูปของผิวการเคลื่อนพังเป็นส่วนโค้งของวงกลม โดยการตัดมวลดินออกเป็นชั้น ๆ ตามแนวดินและพิจารณาสมดุขยของทั้งแรง และโมเมนต์ที่เกิดจากแต่ละมวลดิน (รูปประกอบที่ 4.1) ผลของความมั่นคงของลาดดินแสดงในรูปของอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ซึ่งแสดงในสมการที่ 4.1

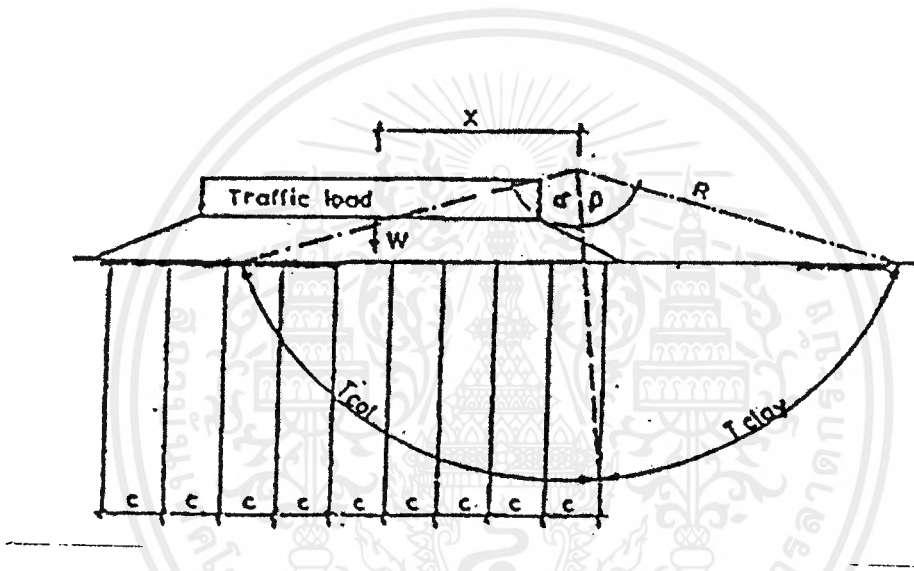
$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{c_i b_i + (W_i - U_i) \tan \phi}{[\cos \theta_i + (\sin \theta_i \tan \phi)] / FS} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[W_i \sin \theta_i + \frac{C_s W_i a_i}{R} \right]} \quad \dots\dots(4.1)$$

โดย

- FS = อัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety)
- n = จำนวนชั้นมวลดิน (Total Number of Slice)
- b = ความกว้างของมวลดินแต่ละชั้น (Width of the Slice)
- h_i = ความสูงของมวลดินแต่ละชั้น (Average Height of slice)
- c_i = ความเหนียวของดิน (Cohesion of soil)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ϕ = มุมของความเสียดทานภายในดิน (Internal Friction Angle of Soil)
 θ = มุมเอียงของเส้นสัมผัส (Angle of Inclination)
 W_i = น้ำหนักของมวลดินแต่ละชั้น (Total Weight of i^{th} Slice)
 U_i = แรงดันน้ำที่กระทำต่อผิวเคลื่อนของมวลดินชั้นใด ๆ
 C_s = สัมประสิทธิ์ความสั้นสะเทือนจากแผ่นดินไหว
 R = รัศมีของวงกลมของการเคลื่อนพัง
 a_i = แชนของโมเมนต์



รูปที่ 4.2 การคำนวณ Slope Stability ก่อนการปรับปรุงดิน (สราวุธ จริตงาม, 1998)

สำหรับกรณีที่คำนวณ FS ของดินหลังปรับปรุงแล้ว (มีการทำเสาเข็ม Jet Grouting Pile) สามารถใช้สมการของ Swerod (1992) คำนวณได้ตามสมการที่ 4.2 ตามรูปประกอบที่ 4.2

$$FS = \frac{[aS_n + (1-a)S_{JGP}]R^2\alpha + R^2\beta S_u}{Wx} = \frac{S_{av}R^2\alpha + R^2\beta S_u}{Wx} \dots\dots(4.2)$$

โดยที่

$$S_{av} = S_u(1-a) + S_{JGPa}$$

$$a = \frac{NA}{BL}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_u และ S_{JGP} ได้แก่ค่า Undrained Shear Strength ของดินและเสาเข็ม Jet Grouting Pile ตามลำดับ

α คือมุมที่เป็นส่วนของวงกลมในบริเวณกลุ่มเสาเข็ม Jet Grouting Pile ซึ่งจะคำนวณโดยใช้ค่า S_{AV}

β คือมุมที่เป็นส่วนของวงกลมในบริเวณดินอ่อน ซึ่งจะคำนวณใช้ค่า S_u

R คือรัศมีของวงกลมของการเคลื่อนที่

4.1.2 การออกแบบ Jet Grouting Pile เพื่อป้องกันการทรุดตัวของโครงสร้างดิน (Settlement)

ในการก่อสร้างคันดินบนชั้นดินอ่อนที่ค่อนข้างหนา มีปัญหาหลัก 2 ประเด็น คือ

ก. การทรุดตัวในระยะยาวมักเกิดขึ้นมากและไม่สม่ำเสมอ

(Large and Uneven Settlement)

ข. การพังทลายอย่างฉับพลันในขณะที่ก่อสร้างอาจเกิดได้ถ้าถมดินชั้นสูงเกินขนาดที่ชั้นดินอ่อนส่วนจะรองรับไหว เนื่องจากทำให้เกิด Shear Stress ขึ้นสูงกว่า Shear Strength ในดินอ่อน ซึ่งเป็นดินฐานรากและถ้ามากถึงระดับหนึ่งอาจทำให้ดินอ่อนเคลื่อนตัวออกทางด้านข้าง และไหลหนีออกไปจากใต้คันดินถม (Mud Flow) ซึ่งจะก่อให้เกิดการพังทลายของคันดินถมติดตามมาในทันที (Sudden Failure) ปัญหาในประเด็นหลังนี้มักทำให้การดำเนินงานก่อสร้างต้องล่าช้าออกไปจากแผนงานมาก แนวคิดพื้นฐานหลักคือ สร้างกลุ่ม Jet Grouting Pile ที่มีความยาวและแข็งแรงที่เพียงพอในชั้นดินอ่อน เพื่อถ่ายน้ำหนักของคันดินถมรวมทั้งน้ำหนักที่คาดว่าคันดินถมจะต้องแบกรับในขณะที่ใช้งานลงไปในชั้นดินที่มีความแข็งแรงพอเหมาะ ที่จะแบกรับน้ำหนักตัวทั้งหมดไว้โดยไม่ทำให้เกิดการทรุดตัวของคันดินถมเกินเกณฑ์ที่กำหนด ทั้งการทรุดตัวโดยรวม (Total Settlement) และการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential Settlement) ลักษณะการต้านรับแรงกดในแนวตั้งของ Jet Grouting Pile แต่ละต้นจะมีพฤติกรรมและอาจคำนวณได้คล้ายเสาเข็มเจาะ (Bored Pile) ซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ แรงต้านจากความเสียดทานรอบผิวเสาเข็ม (Skin Friction Resistance) และแรงต้านจากการแบกรับที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing Resistance) ในกรณีที่ปลายเสาเข็ม Jet Grouting Pile หยั่งลงไปถึงชั้นดินที่แน่นพอสมควร (Firm Layer) น้ำหนักส่วนที่แบกรับโดยปลายเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นตามความแข็งแรงของชั้นดินที่แน่น ความยาวของเสาเข็ม คุณสมบัติและพฤติกรรมของชั้นดินอ่อนที่เสาเข็มแทรกผ่านลงไป แต่อย่างไรก็ตาม กำลัง

ด้านรับแรงกดของดินที่ปลายเสาเข็มที่จะนำมาใช้งานได้ต้องไม่เกินกำลังรับแรงกดของเนื้อวัสดุ Jet Grouting Pile โดยทั่วไปการออกแบบให้ได้ Jet Grouting Pile ยาวที่สุดเท่าที่จะก่อสร้างได้สะดวก จะมีข้อได้เปรียบคือ สามารถใช้ประโยชน์จากกำลังของเสาเข็ม Jet Grouting Pile ได้เต็มที่ ทั้งยังลดการทรุดตัวในระยะยาวของคันดินถมลงได้มาก

แต่อย่างไรก็ตามหากกลุ่มเสาเข็มยังปลายลงไปถึงชั้นดินแน่น น้ำหนักส่วนหนึ่งจะสามารถกระจายผ่าน Jet Grouting Pile ลงไปในชั้นดินนั้นได้เพิ่มขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น สิ่งหนึ่งที่พึงระวังในกรณีหลังนี้คือ ต้องคำนึงถึงแรงดูดลงรอบเสาเข็ม (Negative Skin Friction) จากการทรุดตัวของดินอ่อนรอบกลุ่มเสาเข็มด้วยว่ามีโอกาสจะเกิดขึ้นหรือไม่ เพราะถ้ามีจะทำให้กำลังแบกรับน้ำหนักของกลุ่มเสาเข็มลดลง และจะเกิดการทรุดตัวของคันดินถมมากเกินกว่าที่ประมาณไว้สำหรับการวิเคราะห์แรงเสียดทานที่ผิวในทางลบ

การคำนวณการทรุดตัวของดิน เนื่องจาก Consolidation สำหรับงานถนนจะใช้หลักการของ Pavement design มาประยุกต์กับการคำนวณการทรุดตัวมาใช้ โดยพิจารณาชั้น Composite Ground (ชั้นดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วย Jet Grouting) เสมือนชั้นดินแข็งชั้นหนึ่งเป็นชั้น Subbase ทับอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน การถ่าย Load ที่กระทำลงสู่ดินฐานรากจะใช้หลักการของ Burmister Two-Layer Stress Influences Curves โดยอาศัยค่าความแตกต่างของ Elastic Modulus ที่ต่างกัน ($E_1 > E_2$) เพื่อคำนวณหาค่า σ แล้วจึงนำค่าดังกล่าวไปแทนในสมการของ Terzaghi's One-dimensional Consolidation Theory ต่อไป

การทรุดตัวโดยรวม (Total Settlement) ของคันดินถมมีกลุ่มเสาเข็ม Jet Grouting Pile รองรับ สามารถคำนวณการทรุดตัวโดยรวมของคันดินถม (Δh) ได้จากสมการที่ 4.3

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 \quad \dots\dots(4.3)$$

Δh_1 = การทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการยุบตัวของเสาเข็ม Jet Grouting Pile และในดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็ม Jet Grouting Pile สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4

$$\Delta h_1 = \frac{qH}{aE_{JGP} + (1-a)E_u} \quad \dots\dots(4.4)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a = อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดรวมของ Jet Grouting Pile
 ทุกต้นต่อพื้นที่ทั้งหมดของดิน (Relative Column Area) = $\frac{NA}{BL}$

N = จำนวนต้นของเสาเข็ม Jet Grouting Pile

A = พื้นที่หน้าตัดของ Jet Grouting Pile

q = Average Unit Load = $\frac{W}{BL}$

E_{JGP}, E_U = Modulus of Elasticity ของเสาเข็ม Jet Grouting Pile และดินเดิมที่อยู่ระหว่างเสาเข็ม Jet Grouting Pile ตามลำดับ

ค่า E_{JGP} และ E_U สามารถหาได้จากการทดสอบด้วย Oedometer Test แต่ถ้าไม่มีผลทดสอบดังกล่าว อาจใช้ค่า Modulus of Elasticity ที่ 50% q_u (E_{50}) จาก Unconfined Compression Test มาใช้ประมาณการยุบตัวของกลุ่มดินที่ปรับปรุงคุณภาพนี้ได้หรือประมาณจาก (E_{50}/S_{JGP}) ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการปรับปรุงคุณภาพของดินหลังการทำ Jet Grouting โดยใช้ซีเมนต์ในอัตรา 200 กก/ม² ของเสาเข็มที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว (สมชาย กกกำแหง, 2536)

| No | สถานี | ชนิดของดิน | อายุ วัน | W % | γ_d t/m ³ | q_u t/m ² | E_{50} t/m ² | S_u t/m ² | E_{50}/S_u |
|----|-----------------------|----------------|-------------|--------|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------|
| 1 | นครราชสีมา | Sandy Silt | 15 | 11 | 1.47 | 542 | 88500 | 271 | 326.26 |
| 2 | ระยอง | Silty Sand | 9 | 14 | 1.82 | 604 | 82000 | 302 | 271.52 |
| 3 | สมุทรปราการ | Very Soft Clay | 14 | 106 | 0.63 | 50 | 3370 | 25 | 134.80 |
| | | | | 116 | 0.60 | 66 | 5510 | 33 | 166.96 |
| 4 | รังสิต | Very Soft Clay | 28 | 101 | 0.67 | 60 | 6900 | 30 | 230 |
| 5 | หนองจอก | Very Soft Clay | 7 | 88 | 0.79 | 49 | 7620 | 24.5 | 319.18 |
| 6 | บางบัว (สนามกอล์ฟ) | Very Soft Clay | 13 | 162 | 0.48 | 48 | 4790 | 24 | 199.58 |
| | | | 20 | 173 | 0.48 | 55 | 8530 | 27.5 | 310.18 |
| | | | 31 | 147 | 0.52 | 43 | 12440 | 21.5 | 578.60 |
| | | | 41 | 123 | 0.54 | 55 | 7240 | 27.5 | 263.27 |
| | | | 77 | 123 | 0.56 | 80 | 6830 | 40 | 170.75 |

ตารางที่ 4.1 ผลการปรับปรุงคุณภาพของดินหลังการทำ Jet Grouting โดยใช้ซีเมนต์ในอัตรา 200 กก./ม.² ของเสาเข็มที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว (สมชาย กกกำแหง, 2536) (ต่อ) 42

| | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|----------------|----|-----|------|-----|-------|------|--------|
| 7 | บางซอน | Very Soft Clay | 28 | 97 | 0.72 | 104 | 24210 | 52 | 465.57 |
| | | | 28 | 113 | 0.65 | 76 | 22970 | 39 | 604.47 |
| | | | 28 | 122 | 0.60 | 61 | 14670 | 30.5 | 490.98 |
| | | | 28 | 132 | 0.57 | 91 | 11410 | 45.5 | 250.76 |
| 8 | บางปะกง | Very Soft Clay | 27 | 93 | 0.74 | 166 | 45440 | 83 | 547.46 |
| | | | 27 | 103 | 0.68 | 106 | 21670 | 53 | 408.85 |
| 9 | บางบ่อ (สถานีเชื้อเพลิงปิโตรเลียม) | Very Soft Clay | 73 | 127 | 0.58 | 99 | 19746 | 49.5 | 398.90 |
| | | | 79 | 136 | 0.56 | 94 | 13929 | 47 | 296.36 |
| | | | 81 | 131 | 0.59 | 147 | 41575 | 73.5 | 565.64 |

ผลการปรับปรุงคุณภาพของดินหลังการทำ Jet Grouting โดยใช้ซีเมนต์ในอัตรา 200 kg/m³ ของเสาเข็มที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว (สมชาย กกกำแหง, 2536)

Δh_1 = การทรุดตัวของชั้นดินใต้กลุ่มเสาเข็ม Jet Grouting เมื่อแบกรับน้ำหนักจากคันดินถม ซึ่งสามารถคำนวณการทรุดตัวของชั้นดินต่าง ๆ ใต้กลุ่มเสาเข็มตามวิธีการคำนวณการยุบตัวของดินเมื่อรับแรงกระทำโดยใช้สมการตามที่นำมาข้างล่างนี้ ซึ่งจะเท่ากับผลรวมของ Precompression Settlement (S_1) กับ Virgin Settlement (S_2) หรือสามารถใช้ Finite Element วิเคราะห์

$$\Delta h_2 = \frac{C_r}{1+e} H_i \log \frac{P'_f}{P'_o} + \frac{C_c}{1+e} H_i \log \frac{P'_f}{P'_c} \quad (4.5)$$

โดยที่ $P_f = P_o + \Delta P$

$$T_v = \frac{\pi}{4} U^2 \text{ for } U < 60\%$$

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%) \text{ for } U < 60\%$$

$$t = \frac{H^2 T_v}{C_v}$$

4.1.3 การออกแบบ Jet Grouting Pile เพื่อเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดิน (Bearing Capacity)

สำหรับการวิเคราะห์ค่า Bearing Capacity โดยทั่วไปจะต้องคำนึงถึงการพิบัติ 2 ประการ คือ การพิบัติของเสาเข็ม Jet Grouting Pile (Structural Failure) และการพิบัติของมวลดิน (Soil Failure) ในส่วนของการพิบัติของกลุ่มเสาเข็ม Jet Grouted ขึ้นอยู่กับการควบคุมคุณภาพเพื่อให้ได้ค่า Compressive Strength ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระยะห่าง (Spacing) และความยาวตามที่กำหนดตามแบบ การเกิดพิบัติในบริเวณกลุ่มเสาเข็มจะไม่ใช่ปัญหา การก่อสร้างกลุ่ม Jet Grouting Pile เพื่อรองรับคันดินถมโดยทั่วไปแนะนำให้ใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มประมาณ 2-3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ทั้งนี้เพื่อให้รับกำลังของดินอ่อนโดยกลุ่มเสาเข็ม อยู่ในลักษณะที่ทำให้มวลดินจับกับเป็นกลุ่มเป็นก้อน และมีพฤติกรรมในลักษณะที่จะนำไปสู่การวิบัติเมื่อแบกรับน้ำหนักสูงสุดโดยการแหวกดินอ่อนลงไปในรูปแบบของกล่องดินแข็ง (Block Failure) ในกรณีนี้แรงต้านรับส่วนใหญ่ของกลุ่มเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติด้านแรงเสียดทานรอบรูปกล่องของกลุ่มเสาเข็มนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกลุ่มเสาเข็มลอยอยู่ในชั้นดินอ่อนทั้งหมด ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3 จึงสามารถเขียนสมการในการคำนวณได้ตามสมการที่ 4.6

$$Q_{ult} = 2S_u H[B + L] + 9S_u BL \quad \dots\dots(4.6)$$

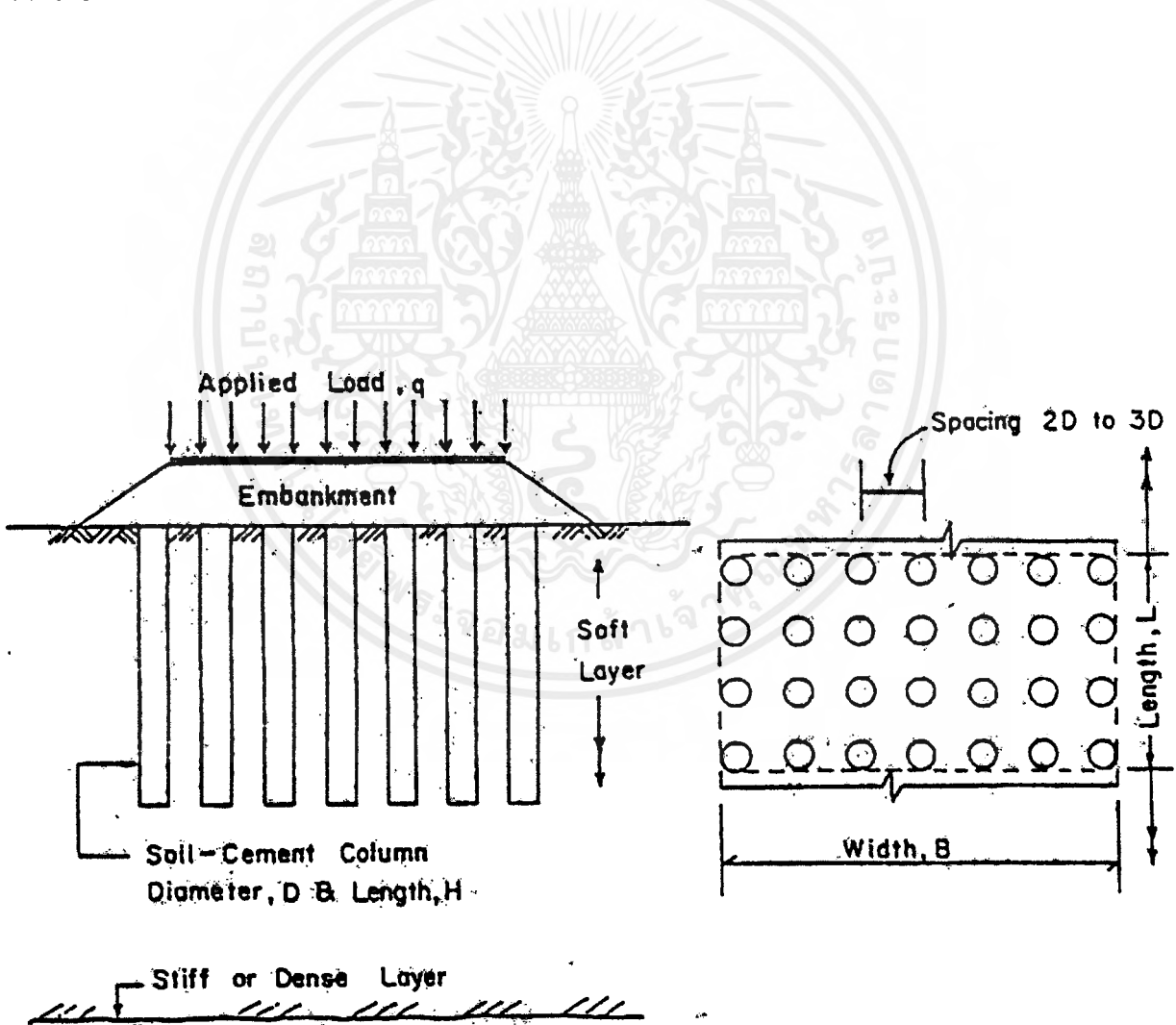
$$F.S. = \frac{Q_{ult}}{F} \quad \dots\dots(4.7)$$

โดยที่ $F = \text{Total Load ของรถยนต์และ Embankment (t/m}^2 \text{)}$

4.1.4 การออกแบบ Jet Grouting Pile เป็นกำแพงทึบน้ำ (Cut - Off Wall)

เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ ไม่ให้ไหลผ่านเข้าสู่บริเวณที่ต้องการป้องกันในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น ในยุโรป สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ส่วนได้ประยุกต์ใช้ Jet Grouting Technique ในงานก่อสร้างส่วนที่เป็นกำแพงทึบน้ำของเขื่อนไปแล้วทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขื่อนก่อสร้างเหนือฐานรากที่เป็นชั้นทราย ซึ่งน้ำสามารถไหลลอดได้เขื่อนไปได้อย่างง่ายดายถ้าปราศจากการป้องกันที่ดีพอในกรณีดังกล่าว อาจสร้าง Jet Grouting Pile ต่อเนื่องกันเป็นกำแพงทึบน้ำอย่างน้อย 1 แถว หรือหลายแถวประชิดกัน ระยะห่างระหว่าง Jet Grouting Pile ในแต่ละแถวควรอยู่ระหว่าง 0.8-0.9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง Jet Grouting Pile ปลายเสาเข็มควรฝังหยั่งลงไป

ชั้นที่บ่งชี้ที่หน้าพอสสมควร การสร้าง Jet Grouting Pile ให้ซ้อนเหลื่อมกันเพื่อให้มั่นใจได้ว่า น้ำจะไม่ซึมผ่านผนัง Jet Grouting Pile เข้าไปสู่บริเวณที่ต้องการป้องกัน ในงานลักษณะดังกล่าวคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของ Jet Grouting Pile มีความสำคัญน้อยกว่าคุณสมบัติการเคลื่อนตัวได้สูงโดยไม่แตกร้าว (Flexibility) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ตัวเชื่อมส่วนใหญ่สร้างด้วยวัสดุดินที่มีการยุบตัวได้สูง คุณสมบัติ Flexibility ของวัสดุผสมดิน-ซีเมนต์ สามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเติม Bentonite เข้าไปในน้ำปูนก่อนฉีดเข้าไปผสมกับดิน ซึ่งสัดส่วนที่พอเหมาะระหว่างวัสดุดังกล่าวสามารถหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ค่า Strain at Failure ของวัสดุผสมไม่ควรต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สภาวะ Unconsolidated Undrained Triaxial Stresses ซึ่งมี Confining Pressure ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละงาน

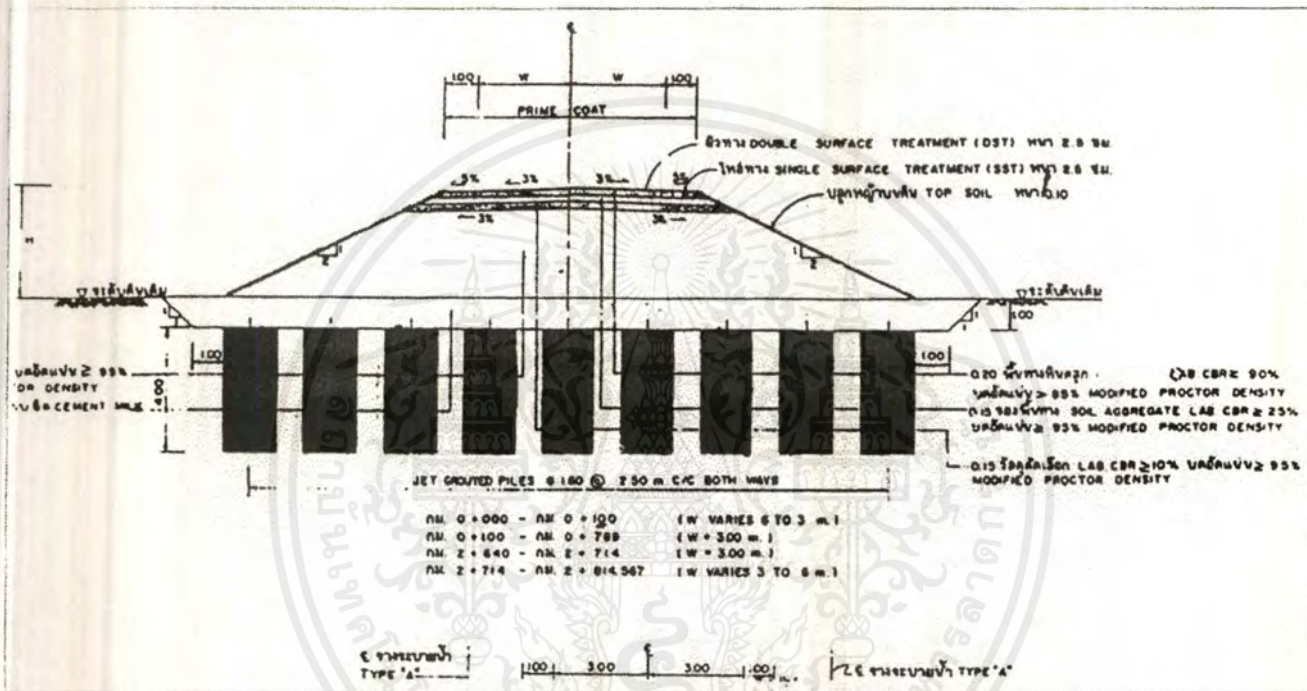


รูปที่ 4.3 การคำนวณ Bearing Capacity (ศราวุธ จริตงาม, 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบ

สมมติให้ตัวอย่างนี้เป็นโครงสร้างถนนที่มีความกว้าง 20 เมตร ความยาว 2,300 เมตร ความสูงของเนินดิน Embankment เท่ากับ 3.4 เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับโครงสร้างถนนเข้าสู่โครงการเขื่อนปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งออกแบบเป็นเสาเข็ม Jet Grouted Piles ยาว 4 เมตร ทั้งหมด 8,880 ต้น ดูรูปประกอบที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปตัดถนนถนนเข้าสู่โครงการปากพนัง (สรารุข จริตงาม, 1998)

ดินที่ใช้ทำ Embankment มีค่าคุณสมบัติดังนี้

$$S_u = 5 \text{ T/m}^2 \quad \phi = 10^\circ \quad \gamma_t = 2.2 \text{ T/m}^3$$

คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนที่รองรับ Embankment (ที่ระดับ 0-18 เมตร) มีดังนี้

$$S_u = 1.5 \text{ T/m}^2 \quad \phi = 0^\circ \quad \gamma_t = 1.8 \text{ T/m}^3$$

จากการการคำนวณจะประมาณ Load จากถนนและรถยนต์ เท่ากับ 7 T/m^2

1. การคำนวณการทรุดตัว

1.1 การคำนวณหาค่า Stress distribution ของน้ำหนักของรถยนต์ที่ความลึก 4.0 เมตร จากระดับผิวถนน

จากข้อมูลทั่วไป ค่า Modulus ของเสาเข็ม Jet Grouting Pile หรือ $E_{JGP} = 1000 S_{JGP}$

หลังจากการปรับปรุงดิน เราจะได้ค่า S_{JGP} หรือค่า Undrained Shear Strength ของดินที่ปรับปรุงแล้ว ประมาณ 3000 kPa หรือ $30 T/m^2$

$$\therefore E_{JGP} = 1000 \times 30 = 30,000 T/m^2$$

$$\text{และ} \quad E_u = 200 S_u$$

ค่า S_u หรือค่า Undrained Shear Strength ของดินเดิมประมาณ 15 Kpa หรือ $1.5 T/m^2$

$$\therefore E_{JGP} = 200 \times 1.5 = 300 T/m^2$$

$$E_{JGP}/E_u = 30,000/300 = 100$$

$$z = 4.0 \text{ a} = B/2 = 20/2 = 10 \text{ เมตร}$$

$$\therefore Z/a = 4/10 = 0.4$$

จากสมการ Burmister สำหรับการคำนวณ 2 Layer Stress Interface จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Z/a และ E_{JGP}/E_u ที่ลดลงตามความลึก z

$$\therefore Z/a = 0.4 \text{ และ } E_{JGP}/E_u = 100 \text{ จะได้ค่า } \sigma_z/P = 0.7$$

ดังนั้นค่า Load ที่จะใช้ในการคำนวณหาการทรุดตัวของชั้นดินอ่อนหรือ $\sigma_z/P = 0.7 \times 7 = 4.9 T/m^2$

1.2 การคำนวณหาอัตราทรุดตัว

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2$$

- หา Δh_1

$$\Delta h_1 = \frac{qH}{aE_{JGP} + (1-a)E_u}$$

$$a = \frac{NA}{BL} = \frac{8,800 \times 2.01}{20 \times 2,300} = 0.39$$

$$\Delta h_1 = \frac{7 \times 4}{0.39 \times 30,000 + (1 - 0.39) \times 200} = 0.002 \text{ m}$$

- หา Δh_2

จากการหา Settlement Parameters ซึ่งสามารถหาจากในห้องปฏิบัติการ สำหรับโจทย์นี้

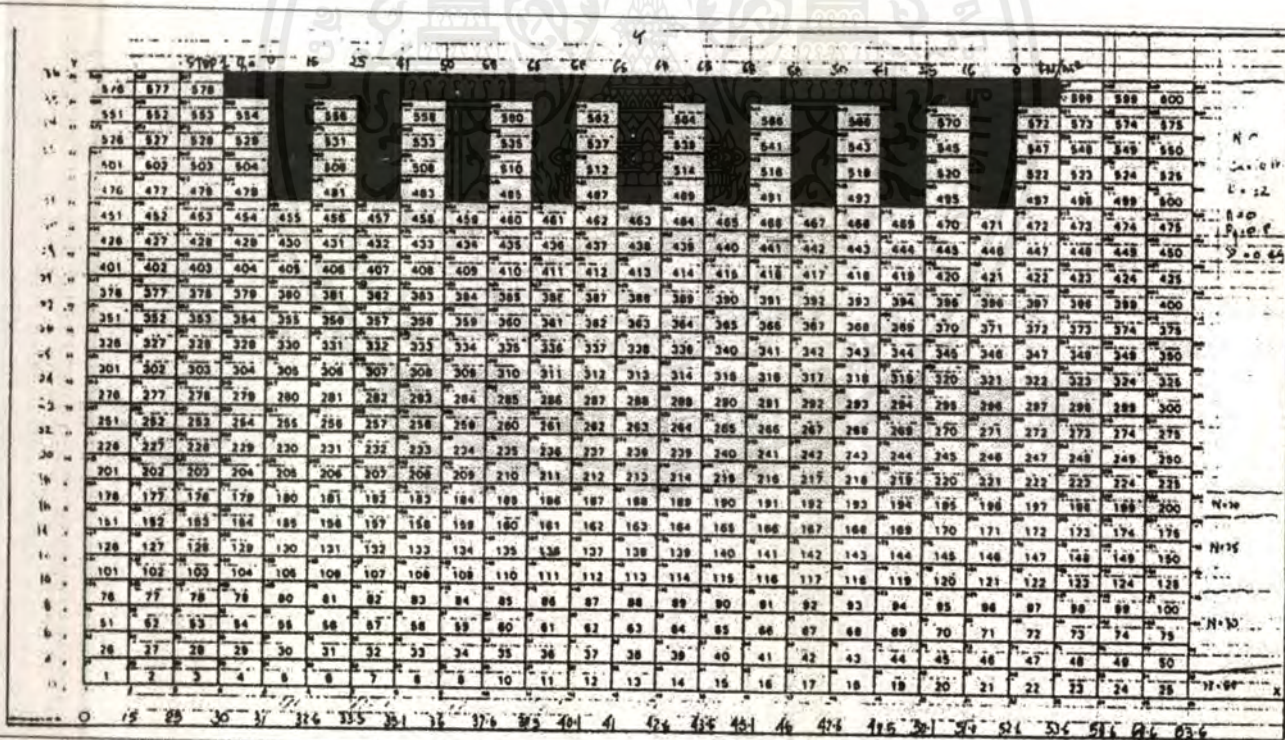
สมมติว่าค่า $P'_c = 8 \text{ T/m}^2$ ค่า $\frac{C_r}{1+e} = 0.08$ และ $\frac{C_c}{1+e} = 0.40$

$$\text{จาก } \Delta h_2 = S_1 + S_2 = \frac{C_r}{1+e} H_i \log \frac{P'_c}{P'_o} + \frac{C_c}{1+e} H_i \log \frac{P_f}{P'_c}$$

จะได้

$$\Delta h_2 = 0.08 \times 14 \times \log \frac{8}{7} + 0.40 \times 14 \times \log \frac{7 + 4.9}{8}$$

$$= 1.031 \text{ m ที่ } U = 60\%$$



รูปที่ 4.5 Finite Element Mesh สำหรับการคำนวณ (สราวุธ จริตงาม, 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโจทย์ตัวอย่างที่กำหนดให้ จะสังเกตเห็นได้ชัดว่าการเกิดการทรุดตัวในส่วนของเสาเข็ม Jet Grouting Pile มีค่าน้อย แต่การทรุดตัวในระยะยาว (Log Term Settlement) จะเกิดขึ้นมากในบริเวณชั้นดินเหนียวส่วนล่างซึ่งหนาประมาณ 14 เมตร จะสามารถทรุดตัวได้อีก การหาค่า P'_c ค่า $C_u/1+e$ และ $C_c/1+e$ ที่แม่นยำเพื่อประกอบการคำนวณจึงเป็นเรื่องสำคัญที่สุดในการคำนวณการทรุดตัว เพราะถ้า P_0 มากกว่า P'_c นั่นคือดินจะมีสภาพแบบ Under Consolidation Clay การคำนวณจะใช้ $C_u/1+e$ ซึ่งมีค่ามากกว่า $C_c/1+e$ เกือบ 5 เท่าเมื่อคูณด้วยความหนาของชั้นดินที่หนามาก เช่น โจทย์ตัวอย่างนี้คือ 14 เมตร ย่อมจะทำให้คำนวณได้ค่าการทรุดตัวมาก การเกิดการพิบัติเนื่องจากการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุก P_f จึงเป็นเรื่องที่วิศวกรต้องระวังเป็นอย่างยิ่ง

2. การคำนวณ Bearing Capacity

การคำนวณหาค่า Bearing Capacity ของถนน สามารถหาได้จากสมการ

$$Q_{ult} = 2S_u H[B + L] + 9S_u BL$$

$$Q_{ult} = 2 \times 1.5 \times 4[20 + 2,300] + 9 \times 1.5 \times 20 \times 2,300$$

$$= 27,800 + 621,000 = 648,840 \text{ T}$$

$$F = 7 \times 20 \times 2,300 = 322,000 \text{ T}$$

$$F.S. = Q_{ult}/F = 648,840/322,000 = 2.01 > 1.2 \text{ OK}$$

3. การคำนวณ Slope Stability

การคำนวณหาค่า FS สำหรับตรวจสอบเสถียรภาพของ Slope เนินถนน หาได้จากสมการของ Swerod (1992)

$$F.S. = \frac{[aS_u + (1-a)S_{JGP}]R^2\alpha + R^2\beta S_u}{Wx} = \frac{S_{av}R^2\alpha + R^2\beta S_u}{Wx}$$

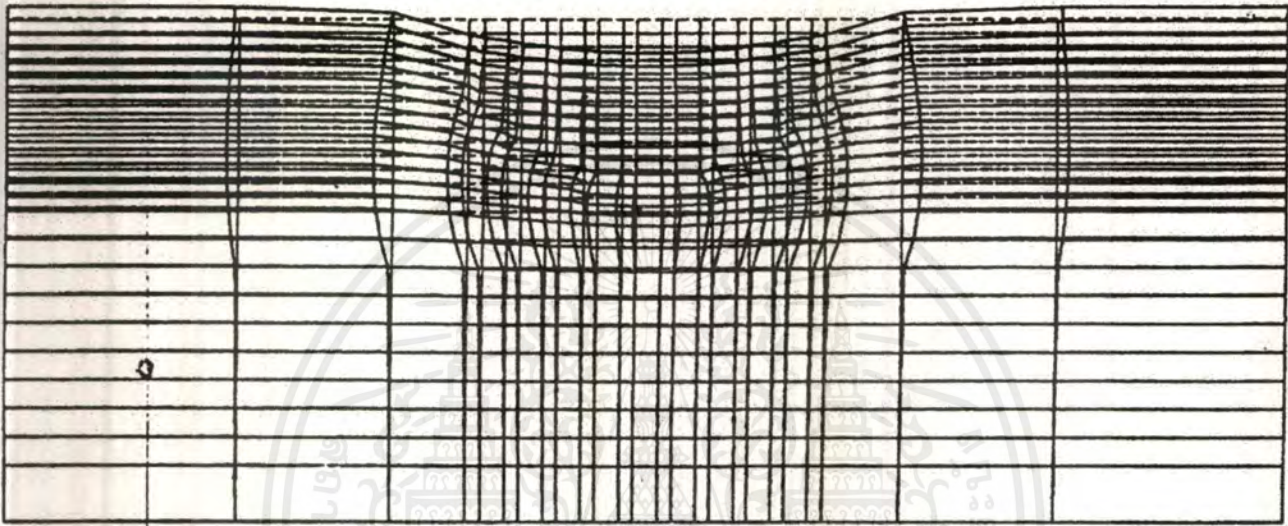
$$\text{จาก } S_{av} = S_u(1-a) + S_{JGP}a$$

$$\text{ดังนั้น } S_{av} = 1.5(1-0.39) + 30 \times 0.39 = 12.62 \text{ T/m}^2$$

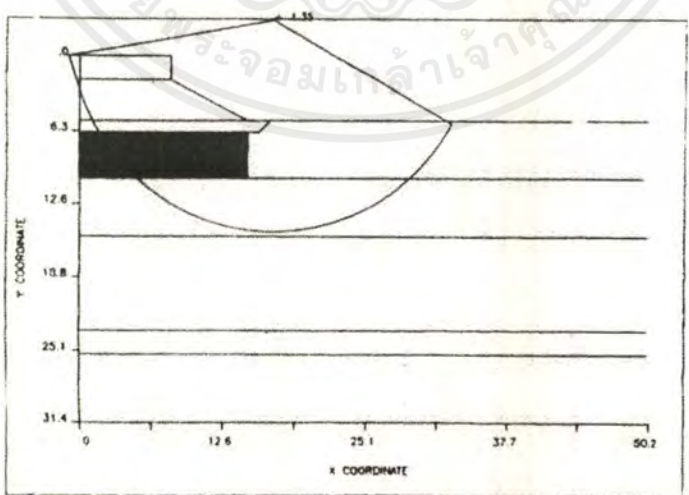
เมื่อเราสมมติจุดศูนย์กลางของวงกลมที่ทำให้เกิดการพังได้จะทำให้เราได้ค่ารัศมี R และค่ามุม β α ระยะ X สามารถหาได้จากระยะจาก Center ของ Embankment ถึงจุดศูนย์กลางวงกลม รูปประกอบที่ 4.2 หลังจากแทนค่าสมการ เราจะสามารถหาค่า FS ได้ ซึ่งความยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นคือ การเลือกจุดศูนย์กลางวงกลม กับรัศมี R เพราะหากสมมติผิด จะทำให้การคำนวณหาค่า FS จะไม่ได้ค่าที่ต่ำสุด โดยปกติจะต้องทำการ Trail and Error หลาย ครั้งและเลือกค่า FS ที่น้อยที่สุดมาพิจารณา โดยปกติค่า FS ที่ยอมรับได้ควรจะมากกว่า 1.2



รูปที่ 4.6 Output แสดงการหลุดตัวจาก FEM (สราวุธ จริตงาม,1998)



รูปที่ 4.7 การคำนวณ Slope Stability โดยใช้โปรแกรม Computer (สราวุธ จริตงาม,1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทวิเคราะห์

1. ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ค่าการทรุดตัว การรับน้ำหนักบรรทุก และการพังทลายของเนินดินต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

2. การออกแบบโดยวิธีการคำนวณดังกล่าวนั้นเป็นการคำนวณโดยการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของค่าตอบอาจมีค่าสูงมากหากผู้ออกแบบขาดประสบการณ์ (สมมติว่าไม่มี ความผิดพลาดเนื่องมาจากการสมมติฐานของสมการ หรือข้อจำกัดของสมการที่กำหนดให้) ดังนั้น ถ้าหากมีการตรวจสอบ การสังเกต การติดตั้ง Instrument และการควบคุมงานหน้างานจะเป็นสิ่งที่ ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้

3. สมมติฐานของสมการต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้น อาจมีความจำเป็นต้องมีการปรับปรุงให้มีความถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากสมมติฐานของสมการนั้นยังอาศัยข้อมูลจากการเกิดขึ้นจริงไม่มากนัก ในการตั้งสมมติฐานของสมการ

4. Computerวิธีการคำนวณในปัจจุบันได้มีการตรวจสอบและปรับปรุงเพื่อให้ถึงความผิดพลาดเนื่องมาจากการคำนวณ ซึ่งมีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Element (FEM) เพื่อหาการทรุดตัว และการหา FS ของ Slope ได้ เพราะถ้าเราป้อนค่า Input ของ Soil Parameters Load ขนาดและรูปตัดตามแบบ (Geometry) ที่ถูกต้อง จะทำได้ผลเฉลย (Output) ที่ละเอียดและแม่นยำขึ้น ดังเช่นการแสดงผลการทรุดตัวจาก FEM และการคำนวณ Slope Stability โดยใช้โปรแกรม

4.3 การออกแบบ Soil Cement ในห้องทดลอง

ก่อนการออกแบบควรนำดินบริเวณที่จะทำเสาเข็มซีเมนต์มาทดลองผสมและทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาคุณสมบัติในเบื้องต้น เพื่อกำหนดในการออกแบบและก่อสร้างต่อไป

ผู้ออกแบบต้องทำการเจาะสำรวจดินบริเวณนั้น เพื่อทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของดินบริเวณนั้น เช่น ทดสอบ Water Content, Atterberg Limit, Unit Weight, Unconfined compression test ความถ่วงจำเพาะ, Consolidation Test, CU-Triaxial Test และต้องนำดินในบริเวณนั้นมาลองผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

4.4 การออกแบบพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการทำ Jet Grouting Pile

ก่อนที่จะต้องทำงานปรับปรุงคุณภาพดิน โดยวิธีการสร้างโดยใช้น้ำซีเมนต์อัดฉีดตัดดิน ด้วยความเร็วสูง จะต้องทำการทดสอบการ Jet Grouting ในภาคสนาม เพื่อที่จะหาพารามิเตอร์ไปใช้ในการกำหนดค่าที่ต้องใช้ในการทำงานจริงสำหรับการผสมน้ำปูนซีเมนต์และหาค่าตัวเลขที่ใช้ในการควบคุมเครื่องมือ เครื่องจักรสำหรับการทำงานจริง เพื่อให้ได้เสาเข็ม Jet Grouting Pile ที่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและสามารถรับแรงเฉือนได้ตามที่กำหนด ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบผสมน้ำปูนซีเมนต์และทดลองใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงาน เช่น อัตราการถอนท่อฉีดน้ำปูนซีเมนต์และอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ เป็นต้น เพราะตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่า Strength และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของดินหลังการปรับปรุง ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมโดยทดลองเปลี่ยนค่า 2 ตัวแปรดังกล่าว

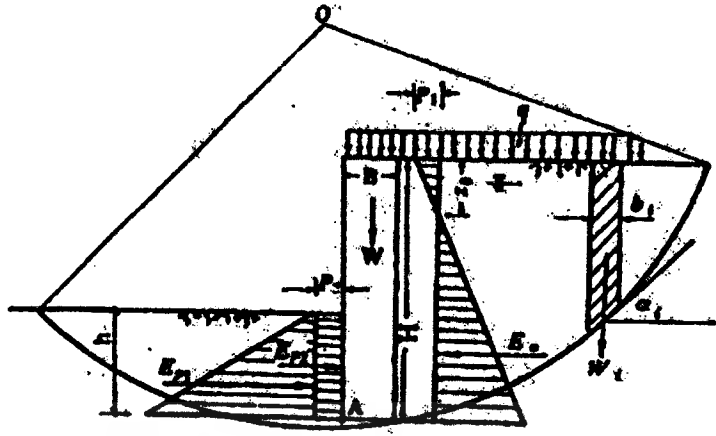
การออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำงานภาคสนามสามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างดินที่เก็บมาจากสถานที่ทำงานจริงผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการเช่นใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0, 15, 30 ของน้ำหนักดิน โดยที่ใช้ปริมาณน้ำและดินคงที่ แล้วเปลี่ยนปริมาณน้ำโดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คงที่ เมื่อได้วัสดุผสมปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำ ในอัตราส่วนต่าง ๆ นำไปใส่ในแบบหล่อแท่งตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร ไปบ่มด้วยเวลาต่าง ๆ เช่น 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน ภายใต้การควบคุมความชื้น นำวัสดุผสมที่ผ่านการบ่มตามเวลาที่ต้องการไปทดสอบคุณสมบัติของดินเพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์หา อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ดิน, น้ำ และเวลาบ่ม ที่ให้ค่า Undrained Shear Strength ที่ต้องการ แล้วนำค่าที่ได้ไปทดลองทำจริงในสนามด้วยความดัน Cement Grout, ความดันอากาศ, อัตราการถอนก้านเจาะ, อัตราการหมุนของก้านเจาะต่าง ๆ กัน เมื่อได้เวลาบ่มดังที่ต้องการแล้วจึงทำการ Coring Jet Grouting Pile แบบต่อเนื่องเพื่อนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดแบบ Unconfined Compression Test ถ้าได้กำลังอัด (q_u) ตามที่ต้องการ ก็นำอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ, แรงดัน Cement Grout, ความดันอากาศ, อัตราถอนก้านเจาะ, อัตราหมุนก้านเจาะไปใช้งานจริงในสนาม ตัวอย่างเช่น โครงการปากพั้ง เมื่อเก็บตัวอย่างดินจากโครงการไปทดสอบผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ ด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ กัน แล้วนำไปทดสอบ Liquid Limit, Plastic Limit, Shrinkage Limit, Unconfined Compression Test, Triaxial Compression Test, Modified Proctor Compaction พบว่าส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อน้ำเมื่อใช้ผสมกับดิน 1 ลูกบาศก์เมตร แล้ว

ได้ Undrained Shear Strength ไม่ต่ำกว่า 300 kPa คือใช้ปูนซีเมนต์ 20 กิโลกรัมผสมกับน้ำ 27 กิโลกรัม และเมื่อนำปูนซีเมนต์ผสมน้ำด้วยอัตราส่วนดังกล่าวไปทดลองทำ Jet Grouting Pile ในสนาม ในบริเวณที่กำหนดไว้มีโครงการเพื่อให้ได้ Jet Grouting Pile ขนาด 1.60 เมตร และมีค่า Undrained Shear Strength มากกว่า 300 kPa โดยใช้อัตราการถอนก้านเจาะอัตราการหมุนก้านเจาะต่าง ๆ ในขณะที่ใช้ความดันของ Cement Grout 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความดันอากาศ 7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ระยะระหว่างต้น 2.5 เมตร พบว่าต้องใช้อัตราการถอนก้านเจาะ 14 เมตรต่อวินาที อัตราการหมุนของก้านเจาะ 10 รอบต่อนาที หลังจากการทำ Jet Grouting Pile แล้วเสร็จ

4.5 การคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินที่ทำด้วย Jet Grouting Pile

การออกแบบกำแพงกันดินขั้นแรกจะกำหนดขนาดและรูปร่างของกำแพง ซึ่งขึ้นอยู่กับความลึกของงานขุด X.L. Clen, Y.H. Lin และ S.D. Zhang ให้คำแนะนำว่าความกว้างของกำแพงจะอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 0.8 เท่าของความลึกของงานขุด และความลึกของกำแพงได้ระดับงานขุดลงไปเท่ากับ 0.8 ถึง 1.2 เท่าของความลึกของงานขุด

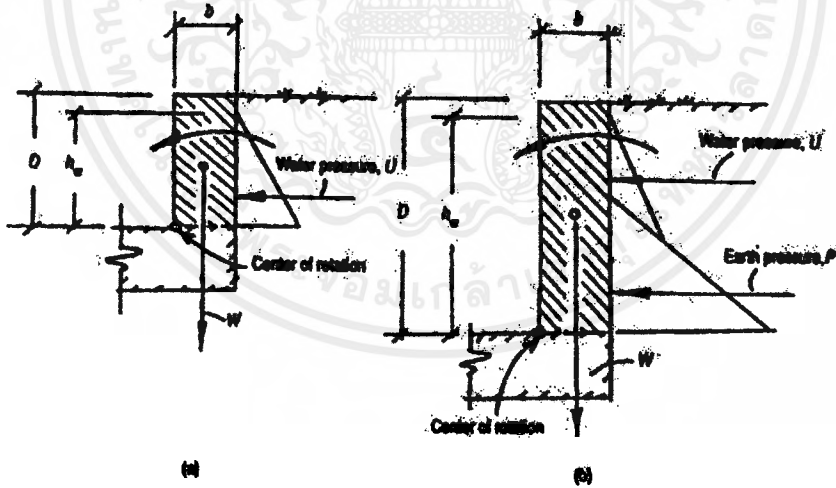
ขั้นต่อไปให้ตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงโดยรวม (ดูรูปที่ 4.8) หากผลการคำนวณไม่ผ่านต้องกำหนดขนาดและความลึกของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ใหม่ เมื่อผลการคำนวณผ่านต้องทำการตรวจสอบแรงดันด้านข้างโดยใช้ทฤษฎีของ Rankine ว่าจะทำให้เกิด Sliding ที่ฐานของกำแพงหรือไม่ หลังจากนั้นให้ทำการตรวจสอบ Overturning stability โดยคิดว่ากำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์เป็น Gravity wall ดัง(รูปที่ 4.9)



Where: $P_1 = 2C_1 \sqrt{K_1}$, $P_2 = 2C_2 \sqrt{K_2}$, $z_0 = \frac{2C}{\gamma \sqrt{K_2}}$

Design mode

รูปที่ 4.8 การตรวจสอบเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงเสาเข็ม (พินิต ตั้งบุญเต็ม, 2539)



รูปที่ 4.9 การตรวจสอบ Overturning Stability ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ (พินิต ตั้งบุญเต็ม, 2539)

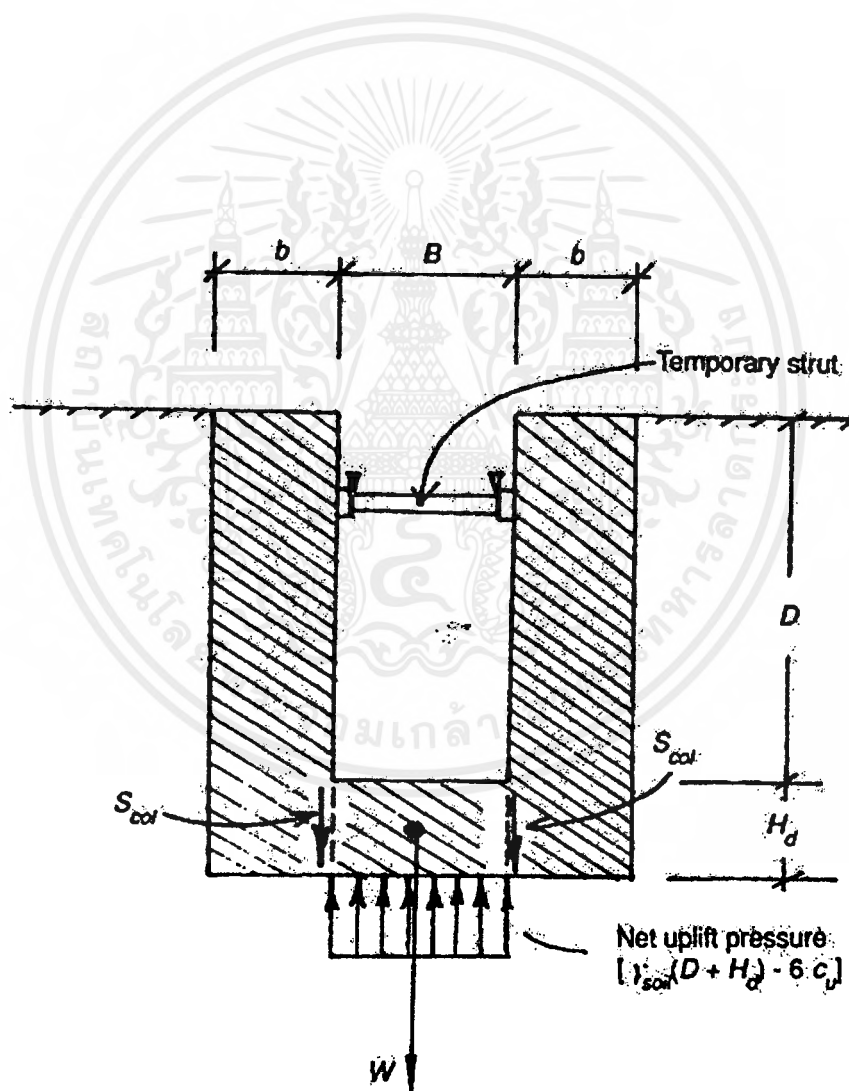
ในงานที่ขุดลึกจะเกิดการบวมตัว (Heave) ของดินที่ใต้บ่อขุด ซึ่งป้องกันได้โดยการทำเสาเข็มดินซีเมนต์กันทั้งหมดที่กันบ่อขุด (ดังรูปที่ 4.10) โดยความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ (H_d) คำนวณได้จากสมการ

$$H_d > \frac{B \cdot D \cdot \gamma_{\text{Soil}}}{2C_u^{\text{Col}}} - \frac{3C_u^{\text{Soil}} \cdot B}{C_u^{\text{Col}}}$$

โดยที่ B = ความกว้างของงานขุด

D = ความลึกของงานขุด

กรณีที่ไม่ว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ติดกันทั้งหมดค่า C_u^{Col} จะต้องเปลี่ยนเป็นค่า C_u^{Soil} ในการคำนวณ



รูปที่ 4.10 การคำนวณป้องกันการหลุดตัวของบ่อขุด

(พินิต ตั้งบุญเติม, 2539)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การหาค่าพารามิเตอร์ Jet Grouting สนาม (Trial Test)

ในการก่อสร้างจริงนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำ Jet Grouting เช่น ปริมาณวัสดุที่ใช้ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ แรงดันในการอัดฉีดน้ำปูน อัตราการถอนก้านเจาะ อัตราการหมุนก้านเจาะ เพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม และกำลังของดินตามต้องการ

การทำ Trial Test ควรทำไม่น้อยกว่า 3 ต้น ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงบริเวณก่อสร้างตามที่ได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงานของผู้ว่าจ้าง ทั้งนี้ผู้รับจ้างจะต้องมีการบันทึกการทำ Jet Grouting Pile เพื่อเป็นข้อมูลในการก่อสร้างจริง

ขั้นตอนการทำ Trial Test

1) ทำการ Pre-Cut หรือ Pre-Jet ด้วยน้ำธรรมดา ความดันขึ้นอยู่กับดินแต่ละแห่งเช่นดินเหนียวอ่อนในกรุงเทพฯ ใช้ความดันประมาณ 150 บาร์ โดยเริ่ม Pre-Cut จาก Pile Top ลงไปจนถึง Pile Tip ตลอดทั้งต้นหรือเป็นช่วง ขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นดินและขนาดของเข็มกับกำลังของดินที่ต้องการด้วย ซึ่งหากทำ Pre-Cut ในชั้นทรายหลวมอาจจะทำให้กำลังของเสาเข็มในชั้นนั้นไม่สูงพอ เนื่องจากน้ำปูนจะแผ่กระจายกันออกไปในเนื้อดินหลวมเป็นบริเวณกว้างกว่าที่ต้องการไปมากจะทำให้ความเข้มชั้นของปูนซีเมนต์ในเนื้อดินส่วนนั้นเจือจางกว่าปกติ

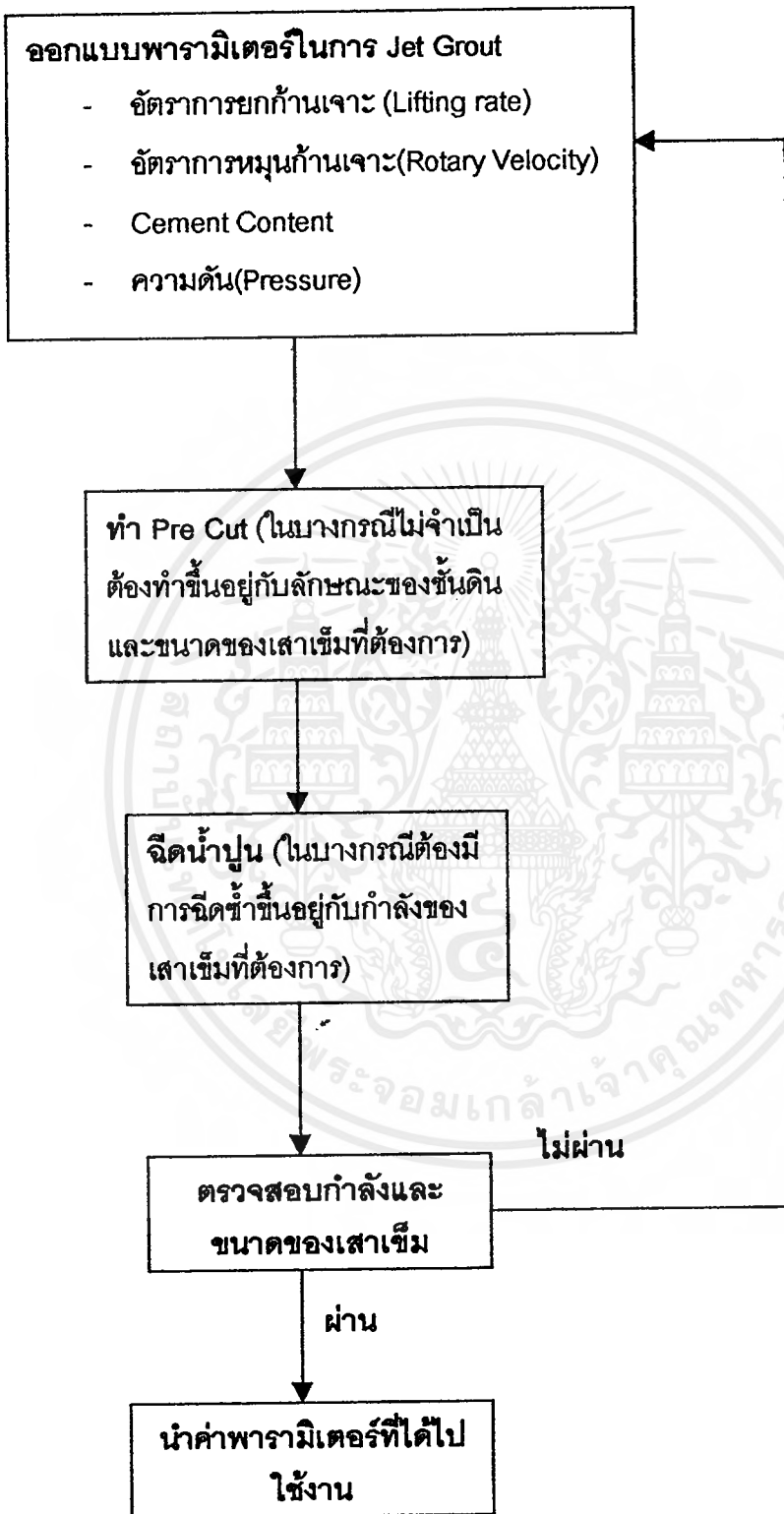
หมายเหตุ การทำ Pre-Cut นั้นเป็นการทำให้เสาเข็มมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยการฉีดน้ำด้วยความดันสูงเข้าไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเดิม ซึ่งช่วยในการฉีดน้ำปูนทำให้น้ำปูนออกไปได้ในรัศมีที่ไกลขึ้น

2) เริ่มฉีดน้ำปูน(cement slurry) ด้วยความดัน 200-400 บาร์ จาก Pile Tip ขึ้นมายัง Pile Top ด้วยอัตราระยะยก(stroke) แรงดันน้ำปูน อัตราการไหลของน้ำปูนที่ได้ออกแบบไว้ก่อนก็จะได้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ที่ต้องการโดยควรทำไม่น้อยกว่า 3 ต้น

3) ทดสอบดูว่าเสาเข็มได้กำลังตามที่ต้องการหรือไม่ โดยการทำ Pile Load Test และทำการ Coring เพื่อนำไปหาค่า RQD Core Recovery และค่า Unconfined Compressive Strength

4) ทำการตรวจสอบขนาดและความยาวของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.80 เมตร สามารถทำการถอนขึ้นมาตรวจสอบได้ และถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ 1.00 เมตร ทำการ Coring โดยรอบ 4 ฐ แล้วนำมาเขียน CORE LOG หรืออาจใช้วิธีการขุดตรวจสอบขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.7 การทำ Jet Grout เป็นกำแพงต่อเนื่อง

ความต่อเนื่องของกำแพงที่ทำโดยวิธี Jet Grout มีความสำคัญมากต่อระบบการทำกำแพงที่บ้น้ำหรือกำแพงกันดิน ซึ่งความแข็งแรงของกำแพงจะขึ้นอยู่กับปัจจัย 4 อย่างที่สำคัญ ดังนี้

- 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสา (D)
- 2) ระยะห่างระหว่างแกนเสา (l)
- 3) ความเฉยที่เกิดขึ้นในการเจาะ (Σ_{max})
- 4) จำนวนแถวของเสา

ตัวแปรสุดท้ายมีความสำคัญมากต่อความประหยัดในการทำกำแพงที่บ้น้ำ เนื่องจากการทำ Jet Grouting มีราคาแพงมาก ดังนั้นถ้าทำ Jet Grouting เป็นกำแพงแถวเดียวจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มาก และเนื่องจากการเจาะจากแนวตั้งของเสาเข็มเป็นสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ในการก่อสร้าง จึงจำเป็นต้องมีระยะเหลื่อมน้อยสุดของเสา (D-l) ถ้าการเจาะลึกมากกว่า 50 ฟุต ความเฉยของก้านเจาะสามารถวัดได้จากขั้นตอนการทดลองในสนาม หรือจากเสาดินซีเมนต์ที่ถูกทำขึ้น ค่าความเฉยสูงสุดที่เกิดขึ้นในการเจาะ (Σ_{max}) ได้จากการประมาณเพื่อหาค่าที่เหมาะสม การเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับระยะห่างระหว่างแกนเสา (l) อาจคำนวณจากทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นกับความเฉยสูงสุดที่เกิดขึ้นในการเจาะ (Σ_{max}) เพื่อหาระยะเหลื่อมน้อยที่สุด (D-l) สำหรับเสาต้นถัดไป นักวิจัยหลายคนพยายามที่จะแก้ปัญหานี้โดยตั้งสมมติฐานขึ้นมา เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นกับความเฉยที่เกิดขึ้นในการเจาะบ่อยครั้งที่ความเฉยที่เกิดขึ้นในการเจาะถูกสมมติ

ผลจากการวิเคราะห์ของ Vogel R. and Kaugchinger J. โดยการประมาณค่าด้วยวิธี fourier เพื่อหาฟังก์ชันที่แท้จริง ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเหลื่อมกับการเฉย ดังนี้

$$(D-l) / (\Sigma_{max}) = b \quad (4.10)$$

เมื่อ b คือ แฟคเตอร์ของระยะเหลื่อม ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเป็นไปได้ ดังแสดงในตารางที่ 8 ถ้าต้องการสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แถวเดียวฟังก์ชันของความน่าจะเป็นคือ

$$q = p^{(m-1)} \quad (4.11)$$

เมื่อ q คือ ค่าความมั่นใจ (นิยมใช้ 95%)

m คือ จำนวนเสา

P คือ ค่าความน่าจะเป็น

ตัวอย่าง

ถ้ากำแพงประกอบด้วยเสา 100 ต้น ต้องการค่าความน่าจะเป็น $p = 0.999482$ จากตารางที่ 8 จะได้ค่าแฟคเตอร์ของระยะเหลี่ยม $b = 1.5$ ถ้าค่าความเฉยที่เกิดขึ้นจากการเจาะสูงสุด $\Sigma = 6''$ แล้ว สถานการณ์นี้จะต้องการระยะเหลี่ยม 9" สำหรับค่าความมั่นใจ 95% ถ้าการทดลองในสนามได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาต่ำสุด 36" แล้วช่องว่างระหว่างแกนเสาที่ผิวบนจะเท่ากับ 27"

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์ของระยะเหลี่ยม (b) และค่าความน่าจะเป็นที่ต้องการเสาหรือกำแพงที่บ่งชี้ที่ใช้เสาแถวเดียว (Vogel, Kauschinger 1989)

| ค่าแฟคเตอร์ของระยะเหลี่ยม $b = (D-l)/\Sigma_{max}$ | ค่าความน่าจะเป็น P |
|---|-------------------------|
| 0.0 | 0.50000 |
| 0.75 | 0.92634 |
| 1.00 | 0.97632 |
| 1.25 | 0.99507 |
| 1.50 | 0.99952 |
| 1.75 | 0.99999 |
| 2.00 | 1.00000 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

เครื่องจักร อุปกรณ์ และวัสดุ

เพื่อให้คุณสมบัติของ Soil Cement ที่ได้จากการทำ Jet Grouting เป็นไปตามที่กำหนดจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ที่ได้มาตรฐาน เพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และป้องกันอุบัติเหตุต่าง ๆ อันอาจจะเกิดขึ้น และส่งผลเสียต่อคุณภาพของเนื้องาน อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทำ Jet Grouting จึงมีความสำคัญมากสำหรับคุณภาพงาน

5.1 วัสดุ

5.1.1 Cement Grout

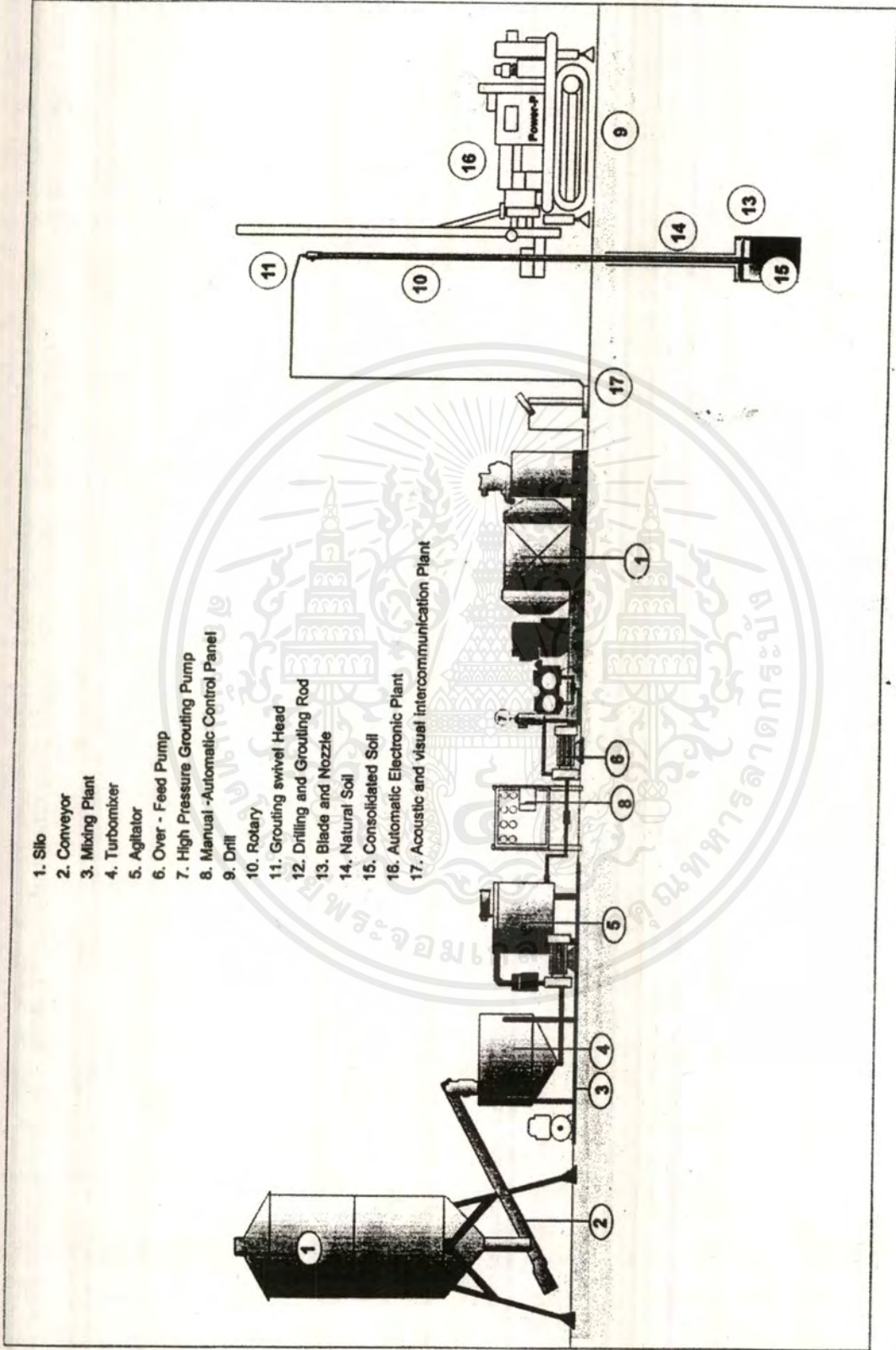
ซีเมนต์ที่ใช้ในการ Grouting ต้องเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 หรือเทียบเท่า และได้มาตรฐาน ASTM C150 ถ้าไม่เช่นนั้นก็ต้องได้รับการยอมรับจากเจ้าของงาน หรือผู้ควบคุมงาน ส่วนสารผสมเพิ่มอื่น ๆ ต้องได้มาตรฐาน ASTM C 494 หรือเทียบเท่า และอัตราส่วนผสมสำหรับการ grout นั้น ต้องได้รับการยอมรับจากทางผู้ควบคุมงาน

5.1.2 วัสดุอื่น ๆ

- 1) สารเคมี และวัสดุอื่น ๆ จะต้องได้รับการอนุมัติจากทางผู้ควบคุมก่อนใช้งาน
- 2) น้ำ ต้องใช้น้ำสะอาด ไม่มีปฏิกิริยาเคมี ไม่มีต่อผลการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ และการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์

5.1.3 การเก็บวัสดุ

วัสดุต่างๆ ต้องมีการจัดเก็บเพื่อป้องกันความเสียหาย และควรอยู่ในสถานที่เก็บอย่างเหมาะสม โดยให้สอดคล้องกับคำแนะนำของผู้ผลิต ไม่มีสิ่งที่ทำให้เกิดการสึกกร่อน ป้องกันจากความสกปรกและมลพิษ



รูปที่ 5.1 เครื่องจักรและอุปกรณ์ในการทำ Jet Grout (เชี่ย เทียนไฮ, 2541)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์

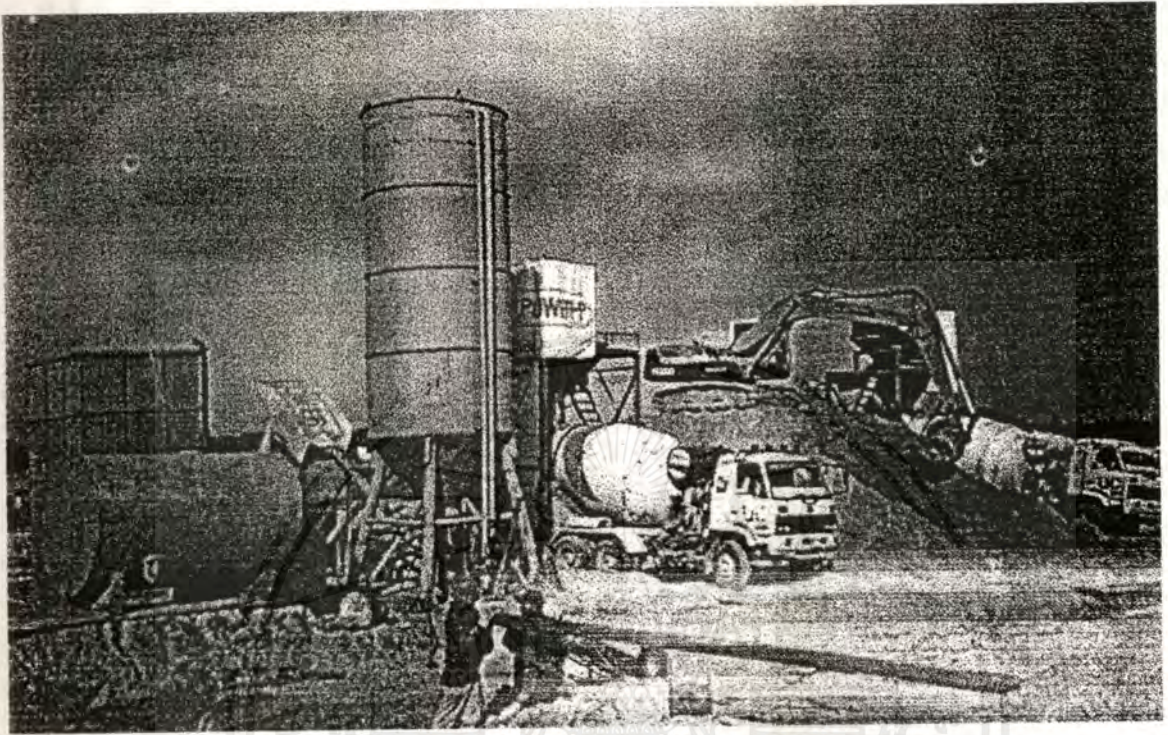
5.2.1 Cement Silo สามารถที่จะเก็บผงซีเมนต์จากความชื้นได้ ซึ่งจะมีท่อ (Conveyor) สำหรับส่งซีเมนต์ไปยังเครื่องผสม (Mixing Plant)



รูปที่ 5.2 ซิโลเก็บซีเมนต์และน้ำ (โครงการ MRTA)

5.2.2 Mixing Plant ควรจะมีปริมาณความจุเพียงพอสำหรับการใช้งาน และจะต้องจัดเตรียมระบบสำหรับตรวจสอบปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม โดยอุปกรณ์หลักของ Mixing Plant มีดังนี้

- 1) Turbomixer คือส่วนผสมปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งต้องกวนตลอดเวลา เมื่อผสมแต่ละครั้งควรใช้ให้หมดภายใน 90 นาที
- 2) Agitator ควรจะมีการจัดเตรียมไว้ให้เพียงพอกับความจุสำหรับการบรรจุน้ำซีเมนต์ที่พอเพียงสำหรับการฉีด (Jetting) ในอัตราสูงสุด เพื่อความสมบูรณ์ในการ Grout



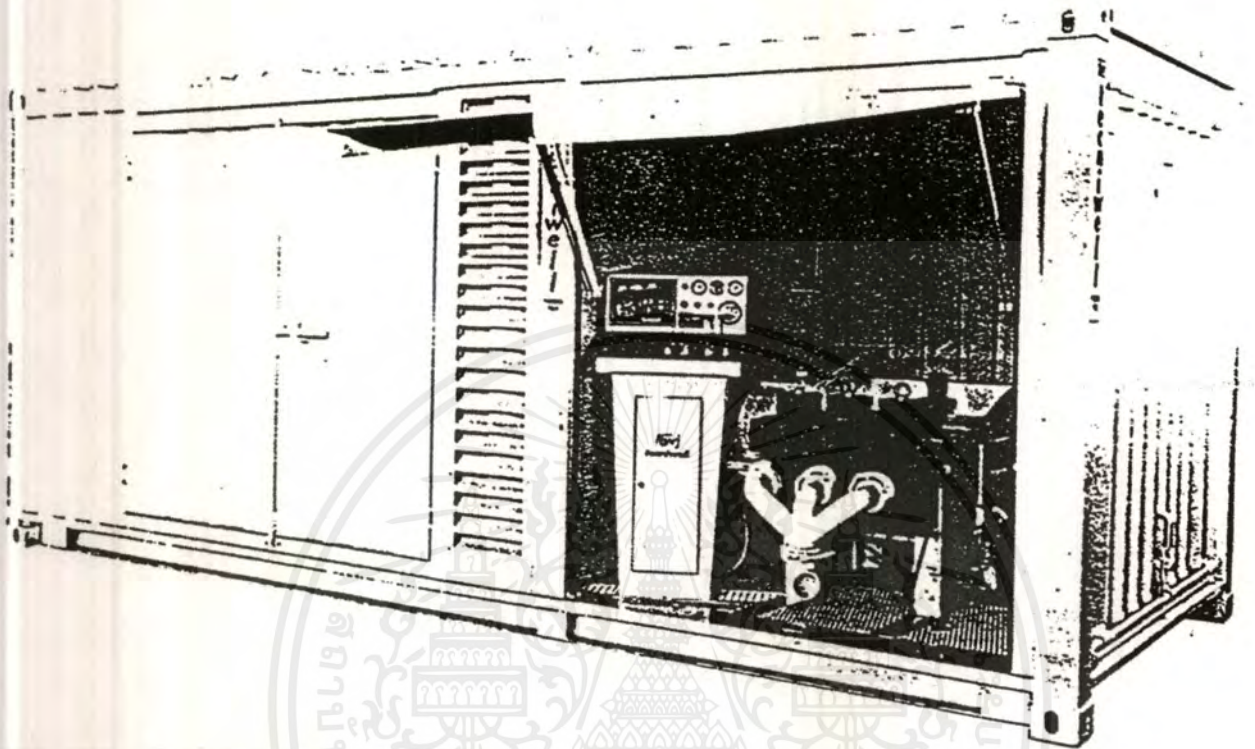
รูปที่ 5.3 Mixing Plant (เชียงใหม่, 2541)

5.2.3 High Pressure Pump ควรจะมีระดับความดันที่เพียงพอกับระดับความดันที่ออกแบบไว้ โดยทั่วไปจะกำหนดไว้ที่ 400 บาร์ และมีอัตราการบีบอัดชนิดน้ำซีเมนต์ที่สถานะใช้งานอย่างต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 50 ลิตร/นาที ขณะที่ทำงานบีบควรจะมีความดันสม่ำเสมอ ความผิดพลาดคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 10% การไหลจากบีบผ่านไปยังรูฉีด (Nozzles) ต้องสม่ำเสมอไม่ขาดตอน

5.2.4 Manual-Automatic control Plant เป็นแผงควบคุมซึ่งมีทั้งแบบอัตโนมัติและแบบทั่วไป

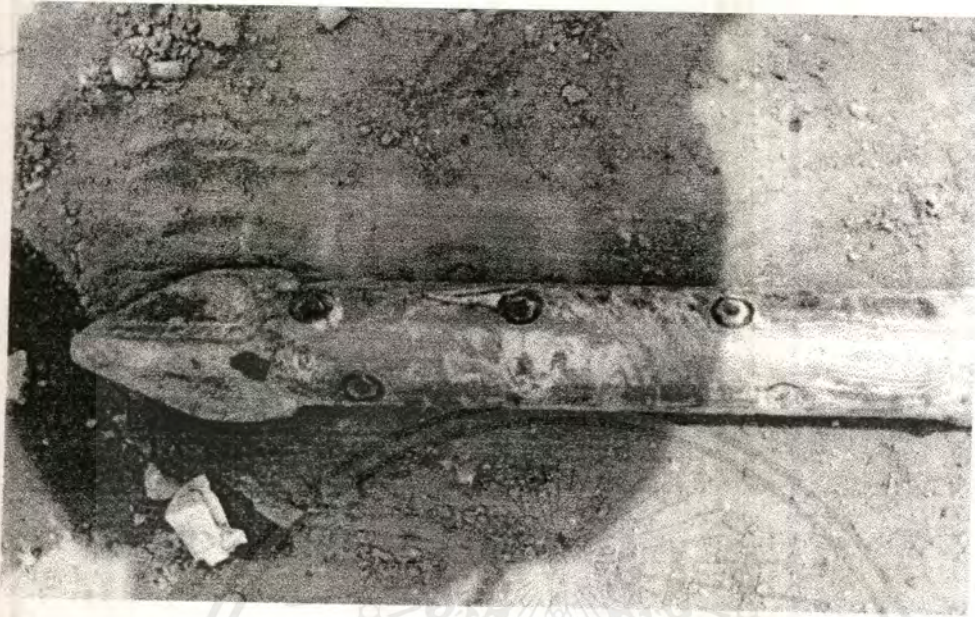
5.2.5 Grouting Swivel Head ซึ่งใช้ในการต่อสายลมและสายน้ำปูนเพื่อส่งและอัดฉีดลม และนำปูนไปยังก้นเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 High Pressure Pump (CCP International Co.)

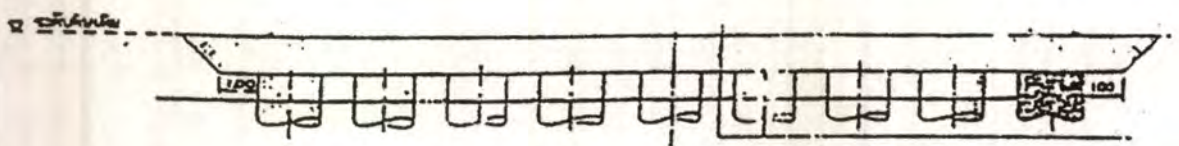
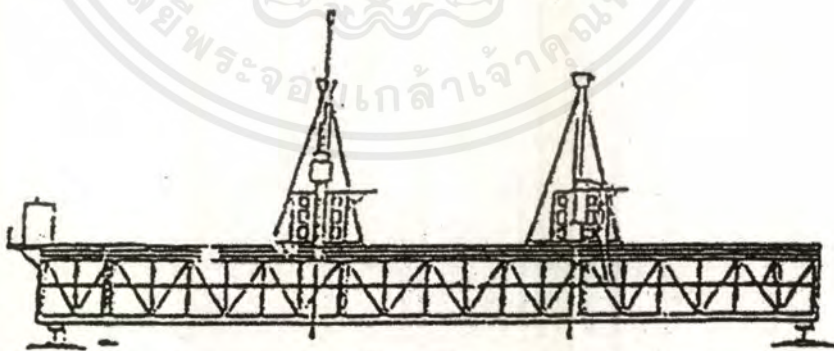
5.2.6 ก้านเจาะ (Rod) และหัวเจาะ (Drilling Rig) ก้านเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100-150 มิลลิเมตร ความยาวของก้านเจาะต้องมีความยาวเพียงพอกับความลึกของปลายเสาเข็ม ส่วนหัวเจาะจะประกอบด้วยรูฉีด (Nozzles) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.0-4.0 มิลลิเมตร โดยจำนวนของรูฉีด (Nozzles) ขึ้นอยู่กับความดันขนาดของรูฉีด และปริมาณอัตราการฉีดน้ำซีเมนต์



รูปที่ 5.5 หัวเจาะ (Drilling rig) (โครงการ MRTA)

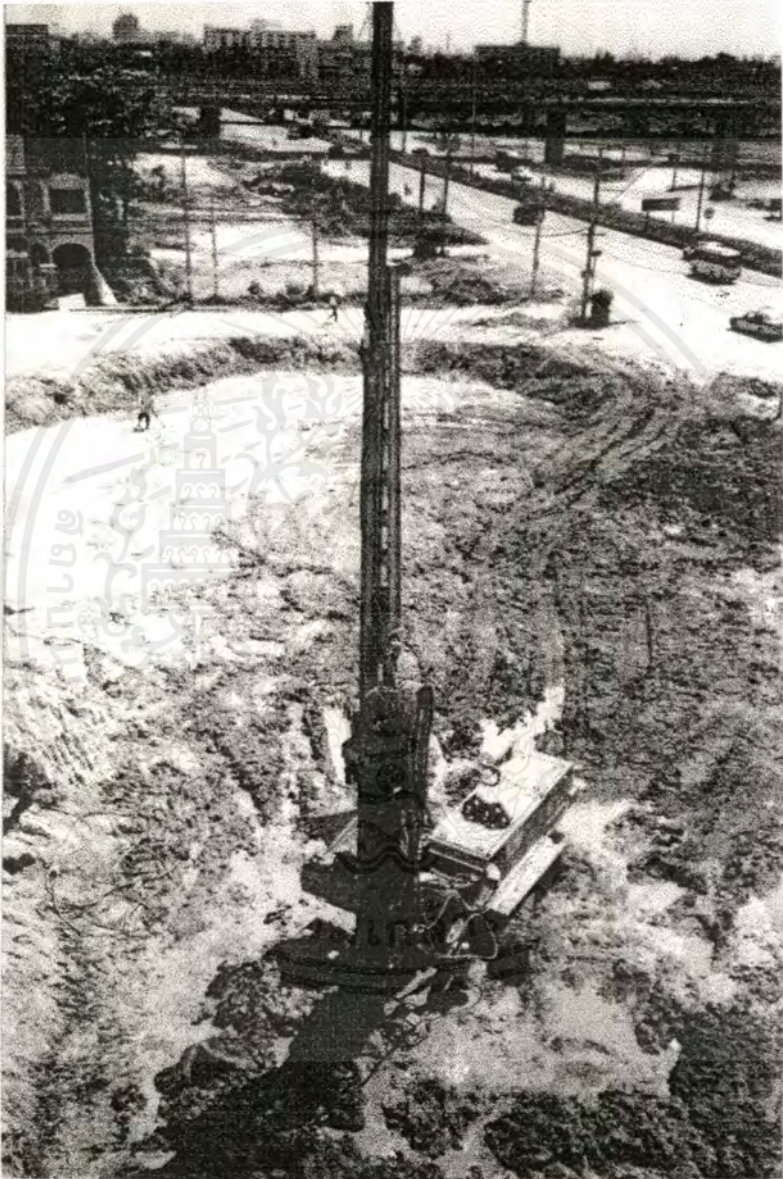
5.2.7 เครื่องเจาะ (Jet Grout Machine) เครื่องเจาะที่พบในประเทศไทยมี 2 แบบ คือ

- 1) เครื่องเจาะแบบ Girder
- 2) เครื่องเจาะแบบตีนตะขาบ



รูปที่ 5.6 เครื่องเจาะแบบ Girder (โครงการ MRTA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

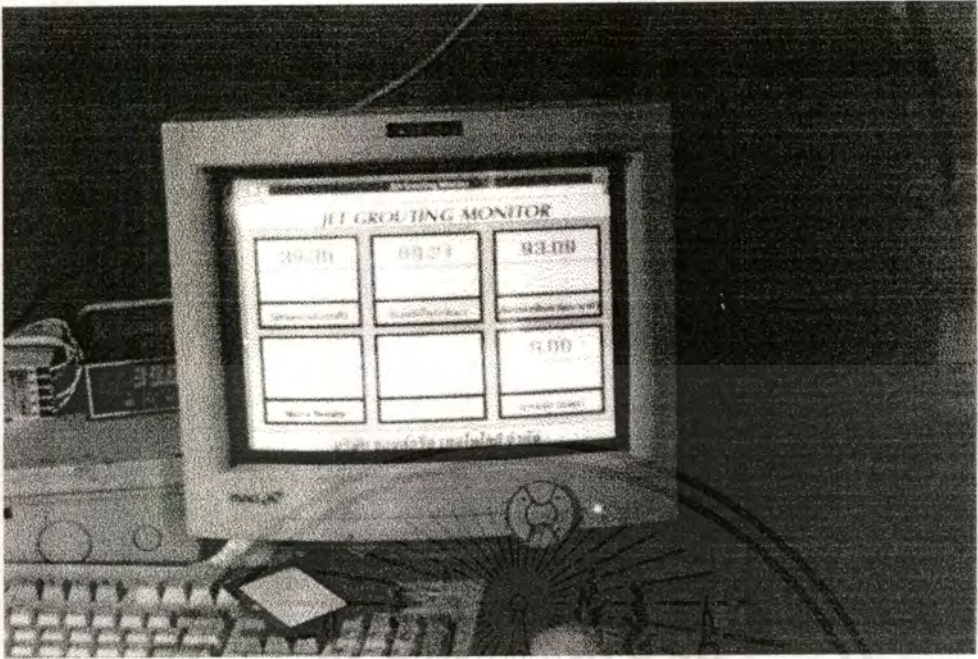


รูปที่ 5.7 เครื่องเจาะดินตะขาบ (โครงการ OBRR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

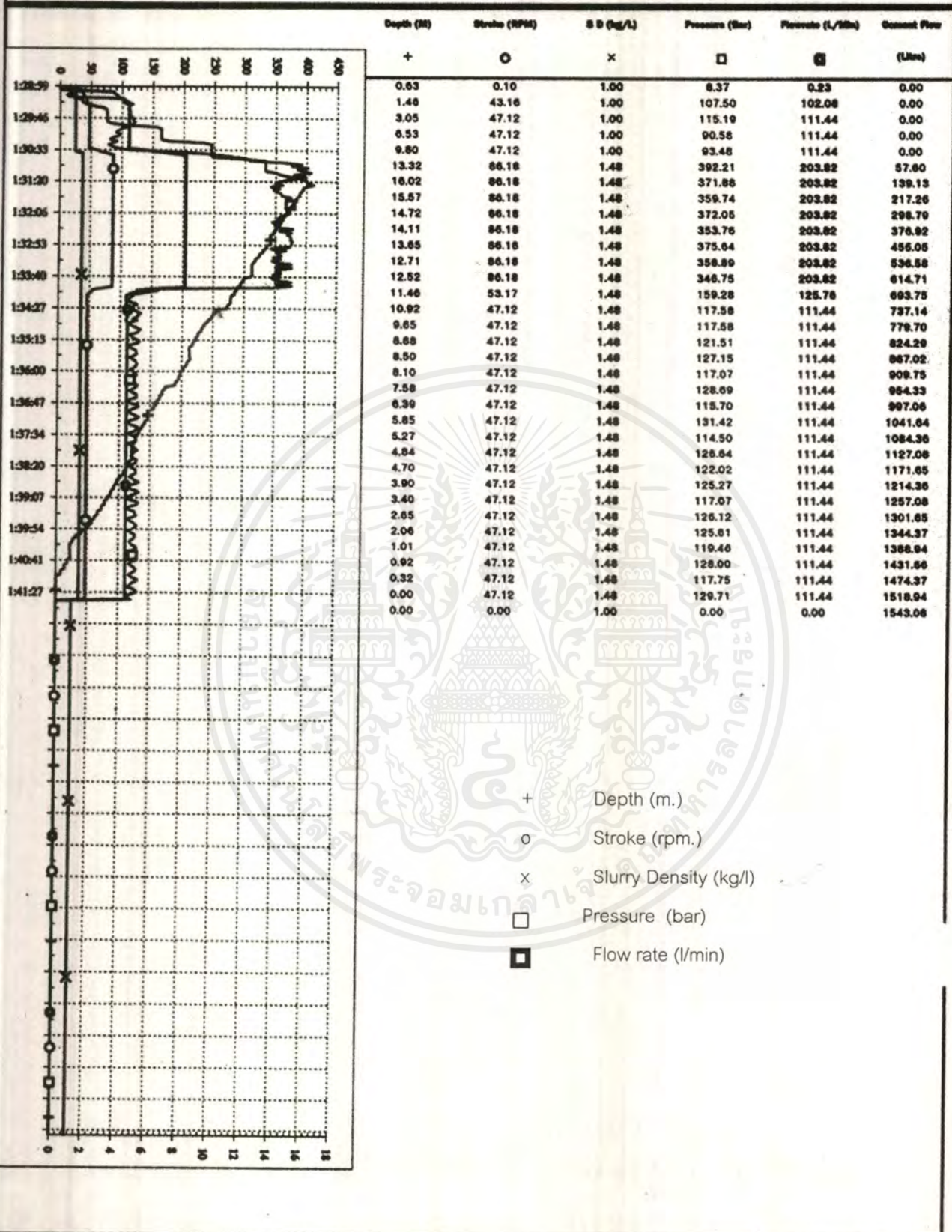
อุปกรณ์และเครื่องจักรต่าง ๆ ในการทำ Jet Grouting Pile ควรจะอยู่ในบริเวณเดียวกัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ โรงผสม เครื่องผสม ถังเก็บน้ำ และมีมีความดันสูง และการจัดวางเครื่องจักรควรเป็นไปในลักษณะต่อเนื่องไม่ขวางการไหลของน้ำซีเมนต์ (ดังแสดงในรูปที่ 5.1) สำหรับความต้องการด้านอื่น ๆ เช่น

1. น้ำซีเมนต์เมื่อผสมแล้วต้องมีเครื่องกวนตลอดเวลาเพื่อไม่ให้ตกตะกอน
2. การวัดปริมาณซีเมนต์และน้ำควรมีระบบตรวจวัดอัตโนมัติ (Automatic Mixer) เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่ถูกต้องแน่นอน
3. ต้องมีเครื่องมืออัตโนมัติวัดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสม และสามารถพิมพ์ผลลัพธ์ออกมาได้ทันทีที่ต้องการในแต่ละวัน
4. ต้องมีเครื่องมือตรวจสอบความเร็วของก้านเจาะ และอัตราการยกของก้านเจาะได้อย่างอัตโนมัติ
5. ต้องมีอุปกรณ์เครื่องมือวัดแวนดิงของก้านเจาะก่อนทำการทำ Jet Grouting Pile ทุกต้น เพื่อตรวจสอบการเบี่ยงเบนของ Jet Grouting Pile
6. อุปกรณ์และเครื่องจักรทั่วไปสำหรับใช้ในการทำ Jet Grouting นั้นควรจะถูกออกแบบให้สะดวกในการใช้งาน และต้องบำรุงรักษาให้ดีอยู่เสมอ รวมทั้งควรมีการล้างทำความสะอาดสม่ำเสมอ
7. อุปกรณ์เสริมต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนหรือซ่อมแซม ควรจะมีการจัดเตรียมไว้เพื่อป้องกัน เพราะว่าเมื่ออุปกรณ์ขัดข้องสามารถจะซ่อมแซมได้ทันที และสามารถทำให้งานดำเนินต่อไปได้ โดยไม่ชะงัก



รูปที่ 5.8 แสดงผลของพารามิเตอร์ในการ Jet Grout (โครงการ MRTA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างกราฟแสดงผลของพารามิเตอร์ในการ Jet Grout ที่ระดับความลึกต่างๆ (โครงการ MRTA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การควบคุมคุณภาพ

การควบคุมคุณภาพเป็นเรื่องสำคัญมากสำหรับการทำ Jet Grouting เนื่องจากเทคนิค Jet Grouting ยังเป็นเรื่องใหม่อยู่สำหรับประเทศไทย การทำ Jet Grouting ในช่วงแรกจึงมีปัญหาอยู่มากในผลงานที่ได้ แต่ในช่วงหลัง ๆ มีการควบคุมงานกันอย่างเป็นระบบ และทั่วถึงมากขึ้นทำให้งานที่ได้ค่อนข้างจะมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

การควบคุมคุณภาพควรเริ่มตั้งแต่การเคลื่อนย้ายเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าไปในสถานที่ก่อสร้างแล้วติดตั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ให้ถูกต้องเหมาะสม จากนั้นก็จะเป็นการควบคุมวิธีการทำงานและการควบคุมในส่วนต่าง ๆ เช่น ส่วนผสม (Grout Mixing) , การเจาะ (Drilling), การฉีด (Jetting) โดยอาศัยมาตรฐานจากผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงาน (Consultant) ซึ่งอาจจะมีข้อแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยตามแต่ละงาน แต่โดยรูปแบบและวัตถุประสงค์จะเหมือน ๆ กัน

แนวความคิดการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงดินด้วย Jet Grouting เป็นเพียงวิธีการปรับปรุงคุณภาพของมวลดินให้มีความเหมาะสมทางวิศวกรรมดีขึ้นโดยมีพื้นฐานแบบหลักการของ Interlocking Column เพื่อ form เป็น Composite Ground ของ Improved Soil ไม่ใช่หลักการของ Individual Column ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพงานจึงเป็น Mass มากกว่า Individual Spicemen ดังกรณีของเสาเข็ม

แนวทางการควบคุมคุณภาพของ Jet Grouting แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

- 1) Diameter Control เพื่อการควบคุมขนาดและรูปร่างของ Jet Grouting Pile จะทำโดย Coring และการ Pull Out
- 2) Strength Control โดยจะทำการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของตัวอย่าง Jet Grouting Pile ที่ได้จากการ Coring โดยตัวอย่างที่ทำการทดสอบต้องมีความยาว 2-3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (โดยทั่วไป ϕ ประมาณ 45 mm.)

การเก็บตัวอย่าง Jet Grouting Pile โดยการทำ Coring เพื่อเป็นมาตรฐานในการตรวจสอบคุณภาพในการควบคุมงาน Jet Grouting Pile เพื่อตรวจสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และกำลังรับน้ำหนักของ Jet Grouting Pile หรือ Unconfined Compressive Strength โดยใช้เครื่องเจาะเป็นหมุน และกระบอกเก็บตัวอย่างชนิด Triple Tubes Core Barrel โดยทั่วไปแล้วการเจาะตัวอย่างโดยวิธีนี้ จะมีตัวอย่างบางส่วนที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม และในบางบริเวณแตกยุ่ยเมื่อถูกน้ำซึ่ง

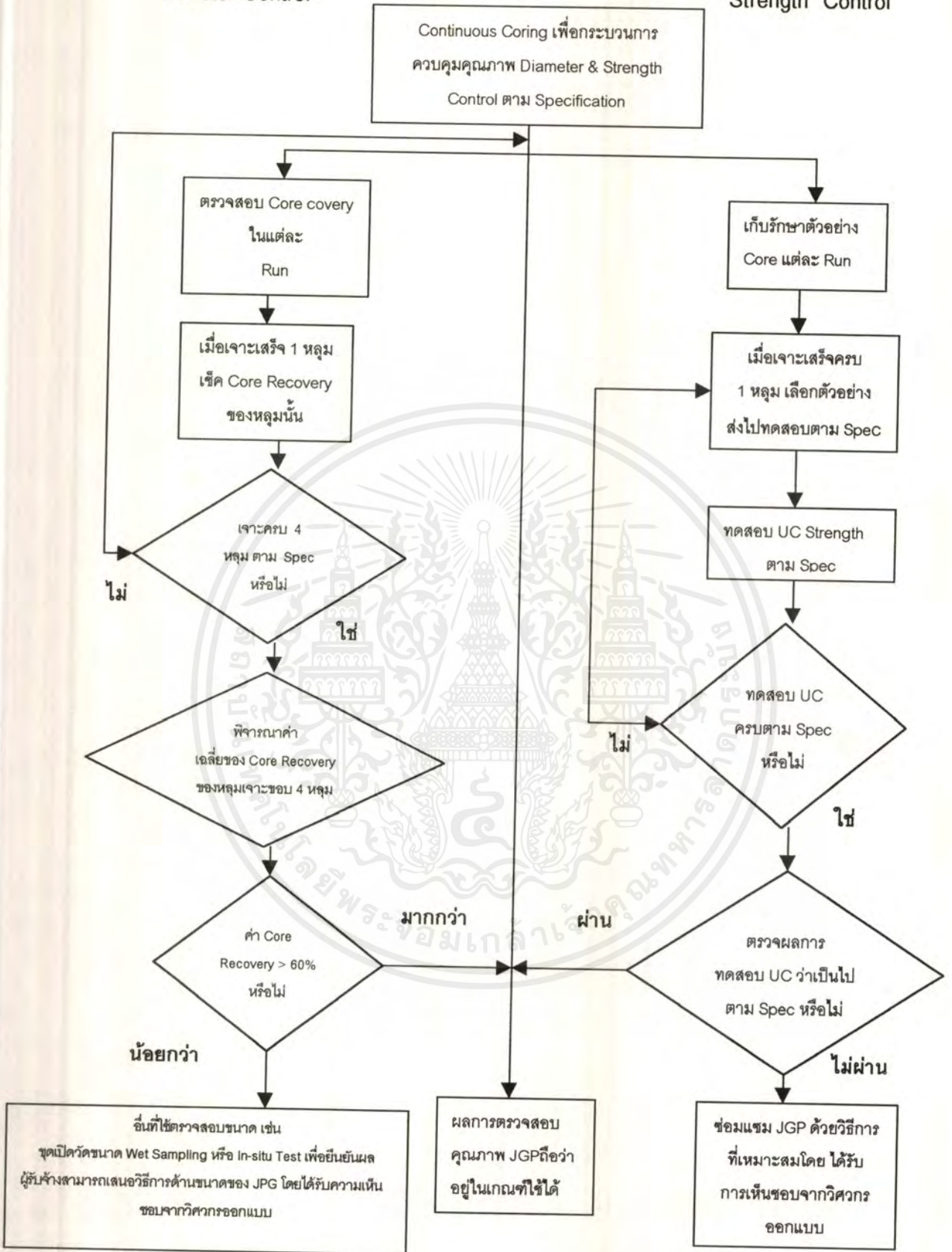
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 วิธีการทำงานและการควบคุมการฉีด (Jetting) (ชอยล์กรีต,2541) (ต่อ)

| | | | | | | |
|----------------------------------|------------|---------------|--------------------|---------------|---------|--------------------------|
| ความดันของเหลวที่ปั๊ม | ควบคุมปั๊ม | ตามข้อแนะนำ | เกจความดัน | ต่อเนื่อง | ±10 bar | ตรวจสอบสภาพหัวฉีดและวงจร |
| อัตราการไหลของปั๊ม | ควบคุมปั๊ม | ตามข้อแนะนำ | เครื่องวัดความเร็ว | ต่อเนื่อง | ±10 bar | ปรับแก้ใหม่ |
| เครื่องลม | ควบคุมปั๊ม | ตามข้อแนะนำ | เกจความดัน | แต่ละคน | ±10 bar | ตรวจสอบปั๊ม |
| ความเร็วของการหมุน (rpm) | ควบคุมปั๊ม | ตามข้อแนะนำ | สายตา | แต่ละคน | ±10 bar | ตรวจสอบเครื่องลม |
| ขั้นตอนการถอน (ชม./วินาที) | ควบคุมปั๊ม | ตามข้อแนะนำ | ระบบอัตโนมัติ | ต่อเนื่อง | ±10 bar | ปรับวาล์ว |
| ความเร็วในการถอน | ควบคุมปั๊ม | ตามข้อแนะนำ | Chronometer / 1 m | 1 ครั้งต่อกะ | ±10 bar | ปรับแก้ให้ถูกต้อง |
| กาก (SPOIL) | | | | | | |
| การไหลของกาก | ควบคุม rig | -- | สายตา | ต่อเนื่อง | ±10 bar | บันทึกการเปลี่ยนแปลง |
| การจุดตัน | ควบคุม rig | ตามข้อแนะนำ | สายตา | ต่อเนื่อง | ±10 bar | หยุดและทำความสะอาด |
| การเก็บตัวอย่างสำหรับ Double jet | ควบคุม rig | ตามข้อแนะนำ | เก็บตัวอย่าง | แต่ละต้น | ±10 bar | -- |
| การเสียรูปร่าง (DEFORMATION) | | | | | | |
| สำรวจ | ช่างสำรวจ | หมดระดับ | ถ่ายระดับ | ตามข้อเสนอแนะ | -- | แจ้งวิศวกร |
| การตรวจตราบริเวณโดยรอบ | ไฟร์แมน | เมื่อเริ่มงาน | สายตา | | -- | หยุดและรายงาน |

Dimeter Control

Strength Control



รูปที่ 6.1 แนวทางในการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงดินในสนามด้วยวิธี Jet Groting (สรารุท จริตงาม, 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1 การตรวจสอบคุณภาพของ Jet Grouting Pile

6.1.1 การตรวจสอบคุณภาพโดยวิธีการ Coring

ภายหลังจากที่วิศวกรที่ปรึกษา ได้ทำการคัดเลือก Jet Grouting Pile ที่จะทำการทดสอบ โดยจำนวนเสาเข็มที่จะทดสอบขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และดุลยพินิจของวิศวกรที่ปรึกษา วิศวกรที่ปรึกษาจะระบุตำแหน่งหลุมเจาะ

ข้อกำหนดของการทำ Coring

การทำ Coring เป็นมาตรฐานในการตรวจสอบคุณภาพของ Jet Grouting Pile เพื่อตรวจสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และกำลังของเสาเข็ม โดยใช้เครื่องเจาะแบบหมุน และกระบอกล็อกเก็บตัวอย่าง (ดูรูปที่ 6.2 และ รูปที่ 6.3 กระบอกล็อกตัวอย่างไม่ควรจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 75 มิลลิเมตร ในการเก็บตัวอย่างโดยวิธี Coring ให้ทำการเก็บตัวอย่างตลอดทั้งความยาวของต้น



รูปที่ 6.2 กระบอกล็อกตัวอย่างโดยวิธี Coring (โครงการ MRTA)

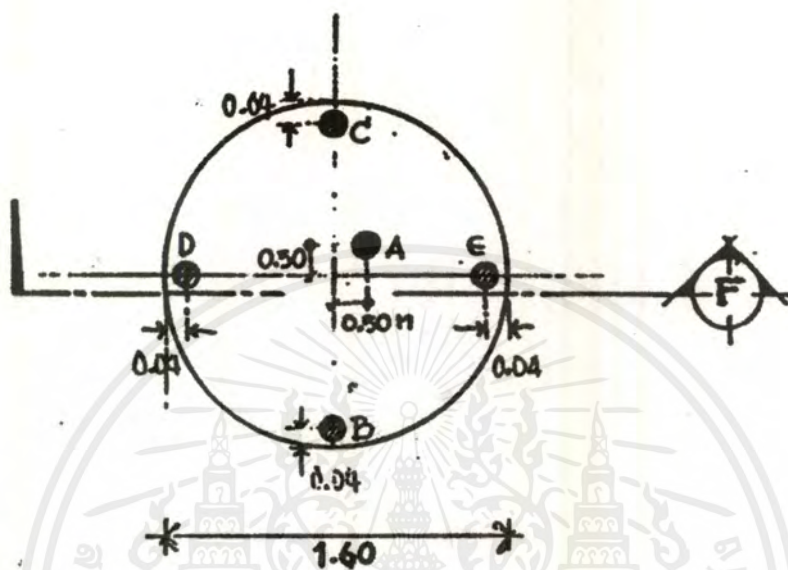
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 การประกอบระบบอกเก็บตัวอย่าง (โครงการ MRTA)

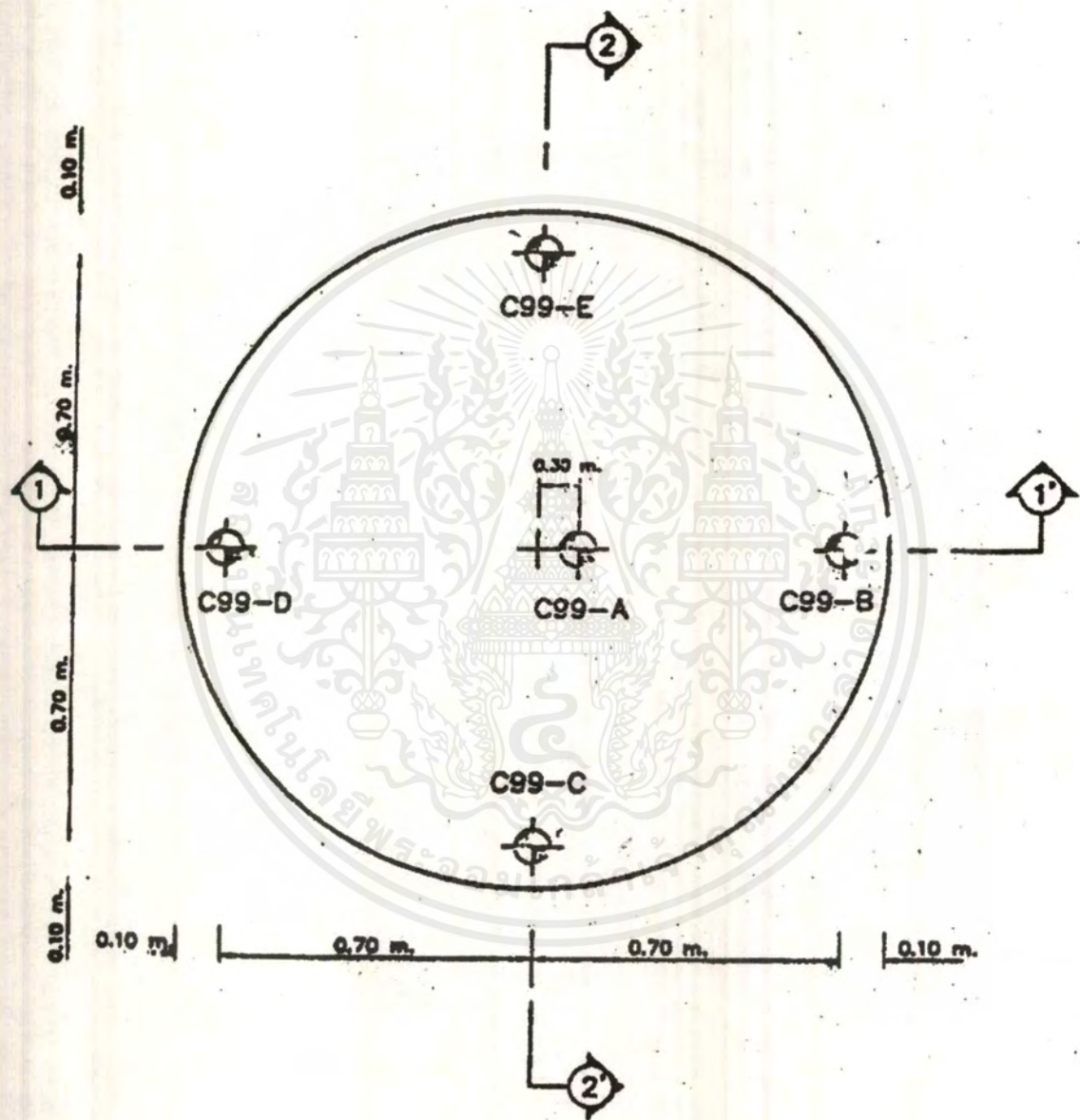
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Coring เพื่อตรวจสอบขนาดของเสาเข็ม ให้ทำการเจาะไม่น้อยกว่า 4 หลุม โดยตำแหน่งของหลุมเจาะ ควรห่างจากขอบของเสาเข็มเล็กน้อย ให้พิจารณาหลุมเจาะ B, C, D, E (ดังรูปที่ 6.4)



รูปที่ 6.4 แสดงตำแหน่งหลุมเจาะเก็บตัวอย่าง (โครงการปากพนัง)

1. RDQ (Rock quality Designation) คือ ให้รวมผลบวกของแท่ง Core ที่มีค่า q_u มากกว่าหรือเท่ากับข้อกำหนดที่มีความยาวตั้งแต่ 10 เซนติเมตรขึ้นไปที่ขาดเนื่องจากการทำ Cement Column ทหารด้วยความยาวของต้น Cement Column ซึ่งควรมีค่ามากกว่า 75%
2. Core Recovery คือ ปริมาณตัวอย่างที่เก็บได้ในแต่ละช่วง ตัวอย่างที่มีค่า Core Recovery สูงนั้นเป็นตัวอย่างที่มีการจับตัว และมีความต่อเนื่องดีกว่าตัวอย่างที่มีค่า Core Recovery ต่ำ โดยค่า Core Recovery ควรมีค่ามากกว่า 60% ดังแสดงในรูปที่ 6.5, 6.6 และ 6.7



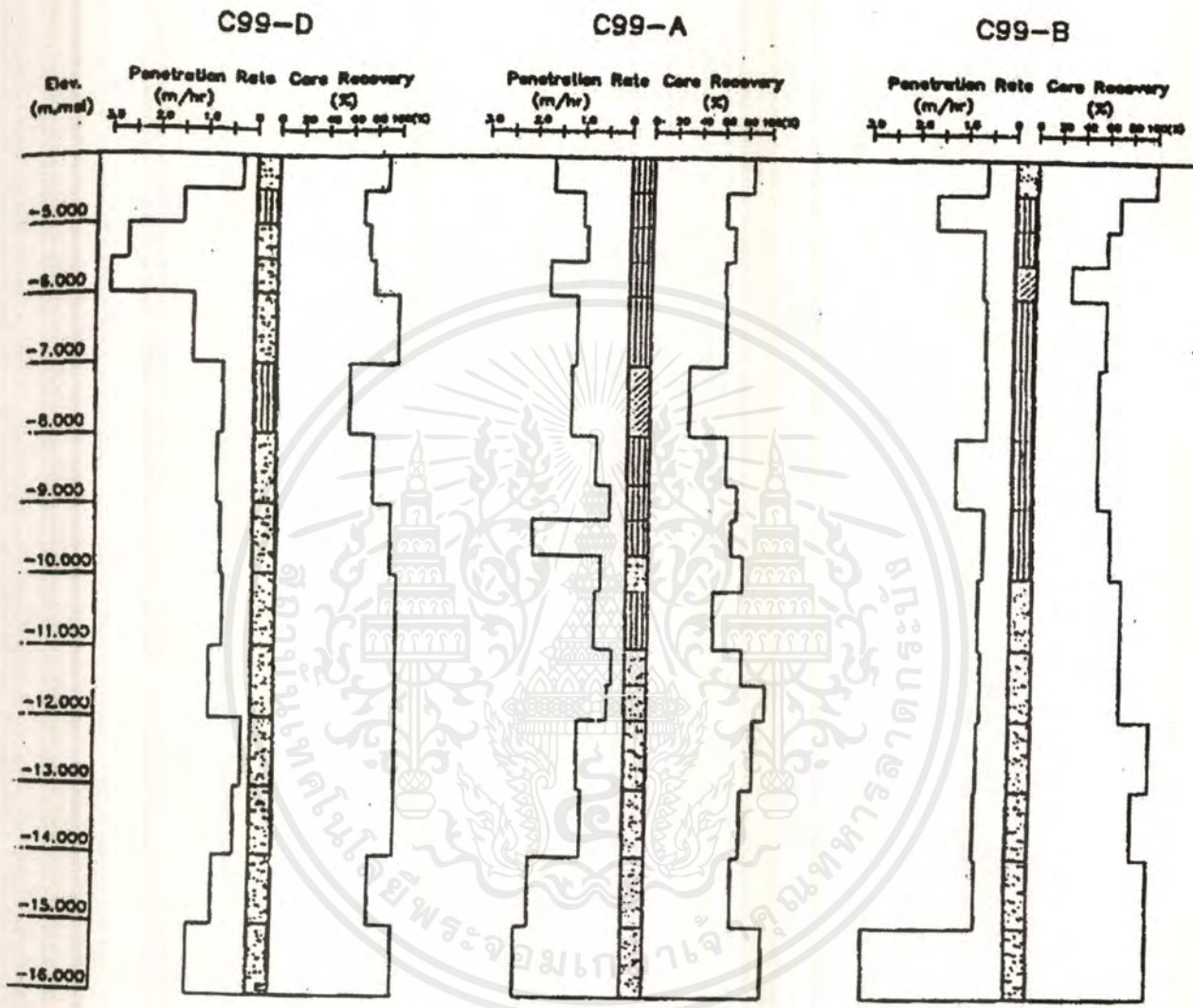
รูปที่ 6.5 ตำแหน่งหลุมเจาะเก็บตัวอย่าง
(สราวุธ จริตงาม, 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SECTION 1-1'

Pile Top -4.00 m.

Pile Tip -16.00 m.



| | | | | | |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| Penetration Rate | Core Recovery | Penetration Rate | Core Recovery | Penetration Rate | Core Recovery |
| เฉลี่ย 1.23 m/hr | เฉลี่ย 86.80 % | เฉลี่ย 1.13 m/hr | เฉลี่ย 71.01 % | เฉลี่ย 1.03 m/hr | เฉลี่ย 73.57 % |

| | | |
|----------|-----------------------|------------------------|
| หมายเหตุ | Core Recovery 0-25 % | Core Recovery 50-75 % |
| | Core Recovery 25-50 % | Core Recovery 75-100 % |

รูปที่ 6.6 แสดงค่า Core Recovery ของหลุมเจาะเก็บตัวอย่าง

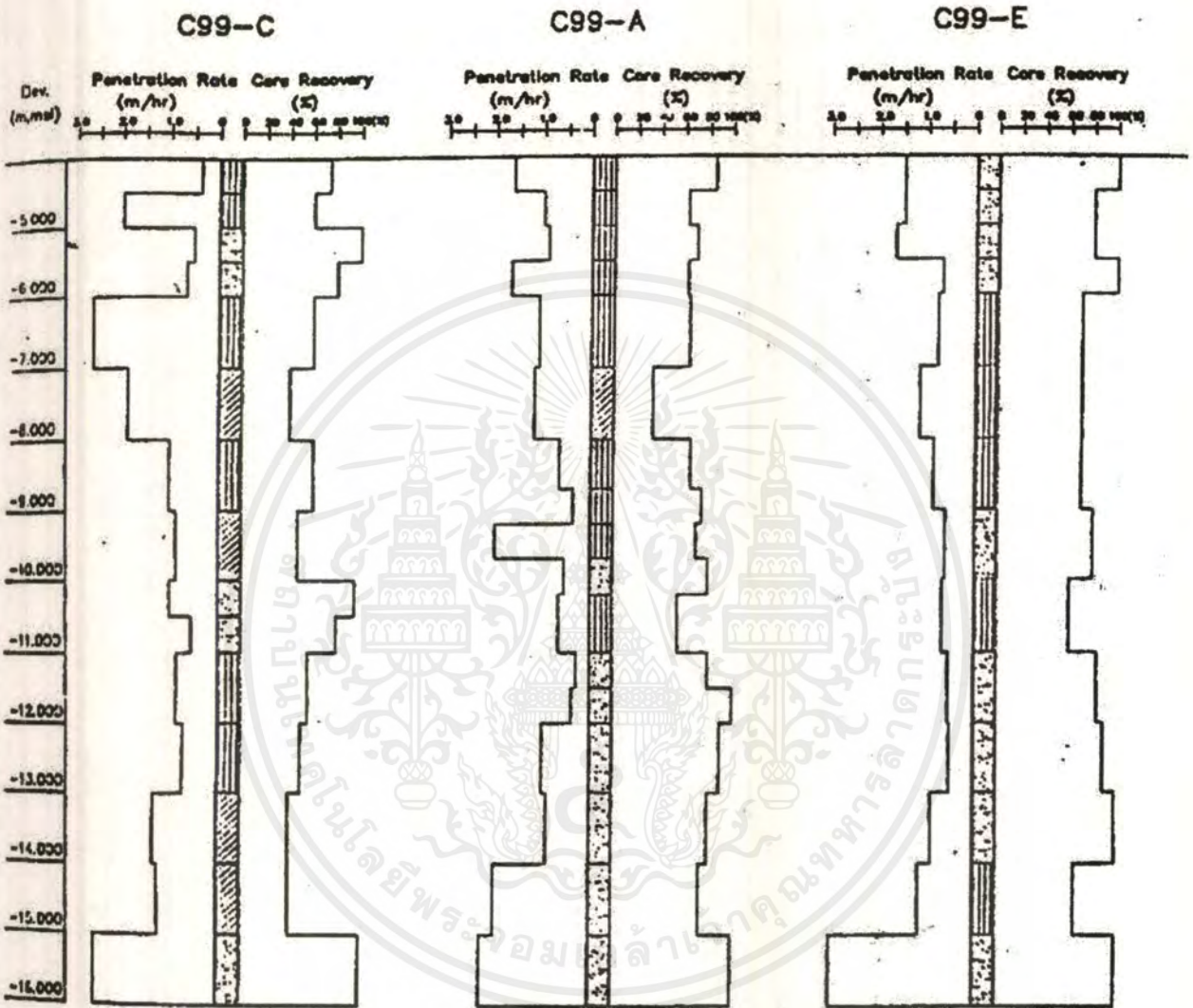
(สรารุท จริตงาม, 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SECTION 2-2'

Pile Top -4.00 m.

Pile Tip -16.00 m.



| | | | | | |
|------------------|---------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| Penetration Rate | Core Recovery | Penetration Rate | Core Recovery | Penetration Rate | Core Recovery |
| เฉลี่ย 1.27 m/hr | เฉลี่ย 55.4 % | เฉลี่ย 1.13 m/hr | เฉลี่ย 71.01 % | เฉลี่ย 1.17 m/hr | เฉลี่ย 53.21 % |

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Core Recovery 0-25 % | Core Recovery 50-75 % |
| Core Recovery 25-50 % | Core Recovery 75-100 % |

รูปที่ 6.7 แสดงค่า Core Recovery ของหลุมเก็บตัวอย่าง (ต่อ)

(สราวุธ จริตงาม, 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Coring เพื่อตรวจสอบกำลังของเสาเข็ม ให้พิจารณาหลุมเจาะ A, B, C, D, E โดยหลุมเจาะ E ควรจะมีตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางของเสาเข็มระหว่าง 1/6 ถึง 2/6 เท่าของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง

การสรุปผลการตรวจสอบคุณภาพของ Jet Grouting Pile ให้นำผลการตรวจสอบ Unconfined Compressive Strength (UC) มาหาค่าเฉลี่ย เช่น หลุมเจาะ A ประกอบด้วยตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง คือ UCA1 UCA2 UCA3 และ UCA4 เพราะฉะนั้นค่า UC ของตัวอย่าง A = $[(UCA1) + (UCA2) + (UCA3) + (UCA4)]/4$ ซึ่งผลที่ได้ต้องผ่านข้อกำหนดของงาน

จากการรวบรวมข้อมูลจากบริษัท แอล บี จีโอเทค จำกัด บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด โครงการ MRTA โครงการปากพั้ง ทางคณะผู้ศึกษาได้สรุปวิธีการทำ Coring ดังนี้

วิธีการทำ Coring

1. เมื่อทำ Jet Grouting Pile เสร็จเรียบร้อยแล้วให้ผู้รับจ้างทำการเจาะเก็บตัวอย่างของ Soil Cement โดยตำแหน่งเจาะที่แน่นอนของการเก็บตัวอย่างให้ผู้ควบคุมของผู้ว่าจ้างเป็นผู้กำหนด ซึ่งควรทำทุกๆ 1000 ตารางเมตร ต่อ 1 ดัน สำหรับงานเสาเข็ม หรือ 500 ลูกบาศก์เมตร ของ Cement Wall
2. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างต้องไม่เล็กกว่า 45 มม. และต้องมีความสามารถเก็บตัวอย่างได้ความยาวต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 3 เมตร โดยเก็บตัวอย่างตลอดความลึกของ Jet Grouting Pile เพื่อดูความสม่ำเสมอ ตัวอย่างที่นำมาจากหลุมเจาะให้หุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น นำแท่งตัวอย่างนี้ไปทดสอบ Unconfined Compression Test ตามมาตรฐาน ASTM D 2166-85
3. ตัดแท่งตัวอย่างได้จากหลุมตรวจสอบ นำไปทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ทุกระยะ 3 เมตร ต่อ 1 ตัวอย่าง (ในบางโครงการให้ใช้ 1.5 เมตร ต่อ 1 ตัวอย่าง) จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 ดันทดสอบ ส่งตัวอย่างไปทดสอบที่หน่วยงานของรัฐ หรือสถานศึกษาของรัฐที่เชื่อถือได้
4. นำตัวอย่างที่เจาะเก็บได้มาใส่ใน Core Box ถ่ายภาพตัวอย่างในถัง Core Box แล้วส่งทั้งรูปภาพและตัวอย่างจริงใน Core Box ให้กับผู้ควบคุมงานของผู้ว่าจ้าง จำนวน 1 ชุด
5. ถ้าผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด แต่ไม่ต่ำกว่า 85% ของค่าที่กำหนดให้ถือว่าใช้ได้ แต่จะต้องไม่มากกว่า 2 ตัวอย่าง ต่อ 1 หลุมเจาะ

6. ถ้าผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของตัวอย่างใดตัวอย่างหนึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยต่ำกว่า 85% ของค่าที่กำหนดหรือไม่ต่ำกว่า 85% ของค่าที่กำหนดและมากกว่า 2 ตัวอย่างต่อหลุมเจาะ ให้ถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ให้ทำการ Jet Grouting Pile พื้นที่ส่วนนั้นใหม่ แล้วทำการเจาะทดสอบใหม่
7. ในกรณีที่มีข้อสงสัยเกี่ยวกับคุณภาพของงาน ผู้ควบคุมงานของผู้ว่าจ้างอาจจะให้มีการเจาะ Coring และทดสอบตัวอย่างเพิ่มได้ตามความจำเป็น
8. ผู้รับจ้างจะต้องทำการอัดน้ำปูนด้วยอัตราส่วนปูนต่อน้ำไม่มากกว่า 1:2 โดยน้ำหนักในหลุมเจาะทดสอบทุกหลุมให้เรียบร้อย



รูปที่ 6.8 แสดงตัวอย่างที่ได้จากการ Coring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 แสดงตัวอย่างที่ได้จากการ Coring ตลอดทั้งต้น และมีการป้องกันการระเหยของน้ำโดยการหุ้มด้วยพลาสติก (โครงการ MRTA)

6.1.2 การตรวจสอบคุณภาพโดยวิธี Pullout Test

Pullout Test เป็นวิธีการดึงเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งต้นตลอดความยาวขึ้นมาเพื่อตรวจสอบให้เห็นกับตา มีหลายวิธีสำหรับ Pull out Test ที่สามารถนำมาใช้ได้ และนำมาใช้โดยผู้รับเหมาแต่ละรายแตกต่างกันไป เช่น

1. Open excavation เป็นการขุดเพื่อการทดสอบดูขนาดและคุณภาพของเสาเข็ม



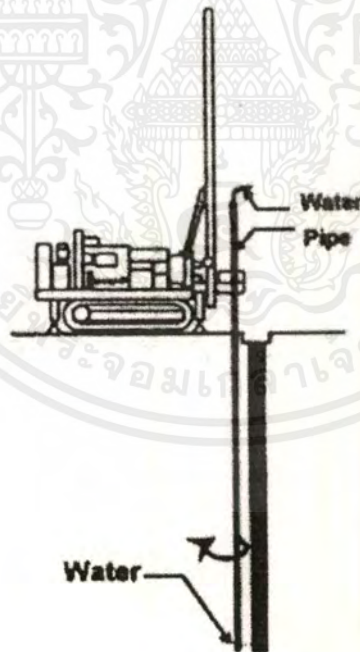
รูปที่ 6.10 แสดงการขุดเพื่อตรวจสอบขนาดของ Jet Grouting Pile (โครงการปากพ่อง)



รูปที่ 6.11 แสดงการวัดขนาดของ Jet Grouting Pile
(โครงการปากพ่อง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

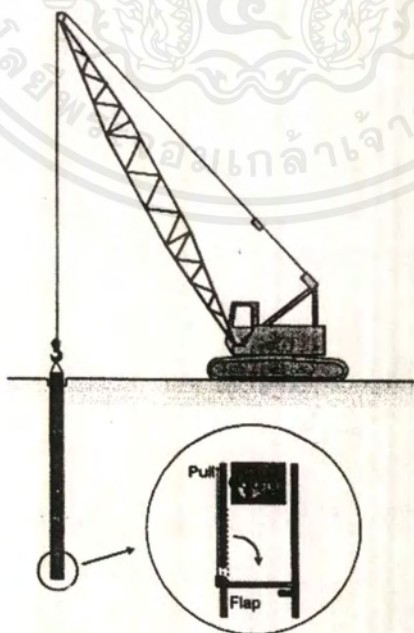
2. การฝังเหล็กเสริมที่จำเป็นลงไปตลอดความยาวเสาเข็ม เพื่อประโยชน์ในการดึงถอนเสาเข็มขึ้นมาตรวจสอบคุณภาพ วิธีนี้เหมาะสำหรับเสาเข็มขนาดไม่เกิน 80 เซนติเมตร เพราะถ้าใช้กับเสาเข็มขนาดใหญ่อาจมีปัญหาในการถอนเพราะต้องใช้แรงมาก เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้ดึงเสาเข็มขึ้นมาตรวจสอบดูความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความยาวตลอดจนเนื้อวัสดุของเสาเข็ม โดยขนาดของเสาเข็มควรมีขนาดส่วนคอดเล็กไม่ควรเกิน 15% หรือ ขยายใหญ่เกินกว่า 30% ของขนาดเสาเข็มที่ออกแบบไว้
3. โดยการใช้ casing ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมาก มีขั้นตอนการทำดังนี้
 - ขั้นตอนการทำ Pullout Test
 1. ทำการ Jet น้ำรอบ ๆ Jet Grouting Pile เพื่อให้ดินรอบ ๆ เข็มมีแรงยึดเหนี่ยวต่อกันน้อยลงเพื่อประโยชน์ในการกด Casing



2. กด Casing ลงไปตามยาว Jet Grouting Pile โดยใช้ Vibro



3. ปิด Flap ที่ส่วนล่างโดยปลาย Casing อยู่ต่ำกว่า Jet Grouting Pile ประมาณ 1 เมตร แล้วดึง Casing ขึ้น



4. วาง Casing ลงบนพื้นดิน แล้วดัน Jet Grouting Pile ออกจาก Casing

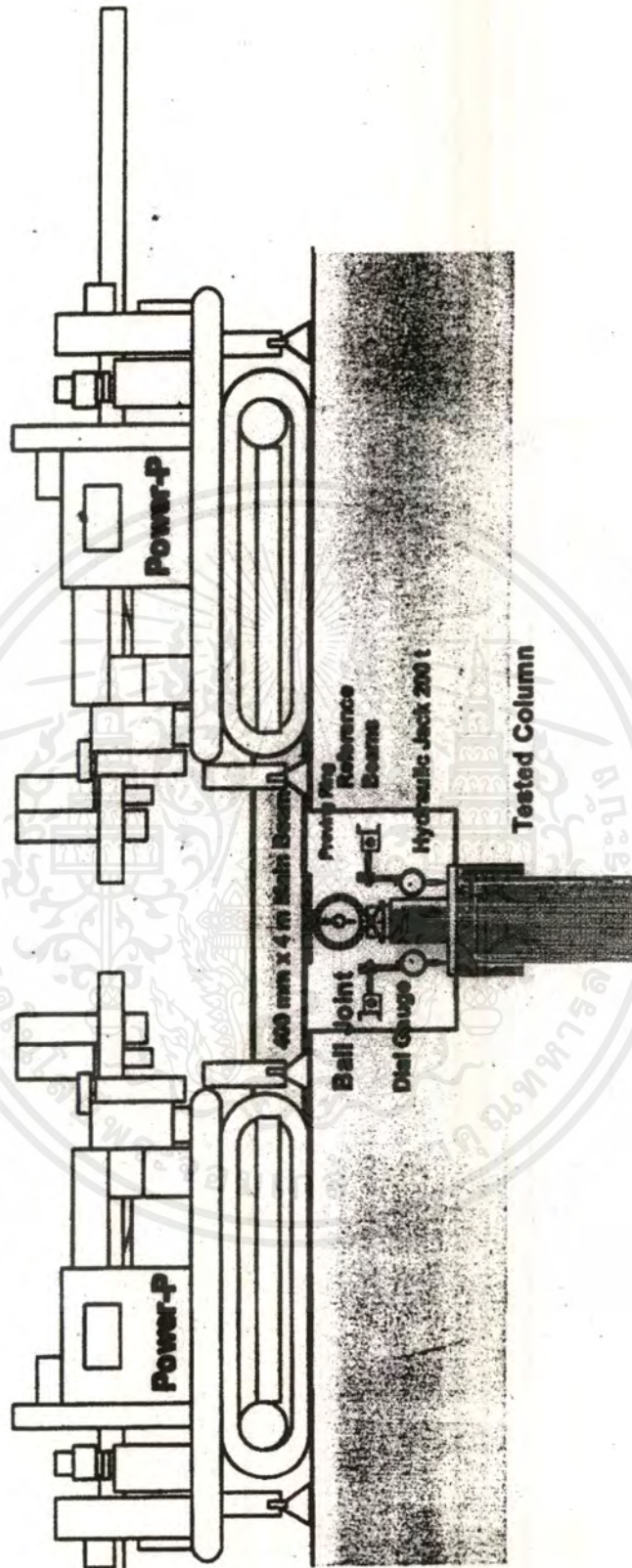


เสาเข็มที่ได้จะถูกตัดเป็นส่วน ๆ แยกออกจากกันเพื่อตรวจสอบสภาพ ถ้าหากส่วนผสมไม่ดีหรือทำการ Jet Grout ไม่ดีแล้ว จะพบก้อนของดินเหนียวที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยการใช้มือกด เพราะว่าไม่สามารถมองได้ด้วยตา เพราะว่าสีของดินซีเมนต์กับดินเหนียวจะใกล้เคียงกันมาก

6.2 การตรวจการรับน้ำหนักของ Jet Grouting Pile โดยวิธี Pile Load Test

เพื่อให้ได้คุณภาพของ Jet Grouting Pile เป็นไปตามที่กำหนดในการรับน้ำหนัก โดยมีหลักการโดยทั่ว ๆ ไปคือ เมื่อทำ Jet Grouting Pile เสร็จเรียบร้อยแล้ว และมีอายุครบ 28 วัน หรือ ครบตามเวลาที่กำหนดโดยผู้คุมงานหรือผู้ว่าจ้างให้ทำ Pile Load Test ตามต้นที่ระบุโดยผู้คุมงานหรือผู้ว่าจ้าง โดยขนาดของแรงกดในการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ Pile Load ตามมาตรฐาน ASTM D 1143 (Pile Under Static axial compressive load) ให้ทำการบันทึกผลการทดสอบทุกขั้นตอนและเสนอให้กับผู้ว่าจ้างหรือผู้คุมงานทราบ

เสาเข็มดินซีเมนต์ต้นหนึ่ง ๆ ที่สร้างขึ้นก็เพื่อจุดประสงค์ในการทดสอบ การรับแรงกดของเสา โดยตรวจสอบความสามารถในการรับแรง และความสม่ำเสมอของเสาเข็ม ถ้าเสาเข็มที่ทำ weak ในบางส่วน นั่นก็คือว่าการทำ Jet Grouting ไม่ดีพอ ดังนั้น การทดสอบ Pile Load Test สามารถนำไปใช้ในการทดสอบเสาเข็มได้



รูปที่ 6.12 แสดงการทำ PILE LOAD TEST (เทียบโยโย, 2541)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์ลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 วิธีการทำงานและการควบคุม (Execution and Control Procedures)

6.3.1 ส่วนผสม (Grout Mixing)

• 1) วิธีก่อสร้าง

1.1) ทั่วไป

ส่วนผสมของ grout ประกอบด้วย ซีเมนต์กับน้ำ โดยจะต้องทำการเตรียมและผสมใน plant ซึ่งประกอบด้วย ถังผสมความเร็วสูง เพื่อผสมน้ำกับซีเมนต์ ให้เข้ากันเป็นส่วนผสมสำเร็จ แล้วนำไปพักไว้ในถังปั่น ก่อนที่จะส่งเข้าสู่ปั๊มความดันสูงต่อไป

1.2) ส่วนผสมพื้นฐานของ Grout

ใน 1 ลบ.ม. ของ grout จะประกอบด้วย

ตารางที่ 6.1 แสดงส่วนผสมของน้ำปูนซีเมนต์ (ชอยล์กรีต,2541)

| | ส่วนผสมสำหรับ Single jet | ส่วนผสมสำหรับ Double jet |
|----------------|--------------------------|--------------------------|
| น้ำ กก. | ตามค่าที่ออกแบบ | ตามค่าที่ออกแบบ |
| ซีเมนต์ กก. | ตามค่าที่ออกแบบ | ตามค่าที่ออกแบบ |
| เบนโทไนท์ กก. | ตามค่าที่ออกแบบ | ตามค่าที่ออกแบบ |
| สารผสมเพิ่ม | ตามค่าที่ออกแบบ | ตามค่าที่ออกแบบ |
| ความถ่วงจำเพาะ | ตามค่าที่ออกแบบ | ตามค่าที่ออกแบบ |

1.3) อุปกรณ์เฉพาะ (Specific equipment)

- ถังเก็บซีเมนต์พร้อมสายพานส่งแบบเกลียว
 - Plant ผสมอัตโนมัติ
 - ถังปั่นสำหรับเก็บส่วนผสมสำเร็จ (Grout)

1.4) หัวข้อเฉพาะ (Specific point)

2) หัวข้อพิเศษ (Particular Points)

- 2.1) การหยุดงาน (ต้องอนุมัติโดยเจ้าของงาน)
- 2.2) จุดวิกฤติ (ต้องได้ข้อมูลจากเจ้าของงาน)
- 2.3) ข้อผิดพลาดเคลื่อนและความถี่ในการเกิดตามสัญญา
- 2.4) ความเสี่ยงจำเพาะ

3) การควบคุมคุณภาพ (Quality Control)

- 1) ข้อผิดพลาดเคลื่อนและความถี่ในการเกิดแสดงไว้ในตารางข้างล่าง
- 2) ถ้าข้อผิดพลาดเคลื่อนและความถี่ในการเกิดตามข้อสัญญามีข้อจำกัดจะต้องเขียนค่าเหล่านี้ลงในตารางและระบุไว้เป็นไปตามข้อตกลงในสัญญา

ตารางที่ 6.2 วิธีการทำงานและการควบคุมส่วนผสม (Grout Mixing) (ชอยล์กรีต,2541)

| | ผู้รับผิดชอบ | อ้างอิง | วิธีการ | ความถี่ | ความคลาดเคลื่อน | วิธีแก้ไข |
|------------------------|--------------|---------------|--------------|----------------------|-----------------|--------------|
| PLANT ในการผลิตส่วนผสม | ช่างเครื่อง | ตามใบสั่งจ้าง | ตรวจด้วยตา | ทุกครั้งของการนำเข้า | ตามใบสั่งจ้าง | ซ่อมแซมใหม่ |
| GROUT MIX | | | | | | |
| ความถ่วงจำเพาะ | ผู้ดำเนินการ | ส่วนผสม | Baroid scale | 1/เที่ยว | ±3% | แก้ไขตามซั่ง |
| การเก็บตัวอย่าง | ผู้ดำเนินการ | ตามคำสั่ง | เก็บตัวอย่าง | ตามคำสั่ง | - | - |

6.3.2 การเจาะ (Drilling)

1. การก่อสร้าง

1.1) ทั่วไป

- ขั้นตอนในการฉีดส่วนผสมน้ำซีเมนต์ ประกอบด้วยการทำให้เนื้อดินแตกตัว จากนั้นจึงผสมหรือแทนที่ดินบางส่วนด้วยซีเมนต์ การทำให้เนื้อดินแตกตัวทำได้โดยการใช้หัวฉีดของเหลวความดันสูง ซึ่งของเหลวนี้อาจเป็นน้ำซีเมนต์ก็ได้

- ก่อนที่ก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ จะต้องเจาะรูลงไปให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ถึง 160 มม.

- ของเหลวที่ใช้ในการเจาะ คือ น้ำ แต่ก็อาจพิจารณาใช้โคลนเบนโทไนท์หรือน้ำซีเมนต์ก็ได้

- วิธีการเจาะเป็นระบบหมุน ส่วนเจาะ (Drill rigs) จะต้องแน่นเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยมีการต่อก้านเจาะ เพื่อให้ทำการฉีดได้ความลึกมากที่สุด โดยไม่ต้องถอดเอา rod ออก

1.2) หัวข้อจำเพาะ

การฉีดก่อน (Prejetting)

- การฉีดก่อนในระหว่างการเจาะจะกระทำในกรณี Single jet คือ การฉีดของเหลว เพื่อการเจาะด้วยความดันสูงตามที่กำหนด

การเปียงเบนหลุมเจาะ

- ในกรณีการปรับปรุงทรายซึ่งอยู่ลึก การรู้ตำแหน่งของหลุมเจาะจะช่วยป้องกันการผิดพลาดของระยะทับซ้อน (overlap) ระหว่างเสา ซึ่งอาจนำไปสู่การต้องทำงานเพิ่ม

- หลังจากเจาะผ่านไป 2 ท่อ (double rods) จะต้องตรวจสอบหลุมด้วย Inclinator

2. หัวข้อพิเศษ (Particular Points)

2.1) การหยุดงาน (ต้องอนุมัติโดยเจ้าของงาน)

ท่อเจาะจมหลุมไปในรูเจาะ

2.2) จุดวิกฤต (ต้องให้ข้อมูลแก่เจ้าของงาน)

พบอุปสรรคในระหว่างการเจาะ

2.3) ข้อผิดพลาดเคลื่อนและความถี่ตามสัญญา

2.4) ความเสี่ยงจำเพาะ

- สภาพดินที่ผิดปกติจะต้องได้รับการแก้ไขเป็นกรณีพิเศษ
- ถ้ามีสิ่งกีดขวางหรือสาธารณูปโภคจะต้องรื้อย้ายหรือป้องกัน
- การเคลื่อนตัว (ทรุดตัว, ปลูก) ที่ผิวดิน หรือบริเวณโครงสร้างข้างเคียง

3. การควบคุมคุณภาพ

3.1) ข้อผิดพลาดเคลื่อนและความถี่ในการเกิดแสดงไว้ในตารางข้างล่าง

3.2) ถ้าข้อผิดพลาดเคลื่อนและความถี่ในการเกิดตามสัญญามีข้อจำกัด

มากจะต้องเขียนค่าตามสัญญาเหล่านี้ลงในตารางและระบุว่าเนื่องจากสาเหตุใด

ตารางที่ 6.3 วิธีการทำงานและการควบคุมการเจาะ(Drilling) (ชอยล์กรีต,2541)

| | ผู้รับผิดชอบ | อ้างอิง | วิธีการตรวจ | ความถี่ | ความคลาดเคลื่อน | วิธีแก้ไข |
|---------------------------------|--------------|------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| การติดตั้ง PLANT | ช่างเครื่อง | ตามใบสั่งจ้าง | สายตา | ทุกครั้งที่นำเข้าไป | ตามใบสั่งจ้าง | ซ่อมแซมใหม่ |
| SETTING-OUT | | | | | | |
| ทั่วไป | ช่างสำรวจ | ตามแบบที่อนุมัติ | การสำรวจ | ก่อนเริ่มงาน | ±1 ซม. | สำรวจใหม่ |
| เสาเข็มดินซีเมนต์ | ไฟร์แมน | หมุดอ้างอิง | เทปวัด | แต่ละหลุม | ±2 ซม. | แก้ไขใหม่ |
| การติดตั้งส่วนเจาะ (SET UP RIG) | | | | | | |
| ตำแหน่งหลุมเจาะ | ผู้เจาะ | ตามแบบที่อนุมัติ | หมุดพื้นสี, สติกเกอร์ | แต่ละหลุม | - | ตรวจสอบและระบุ |
| ความเอียงของหลุม | ผู้เจาะ | ตามแบบที่อนุมัติ | เครื่องวัดระดับเสียง | แต่ละหลุม | ±0.5° | ปรับแก้ความเอียง |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 วิธีการทำงานและการควบคุมการเจาะ (Drilling) (ชอยล์กริต,2541) (ต่อ)

| ผลกระทบของหลุม เจาะที่บริเวณผิว | ผู้เจาะ | เครื่องหมาย | สายตา | แต่ละหลุม | ±2 ซม. | แก้ไขตำแหน่ง |
|------------------------------------|----------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|---------|-------------------------------|
| การเจาะ (DRILLING) | | | | | | |
| ลักษณะชั้นดิน | ผู้เจาะ | การเจาะสำรวจ | สายตา | ต่อเพิ่ม | - | บันทึกการ เปลี่ยนแปลง |
| ของเหลวช่วยในการ เจาะ | ผู้เจาะ | การไหลกลับของ ของเหลว | สายตา | ต่อเพิ่ม | - | บันทึกการสูญเสีย |
| หัวเจาะ | ผู้เจาะ | ตามข้อแนะนำ | สายตา-เทป วัด | แต่ละหัว | - | เปลี่ยนหัว เจาะ |
| การอัดฉีดน้ำก่อน | ผู้เจาะ | ตามข้อแนะนำ | เกจความดัน | ต่อเนื่อง | 10 bar | ปรับแก้ |
| อัตราการเจาะ | ผู้เจาะ | - | สายตา | แต่ละหลุม | ±N.A | บันทึกสิ่งผิดปกติ |
| ความลึกสุดท้าย | ผู้เจาะ | ตามข้อแนะนำ | จำนวนท่อ ระยะระบุ | แต่ละหลุม | ≥ออกแบบ | เจาะใหม่หรือ หยุดเจาะ |
| ความเบี่ยงเบนของรู เจาะ | ช่าง เทคนิค | - | Inclinometer | รูเจาะแบบ Double jet | - | ตามการ วิเคราะห์ข้อ มูล |

6.3.3 การฉีด (Jetting)

1. วิธีการก่อสร้าง

1.1) ทั่วไป

- ขั้นตอนในการฉีดส่วนผสมน้ำซีเมนต์ประกอบด้วย การทำให้เนื้อดินแตกตัวจากนั้นจึงผสมหรือแทนที่ดินบางส่วนด้วยซีเมนต์ การทำให้เนื้อดินแตกตัวทำได้โดยการใช้หัวฉีดของเหลวความดันสูง ซึ่งของเหลวนี้อาจ เป็นน้ำซีเมนต์ก็ได้

- การฉีดด้วยวิธี Single หรือ Double นั้นต่างก็ต้องใช้ความดันสูงเพื่อฉีดมวลผสมน้ำซีเมนต์ในวิธี Double jet ส่วนผสมที่ฉีดออกมาจะผสมด้วยอากาศอัดที่ถูกฉีดออกมาในเวลาเดียวกัน เพื่อให้ส่วนผสมสามารถแทรกซึมในดินได้ดี และเป็นการขยายเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์

1.2) ส่วนผสมของ Grout

ส่วนผสมของ grout โดยทั่วไปประกอบด้วย ซีเมนต์และน้ำ ที่จะเตรียมและเก็บไว้ใน plant ซึ่งประกอบด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ทำการผสมซีเมนต์เข้ากับน้ำกลายเป็นส่วนผสม grout จากนั้นนำไปเก็บไว้ในถังปั่น ก่อนที่จะถูกส่งต่อออกไปด้วยปั๊มความดันสูง

1.3) เครื่องมือพิเศษ

- Jetting rig (เหมือน Drilling rig)
- Jetting string (ใช้ในกรณีเจาะเช่นกัน) ประกอบด้วยท่อคูในกรณี Double jet ซึ่งสามารถทนต่อความดันได้สูง
- Jetting head อยู่ที่ปลายด้านบนของ rod และ Jetting monitor อยู่ที่ปลายด้านล่างของ rod ยึดติดกับหัวฉีด
- ปั๊มความดันสูง
- เครื่องลมในกรณีที่เป็น double jet
- ท่อยาง (Hose) ทนความดันสูงอยู่ระหว่างปั๊มกับ jetting rig

1.4) พารามิเตอร์ในการทำ Jet Grout

ด้วยสภาพทางธรณีวิทยาและผลที่จะได้รับในการทำ Jet Grout จะต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- ความดันของ ๆ เหลว ซึ่งหมายถึง น้ำในการทำ prejet, ส่วนผสมซีเมนต์ หรืออากาศในกรณี double jet
- อัตราการไหลของการฉีดด้วยความดันสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด
- การถอนขึ้น และอัตราการหมุนของหัวฉีด (rods)

1.5) หัวข้อจำเพาะ

- การจัดการกับส่วนกาก (Spoil)

ในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ จะเกิดส่วนกาก (ส่วนผสม ดิน + น้ำ + ซีเมนต์) ทะลักขึ้นมาบริเวณปากหลุม ซึ่งกากเหล่านี้จะต้องถูกนำไปเก็บไว้ในถังหรือบ่อดัก แล้วนำไปทิ้งในที่ ๆ ได้รับอนุญาต

- การทดลอง (Trial Test)

ก่อนจะเริ่มงาน จะต้องทำการทดลองเจาะ เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นให้เป็นไปตามต้องการ

2. หัวข้อพิเศษ

2-1) การหยุดงาน (อนุมัติโดยเจ้าของ)

- เกิดการหลุดหายของท่อเจาะลงในรูเจาะ
- เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างข้างเคียง

2-2) จุดวิกฤติ (ข้อมูลแจ้งเจ้าของงาน)

2-3) ข้อคลาดเคลื่อนและความถี่ในการเกิดตามสัญญา

2-4) ความเสี่ยงพิเศษ

- สภาพดินที่ผิดปกติต้องได้รับการปรับปรุงเป็นพิเศษ
- การเสียรูปร่างของโครงสร้างข้างเคียงหรือถนน
- การเคลื่อนที่ (การทรุดตัว, ระเบิดขึ้น) ที่ฝังดินหรือโครงสร้างข้างเคียง

3. การควบคุมคุณภาพ

3.1) ความคลาดเคลื่อนความถี่ระบุไว้ในตารางข้างล่าง

3.2) ถ้าความคลาดเคลื่อนหรือความถี่เกิดขึ้นตามสัญญามีข้อจำกัด ค่า

ตามสัญญาเหล่านี้จะต้องเขียนลงในตารางและระบุว่าเนื่องจากสาเหตุใด

ตารางที่ 6.4 วิธีการทำงานและการควบคุมการฉีด (Jetting) (ชอยล์กรีต,2541)

| | ผู้รับผิดชอบ | อ้างอิง | วิธีการตรวจ | ความถี่ | ข้อคลาดเคลื่อน | การแก้ไข |
|-----------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|----------------|-------------|
| PLANT | ช่างเครื่อง | คำสั่งจ้าง | สายตา | ทุกครั้งที่ส่งมอบ | ใบสั่งจ้าง | ซ่อมแซมใหม่ |
| JETTING | | | | | | |
| ความดันของเหลวที่ rig | คนคุม rig | ตามข้อแนะนำ | เกจความดัน | ต่อเนื่อง | ใบสั่งจ้าง | ซ่อมแซมใหม่ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องมีในระหว่างการเจาะ แรงดันน้ำซึ่งใช้เจาะเก็บตัวอย่างหรือแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ หายไปในการเจาะเพราะ Jet Grouting Pile เป็นวัสดุค่อนข้างเปราะ จึงทำให้ตัวอย่างที่ Core ได้มักจะแตกและหักเนื่องจาก

- 1) การโค้งงอภายในหลุมเจาะ
- 2) Rigidity ของกระบอกเก็บตัวอย่าง
- 3) การ Locking ของกระบอกเก็บตัวอย่าง
- 4) การหมุนของตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาในกระบอกเก็บตัวอย่าง เป็นต้น

ปริมาณตัวอย่างที่เก็บได้ในแต่ละช่วงการเจาะ เรียกว่า Core Recovery ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าตัวอย่างที่มีค่า Core Recovery สูงนั้นเป็นตัวอย่างที่มีการจับตัว และมีความต่อเนื่องดีกว่าตัวอย่างที่ดีค่า Core Recovery ต่ำ จากผล Core Recovery ที่ได้จะสามารถประเมินผลการเจาะได้ดังนี้

| Core Recovery (%) | ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง |
|-------------------|----------------------------|
| 0-25 | ต่ำ |
| 25-50 | ค่อนข้างต่ำ |
| 50-75 | ปานกลาง |
| 75-100 | ค่อนข้างสูง |

อย่างไรก็ตาม การประเมินคุณภาพของแท่งตัวอย่าง Jet Grouting Pile ที่ถูกต้องจะต้องประกอบด้วยผลการทดสอบอื่น ๆ เช่น ผลการทดสอบ Unconfined Compressive Test เป็นต้น เพื่อที่จะบอกได้ว่าตัวอย่างที่ได้คุณสมบัติในด้านกำลัง เพิ่มขึ้นอย่างไร สำหรับการควบคุมคุณภาพงานปรับปรุงดินโดยวิธี Jet Grouting Pile ในด้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและกำลังของ Jet Grouting Pile ได้สรุปดังรูปที่ 6.1

6.4 การคำนวณตรวจสอบปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับงาน Jet Grouting Pile

ในการคำนวณปริมาณปูนซีเมนต์ต้องรู้ขนาดของ Jet Grouting Pile และ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำงาน เช่น อัตราการดึงก้านเจาะ (rod) อัตราการบีบอัดฉีดน้ำซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ โดยสามารถคำนวณออกมาเป็นปริมาณปูนที่ใช้ต่อลูกบาศก์เมตรของเสาเข็ม

ประโยชน์ในการตรวจสอบปริมาณปูนซีเมนต์

1. เพื่อเป็นการตรวจสอบส่วนผสมต่าง ๆ ว่าถูกต้องหรือไม่อย่างคร่าว ๆ ถือเป็นการทำงานก่อนทำงานจริง เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะตามมา เช่น strength ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)
2. เพื่อเป็นการตรวจสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำ Jet Grouting เช่น flow rate ของน้ำปูน อัตราการยกก้านเจาะ อัตราการหมุนก้านเจาะ
3. เพื่อเป็นการเสนอรายการควบคุมอัตราส่วนผสม (Mixing Ratio) เสนอใน Proposal ให้ผู้คุมงานหรือเจ้าของงานทราบ
4. เพื่อประโยชน์ในการประมาณราคาโดยอาศัยปริมาณปูนซีเมนต์เป็นเกณฑ์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีการกำหนดราคาเป็นลูกบาศก์เมตรของเสาเข็ม
5. เพื่อเป็นการประมาณเวลาที่ใช้ในการทำงานได้

ตัวอย่างการคำนวณ Mixing Ratio

สมมติ : ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.60 เมตร ยาว 12.00 เมตร

$$\text{Cement content} = 250 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{W/C} = 1.25$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์} = 3.1$$

$$\text{Quantity of flow} = 200 \text{ litre/min}$$

- 1) ความถ่วงจำเพาะของน้ำปูน (ต่อ 1 กรัม)

| | ซีเมนต์ | น้ำ | รวม |
|--------------|-----------|-----|--------|
| น้ำหนัก (kg) | 200 | 250 | 450 |
| ปริมาตร | $200/3.1$ | 250 | 314.52 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถ่วงจำเพาะของน้ำปูน : PC

$$PC = 450/314.52$$

$$= 1.43 \quad \text{_____}(1)$$

2) จำนวนของซีเมนต์ต่อลิตรของน้ำปูน

$$314.52 \text{ litre (น้ำปูน)} \rightarrow 200 \text{ kg. (ซีเมนต์)}$$

$$1.572 \text{ litre (น้ำปูน)} \rightarrow 1 \text{ kg. (ซีเมนต์)} \quad \text{_____}(2)$$

3) จำนวนของน้ำปูนต่อเสาเข็มหนึ่งต้น

$$\text{ปริมาตรของเสาเข็ม} = \pi/4 \times (0.60)^2 \times 12.00$$

$$= 3.39 \text{ m}^3/\text{pile}$$

$$= 3.39 \text{ m}^3 \times 250 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{จำนวนของซีเมนต์ต่อเสาเข็มหนึ่งต้น} = 847.50 \text{ kg/pile} \quad \text{_____}(3)$$

จาก (2)

$$\text{จำนวนของปริมาณน้ำปูน} = 847.50 \times 1.572$$

$$= 1,332.27 \text{ litre/pile}$$

4) การควบคุมอัตราการไหลของน้ำปูน

$$\text{กำหนด : อัตราการไหลของน้ำปูน} = 200 \text{ litre/min}$$

$$\text{เวลา} = 1332.27/200$$

$$= 6.66 \text{ min/pile}$$

$$= 399.6 \text{ sec/pile}$$

$$\text{อัตราการหมุนก้านเจาะ} = 10 \text{ r.p.m.}$$

$$= 6 \text{ sec/stroke}$$

$$\text{รวมจำนวนครั้ง} = 399.6/6 \text{ stroke}$$

$$= 66.6 \text{ stroke}$$

$$\text{รวมใช้เวลา} = 67 \times 7 \text{ sec/pile}$$

$$= 402 \text{ sec/pile}$$

$$\text{หรือ} = 6.7 \text{ min/pile}$$

$$\text{รวมปริมาณน้ำปูน} = (402/60) \times 200 \text{ litre}$$

$$= 1,340 \text{ litre}$$

$$\text{จำนวนของซีเมนต์} = 1,340/1.572 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}
 &= 852.41 \quad \text{kg} \\
 \text{Cement content ของเสาเข็ม} &= 852.41/3.39 \text{ kh/m}^3 \\
 &= 251.45 \quad \text{kg/m}^3 \text{ ____OK}
 \end{aligned}$$

จะพบว่าปริมาณ Cement content จากรายการคำนวณเท่ากับ 251.45 kg/m^3 มีค่าใกล้เคียงกับ Cement content ที่ระบุไว้ในช่วงแรกเท่ากับ 250 kg/m^3 เพราะฉะนั้นจึงสามารถยอมรับได้ และอัตราการหมุนก้านเจาะ ระยะยกก้านเจาะ (stroke) flow rate ก็สามารถยอมรับได้เช่นกัน

ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ไม่ควรจะมากกว่า 2 แต่โดยทั่วไปจะใช้ 1.1-1.5 ซึ่งปริมาณน้ำต่อซีเมนต์จะมีผลต่อ strength ของดินซีเมนต์โดยตรง

6.5 ข้อกำหนดของการทำ Jet Grouting Pile

ในขณะนี้มาตรฐานทางวิศวกรรมของงาน jet grouting วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ยังไม่ได้ระบุไว้อย่างชัดเจน เพราะฉะนั้นข้อกำหนดต่างๆ ถูกกำหนดโดยผู้ออกแบบหรือผู้ควบคุมงาน โดยจะมีระบุไว้ในสัญญาจ้าง ในการทำงานนั้นผู้รับเหมาจะจัดทำรายการการทำงาน (proposal) เสนอแก่ผู้ว่าจ้างหรือผู้ควบคุมงาน โดยจะบอกถึงลักษณะของเครื่องจักร อุปกรณ์ที่ใช้ และบอกถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำงาน Jet Grouting เช่น Pressure of slurry, Quantity of flow, With drawing speed, Rotation speed, Water Cement ratio

จากการศึกษาของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (บางมด) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2532 โดยนำดินเหนียวกรุงเทพฯ มาผสมกับน้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่าใช้น้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 100 กก./ลบ.ม. ของดินเปียก ในการทำ Cement Column ในสนาม กำหนดให้ทำ Trial Test ทำการ CORING เพื่อให้ได้ตัวอย่างไม่เล็กกว่า 75 มม. ตลอดความยาวของต้น ของ Cement Column เพื่อสุ่มตัวอย่างไปทดสอบ Unconfined Compressive Strength, q_u , และตั้งหา ROD (Rock quality Designation) คือให้รวมผลบวกของแท่น Core ที่มีค่า q_u มากกว่าหรือเท่ากับข้อกำหนดที่มีความยาวตั้งแต่ 10 เซนติเมตรขึ้นไปที่ขาดเนื่องจากการทำ Cement Column ทหารด้วยความยาวของต้น Cement Column ซึ่งควรมีค่า RQD > 75 การ Coring Cement Column นั้น ให้พิจารณาถึงขนาดของ Cement Column ด้วย เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 80 เซนติเมตร ให้ทำการ Core ประมาณใกล้ศูนย์กลางของต้นหนึ่งตำแหน่ง การตรวจสอบความสม่ำเสมอให้ใช้วิธีถอนขึ้นมา

ตรวจสอบ ส่วน Cement Column ขนาดโตกว่า $\phi \geq 1$ เมตร ให้ทำการ Core เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของการเป็น Cement Column (ความสม่ำเสมอคือค่า q_u รอบนอกต้องไม่น้อยกว่ากลาง ๆ ลำต้น) โดยทำการ Coring อีกต้นละ 4 รู รอบ ๆ ต้น Cement Column โดยให้ริมอกของ Cement Column ห่างจากขอบนอกของหัว CORE ประมาณ 15 เซนติเมตร ส่วนการ CORING เพื่อหาค่า Unconfined Compressive Strength ให้ Core ประมาณกลาง ๆ ลำต้น

ตัวอย่างการระบุ Specification (โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาพระองค์ไชยานุชิต, 1999)

(1) ส่วนประกอบและความชันเหลวของน้ำซีเมนต์ อัตราการบีบ ความดันของการอัดฉีดจะต้องใช้ไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ดังนี้

- Portland Cement Type I
- ใช้ปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 250 กก./ลบ.ม. ของดินเดิม
- อัดฉีดน้ำซีเมนต์ด้วยแรงดันประมาณ 150-400 BAR

(2) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Jet Grouting Pile ไม่น้อยกว่า 1.60 ม. โดยมีระยะห่างและระยะเหลื่อมตามที่ปรากฏในแบบรายละเอียดการก่อสร้าง

(3) ค่า Unconfined Compressive Strength ของตัวอย่างที่ระดับต่าง ๆ เมื่ออายุครบ 14 วัน หรือ 28 วัน ของทุกตัวอย่างต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4 กก./ตร.ซม. หรือ 6 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ กรณีใดกรณีหนึ่ง ให้ถือว่าใช้ได้แล้วรวบรวมงานผลส่งให้กับกรรมการตรวจการจ้างจำนวน 3 ชุด ในวันตรวจรับงานงวดต่อไป

(4) ค่า Pile Load เมื่ออายุครบ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 1,250 KN ในงานก่อสร้างทำนบกั้นลำน้ำเดิมและไม่น้อยกว่า 500 KN ในงานก่อสร้างงานอื่น ๆ ที่กำหนดไว้ในแบบ

บทที่ 7 กรณีศึกษา

7.1 โครงการรถไฟฟ้ามหานครระยะแรก สถานีหัวลำโพง-ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์-บางซื่อ (สายสีน้ำเงิน)

เจ้าของโครงการ

องค์การรถไฟฟ้ามหานคร

ระยะเวลาก่อสร้าง

สิงหาคม 2539 – ธันวาคม 2545

7.1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เนื่องจากในปัจจุบันกรุงเทพมหานครประสบกับปัญหาเรื่องการจราจรเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีการเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาหลายแนวทาง ซึ่งแนวทางหนึ่งก็คือ การเพิ่มเติมระบบขนส่งมวลชนขนาดใหญ่เข้ามาในระบบการขนส่งเพื่อลดปัญหาเรื่องการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลของประชาชนที่นับวันจะมีมากขึ้น จึงได้มีการจัดทำโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ามหานครเกิดขึ้น

การก่อสร้างจุดต่อของอุโมงค์กับสถานีและตำแหน่งที่อุโมงค์ต้องลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นท่อน้ำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดประมาณ 2 เมตร ใช้แจกจ่ายน้ำให้กับประชากรในกรุงเทพมหานครประมาณครึ่งเมืองและส่วนต่าง ๆ ของโครงการด้วยวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน ซึ่งเป็นการก่อสร้างด้วยวิธี Jet Grouting คือ การฉีดน้ำปูนผสมลงไปในดิน ให้เกิดเสาเป็นแนวต่อเนื่อง เพื่อป้องกันการไหลตัวของดิน เข้ามาในอุโมงค์หรือช่องเปิด

7.1.2 งานก่อสร้างในโครงการที่ใช้ Jet Grouting มีดังนี้

1. ตำแหน่งที่อุโมงค์เชื่อมต่อกับสถานี เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของดินอ่อนเข้ามาในช่องเปิดของสถานีเมื่อเริ่มเจาะอุโมงค์
2. ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินต้องลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ เพื่อใช้เป็นกำแพงกับดินแทบการก่อสร้างดิน Diaphragm wall เนื่องจากบริเวณนี้เป็นอุโมงค์ทางขึ้นสู่สถานีใหญ่ที่อยู่บนดิน การก่อสร้างอุโมงค์จึงทำโครงการขุดเปิดหน้าดินลงไปก่อสร้างแทนการเจาะอุโมงค์ลอดผ่านใต้ดิน การก่อสร้างบริเวณที่ต้องลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ ไม่สามารถใช้เครื่องมือขุดดินได้เพื่อทำ diaphragm wall หรือการตอก sheet pile เขียงเข้าไปก็ไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงต้องใช้การก่อสร้างโดยวิธี Jet Grouting ปรับปรุงดินให้เป็นแนวกำแพงกันดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จุดต่อระหว่าง sheet pile กับ Diaphragm wall เพื่อกันดินบริเวณจุดต่อระหว่าง sheet pile กับ Diaphragm wall ที่สัมผัสกันไม่สนิท

7.1.3 ข้อมูลการเจาะสำรวจดิน

ดินในบริเวณที่ทำการก่อสร้างโครงการรถไฟใต้ดิน มีสภาพเป็นดินเหนียวอ่อน มีค่า Undrained shear strength (S_u) ต่ำ SPT ต่ำ

ชนิดของดิน

| ความลึก (m) | ชนิดของดิน |
|-------------|----------------------------|
| 0.00-17.00 | soft to medium clay |
| 17.00-20.50 | medium to stiff silty clay |

คุณสมบัติบ่งชี้ลักษณะดิน

1. ความถ่วงจำเพาะ (G_s)

ความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ประมาณ 2.63

2. ปริมาณความชื้น (W)

ปริมาณความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 17-90%

| ความลึก (ม.) | ปริมาณความชื้น (%) |
|--------------|--------------------|
| 0.00-4.00 | 17-39 |
| 4.00-10.00 | 70-90 |
| 10.00-17.00 | 50-70 |
| 17.00-20.50 | 34-70 |

3. Liquid Limit (LL) และ Plastic Limit (PL)

Liquid Limit มีค่าประมาณ 55-97

Plastic Limit มีค่าประมาณ 23-36

4. Plastic Index มีค่าประมาณ 32-61

5. Consistency Index, $CI = (LL-W)/PI$

จากผิวดินถึงระดับใต้ดิน 14 เมตร ค่า CI มีค่าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าดินไม่มั่นคง เมื่อถูกบกรวน ส่วนระดับที่ต่ำลงไป มีค่า CI อยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.88 แสดงว่าดินมีความมั่นคง

6. Liquidity Index

Liquidity Index ; $LI = (W-PL)/PI$

ที่ระดับผิวดินถึงระดับต่ำกว่าผิวดิน 16 เมตร มีค่า LI มากกว่า 0.5 แสดงว่าเป็นดินอ่อนมีความไวตัวสูง และที่ระดับต่ำกว่ามีค่า LI ต่ำกว่า 0.5 แสดงว่า ดินมีความมั่นคง

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

| ความลึก (เมตร) | shear strength (ksc) |
|----------------|----------------------|
| 0.00-14.00 | 0.05-0.23 |
| 14.00-20.30 | 0.4-0.6 |

7.1.4 กระบวนการทำ Jet Grouting และการตรวจสอบในแต่ละส่วนของโครงการ ดังนี้

7.1.4.1 ตำแหน่งที่อุโมงค์เชื่อมต่อกับสถานี

วิธีการทำงานของ Jet Grouting (Single Fluid System)

1. การเจาะนำจะทำไปพร้อมกับการ Precutting โดยใช้หัวฉีดน้ำแรงดันสูงประมาณ 150 bar ในดินเหนียวอ่อนและ 350 bar ในดินเหนียวแน่นถึงแข็งลงไปถึงความลึกที่ต้องการในเวลาเดียวกันเมื่อมีการหมุนทอลงไปด้วย
2. การเจาะนำจะต้องทำต่อเนื่องประมาณ 10 หลุมก่อนที่จะทำการอัดฉีดน้ำปูน
3. ในการฉีดน้ำปูนจะต้องกดให้หัวฉีดลงไปอยู่ที่ระดับความลึกที่ต้องการอีกครั้ง จากนั้นจึงฉีดน้ำปูนออกมาด้วยความดันที่กำหนด (250 bar) และท่อจะถูกถอนขึ้นในอัตราความเร็วคงที่ขณะที่หมุนไปด้วย
4. เมื่อหัวเจาะถูกดึงขึ้นถึงระดับบนสุดของการปรับปรุงดิน การถอนท่อก็ทำด้วยความเร็วที่สูงขึ้นและมีความดันการฉีดต่ำกว่าที่กำหนด (100 bar) การอัดฉีดส่วนนี้เรียกว่า การอัดฉีดส่วนบน (Top Grout) ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ดินที่อยู่เหนือการปรับปรุงมีความหนาแน่นขึ้น

ลำดับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

1. การก่อสร้างจะกำหนดเป็นกลุ่มย่อย (กลุ่มละประมาณ 16 ต้น) โดยใช้เวลาก่อสร้างกลุ่มละ 1 วัน
2. ทำการPre cutting ตามลำดับ ดังนี้ (ดูรูปที่ 7.2 และ 7.3 ประกอบ)
 - A1, B1, A2, B2, A3, B3, A4, B4, C1, D1, C2, D2, C3, D3, C4, D4
3. ทำการฉีดน้ำปูนตามลำดับดังนี้ (ดูรูปที่ 7.2 และ 7.3 ประกอบ)
 - A1, B1, A2, B2, A3, B3, A4, B4, C1, D1, C2, D2, C3, D3, C4, D4
4. ทำการก่อสร้างโดยเว้นช่วง 1 กลุ่มเพื่อป้องกันการทำ Precutting อาจจะชะล้างซีเมนต์ออกจากเสาเข็มดินซีเมนต์ต้นที่ทำเสร็จก่อนหน้านี้โดยการก่อสร้างจะทำเหมือนขั้นตอนที่2และ3จนแล้วเสร็จ

ค่าพารามิเตอร์ในการฉีดน้ำปูน

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร ณ ตำแหน่งที่อุโมงค์เชื่อมต่อกับสถานี ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการฉีดน้ำปูน ตามค่าที่สรุปไว้ในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการฉีดน้ำปูน

| พารามิเตอร์ | การฉีดน้ำ(Prejetting) | | การฉีดน้ำปูน(Grouting) | |
|---------------------------------------|-----------------------|------------|------------------------|---------------|
| | Soft clay | Stiff clay | Top Grout | plug grout |
| อัตราการไหลของน้ำปูน (ลิตร/นาที) | - | - | 115 | 200 |
| ความดันในการอัดฉีด (บาร์) | - | - | 100 | 250 |
| อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/นาที) | 180 | 280 | - | - |
| ความดันน้ำ (บาร์) | 150 | 350 | - | - |
| ความเร็วในการหมุน (รอบ/นาที) | 20 | 10 | 20 | 10 |
| ระยะเวลาถอนขึ้น (ชม.) | - | - | 23 | 23 |
| ความเร็วในการถอน (วินาที/ระยะเวลาถอน) | - | - | 3 | 6 |
| อัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์ | - | - | 1.1 | 1.1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บตัวอย่างและการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์

ใช้วิธีการเจาะ (Coring) เพื่อนำตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์มาทดสอบโดยวิธี Unconfined Compression Test ค่า Unconfined Compressive Strength ต้องไม่ต่ำกว่า 10 ksc ทำการทดสอบจำนวน 2 ต้นต่อกลุ่ม (Plug) ซึ่งประกอบด้วย 2 ตำแหน่งดังนี้

1. บริเวณตรงกลางของเสาเข็มดินซีเมนต์
2. บริเวณที่เสาเข็มดินซีเมนต์เชื่อมกัน

7.1.4.2 ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่

วิธีการทำงานของ Jet Grouting (Single Fluid System)

1. เคลื่อนย้ายเครื่องจักรที่พร้อมทำงาน เครื่องจักร Jet Grouting ควรจะถูกเคลื่อนย้าย ณ จุดที่จะทำการเจาะ
2. เจาะดินโดยหัวเจาะโลหะ ซึ่งจะทำการเจาะและตัดดินในเริ่มต้นก่อนโดยการฉีดน้ำด้วยแรงดันสูง 150 บาร์ สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน 350 บาร์ สำหรับ stiff clay และ Dense sand ไปจนถึงความลึกที่ออกแบบขณะทำการหมุนหัวเจาะ
3. ทำการถอนออกหลังจากถึงความลึกที่ออกแบบ โดยก้านเจาะจะถูกดึงออกมาข้างบน เคลื่อนไปยังตำแหน่งใหม่ในขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนที่ 2 ทำการ pre-cut ประมาณ 10 หลุม
4. การเจาะหัวเจาะสำหรับการทำเสาเข็มดินซีเมนต์
หัวเจาะจะทำการเจาะจนถึงตำแหน่งที่ทำการออกแบบ หลังจากที่มีการยืนยันแรงดันที่ออกแบบไว้ 350 บาร์ ของ slurry ก้านเจาะควรจะถูกถอนออกในอัตราความเร็วที่ตายตัว ขณะที่อัตราการหมุนก้านเจาะ 10 รอบต่อนาที
5. การถอนก้านเจาะออก
หลังจากที่เจาะอย่างสม่ำเสมอ จนถึงตำแหน่งที่ได้ทำการออกแบบไว้ การถอนมาทางด้านบนควรใช้ Jetting pressure 100 บาร์ อัตราการหมุน 20 รอบต่อนาที

ลำดับการก่อสร้างโดย Jet Grouting (ดูรูปที่ 7.4 และ 7.5 ประกอบ)

1. กำหนดจุดศูนย์กลางของเสา K, L, M, N, E, O, P และ F แนวที่ 6
2. ทำการตัดดินก่อนโดยฉีดน้ำแรงดันสูง 200 บาร์ ในเสา F6, P6, O6, E6, N6, M6, L6 และ K6
3. ทำเสา Jet Grout ตามลำดับต่อไปนี้
K6, L6, M6, N6, E6, P6, O6, F6
4. Pre-cutting เสา A, B, C, D แนว 6
5. ทำงาน Jet Grout ตามลำดับ D6, C6, B6, A6
6. Pre-culling เสา J, I, H, G แนว 6
7. ทำเสา Jet Grout G6, H6, I6, J6
8. ทำเป็นการทำ Jet Grout แนว 7 จากข้อ 2 ถึงข้อ 7
9. ทำ Jet Grout Column ตามลำดับ Line 5, 8, 4, 9, 3, 10, 2, 11, 1, 12

ค่าพารามิเตอร์ในการฉีดน้ำปูน

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการรถไฟฟ้ามหานคร ตำแหน่งที่อุโมงค์ลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการฉีดน้ำปูน ตามค่าที่สรุปไว้ในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการฉีดน้ำปูน

| พารามิเตอร์ | การฉีดน้ำ(Prejetting) | | การฉีดน้ำปูน (Grouting) |
|--------------------------------------|-----------------------|------------|----------------------------|
| | Soft clay | Stiff clay | |
| อัตราการไหลของน้ำปูน (ลิตร/นาที) | - | - | 230 |
| ความดันในการอัดฉีด (บาร์) | - | - | 350 |
| อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/นาที) | 180 | 280 | - |
| ความดันน้ำ (บาร์) | 150 | 350 | - |
| ความเร็วในการหมุน (รอบ/นาที) | 10 | 10 | 10 |
| ระยะการถอนขึ้น (ซม.) | - | - | 10.5 |
| ความเร็วในการถอน (วินาที/ระยะการถอน) | - | - | 6 |
| อัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์ | - | - | 1.1 |

การเก็บตัวอย่างและการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์

ใช้วิธีการเจาะ (Coring) เพื่อนำตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์มาทดสอบโดยวิธี Unconfined Compression Test ค่า Unconfined Compressive Strength ต้องไม่ต่ำกว่า 1.5 Mpa (ksc) ทำการทดสอบจำนวน 1 ต้น ต่อกลุ่ม (plug) ซึ่งจะได้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ต้น ในกรณีที่ strength สูงสุด ที่ออกแบบไว้ไม่ถึงตามที่ตั้งไว้ หลังจากนำไปทดสอบ จะมีการเพิ่มจำนวนเสา Jet Grout และเพิ่มขนาดของกลุ่มเสาเข็ม

ผลการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength

จากการเก็บตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์จำนวน 4 ต้น ไปทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ได้ผลการทดสอบ ตามค่าที่สรุปไว้ในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 แสดงผลการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength

| Sample # | Depth (m) | Age (วัน) | Q_u (ksc) |
|----------|-------------|-----------|-------------|
| 7C | 1.50-3.00 | 18 | 20.30 |
| | 6.00-7.50 | 18 | 14.61 |
| | 7.50-9.00 | 18 | 20.09 |
| | 10.50-12.00 | 18 | 13.89 |
| 3H | 1.50-3.00 | 31 | 24.04 |
| | 4.50-6.00 | 31 | 30.41 |
| | 7.50-9.00 | 31 | 37.94 |
| | 10.50-12.00 | 31 | 33.76 |
| 6H | 4.50-6.00 | 20 | 27.45 |
| | 7.50-9.00 | 20 | 20.11 |
| | 10.50-12.00 | 20 | 29.99 |
| | 12.00-13.50 | 20 | 20.26 |
| 9H | 3.00-4.50 | 38 | 33.88 |
| | 4.50-6.00 | 38 | 23.77 |
| | 6.00-7.50 | 38 | 38.99 |
| | 7.50-9.00 | 38 | 16.93 |

สรุปผลการตรวจสอบคุณภาพ

1. ค่าเฉลี่ย q_u ของตัวอย่าง 7C = $(20.30+14.61+20.09+13.89)/4$
= 17.22 ksc
2. ค่าเฉลี่ย q_u ของตัวอย่าง 3H = $(24.04+30.41+37.94+33.76)/4$
= 31.53 ksc
3. ค่าเฉลี่ย q_u ของตัวอย่าง 6H = $(27.45+20.11+29.99+20.26)/4$
= 24.45 ksc
4. ค่าเฉลี่ย q_u ของตัวอย่าง 9H = $(33.88+23.77+38.99+16.93)/4$
= 28.39 ksc

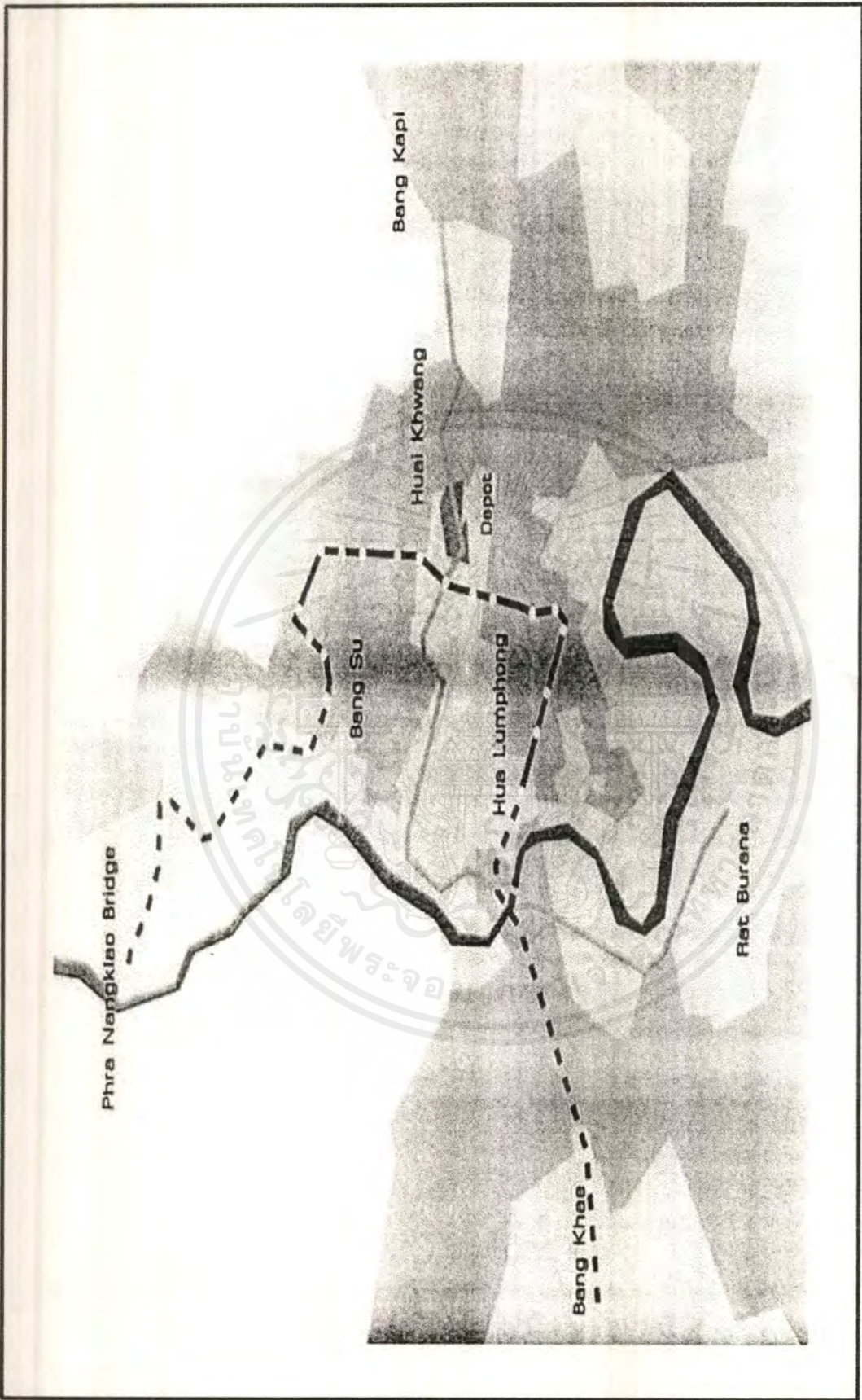
ถือว่า ผ่านตามข้อกำหนดของงาน Jet Grouting

7.1.4.3 จุดต่อระหว่าง Sheet pile กับ Diaphragm wall

วิธีการทำงานของ Jet Grouting และพารามิเตอร์ต่างๆใช้เหมือนกับการก่อสร้างที่

ตำแหน่งอุโมงค์รถไฟใต้ดินลอดผ่านท่อ Water Main

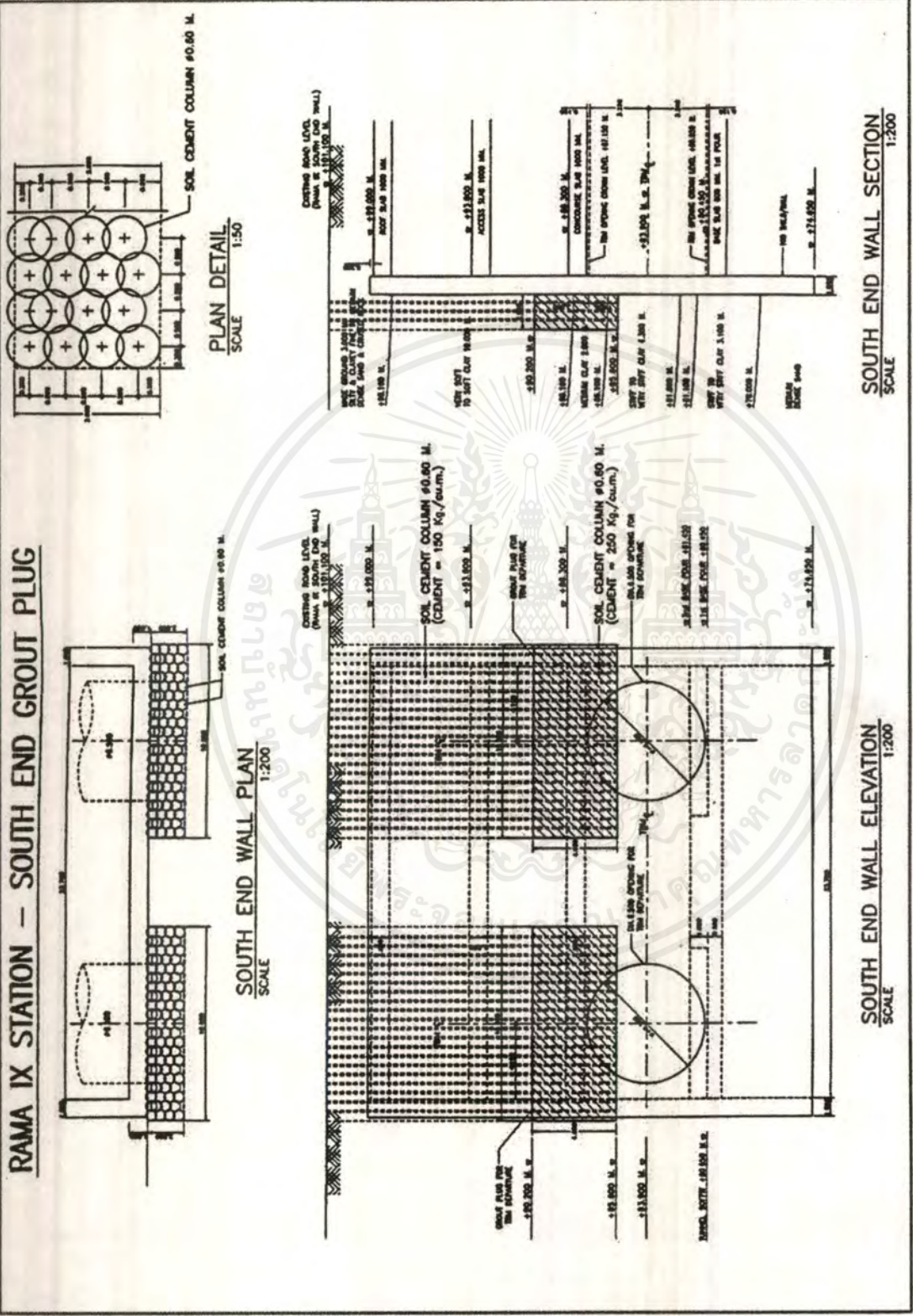
ส่วนการเก็บตัวอย่างและทดสอบจะใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ เนื่องจากใช้ค่าพารามิเตอร์เดียวกัน และอยู่ในบริเวณเดียวกัน



รูปที่ 7.1 ผังบริเวณ (โครงการรถไฟฟ้ามหานคร)

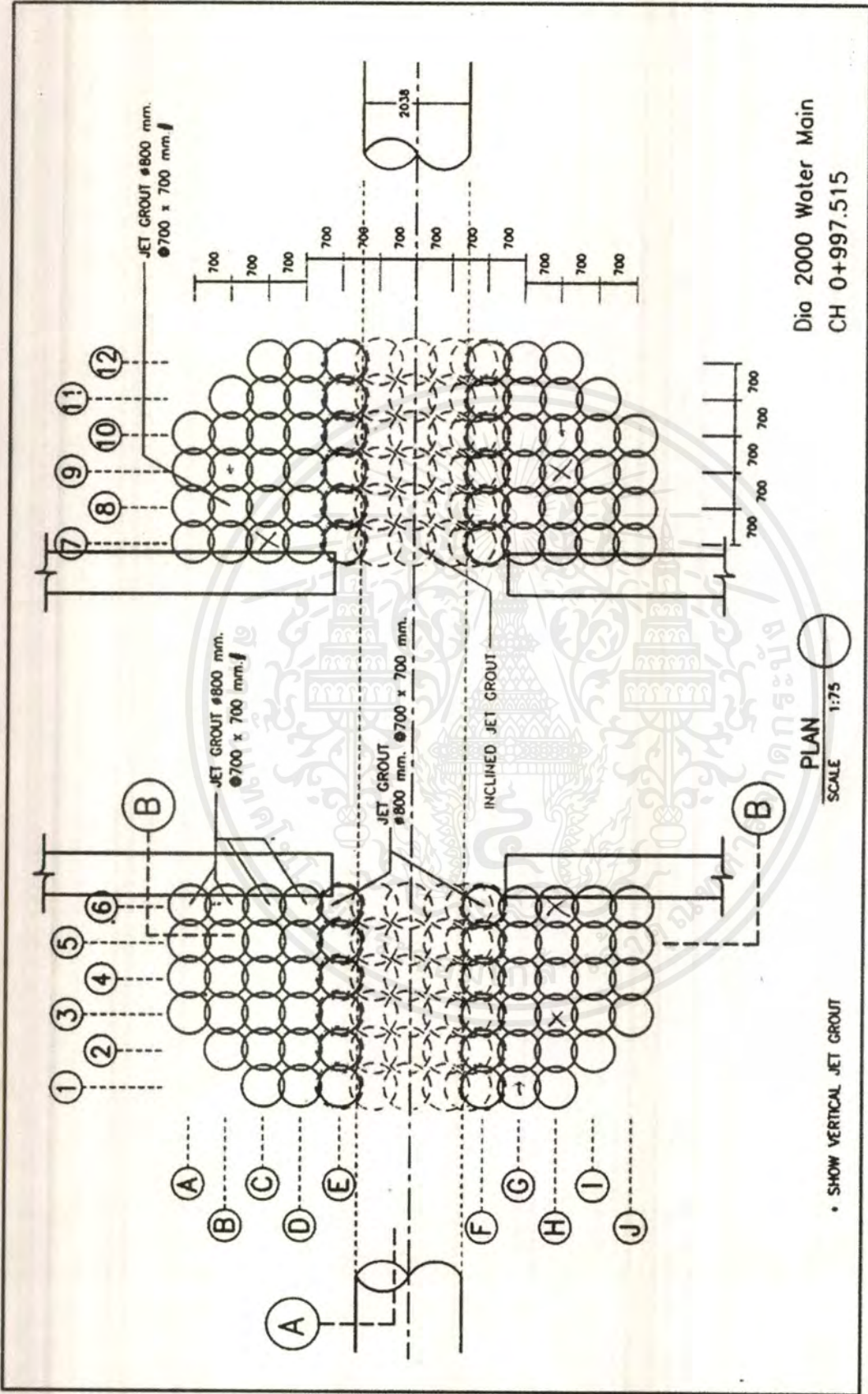
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RAMA IX STATION - SOUTH END GROUT PLUG

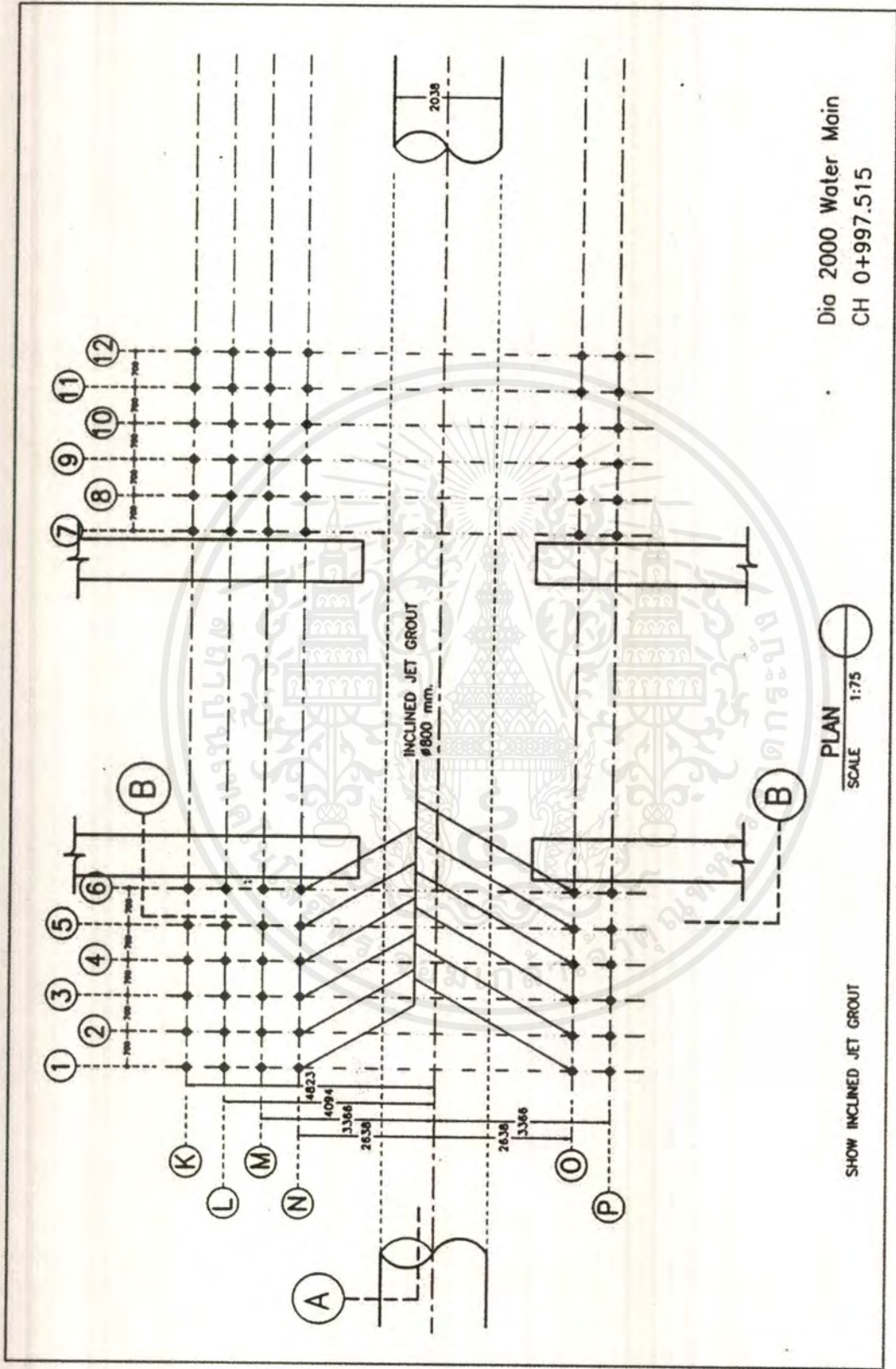


รูปที่ 7.3 รูปตัดเสาเข็มดินซีเมนต์ , ตำแหน่งที่อุโมงค์เชื่อมต่อกับสถานี (โครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานคร)

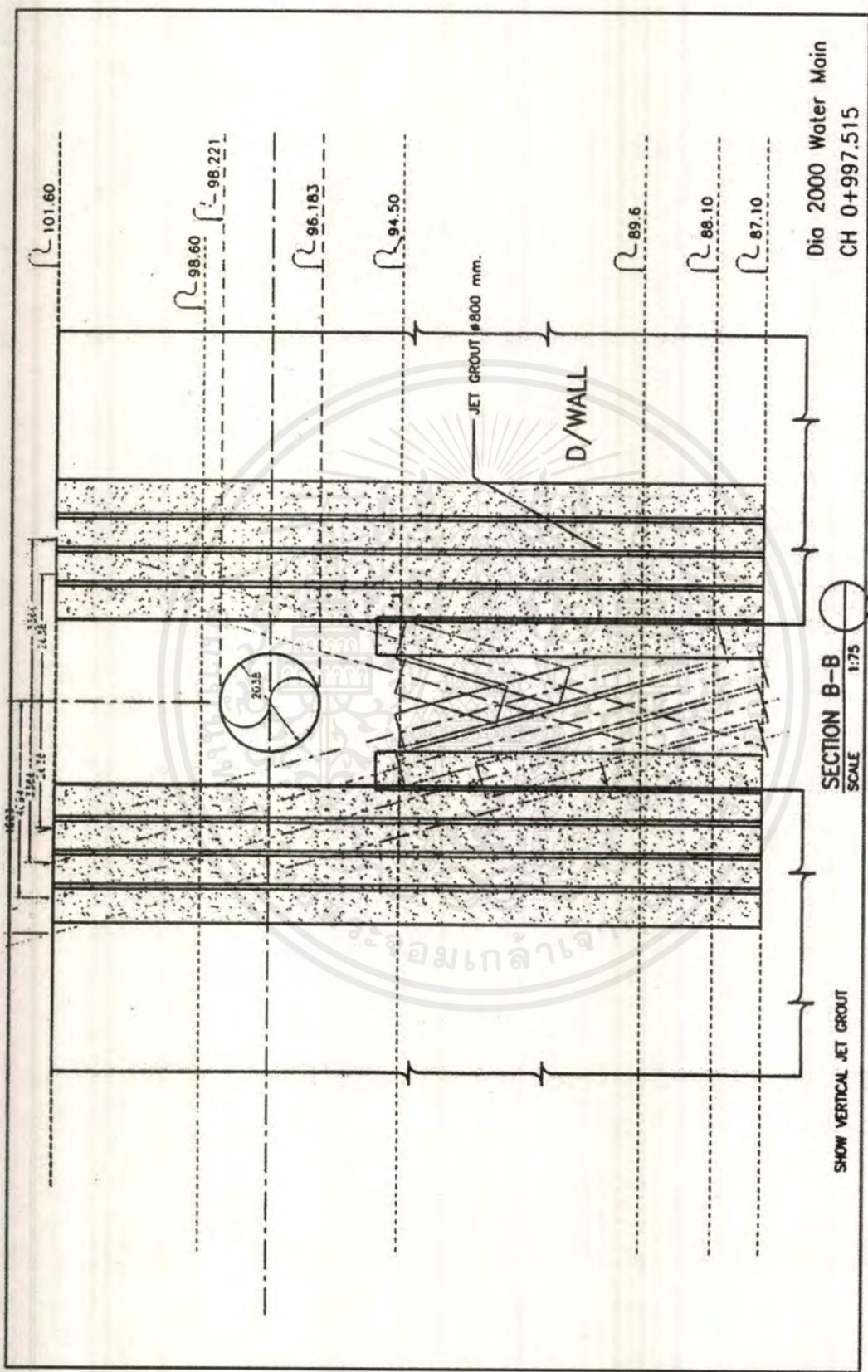
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



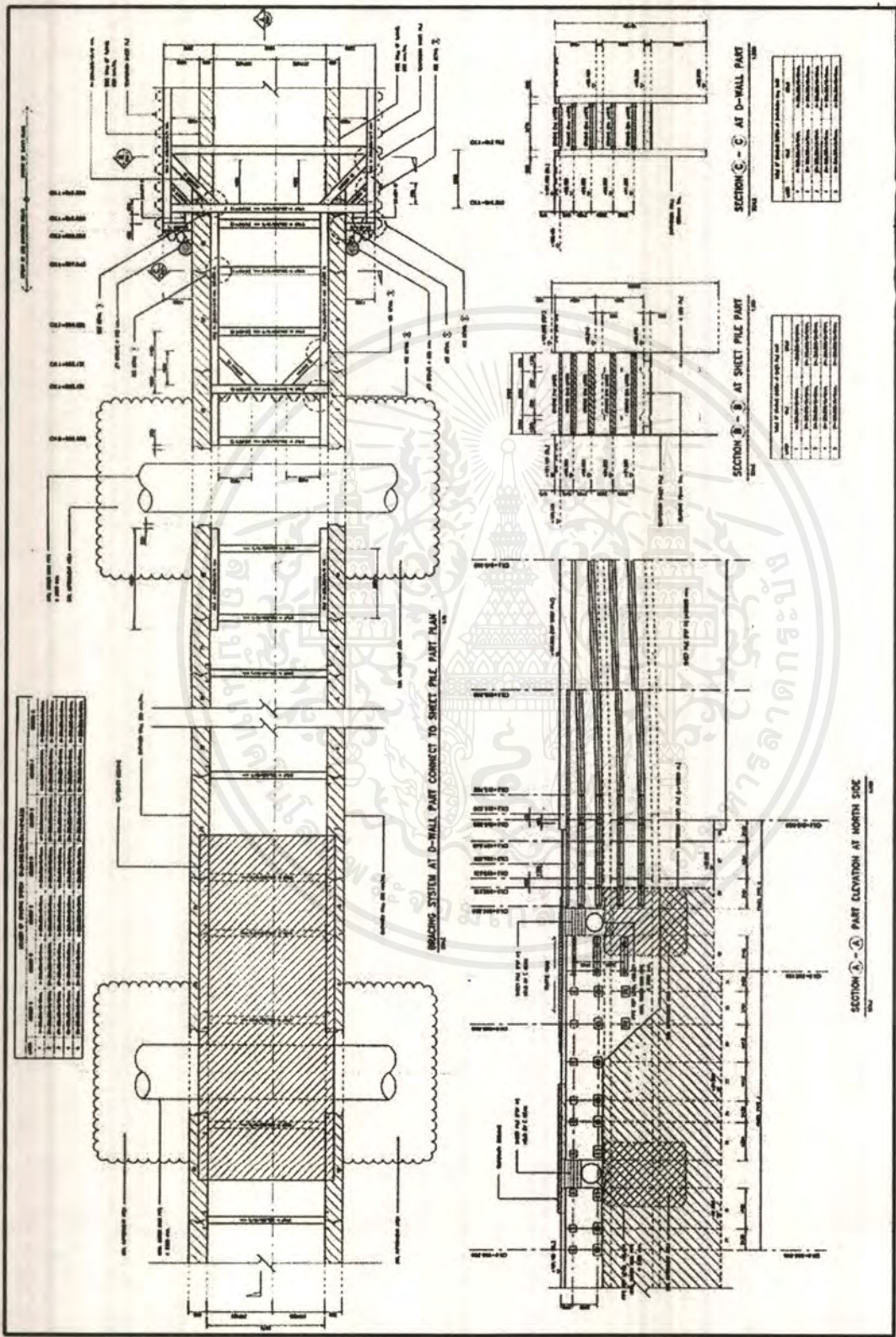
รูปที่ 7.4 แบบแสดงตำแหน่ง Vertical Jet Grout, ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินต้องลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ (โครงการรถไฟฟ้ามหานคร)



รูปที่ 7.5 แบบแสดงตำแหน่ง Inclined Jet Grout , ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินต้องลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ (โครงการรถไฟฟ้ามหานคร)



รูปที่ 7.6 รูปตัด section B-B , ตำแหน่งที่อุโมงค์รถไฟใต้ดินต้องลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่ (โครงการรถไฟฟ้ามหานคร)



รูปที่ 7.7 แบบแสดงตำแหน่ง Jet Grout , จุดต่อระหว่าง sheet pile กับ Diaphragm wall (โครงการรถไฟฟ้ามหานคร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 โครงการประตูล้อมน้ำปากพนัง จ. นครศรีธรรมราช เจ้าของโครงการ กรมชลประทาน

7.2.1 ความเป็นมาของโครงการ

จากสภาพแวดล้อมในปัจจุบันก่อนที่จะมีโครงการพัฒนาพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนัง โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริพื้นที่เดิมเป็นป่าชายเลน และนาทุ่ง ซึ่งลำน้ำเดิมมีความคดเคี้ยวและแคบซึ่งทำให้เกิดปัญหาอุทกภัยในช่วงฤดูฝน ทำให้เกิดน้ำท่วมและพื้นที่การเกษตรกรรมของชาวบ้านเสียหาย พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเห็นถึงปัญหานี้ จึงมีพระราชดำริให้จัดการก่อสร้างการพัฒนาพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนัง

โดยมีการก่อสร้างคลองลัดและส่วนต่าง ๆ ของโครงการด้วยวิธีการปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อนซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในการก่อสร้างด้วยวิธี JET GROUTING PILE (JGP) คือ การฉีดน้ำปูนผสมลงไป在地ให้เกิดเป็นเสาเข็ม Jet Grouting Pile เพื่อป้องกันการพังทลายของ Slope บริเวณคลองลัดและป้องกันการทรุดตัวของถนนเข้าโครงการ

ในการปรับปรุงคุณภาพดินปกติมักจะทำให้คุณภาพของดินมีความที่บ่น้ำมากขึ้นมีความแข็งแรงหรือแกร่งมากขึ้นเพียงพอต่อความต้องการ กรณีของดินเหนียวไม่มีทรายละเอียดปนสามารถใช้วิธีปั่นผสม (Rotary Mixed) หรืออัดฉีดแรงดันต่ำโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมแน่น แต่ในดินเม็ดละเอียดที่น้ำยังซึมผ่านได้จะใช้วิธี Chemical Grouts โดยใช้สารเคมีซึ่งมีอยู่หลายชนิดเป็นตัวปรับปรุงคุณภาพ แต่การใช้ค่อนข้างจำกัดกว่าการใช้ซีเมนต์ เนื่องจากราคาสูงและอาจมีพิษ การใช้วิธีอัดฉีดแรงดันสูง (Jet Grouting หรือ Jet Mixing) จึงถูกนำมาใช้เนื่องจากสามารถทำได้กับดินหลายชนิด

7.2.2 งานก่อสร้างในโครงการที่ใช้ Jet Grouting มีดังนี้ (Application)

โครงการชลประทานที่ลุ่มแม่น้ำปากพนังมีงานที่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการทำเสาเข็มซีเมนต์ (Jet Grouting Pile) 4 ส่วนด้วยกัน คือ

1. ถนนเข้าห้วงวน (Embankment) มีทั้งส่วนเป็นถนนธรรมดา ถนนโค้ง และวงเวียน ซึ่งมีความยาวรวมประมาณ 2.81 กิโลเมตร กว้าง 6 เมตร ยกเว้นจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของถนนมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้าง 12 เมตร ความลาดเอียง (Super Elevation) 3% ไหล่ทางกว้างด้านละ 1 เมตร ความลาดเอียง 5% ทำเป็นถนนหลังเต่าปริมาณงาน Jet Grouting สำหรับงานเข้าห้วงงานประมาณ 71,417 m³

2. คลองลัด (Diversion channel) เพื่อควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลผ่านและเปลี่ยนทางเดินของน้ำ ดำเนินการขุดคลองลัดในส่วนที่สั้นที่สุดของส่วนโค้งกลับของแม่น้ำปากพนัง ซึ่งมีความยาวประมาณ 1.90 กิโลเมตร กว้าง 400 เมตร ส่วนลึกสุดอยู่ที่ระดับ -7.00 เมตร (รทก.) ขอบตลิ่งตัดเป็นพื้นที่เอียงแนวตั้งต่อแนวราบเป็นอัตราส่วน 1:5 สลับกับพื้นราบ พื้นเอียงมี 2 ช่วงยาว 25 เมตร และ 19.5 เมตร พื้นราบอยู่ระหว่างพื้นเอียงยาว 10 เมตร ท้องคลองส่วนลึกกว้าง 345.50 เมตร

ปริมาณงาน Jet Grouting สำหรับงานคลองลัดฝั่งซ้ายประมาณ 52,003 m³

ปริมาณงาน Jet Grouting สำหรับงานคลองลัดฝั่งขวาประมาณ 40,767 m³

3. ประตูเรือสัญจร (Navigation Channel) เพื่อให้เรือสัญจรไปมาได้สะดวกหลังจากปิดลำน้ำแล้ว โดยสร้างข้อมทำนบปิดลำน้ำ (Closure Dam) มีความยาว 600 เมตร ด้านเหนือน้ำกว้าง 95 เมตร ด้านท้ายน้ำกว้าง 55 เมตร ลึก 2.05 เมตร ส่วนลึกสุดอยู่ที่ระดับ -4.05 เมตร

ปริมาณงาน Jet Grouting สำหรับงานประตูเรือสัญจรด้านเหนือน้ำประมาณ 12,587 m³

ปริมาณงาน Jet Grouting สำหรับงานประตูเรือสัญจรด้านท้ายน้ำประมาณ 8,694 m³

4. ทำนบปิดลำน้ำ (Closure Dam) ปิดกั้นทางเดินของลำน้ำเดิม สร้างที่ส่วนแคบที่สุดของลำน้ำปากพนังในส่วนที่โค้งกลับ เมื่อก่อสร้างประตูระบายน้ำและเปิดใช้งานแล้วจะเป็นส่วนหนึ่งของถนนเข้าห้วงงานทำนบปิดลำน้ำจะมีความสูง 3.40 เมตร (รทก.) กว้าง 8 เมตร

7.2.3 ผลการเจาะสำรวจดิน

ดินในบริเวณโครงการเป็นดินปากแม่น้ำมีสภาพเป็นดินอ่อน มีค่าการซึมต่ำ ค่า Undrained Shear Strength (Su) ต่ำ SPT ต่ำ เป็นดินสองชั้น ชั้นบนหนาประมาณ 16 เมตร เป็น Silty Clay อ่อนถึงอ่อนมาก มีสีเทา (Gray), Low Plasticity ชั้นถัดมาเป็นดิน Silty Clay มีกวาดขนาด 0.375-1 นิ้ว ปนอยู่ เป็นดินแข็งถึงแข็งมาก มีค่า K, SPT, Su น้อยมาก มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 0-1.2 เมตร คุณสมบัติของชั้นดินในบริเวณโครงการก่อสร้างประตูระบายน้ำปากพนังสามารถสรุปได้ดังนี้

ชนิดของดิน

| ความลึก (เมตร) | ชนิดของดิน |
|----------------|-------------------------------|
| 0-10 | Very Soft Silty Clay |
| 10-16 | Soft Silty Clay |
| 16-18 | Medium to Stiff Silty Clay |
| 18-20 | Very Stiff Silty Clay |
| 20-23 | Very Stiff to Hard Silty Clay |

คุณสมบัติบ่งชี้ลักษณะดิน

1. ความถ่วงจำเพาะ (Gs)

ความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.73-2.77

2. ปริมาณความชื้น (W)

ปริมาณความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 28-118%

W 20 ที่ความลึก 0.12 ม.

30 > W > 40 ที่ความลึก 12-16 ม.

W ≅ 30 ที่ความลึก 30 ม.

3. Liquid Limit (LL) และ Plastic Limit (PL)

Liquid Limit มีค่าประมาณ 70-140 สำหรับ soft clay ถึง very soft clay
< 70 สำหรับ hard clay

Plastic Limits มีค่าประมาณ 22-35

4. Plastic Index ประมาณ 40-90% เปลี่ยนแปลงความลึก

5. Consistency Index

Consistency Index, $CI = (LL-W)/PI$

จากผิวดินถึงระดับใต้ดิน 11 เมตร ค่า CI มีค่าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าดินไม่มั่นคง เมื่อถูกรบกวน ส่วนระดับที่ต่ำลงไปมีค่า CI อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.6 แสดงว่าดินมีความมั่นคง

6. Liquidity Index

Liquidity Index, $LI = (W-PL)/PI$

ที่ระดับผิวดินถึงระดับต่ำกว่าผิวดิน 6 เมตร มีค่า LI มากกว่า 0.5 แสดงว่าเป็นดินอ่อน มีความไวตัวสูง และที่ระดับต่ำกว่ามีค่า LI ต่ำกว่า 0.5 แสดงว่า ดินมีความมั่นคง

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

| ความลึก (ม.) | ค่า Shear Strength (ksc) |
|--------------|--------------------------|
| 0.00-15.00 | 0.06-0.29 |
| 15.00-35.00 | 0.7-1.2 |

7.2.4 กระบวนการทำ Jet Grouting ในโครงการประตูระบายน้ำปากพนัง

วิธีการทำงานของ Jet Grouting (Double Fluid System)

1. เคลื่อนย้ายเครื่องจักรที่พร้อมทำงาน เครื่องจักร Jet Grouting ควรจะถูกเคลื่อนย้าย ณ จุดที่จะทำการเจาะ
2. เริ่มทำการเจาะโดยใช้ลมและน้ำส่งผ่านท่ออัดฉีดโดยใช้ลมที่ความดัน 7 บาร์ และน้ำ 150 บาร์ และกุดก้านเจาะจนถึงระดับที่ต้องการโดยด้านเจาะจะหมุนเป็นวงกลมที่มีความเร็วรอบ 6 รอบ/นาที
3. เริ่มขั้นตอนการอัดฉีดน้ำซีเมนต์จากบีมด้วยความดัน 200 บาร์ และลม 7 บาร์ โดยเริ่ม Grouted ที่อัตราการยกก้านที่ 14 นาที/เมตร
4. การถอนมายังด้านบนควรใช้ Jetting prossore 100 บาร์ อัตราการหมุน 20 รอบต่อ นาที ขั้นตอนการถึงก้านเจาะจะยกขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงระดับ Pile cut off ที่ต้องการ

ค่าพารามิเตอร์ในการฉีดน้ำปูน

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการประตูระบายน้ำปากพนัง ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการฉีดน้ำปูน ตามค่าที่สรุปไว้ในตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการฉีดน้ำปูน

| พารามิเตอร์ | การฉีดน้ำ (Prejetting) | การฉีดน้ำปูน (Grouting) |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| อัตราการไหลของน้ำปูน (ลิตร/นาที) | - | 60 |
| ความดันในการอัดฉีด (บาร์) | - | 200 |
| อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/นาที) | 60 | - |
| ความดันน้ำ (บาร์) | 150 | - |
| ความดันอากาศ (บาร์) | 7 | 7 |
| ความเร็วในการหมุน (รอบ/นาที) | 6 | 6 |
| ระยะการถอนขึ้น (ซม.) | - | 2.5 |
| ความเร็วในการถอน (วินาที/ระยะการถอน) | - | 10 |
| อัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์ | - | 1:1.35 |

7.2.5 การเก็บตัวอย่างและการทดสอบเสาเข็มดินซีเมนต์

ใช้วิธีการเจาะ (Coring) เพื่อนำตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์มาทดสอบโดยวิธี Unconfined Compression Test ค่า Unconfined Compressive Strength ที่ได้ต้องไม่ต่ำกว่า 4 ก.ก./ซ.ม.² ที่ 14 วัน และ ไม่ต่ำกว่า 6 ก.ก./ซ.ม.² ที่ 28 วัน ซึ่งมีตำแหน่งและจำนวนที่เจาะดังนี้

1. งานก่อสร้างทำนบกั้นลำน้ำเดิม ทุก ๆ ระยะไม่เกิน 20 เมตร ตามแนวความยาวเจาะ เก็บแท่งตัวอย่าง 1 หลุม
2. งานก่อสร้างประตูระบายและประตูเรือสัญจร ทุก ๆ ระยะไม่เกิน 200 เมตร ตามแนวความยาวแต่ละช่วงของคลองเจาะเก็บแท่งตัวอย่าง 1 หลุม
4. งานก่อสร้างถนนทางเข้าโครงการ ทุก ๆ ระยะไม่เกิน 500 เมตร ตามแนวความยาวเจาะเก็บแท่งตัวอย่าง 1 หลุม

7.2.6 ผลการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength

จากการเก็บตัวอย่างเสาเข็มดินซีเมนต์จำนวน 3 หลุม ไปทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength ได้ผลการทดสอบ ตามค่าที่สรุปไว้ในตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 แสดงผลการทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength

| Sample# | Depth (m) | Age (days) | Q_u (ksc) |
|---------|-------------|------------|-------------|
| A1 | 5.60-8.35 | 28 | 8.24 |
| A2 | 8.60-9.35 | 28 | 9.07 |
| A3 | 11.60-12.35 | 28 | 3.35 |
| A4 | 14.60-15.35 | 28 | 9.22 |
| B1 | 5.55-8.30 | 28 | 8.51 |
| B2 | 8.55-9.30 | 28 | 8.79 |
| B3 | 11.50-12.30 | 28 | 9.32 |
| B4 | 15.30-16.05 | 28 | 9.64 |
| C1 | 5.65-6.40 | 28 | 8.04 |
| C2 | 8.65-9.40 | 28 | 8.43 |
| C3 | 11.65-12.40 | 28 | 7.87 |
| C4 | 14.65-15.40 | 28 | 9.45 |

สรุปผลการตรวจสอบคุณภาพ Jet Grouting Pile

จากผลการตรวจสอบค่า Unconfined Compressive Strength (UC) ของตัวอย่าง

$$\begin{aligned}
 (1) \text{ ค่าเฉลี่ย UC ของตัวอย่าง A} &= [(UCA1) / (UCA2) / (UCA3) / (UCA4)] / 4 \\
 &= [(8.24) / (9.07) / (8.85) / (9.33)] / 4 \\
 &= 8.87 \text{ KSC}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (2) \text{ ค่าเฉลี่ย UC ของตัวอย่าง B} &= [(UCB1) / (UCB2) / (UCB3) / (UCB4)] / 4 \\
 &= [(8.51) / (8.79) / (9.83) / (9.64)] / 4
 \end{aligned}$$

$$= 9.19 \text{ KSC}$$

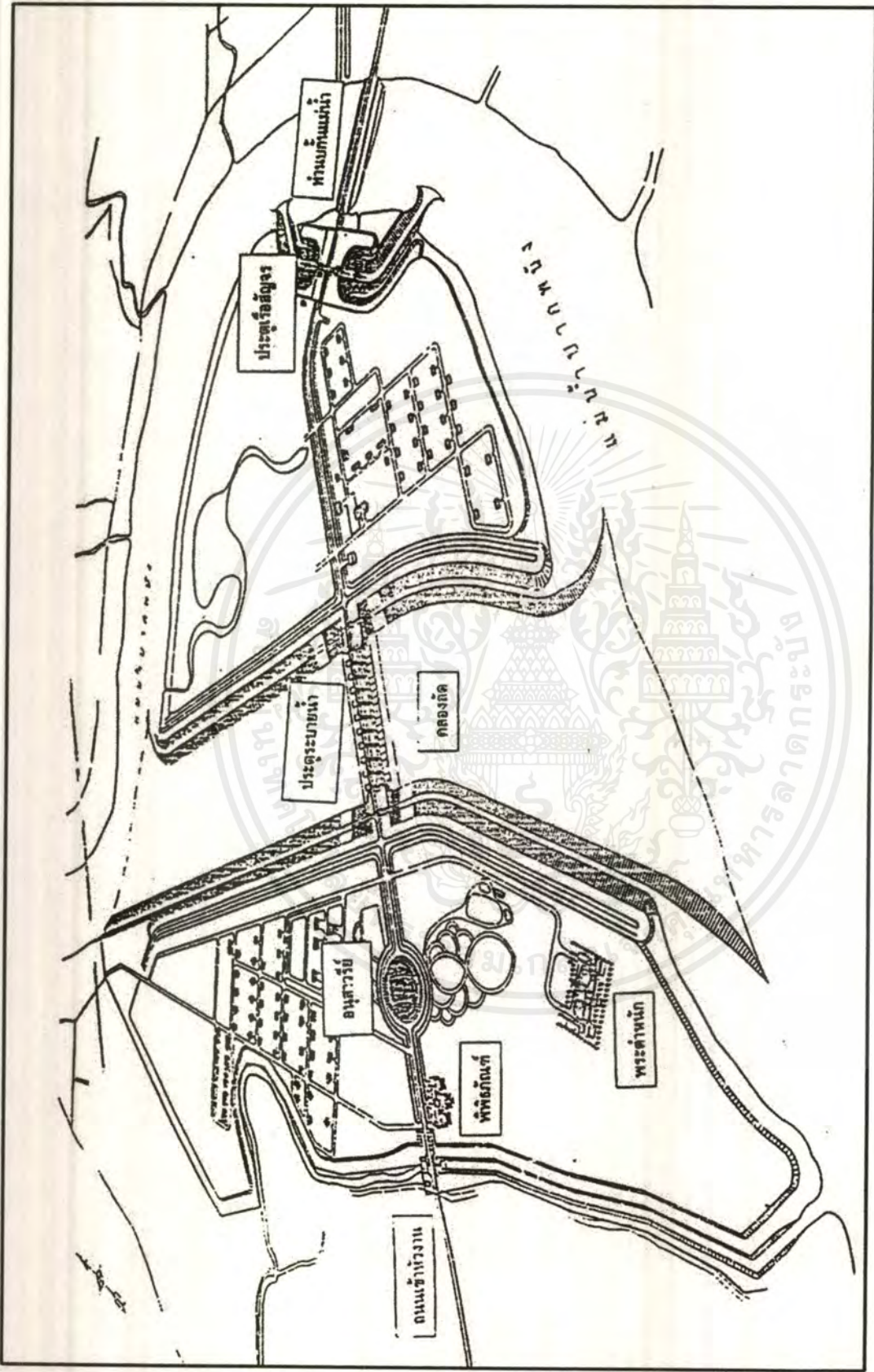
$$(3) \text{ ค่าเฉลี่ย UC ของตัวอย่าง C} = [(UCC1) / (UCC2) / (UCC3) / (UCC4)] / 4$$

$$= [(8.04) / (8.43) / (7.87) / (9.45)] / 4$$

$$= 8.44 \text{ KSC}$$

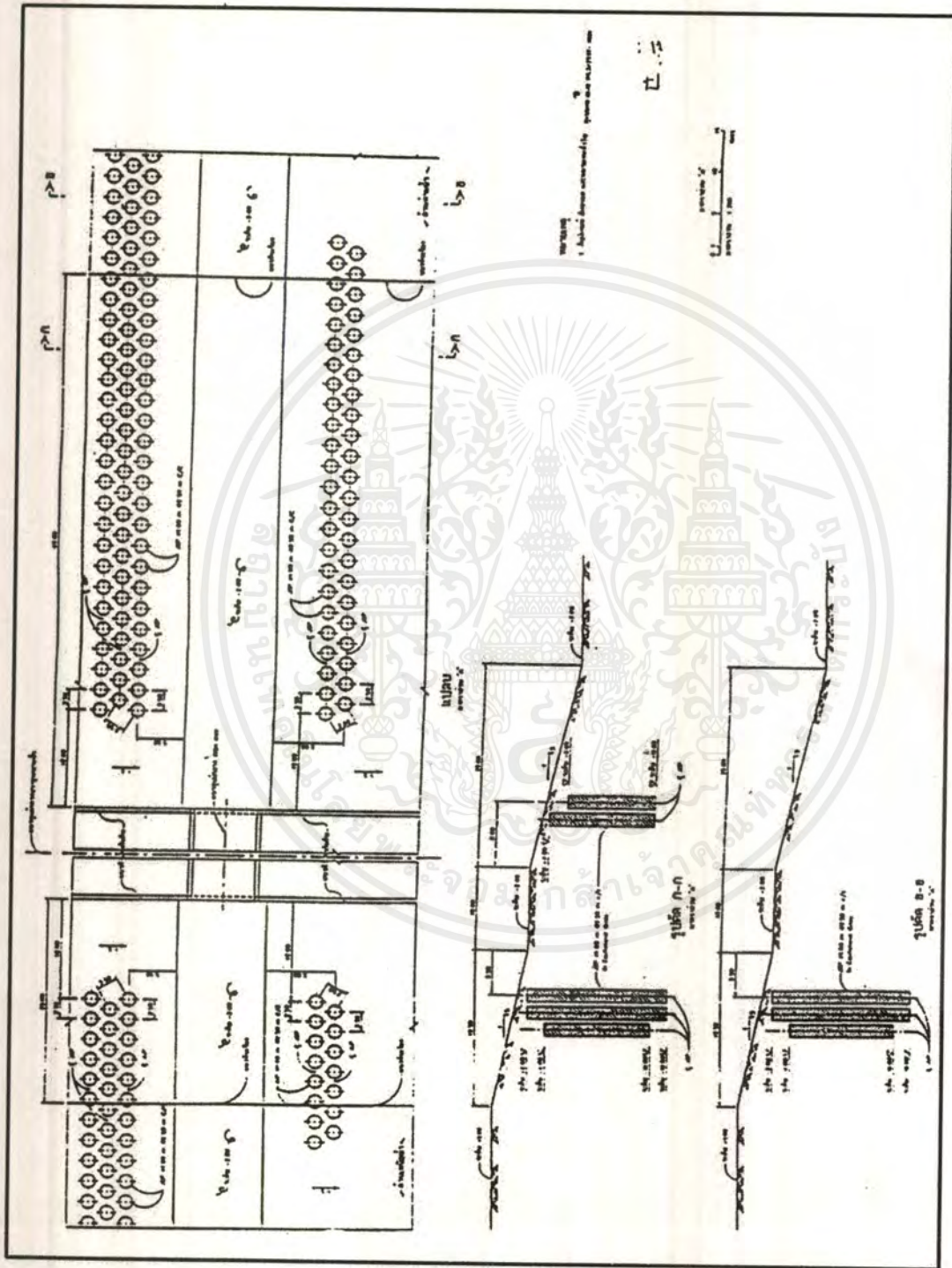
ซึ่งถือว่า ผ่านตามข้อกำหนดของงานของเสาเข็มดินซีเมนต์ และจากการตรวจสอบคุณภาพเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยการทำการทำ Coring และการทดสอบ Unconfined Compressive Strength สามารถใช้คุณภาพอธิบายได้ถึงทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ และค่า Unconfined Compressive Strength ของเสาเข็มดินซีเมนต์ได้





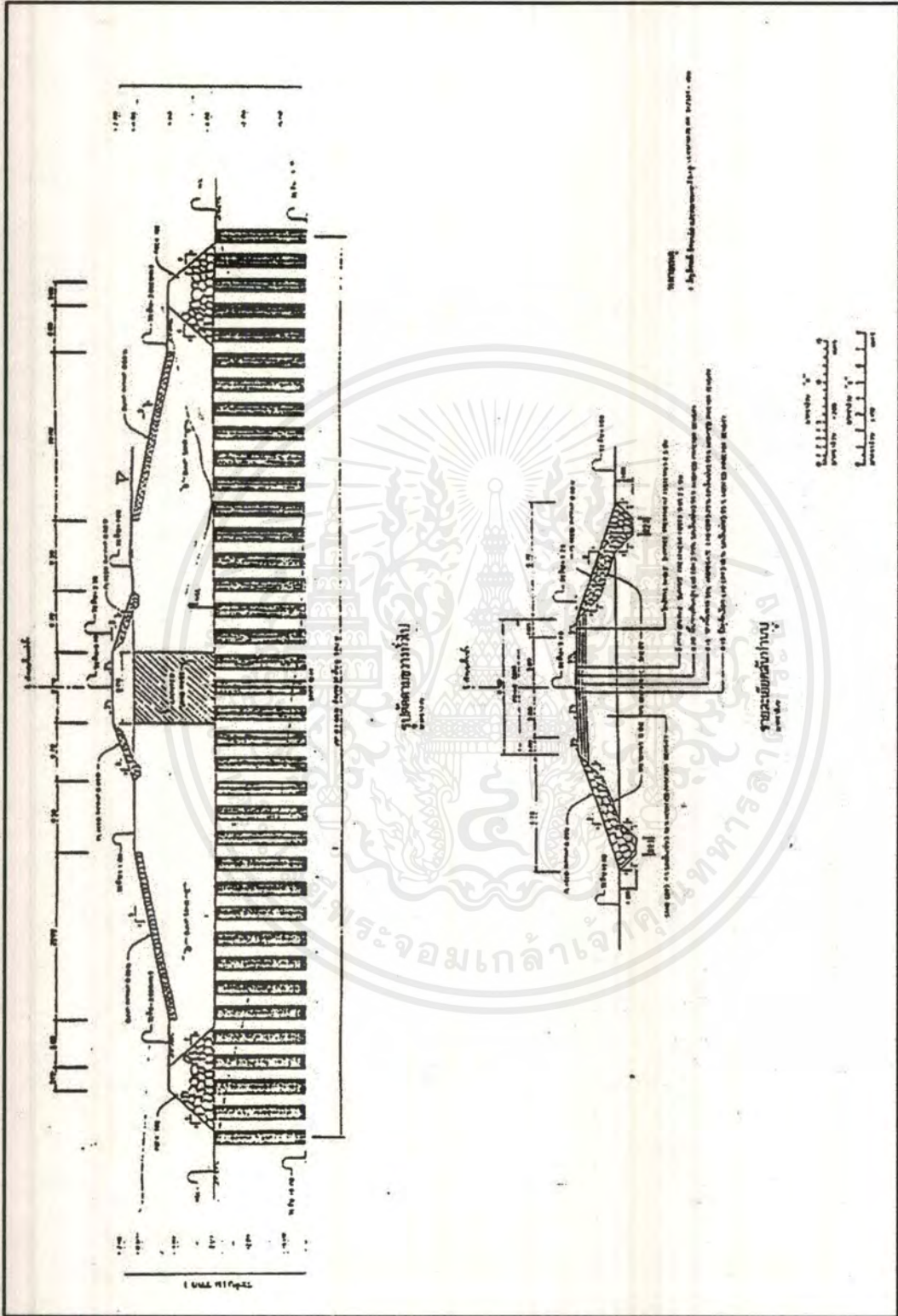
รูปที่ 7.8 ผังบริเวณ (โครงการประตูประบายน้ำปากพอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.10 แบบงานก่อสร้าง Jet Grouting ในส่วนของ คดองลัด (โครงการประตูดระบายน้ำปากพอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.12 แบบงานก่อสร้าง Jet Grouting ในส่วนของ กำแพงกันน้ำ (โครงการประติมากรรมน้ำปากพนัง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 ชื่อโครงการ ทำเทียบเรือขนถ่ายอุปกรณ์หนัก จ.สุราษฎร์ธานี เจ้าของโครงการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

7.3.1 ความเป็นมาของโครงการ

เนื่องจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จะดำเนินการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนกระบี่ จังหวัดกระบี่ แต่จากการสำรวจเส้นทาง พบว่าไม่สามารถขนถ่ายอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเกิน 100 ตัน จากท่าเรือกรุงเทพ ฯ หรือจากท่าเรือสงขลา แล้วขนส่งต่อทางรถบรรทุกได้โดยปลอดภัยเนื่องจากติดปัญหาเรื่องความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานบางแห่งในเส้นทางขนส่ง จึงต้องขนถ่ายจากเรือบรรทุกสินค้าลงเรือขนถ่ายของ กฟผ. ที่จุดใกล้เกาะสมุย บริเวณอ่าวไทย เรือขนถ่ายนี้จะแล่นเข้ามาแม่น้ำตาปีมายังท่าเทียบเรือขนถ่ายอุปกรณ์หนักที่คลองท่าทอง แล้วจึงใช้รถบรรทุกลากจูง (Trailer) บรรทุกอุปกรณ์ดังกล่าวต่อจากเรือขนถ่าย นำไปส่งให้โครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนกระบี่ต่อไป กฟผ. ฤกษ์ออกแบบรองรับโครงสร้างของท่าเทียบเรือขนถ่ายอุปกรณ์หนักครั้งนี้ โดยเลือกใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นตัวถ่ายน้ำหนักบรรทุกผ่านพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กลงสู่ชั้นดินแข็ง และใช้เป็นกำแพงรับแรงดันดินด้านข้างเพื่อประหยัดค่าก่อสร้างลงจากวิธีการที่ได้เคยใช้มาก่อนเช่นการใช้เสาเข็มตอกเสาคอนกรีต เป็นหลักในโครงสร้างท่าเทียบเรือที่ราชบุรี แต่มุ่งหมายให้ได้ความแข็งแรงไม่น้อยกว่าเดิม

7.3.2 ข้อมูลการสำรวจดิน

ความลึก 1-3 ม. เป็นชั้นดินเหนียว

สภาพดินโดยทั่วไปความลึก 3-9 ม. เป็นชั้นทรายแป้งปนดิน หรือปนทรายละเอียด (Clayey silt to silty fine sand) ซึ่งมีลักษณะหลวม น้ำซึมผ่านได้ง่าย และมีความแข็งแรงต่ำ

ความลึก 9-12 ม. เป็นชั้นดินเหนียว หรือชั้นทรายแป้งปนดินเหนียว ซึ่งมีสภาพแข็งปานกลางถึงแข็งมาก (Medium to hard silty clay) ดูรูปที่ 7.13

7.3.3 กระบวนการทำงาน Jet Grouting

1. ในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน 2541 งานก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ก็ทำไปตามแบบซึ่งก็เป็นไปอย่างราบรื่น
2. ก่อสร้างแนวทำนบกั้นน้ำชั่วคราวขนานไปกับแนวตลิ่ง โดยสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาด 70 เซนติเมตร ลึก 13 เมตร ช้อนเหลื่อมกัน 20 เซนติเมตร ต่อเนื่องกันไปในแนวแกนทำนบกั้นน้ำดังกล่าว เพื่อให้แนวเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นม่านกั้นน้ำไม่ให้รั่วไหลเข้ามาในบ่อขุด
3. ทำงานขุดดิน ซึ่งสามารถทำได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากไม่มีน้ำไหลซึมเข้ามาในบ่อขุด แม้ก้นบ่อขุดจะเป็นดินทราย และอยู่ใต้ระดับน้ำในคลองท่าทองไม่น้อยกว่า 3 เมตร
4. สร้างแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กปิดพื้นของเรือ ลานขนถ่ายรอบบ่อขุด ทางลาดขึ้นจากของเรือ ผนังด้านข้างของบ่อขุด และกำแพงด้านประชิดแนวคลองโดยรอบ
5. หลังจากงานคอนกรีตเสร็จเรียบร้อย จึงรื้อแนวทำนบกั้นน้ำชั่วคราวออก และปล่อยให้ น้ำจากคลองท่าทองไหลเข้ามาในของเรือ

งาน Jet Grouting ได้ถูกนำมาใช้ใน 4 ส่วนด้วยกันคือ

1. ใช้ทำเป็นกำแพงที่บ้น้ำเพื่อป้องกันไม่ให้ไหลเข้ามาในบ่อขุด โดยใช้เสาเข็มขนาด 70 เซนติเมตร ลึก 13 เมตร ช้อนเหลื่อมกัน 20 เซนติเมตร
2. ใช้เป็นส่วนฐานรากรับน้ำหนักลานขนถ่ายรอบบ่อขุด และป้องกัน Slop โดยใช้เสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 70 เซนติเมตร ระยะห่าง 1.00 เมตร ลึก 13 เมตร โดยมีการจัดวางตำแหน่งของเสาเข็ม (ดังรูปที่ 7.14)
3. ใช้เป็นส่วนกำแพงที่บ้น้ำสำหรับงานขุดและยังช่วยปรับปรุงความมั่นคงของ Slope โดยใช้เสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ลึก 13 เมตร ช้อนเหลื่อมกัน 10 เซนติเมตร มีระยะห่างระหว่างเข็ม 1.50 เมตร (ดังรูปที่ 7.14)
4. ใช้เป็นฐานรากรับน้ำหนักพื้นของเรือ และทางลาดขึ้นจากของเรือ โดยใช้เสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 1.50 เมตร (ดังรูปที่ 7.14)

7.3.4 การออกแบบและวิเคราะห์ความมั่นคงของท่าเทียบเรือ

ลักษณะโครงสร้างของท่าเทียบเรือขนถ่ายอุปกรณ์หนัก ประกอบด้วยของเรือ ขนาดกว้าง 16 เมตร ยาว 40 เมตร สูง 3.70 เมตร พื้นของเรืออยู่ที่ระดับ -1.20 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง(รทท)มีทางลาดสำหรับชักลากอุปกรณ์ขึ้น กว้าง 16 เมตร ยาว 47.50 เมตร ความลาด 4% พื้นี่ลานขนถ่ายด้านบนข้างของเรือทั้งสองด้านเป็นพื้น คอนกรีตเสริมเหล็ก. ขนาดกว้าง 10 เมตร ยาว 40 เมตร ได้ออกแบบโครงสร้างฐานรากของของเรือโดยจัดเรียงกลุ่มเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ที่มีขนาดและระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่างๆกัน 3 แบบ ดังได้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 7.14 เสาเข็มแต่ละต้นจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $0.60-0.70$ เมตร และความยาวระหว่าง $9-13$ เมตร โดยปลายเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ฝังเข้าไปอยู่ในชั้นดินแน่นที่ระดับประมาณ -10.50 เมตร ระดับน้ำทะเลปานกลาง

ในส่วนบนสุดเป็นลานขนถ่ายซึ่งจะรับน้ำหนักบรรทุกเฉลี่ย 3 ตัน/ม^2 และสามารถรับน้ำหนักกดเป็นจุดขนาด 100 ตัน จาก Mobile Crane ได้ออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 35 ซม. ใต้พื้นคสล. เป็นชั้นทรายโยได้ฉีดซีเมนต์เข้าไปผสมกับทรายจนเป็นชั้นหนาประมาณ 1 เมตร ซึ่งชั้นนี้จะทำหน้าที่ยึดหัวเสาเข็มเข้าด้วยกัน และช่วยกระจายน้ำหนักลงสู่เสาเข็มอย่างสม่ำเสมอ กลุ่มเสาเข็มที่ออกแบบให้รองรับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก.ประกอบด้วยเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ขนาด 0.7 เมตร และวางระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง 1.0 เมตร กระจายเต็มพื้นที่ขนาด 640 ม^2 ในส่วนที่สองเป็นท้องของเทียบเรือและทางลาดขนาดพื้นที่ 1370 ม^2 ได้ออกแบบเป็นแผ่นคอนกรีตหนา 30 ซม. อยู่ที่ระดับต่ำกว่าขอบบนของลานขนถ่าย 3.70 ม. โดยให้แบกรับน้ำหนักบรรทุกเฉลี่ย 5 ตัน/ม^2 และถ่ายผ่านลงสู่กลุ่มเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ขนาด 60 ซม.ซึ่งจัดวางระยะห่างกัน 1.50 ม.ในส่วนที่สามเป็นกำแพงกันดิน(Retaining Structure) ได้ออกแบบเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ขนาด 60 ซม. ซ้อนเหลื่อมกัน 3 แถว ในลักษณะเป็นกำแพงต่อเนื่องมีความหนารวม 1.60 ม.ความยาว 116 ม. และลึก 13 ม.โดยกำแพงต้องมีความมั่นคงสามารถรับแรงดันด้านข้างซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกจากลานขนถ่าย และรับน้ำหนักกดขนาด 100 ตัน จาก Mobile Craneซึ่งกระทำเป็นจุดในตำแหน่งที่ห่างจากขอบท่าตั้งแต่ 50 ซม.ขึ้นไปได้อย่างปลอดภัย

การวิเคราะห์ความมั่นคงของกำแพงกันดิน Zone 1 ในชั้นออกแบบได้ใช้โปรแกรม Slope/W ผลจากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อล้อของ Mobile Crane ขยับห่างจากขอบท่าไปอีก เมื่อกำหนดไม่ให้มีน้ำหนักบรรทุกใดๆ อยู่ในระยะ 1 เมตร จากแนวขอบท่า ได้แยกวิเคราะห์ความมั่นคงของขอบท่าออกเป็น 2 กรณี คือกรณีด้านในของเรือ และกรณีด้านริมแม่น้ำ ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า FS ต่ำสุด = 2.55 สำหรับกรณีแรก และค่า FS ต่ำสุด = 2.83 สำหรับกรณีหลัง ดังนั้นเพื่อให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบท่ามีความปลอดภัยสูงขึ้นในสภาวะใช้งานตามปกติ จึงเสนอให้บริเวณพื้นที่โดยรอบขอบท่าในส่วนที่ห่างจากขอบเข้ามา 1 ม. เป็นบริเวณที่ไม่ควรกองของหนัก หรือให้ Mobile Crane เข้ามาขึ้นทำงาน

7.3.5 การควบคุมคุณภาพการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ครั้งนี้ผู้ออกแบบมีเป้าหมายเพื่อให้ได้เนื้อเสาเข็มมีความแข็งแรงตามกำหนด เสาเข็มมีขนาดและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยตามที่ได้ออกแบบไว้ จึงได้กำหนดวิธีการควบคุมคุณภาพการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์เพื่อให้ได้คุณภาพผลิตภัณฑ์ตามต้องการดังต่อไปนี้

7.3.5.1 หลักเกณฑ์และวิธีการที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ก่อนนำวิธีการผลิตไปใช้ในงานก่อสร้าง

1. ก่อสร้างเสาเข็มทดสอบดิน-ซีเมนต์ ด้วยการทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณซีเมนต์ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์(w/c)และอัตราเร็วในการเจาะฉีดน้ำปูนไปผสมกับดินเมื่อเสาเข็มแข็งตัว และมีอายุไม่น้อยกว่า 7 วันจะเจาะเก็บตัวอย่าง(coring)อย่างต่อเนื่องจากเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ต้นดังก้าวและเลือกเก็บตัวอย่างCore ที่เป็นตัวแทนจากทุกระยะห่าง 1.50 เมตรตลอดทั้งต้นมาทดสอบกำลังอัด เนื้อวัสดุดิน-ซีเมนต์ ตัวอย่าง Core ต้องมีค่ากำลังอัด(unconfined compressive strength)ที่อายุ 14 วันสูงกว่า600 kPaหรือที่อายุ 28 วันสูงกว่า800kPa ถ้ากำลังอัดผ่านกรณีใดกรณีหนึ่ง ให้ถือว่ากรรมวิธีก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ดังกล่าวสามารถยอมรับได้สำหรับการผลิตเนื้อเสาเข็มในงานนี้แต่ถ้ากำลังอัดของของตัวอย่าง Core ใดต่ำกว่าเกณฑ์เกิน 10%และมีจำนวนรวมของตัวอย่าง Core ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าวเกินกว่า 1 ใน 3 ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่เลือกจากเสาเข็มต้นนั้น ให้ก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ขึ้นใหม่ด้วยการปรับเปลี่ยนวิธีการเจาะฉีดน้ำปูนหรือปรับเปลี่ยนส่วนผสมหรือทำทั้ง 2 อย่างเมื่อเสาเข็มใหม่มีอายุครบ 7 วันขึ้นไปให้เจาะเก็บตัวอย่างต่อเนื่องกันตลอดต้นแล้วเลือกตัวอย่าง Core มาทดสอบ หากำลังอัดตามวิธีการเดิม การปรับปรุงคุณภาพงาน จะกระทำเช่นนี้เรื่อยไปจนกระทั่งได้กรรมวิธีก่อสร้างที่ให้เนื้อวัสดุเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จากช่วงควมลึกส่วนต่างๆทั้งต้นสูงกว่าเกณฑ์ที่ต้องการ

2. ก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ 2 ต้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 70 ซม.ยาว 8 ม.และ 10 ม.โดยเสียบเหล็กเสริมที่จำเป็นลงไปตลอดความยาวของเสาเข็ม เพื่อใช้ประโยชน์ในการดึงถอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสาเข็มขึ้นมาตรวจคุณภาพการผลิตเมื่อเสาเข็มมีอายุไม่น้อยกว่า 14 วัน ให้ดึงถอนเสาเข็มขึ้นมาตรวจดูความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวตลอดจนเนื้อวัสดุของเสาเข็ม ถ้าลำต้นของเสาเข็มส่วนใดคอดเล็กเกินกว่า 15% หรือขยายใหญ่เกินกว่า 30% ของขนาดเสาที่ออกแบบไว้ให้ปรับปรุงกรรมวิธีในการผลิตเสาเข็มใหม่เพื่อให้ได้ขนาดเสาเข็มตลอดทั้งต้นอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด จึงจะนำวิธีการผลิตดังกล่าวไปใช้งานก่อสร้างจริงในฝั่งก่อสร้างได้

ในขั้นแรกได้เริ่มก่อสร้างเสาเข็มทดสอบขนาด 70 ซม. ขึ้นโดยในการเจาะฉีดน้ำปูนจะใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ $W/C=1.5$ ใช้ซีเมนต์ขนาด 200 กก/ลบ.ม. ใช้ระดับความดัน 200 กก/ซม.2 ใช้อัตราเร็วในการหมุนก้านเจาะ 10 รอบ/นาที ปรับเปลี่ยนอัตราเร็วในการดึงก้านเจาะฉีดน้ำปูนระหว่าง 150 ถึง 210 ซม/นาที และใช้อัตราเร็วในการฉีดน้ำปูนเข้าไปผสมกับดิน 200 ลิตร/นาที

3. ก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ 1 ต้นด้วยวิธีการที่เลือกแล้วจากผลการทดลองในข้อ 1 และ 2 เมื่อเสาเข็มต้นนี้มีอายุไม่น้อยกว่า 28 วันให้ทดสอบการแบกรับน้ำหนักของเสาเข็มตามมาตรฐาน ASTM D1143-81 ถึงน้ำหนักบรรทุก 100% 200% และ 400% หรือจนถึงจุดวิบัติแล้วแต่กรณีใดจะเกิดก่อนโดยมีการเพิ่มน้ำหนักและลดน้ำหนักโดยวิธีการที่ระบุในหัวข้อ Standard Loading Procedure หากการทดสอบเกิดขึ้นในอัตราที่เร็วมากจนไม่สามารถรักษาน้ำหนักบรรทุกไว้ได้ในระหว่างการทดสอบน้ำหนักบรรทุกในวงจรแรกให้ถือว่าเสาเข็มมีกำลังรับน้ำหนักไม่เพียงพอและให้เลือกเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ต้นใหม่มาทดสอบตามวิธีการเช่นเดิมหากยังเกิดพฤติกรรมเช่นเดียวกันอีกให้เจาะเก็บ Core ต่อเนื่องจนตลอดความลึกของเสาเข็มต้นหลังถ้าพบว่าตัวอย่าง Core ที่เลือกจากทุกระยะ 1.50 ม. นั้นมีกำลังอัดต่ำกว่าเกณฑ์เกิน 10% และมีจำนวนตัวอย่าง Core ดังกล่าว (ที่คุณภาพต่ำกว่าเกณฑ์) รวมกันเกินกว่า 1 ใน 3 ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่เก็บจากเสาเข็มต้นนั้น ผู้รับจ้างต้องเป็นผู้รับค่าใช้จ่ายทั้งสิ้นในการทดสอบการแบกรับน้ำหนักของเสาเข็ม การเจาะเก็บ Core และการทดสอบกำลังอัดเหล่านั้นเองโดยจะนำมาคิดค่าใช้จ่ายกับเจ้าของงานไม่ได้ แต่หากผลการทดสอบกำลังอัดผ่านเกณฑ์ผู้ออกแบบจะทบทวนการออกแบบโดยเพิ่มขนาดเสาเข็มหรือลดกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มลงและเจ้าของงานจะออกค่าใช้จ่ายในส่วนของการเพิ่มขึ้นให้กับผู้รับจ้างในอัตราต่อหน่วยตามปกติของงานที่ระบุไว้ในสัญญา

7.3.5.2 แนวทางการควบคุมคุณภาพการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในระหว่างการก่อสร้าง

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะฉีดน้ำปูนต้องมีความสามารถในการควบคุมก้านเจาะที่ยาวต่อเนื่องได้ถึง 13 เมตรการเจาะฉีดน้ำปูนให้กระทำในจังหวะเดียวโดยไม่ต้องหยุดชะงักเพื่อตัดต่อก้านเจาะการหมุนและการถอนก้านเจาะต้องสามารถควบคุมให้มีอัตราคงที่และสม่ำเสมอได้หลายระดับเครื่องฉีดน้ำปูน(ปั๊ม)ต้องสามารถส่งจ่ายน้ำปูนได้อย่างต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 130 ลิตร/นาทีภายใต้ความดันต่อเนื่องในขณะที่ทำงานในระดับ 40 Mpa และสายยางท่อส่งจ่ายน้ำปูนจากเครื่องฉีดน้ำปูนไปถึงก้านเจาะต้องทนความดันสูงสุดได้ถึงระดับ 60 Mpa
2. วิธีการเจาะฉีดน้ำปูนให้เป็นไปตามแบบแล้วได้ผลดีและได้รับการยอมรับแล้วว่าจะสามารถทำให้ได้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่มีขนาดและกำลังอัดของเนื้อวัสดุตามต้องการ
3. ในระหว่างก่อสร้างให้สุ่มเจาะเก็บตัวอย่างจากเสาเข็มดินซีเมนต์ซึ่งผู้ควบคุมงานจะสุ่มเลือกตำแหน่งเสาเข็มให้โดยไม่กำหนดไว้ล่วงหน้า ถ้าผลการทดสอบกำลังอัดของกลุ่มแท่งตัวอย่างจากเสาเข็มต้นใดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้เช่นที่ระบุในหลักเกณฑ์การควบคุมคุณภาพการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ก่อนนำไปใช้ในงานก่อสร้างให้ผู้ควบคุมงานสุ่มเลือกเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ต้นใหม่อีก 1 ต้นภายในรัศมี 5 ม.โดยรอบเสาเข็มทั้ง 2 ต้นยังไม่ได้รับการปรับปรุงเลยผู้รับจ้างจะต้องทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่มีขนาดและระยะห่างระหว่างต้นตามแบบเพิ่มขึ้นในบริเวณดังกล่าวด้วยวิธีการก่อสร้างที่ได้รับการยอมรับแล้วตามข้อ 2 โดยเสาเข็มที่สร้างขึ้นใหม่นี้จะกระจายอยู่ตามตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเสาเข็มชุดที่ได้ทำไปแล้วในเที่ยวแรก

7.3.5.3 ผลจากการควบคุมงานผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในงานก่อสร้างทำเทียบเรือคลองท่าทอง

ผลการปรับเปลี่ยนวิธีการเจาะฉีดน้ำปูนเพื่อให้ได้คุณภาพเสาเข็มตามต้องการผลการทดสอบกำลังอัดของเนื้อดิน-ซีเมนต์จากตัวอย่าง Core ได้สรุปไว้ในตารางในรูปที่ 7.14 ผลจากการปรับปรุงวิธีการทำเสาเข็มพบว่า การฉีดน้ำควนดินจนเหลวก่อนการฉีดน้ำปูน(Pre cut) บางครั้งหากกระทำมากเกินไปในชั้นทรายหลวมอาจจะทำให้กำลังของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในชั้นดินนั้นมีกำลังสูงเพียงพอเนื่องจาก น้ำปูนจะแผ่กระจายออกไปในเนื้อดินหลวมเป็นบริเวณกว้างกว่าที่ต้องการไปมากซึ่งจะทำให้ปริมาณความเข้มข้นของปูนซีเมนต์ในเนื้อดินส่วนนั้นเจือจางกว่าปกติ จึงได้ทดลองปรับเปลี่ยนขบวนการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยเว้นช่วงที่จะไม่ฉีดน้ำควนดินหรือเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาการฉีดน้ำกวนดินในบางชั้นดินปรับเปลี่ยนปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม ปรับเปลี่ยนความ
 ดันที่ใช้ฉีดน้ำปูนปรับเปลี่ยนความดันที่ใช้ฉีดน้ำปูนปรับเปลี่ยนค่า W/C หรือเพิ่มจำนวนเที่ยวของ
 การฉีดน้ำปูนในบางชั้นดิน

ตารางที่ 7.6 กำลังอัดของตัวอย่างที่เจาะเก็บจากเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในระหว่างปรับเปลี่ยน
 กระบวนการผลิต (สมชัย กกกำแพง,2541)

| ความลึก(ม) | กำลังอัดของแท่งตัวอย่างที่เจาะเก็บ(Coring)จากเสาเข็มดิน-ซีเมนต์Qu(kPa) | | | | | | |
|------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | เสาเข็ม | C1/1 | C1/2 | C1/3 | C1/5 | C1/6 | PL3 |
| | วันที่ก่อสร้าง | 20/11/4 | 14/12/4 | 16/12/4 | 16/12/4 | 20/1/41 | 6/2/41 |
| | อายุ(วัน) | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| 0-1.5 | - | 4698 | 867 | 3098 | 1917 | - | |
| 1.5-3.0 | - | 382 | - | 730 | 2253 | - | |
| 3.0-4.5 | - | 295 | 456 | 567 | 4247 | 1041 | |
| 4.5-6.0 | 2331 | 285 | 258 | 1679 | 4189 | 2320 | |
| 6.0-7.5 | 2986 | 1862 | 275 | 580 | 3521 | 2153 | |
| 7.5-9.0 | 3586 | 1278 | 1299 | 534 | 3857 | 2213 | |
| 9.0-10.5 | 334 | 1086 | 879 | | 1234 | 2890 | |
| 10.5-12.0 | | | | | 1409 | 2600 | |

หมายเหตุ:

- วิธีทำเสาเข็ม C1/1 ฉีดน้ำกวนดินจนเหลว ฉีดน้ำปูนที่มีซีเมนต์ 200 กก/ม³ ในขาชั้น
 1 เทียวโดยใช้ W/C=1.5 และใช้ความดัน 200 กก/ซม²
- วิธีทำเสาเข็ม C1/2 เหมือน C1/1 แต่ขณะเจาะลง งดการฉีดน้ำกวนดิน
- วิธีทำเสาเข็ม C1/3 เหมือน C1/2 เพิ่มปริมาณซีเมนต์เป็น 225 กก/ม³
- วิธีทำเสาเข็ม C1/5 เหมือน C1/3 เพิ่มแรงดันเป็น 250 กก/ซม²
- วิธีทำเสาเข็ม C1/6 เหมือน C1/5 ลดซีเมนต์เป็น 200 กก/ม³ ใช้ W/C=1.1 ฉีดน้ำปูน
 ชั้น 2 เทียว โดยฉีดทั้งขาชั้นและขาลง

วิธีทำเสาเข็ม PL3

เหมือน C1/6 ฉีดน้ำกวนดินเฉพาะช่วงลึก 0-3 ม. และช่วงลึก 7-13 ม. เพิ่มปริมาณซีเมนต์เป็น 225 กก/ม³ ฉีดน้ำปูนซ้ำ 2 เทียวเฉพาะในช่วงลึก 3-7 ม.

ตารางที่ 7.7 กำลังอัดของตัวอย่างที่เจาะเก็บจากเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในระหว่างที่ก่อสร้างจริง (สมชัย กกกำแหง, 2541)

| ความลึก(ม) | กำลังอัดของแท่งตัวอย่างที่เจาะเก็บ(Coring)จากเสาเข็มดิน-ซีเมนต์Qu(kPa) | | | | | | |
|------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | เสาเข็ม | C1/1 | C1/2 | C1/3 | C1/5 | C1/6 | PL3 |
| | วันก่อสร้าง | 10/2/41 | 10/2/41 | 15/3/41 | 16/3/41 | 21/4/41 | 22/4/41 |
| | อายุ(วัน) | 37 | 38 | 36 | 36 | 33 | 32 |
| 0-1.5 | | 807 | 1606 | 2313 | 2564 | 2341 | 1346 |
| 1.5-3.0 | | 3261 | 2087 | 1920 | 1371 | 1464 | 1573 |
| 3.0-4.5 | | 2693 | 1655 | 1952 | 1900 | 3531 | 1877 |
| 4.5-6.0 | | 2879 | 3295 | 2508 | 1458 | 2237 | 2733 |
| 6.0-7.5 | | 3341 | 1652 | 962 | 1143 | 1085 | 1148 |
| 7.5-9.0 | | 2497 | 1739 | 1289 | 1084 | 1388 | 1137 |
| 9.0-10.5 | | 2854 | 1867 | 856 | 800 | 1046 | 1031 |
| 10.5-12.0 | | 3088 | 1684 | 915 | 1419 | 1348 | 1001 |

ในที่สุดได้เลือกการเจาะฉีดน้ำปูนเพื่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ให้มีคุณลักษณะตามต้องการ และนำวิธีการนี้ไปใช้สร้างเสาเข็ม PL3 สำหรับใช้ทดสอบการแบกรับน้ำหนักของเสาเข็มนี้นี้ ใช้ซีเมนต์ 225 กก/ม³ ใช้ W/C=1.1 ใช้ความดัน 250 กก/ซม² ใช้อัตราเร็วในการหมุนก้านเจาะ 10 รอบ/นาที ใช้อัตราเร็วในการตักงานเจาะฉีดน้ำปูน 150 ซม./นาที โดยได้ฉีดน้ำกวนดินในชั้นดินเหนียวแข็งในช่วงความลึก 3-7 ม. เพื่อให้เสาเข็มส่วนที่ผ่านชั้นดินหลวมมีขนาดลดลง และฉีดน้ำปูนในชั้นทรายหลวมนี้ 2 เทียว เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อดินซีเมนต์มากขึ้น

7.3.5.4 ผลการตรวจสอบคุณภาพด้านกำลังอัดของเนื้อวัสดุจากงานก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

ในระหว่างก่อสร้างจริงได้สุ่มเลือกเสาเข็มดิน-ซีเมนต์อีก 6 ต้น ซึ่งได้ก่อสร้างขึ้นตามวิธีการที่ใช้ก่อสร้างเสาเข็มทดสอบ PL3 และเจาะเก็บตัวอย่าง Core ต่อเนื่องจากเสาเข็มเหล่านั้นผลการทดสอบกำลังอัดของทุกตัวอย่าง Core ที่เลือกจากเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทุกระยะ 1.5 ม.ล้วนสูงกว่าเกณฑ์ที่ต้องการ 8 กก/ซม² (ตารางที่ 7.5)

7.3.5.5 ผลการดึงถอนเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

เมื่อเสาเข็มดิน-ซีเมนต์มีอายุได้ 21 วันได้ถอนเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้ง 2 ต้นขึ้นมาโดยใช้แรงถอนประมาณ 30-35 ตันตรวจดูพบว่าเสาเข็มมีขนาดโตประมาณ 90 ซม. ซึ่งใหญ่กว่าขนาดที่ต้องการ (70 ซม.) ไปบ้างแต่ก็มีขนาดสม่ำเสมอจนตลอดความยาวทั้ง 2 ต้น แม้เมื่อวัสดุยังไม่จับตัวกันได้แข็งตามต้องการแต่ผลการผลิตเสาเข็มดิน-ซีเมนต์กับชั้นดินส่วนใหญ่ที่อยู่ในสภาพหลวม สามารถยืนยันได้ว่า ด้วยการใช้ความดันในระดับ 200 กก/ซม² จะสามารถผลิตเสาเข็มที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่าขนาดที่ต้องการได้ตลอดความยาวโดยไม่ปรากฏส่วนคอดเล็กในเสาเข็มเลย

7.3.5.6 ผลการทดสอบความสามารถในการแบกรับน้ำหนักของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

ได้ทดสอบกำลังแบกรับน้ำหนักของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ PL3 เมื่ออายุ 24 วัน พบว่าเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 ซม. ความยาว 13 ม.สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 46.5 ตัน การทรุดตัวจึงเกิดเพิ่มขึ้นต่อเนื่องคิดเป็น 3.1 เท่าของน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยที่ออกแบบไว้ 15 ตัน ในกรณีน้ำหนักบรรทุกคงตัวไว้นาน 24 ชม.เมื่อใช้น้ำหนักบรรทุก 15 ตันเสาเข็มทรุดไป 1.34 มม.และเมื่อใช้น้ำหนักบรรทุก 30 ตันเสาเข็มทรุดไป 3.47 มม.

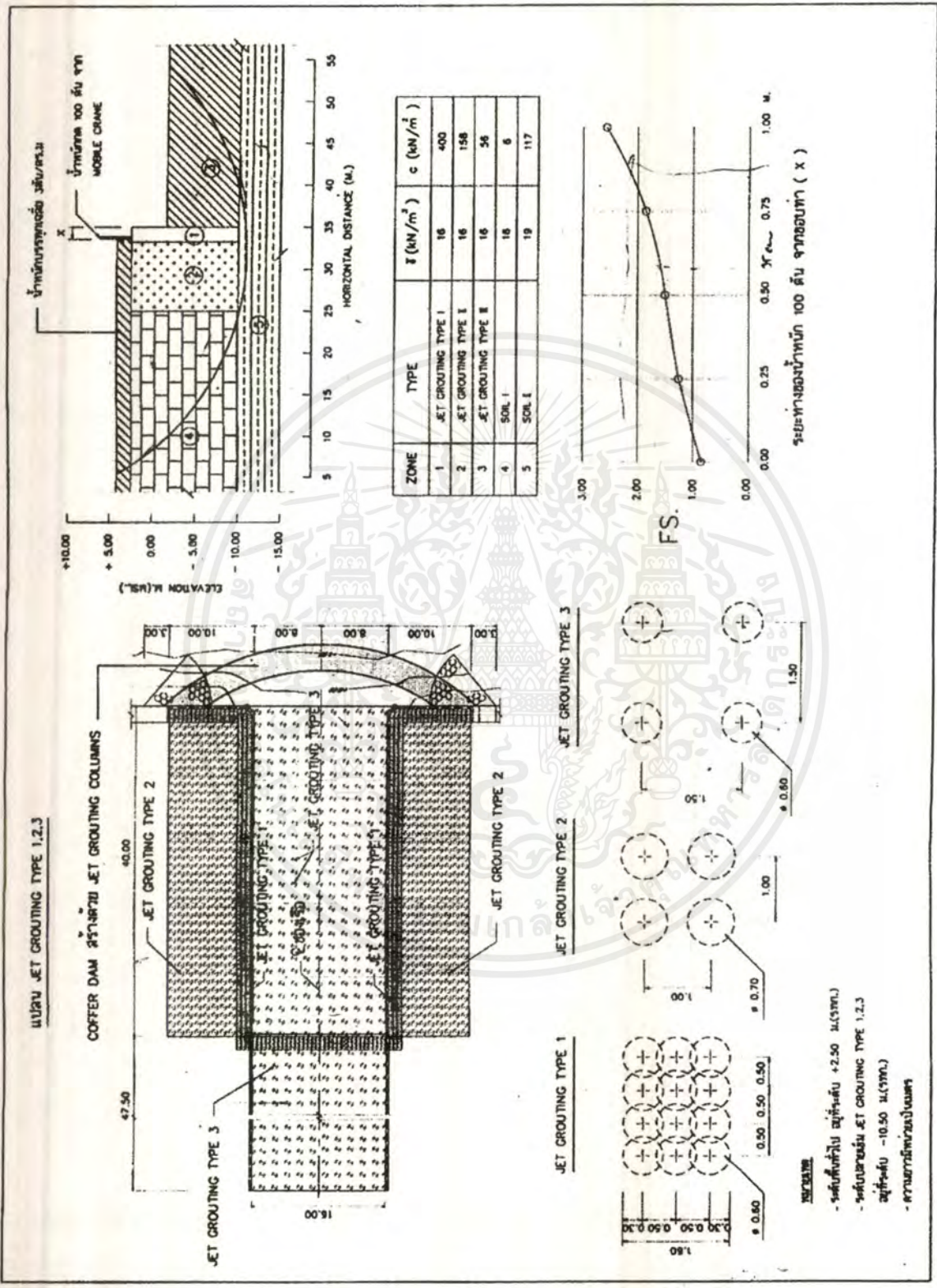
บทวิเคราะห์

ในด้านราคางานก่อสร้างทำเทียบเรือในช่วงเวลาการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกัน 2 แห่ง คือในงานซึ่งประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ที่คลองท่าทอง กับงานก่อสร้างทำเทียบเรือที่ราชบุรี ซึ่งก่อสร้าง

ด้วยวิธีการต้องเสาะเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก ปูพรมรับน้ำหนักจากลานขนถ่าย และพื้นที่ของเรือ และใช้วิธีการก่อสร้างผนังคอนกรีตชั้นเหนือแนวเข็มพืดคอนกรีตทำเป็นกำแพงกันดิน พบว่าราคาก่อสร้างลดลงไปจากเดิมเกือบ 30%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.14 ผังและรูปแบบการจัดวางเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างท่าเทียบเรือขนถ่ายอุปกรณ์หนัก และกราฟแสดง F.S. ในกรณีที่มีน้ำหนักกดจาก MOBILE CRANE 100 ตันที่ระยะห่างจากขอบท่า และตารางแสดงคุณสมบัติ (สมมติยกกำลัง 2541)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 ชื่อโครงการ ทำอากาศยานสากลแห่งที่ 2 (หนองงูเห่า)

7.4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโครงการ

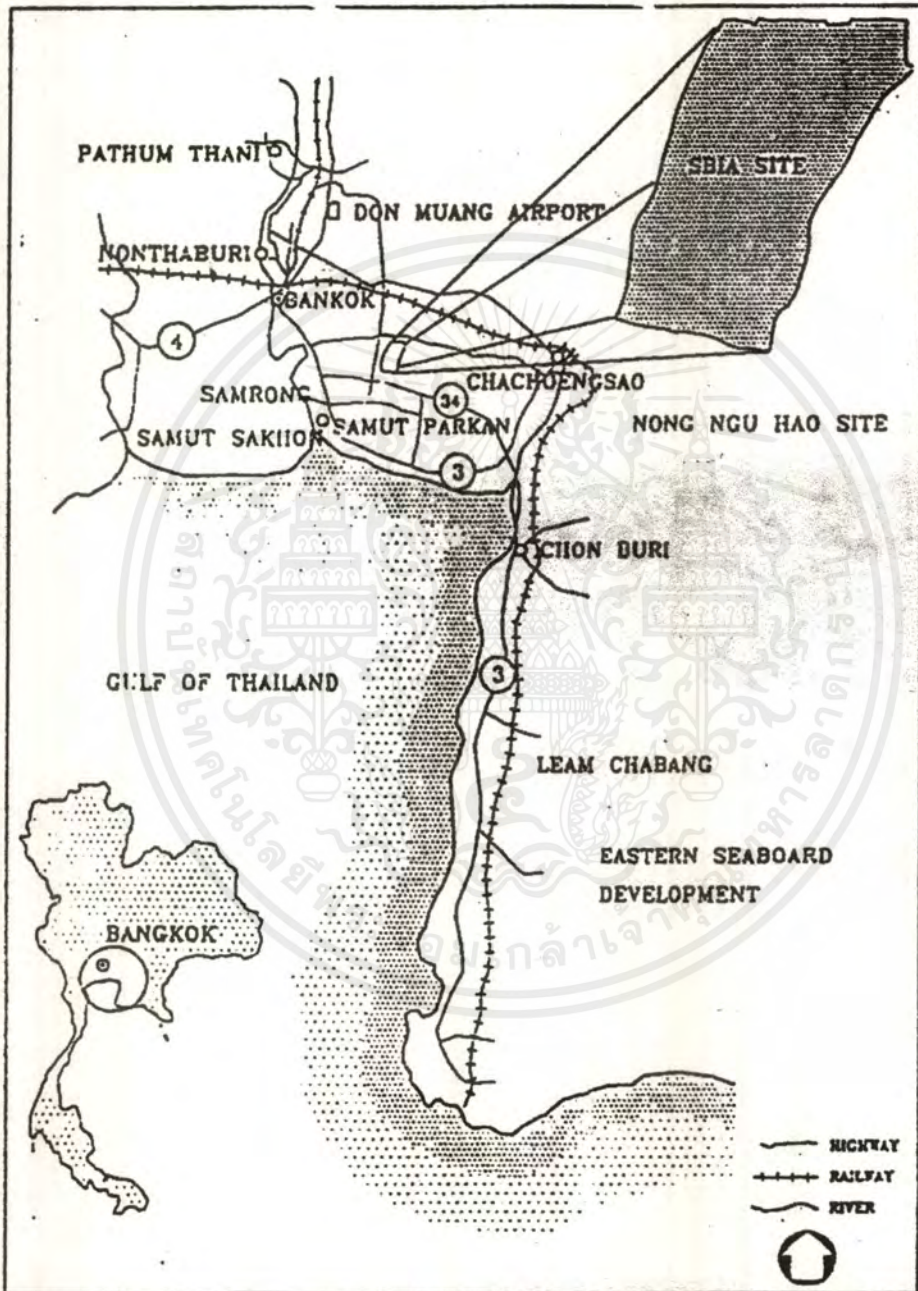
1. การศึกษากรณีตัวอย่างในเรื่องนี้ เป็นการศึกษาตามแนวคิดของคุณสมชัย กกกำแหง (วิศวกรระดับ 10 ฝ่ายสำรวจ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ประธานคณะกรรมการ วิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมปฐพี วสท. (ประจำปี พศ. 2537-2538) ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทความเรื่อง “ทางเลือกใหม่สำหรับงานก่อสร้างฐานรากสนามบินนานาชาติที่หนองงูเห่า” และบทความเรื่อง “การประยุกต์ใช้ Jet Grouting สำหรับงานวิศวกรรมปฐพีในประเทศไทย “

2. สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับโครงการทำอากาศยานสากลกรุงเทพฯ แห่งที่ 2 (หนองงูเห่า) ศึกษาจากบทความเรื่อง “โครงการทำอากาศยานสากลกรุงเทพฯ แห่งที่ 2 หนองงูเห่า “ซึ่งนำเสนอ โดย รศ.ดร. นพดล เพ็ญเวช สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

3. ที่ตั้งของโครงการทำอากาศยานสากลกรุงเทพฯ แห่งที่ 2 (หนองงูเห่า) มีพื้นที่ประมาณ 18,500 ไร่ ขนาดกว้าง 4 กิโลเมตร (แนวตะวันตก – ตะวันออก) ยาว 8 กิโลเมตร (แนวเหนือ – ใต้) อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางกรุงเทพฯ ประมาณ 30 กิโลเมตร

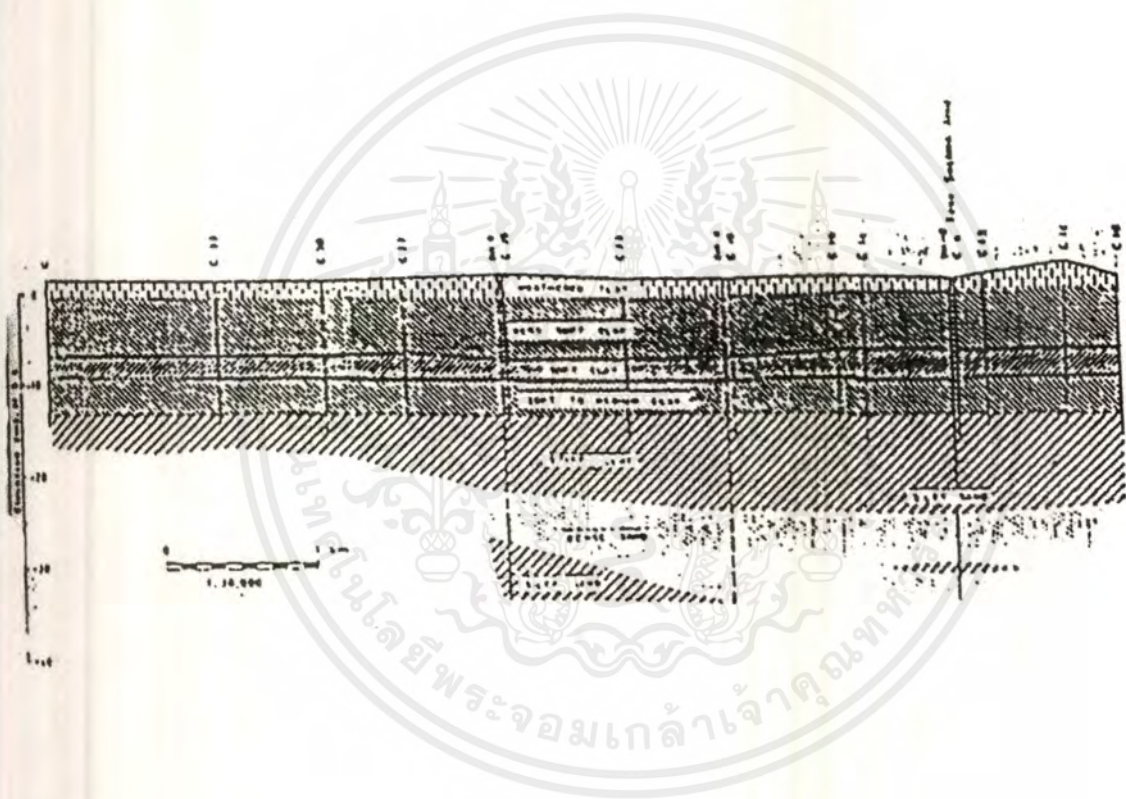
4. สภาพพื้นที่เป็นพื้นที่ต่ำ ต้องมีระบบป้องกันน้ำท่วมที่ดี พื้นที่ในบริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 12-15 เมตร ซึ่งดินมีกำลังต่ำมากและจะต้องปรับปรุงแก้ไขเพื่อป้องกันปัญหาการทรุดตัว

5. ตาม Master Plan เมื่อพัฒนาโครงการได้เต็มที่โครงการจะมีทางวิ่ง 4 ทางวางขนาน แนวเหนือใต้ ซึ่งสามารถรองรับการขึ้นลงของเครื่องบินได้ 112 เครื่อง/ชั่วโมง รองรับปริมาณผู้โดยสาร 100 ล้านคนปี รองรับปริมาณสินค้า 6.4 ล้านตันปี ทางวิ่งจะมีความกว้าง 60 เมตร ยาว 3,700 เมตร ในระยะเริ่มต้นจะก่อสร้าง 2 ทางวิ่ง



รูปที่ 7.15 แสดงที่ตั้งโครงการท่าอากาศยานกรุงเทพแห่งที่ 2 (หนองงูเห่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.16 แสดงสภาพชั้นดินอ่อนบริเวณหนองงเห่า
(โครงการหนองงเห่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.2 แนวคิดหลักในการนำ Soil Cement Column ไปประยุกต์ในโครงการ

1. ทำการก่อสร้าง Soil Cement Column โดยวิธี Jet Grouting Technique ดัดยก่อสร้างในลักษณะกลุ่มของ Soil Cement Column เพื่อให้กลุ่มเสาเข็มนี้ทำหน้าที่เหมือนตัวยึดเสริมเพิ่มความแข็งแรงในมวลดินอ่อน (Soil Reinforcement)

2. กลุ่ม Soil Cement Column จะทำหน้าที่ยึดดินอ่อนเสมือนกล่องดินเหนียวแข็งขนาดใหญ่ซึ่งมีพฤติกรรมเหมือนแพรับน้ำหนักที่ลอยอยู่ในเลน ซึ่งสามารถแบกรับน้ำหนักบรรทุกจากวัสดุถมลานบินและเครื่องบิน พร้อมทั้งสามารถถ่ายน้ำหนักบรรทุกผ่านลงสู่ชั้นดินส่วนล่างได้อย่างสม่ำเสมอซึ่งจะส่งผลให้การทรุดตัวในระยะยาวของผิวลานบินเกิดขึ้นน้อยลงและเป็นไปอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น

3. บดอัดคอนกรีตแห้งซึ่งใช้ซีเมนต์เป็นหลัก(ในปริมาณต่ำ) เพื่อเชื่อมประสานมวลคอนกรีตให้เป็นชั้นวัสดุที่แข็งแรงอยู่เหนือชั้นทรายถมและกลุ่ม Soil Cement Column ชั้นวัสดุคอนกรีตบดอัดจะมีลักษณะเป็นแผ่นวัสดุที่หนาและแข็งแรงเพียงพอที่จะกระจายน้ำหนักบรรทุกลงสู่เสาเข็มเบื้องล่างอย่างสม่ำเสมอในลักษณะฐานรากแพ (Mat Foundation) และช่วยยึดให้กลุ่มเสาเข็มเหล่านั้นมีพฤติกรรมในการรับแรงเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากขึ้น

7.4.3 การออกแบบ Soil Cement Column

ตัวอย่าง การออกแบบสามารถคำนวณตามแนวทางดังต่อไปนี้

1. การคาดคะเนน้ำหนักบรรทุกโดยเฉลี่ยเหนือกลุ่ม

สมมุติ

| | | |
|--|-------------|---------------|
| ให้มีน้ำหนักบรรทุกโดยเฉลี่ย ประมาณ | 2 | ตัน/ตารางเมตร |
| ทรายถมสูงขึ้นจากผิวดิน 60 เซนติเมตร= $(0.6 \times 1.47) =$ | 0.882 | ตัน/ตารางเมตร |
| | \approx 1 | ตัน/ตารางเมตร |
| น้ำหนักลานคอนกรีตหนา 0.50 เมตร= $(0.5 \times 2.40) =$ | 1.2 | ตัน/ตารางเมตร |
| น้ำหนักบรรทุกรวม $= (2 + 1 + 1.2) =$ | 4.2 | ตัน/ตารางเมตร |
| ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกโดยเฉลี่ยเหนือกลุ่ม ที่ใช้ในการออกแบบโดยประมาณ | $=$ 5 | ตัน/ตารางเมตร |

2. ข้อมูลชั้นดินอ่อน

ค่าเฉลี่ย Undrained Shear Strength ของชั้นดินอ่อนแต่ละชั้นซึ่งหนาประมาณ 8 เมตร 3 เมตร และ 4 เมตร ตามลำดับ มีค่า 1 ตัน/ตารางเมตร 1.5 ตัน/ตารางเมตร และ 2.5 ตัน/ตารางเมตร ตามลำดับ

3. การคำนวณหากำลังรับน้ำหนักโดยปลอดภัย Q_a

$$Q_{U(net)} = (Q_{b(net)}/F.S._b) + Q_f$$

$$= (n_1 * n_2) [(9C_u' Ab / F.S._b) + \sum \alpha P Cu \Delta L]$$

$$Q_{(all)} = Q_{U(net)}/F.S._{(all)}$$

| | | | |
|------|----------------|---|---|
| ซึ่ง | $Q_{U(net)}$ | = | กำลังต้านทานน้ำหนักประลัยสุทธิ |
| | $Q_{b(net)}$ | = | กำลังรับน้ำหนักประลัยที่ปลายเสาเข็ม |
| | Q_f | = | กำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน |
| | $(n_1 * n_2)$ | = | จำนวนเสาเข็ม |
| | C_u' | = | Undrained Cohesion ของดินที่ปลายเข็ม |
| | Ab | = | พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มแต่ละต้น |
| | $F.S._b$ | = | ส่วนปลอดภัยสำหรับน้ำหนักประลัยที่ปลายเสาเข็มให้ใช้เท่ากับ 3.0 |
| | P | = | เส้นรอบรูปของเสาเข็มแต่ละต้น |
| | $F.S._{(all)}$ | = | ส่วนปลอดภัยสำหรับกำลังการรับน้ำหนักบรรทุกโดยปลอดภัย(2.0) |
| | C_u | = | Undrained Cohesion ของดินตามความยาวเสาเข็ม |
| | ΔL | = | ช่วงความหนาของชั้นดินที่กำลังพิจารณาค่า Q_f |
| | α | = | Empirical Adhesion Factor |

- ในการคำนวณ ให้คิดสำหรับ Soil Cement Column ดังนั้น $(n_1 * n_2) = 1$
- ให้ระดับปลาย Soil Cement Column วางอยู่ใน Soft Layer 3 ดังนั้น $C_u' = 2.5$ ตัน/ตารางเมตร
- ใช้ Soil Cement Column ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.60 เมตร
- $F.S._b = 3.0$
- ค่า Empirical Adhesion Factor = 1.0 หาได้จากรูปที่ 7.17

$$Q_{all} = Q_{b(net)}/F.S._{(all)}$$

$$= 44.53/2$$

$$= 22.27 \quad \text{ตัน/ตัน}$$

ดังนั้นเสาเข็มแต่ละต้นจะแบกรับภาระจากพื้นที่ลานบินได้ประมาณ

$$22.27/5 = 4.45 \quad \text{ตารางเมตร}$$

$$= 2.11 * 2.11 \quad \text{ตารางเมตร}$$

∴ ระยะห่างของ Soil Cement Column แต่ละต้น = 2.00 เมตร ทั้งสองทิศทางโดยตลอด
ภัย

ในกรณีนี้ Soil Cement Column แต่ละต้นจะรับน้ำหนักจริงประมาณ

$$= 2.00 * 2.00 * 5$$

$$= 20 \quad \text{ตัน}$$

ดังนั้น กำลังขีดสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นใน Soil Cement Column คือ

$$q = 20 \text{ ตัน} / (\pi * 0.6^2 / 4)$$

$$= 70.77 \text{ ตัน/ตารางเมตร}$$

ถ้าใช้ส่วนปลอดภัยของ Soil Cement Column = 2

ดังนั้น จะต้องสร้าง Soil Cement Column ให้มีค่า q_u ที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า
(70.77 * 2) = 141.54 ตัน/ตารางเมตร

จากตารางที่ 7.6 แสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของตัวอย่างที่เจาะเก็บจาก Column Soil Cement ซึ่งสร้างโดยวิธี Jet Grouting จะเห็นได้ว่าอยู่ในวิสัยที่สามารถสร้าง Soil Cement Column ให้มีความแข็งแรงในระดับดังกล่าวได้ไม่ยาก แต่จุดที่สำคัญจุดหนึ่งคือการทดลองหาอัตราส่วนผสมในห้องปฏิบัติการโดยอาศัยดินตัวอย่าง (Disturbed Sample) จากสถานที่จริงที่สุ่มเก็บตัวอย่างในระดับความลึกต่างๆ จากนั้นนำมาทดลอง Unconfined Compression Testing ตามมาตรฐาน ASTM 2166 โดยจะต้องควบคุมการทดลองเพื่อให้เกิดความถูกต้องและแม่นยำของข้อมูลที่จะนำมาออกแบบ Soil Cement Column ต่อไป

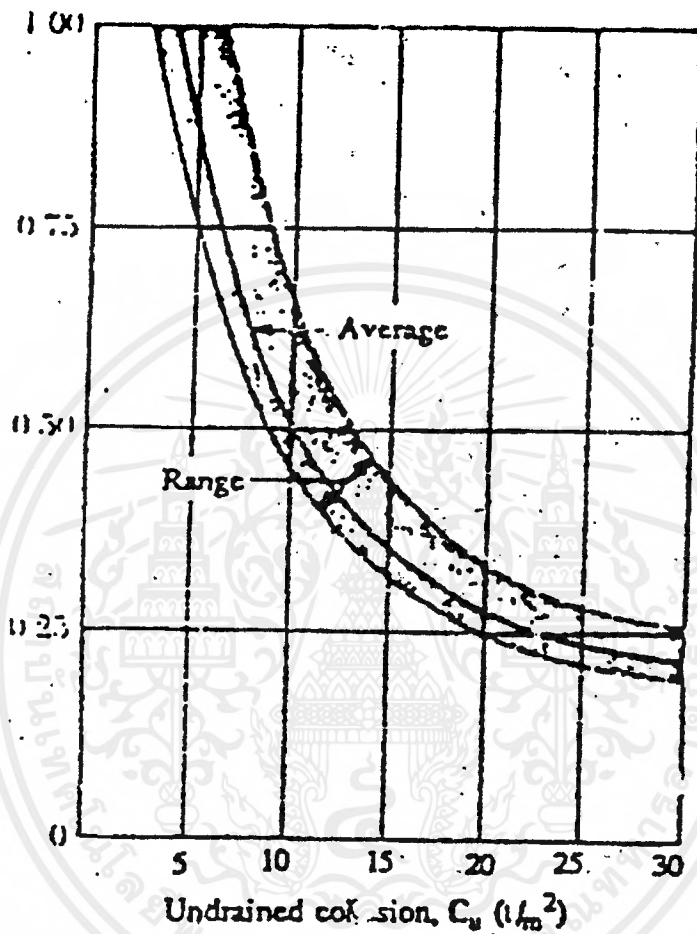
4. การคาดคะเนปริมาณการพองตัวของผิวดินที่เกิดจาก Soil Cement Column

ในการปรับปรุงดินด้วยวิธี Jet Grouting น้ำปูนที่ฉีดเข้าไปในดินจะทำให้ปริมาตรมวลดินฟูเพิ่มขึ้นประมาณ 30 % ของปริมาตร Soil Cement Column ที่ออกแบบไว้เนื่องจากปริมาณน้ำปูนที่ฉีดเข้าไปในมวลดินจะเปลี่ยนไปเป็นปริมาตรของมวลดินแข็งที่เพิ่มขึ้น

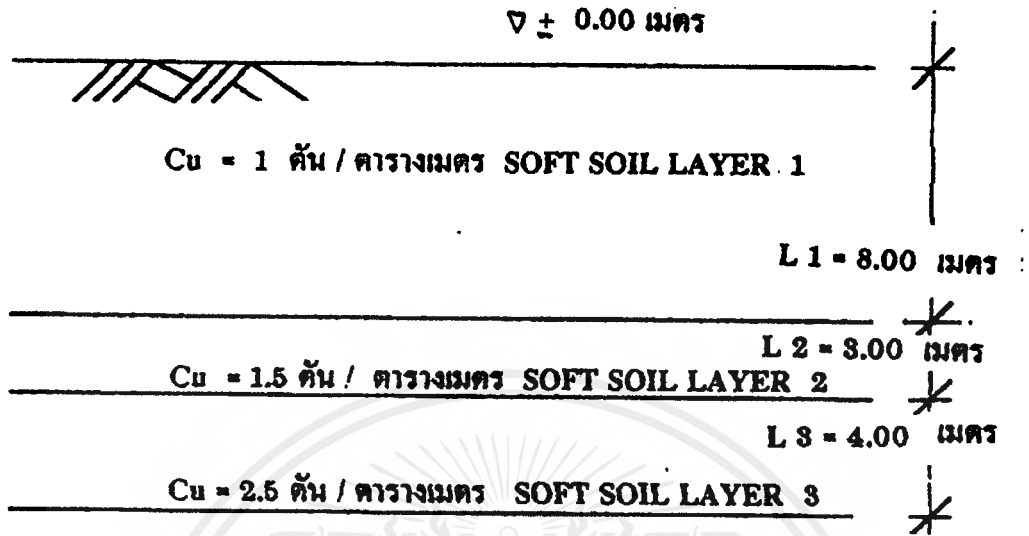
Soil Cement Column แต่ละต้นจะทำให้ปริมาตรมวลดินเพิ่มขึ้นประมาณ = 1.272 ลบ.ม

ถ้า Soil Cement Column แต่ละต้นแบกรับภาระจากพื้นที่ลานบินประมาณ 4 ตารางเมตร
ดังนั้นการพองตัวของผิวดินต่อพื้นที่ 4 ตารางเมตร = $1.27/4 = 0.32$ เมตร ดังนั้นการสร้างกลุ่ม

Soil Cement Column ขนาด 0.60 เมตร* 15.0 เมตร ปูพรมทั่วบริเวณลานบิน จะทำให้ผิวดินโดยเฉลี่ยยกตัวสูงประมาณ 30 เซนติเมตร



รูปที่ 7.17 แสดงค่าของ α ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า UNDRAINED COHESION ของ CLAY (SWEROAD,1992)



รูปที่ 7.18 ลักษณะชั้นดินที่ใช้ในการออกแบบ (โครงการหนองเห่า)

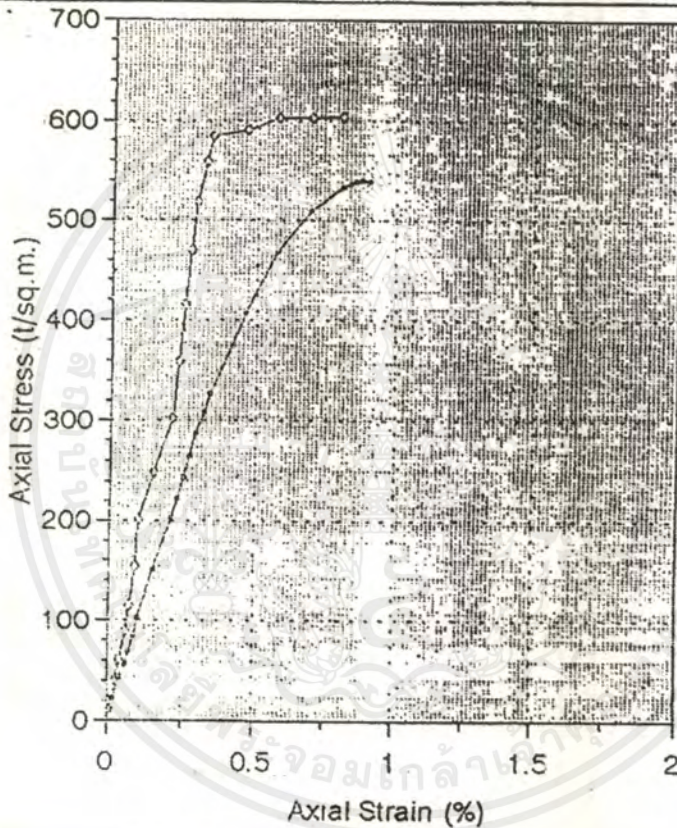
| No | สถานี | ชนิดของดิน | อายุ วัน | W % | γ_d t/m ³ | q_u t/m ² | E_{50} t/m ² | S_{JGP} t/m ² | E_{50} / S_{JGP} |
|----|---|----------------|-------------|--------|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1 | นครราชสีมา | Sandy Silt | 15 | 11 | 1.47 | 542 | 88500 | 271 | 326.26 |
| 2 | ระยอง | Silty Sand | 9 | 14 | 1.82 | 604 | 82000 | 302 | 271.52 |
| 3 | สมุทรปราการ | Very Soft Clay | 14 | 106 | 0.63 | 50 | 3370 | 25 | 134.80 |
| | | | | 116 | 0.60 | 66 | 5510 | 33 | 166.96 |
| 4 | รังสิต | Very Soft Clay | 28 | 101 | 0.67 | 60 | 6900 | 30 | 230 |
| 5 | หนองจอก | Very Soft Clay | 7 | 88 | 0.79 | 49 | 7620 | 24.5 | 319.18 |
| 6 | บางบ่อ (สถานีกองลัพท์) | Very Soft Clay | 13 | 162 | 0.48 | 48 | 4790 | 24 | 199.58 |
| | | | 20 | 173 | 0.48 | 55 | 8530 | 27.5 | 310.18 |
| | | | 31 | 147 | 0.52 | 43 | 12440 | 21.5 | 578.60 |
| | | | 41 | 123 | 0.54 | 55 | 7240 | 27.5 | 263.27 |
| | | | 77 | 123 | 0.56 | 80 | 6830 | 40 | 170.75 |
| 7 | บางซื่อน | Very Soft Clay | 28 | 97 | 0.72 | 104 | 24210 | 52 | 465.57 |
| | | | 28 | 113 | 0.65 | 76 | 22970 | 39 | 604.47 |
| | | | 28 | 122 | 0.60 | 61 | 14670 | 30.5 | 490.98 |
| | | | 28 | 132 | 0.57 | 91 | 11410 | 45.5 | 250.76 |
| 8 | บางปะกง | Very Soft Clay | 27 | 93 | 0.74 | 166 | 45440 | 83 | 547.46 |
| | | | 27 | 103 | 0.68 | 106 | 21670 | 53 | 408.85 |
| 9 | บางบ่อ (สถานีเชื้อเพลิง ปิโตรเลียม) | Very Soft Clay | 73 | 127 | 0.58 | 99 | 19746 | 49.5 | 398.90 |
| | | | 79 | 136 | 0.56 | 94 | 13929 | 47 | 296.36 |
| | | | 81 | 131 | 0.59 | 147 | 41575 | 73.5 | 565.64 |

ตารางที่ 7.8 แสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของตัวอย่างที่จะเจาะเก็บจากเสาเข็มดินซีเมนต์(สมชัย กกกำแหง ,2539)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNCONFINED COMPRESSION TEST RESULTS

TESTED SPECIMENS : SOIL-CEMENT STABILIZATION BY JET GROUTING
ON COHESIONLESS SOIL, SANDY SILT & SAND



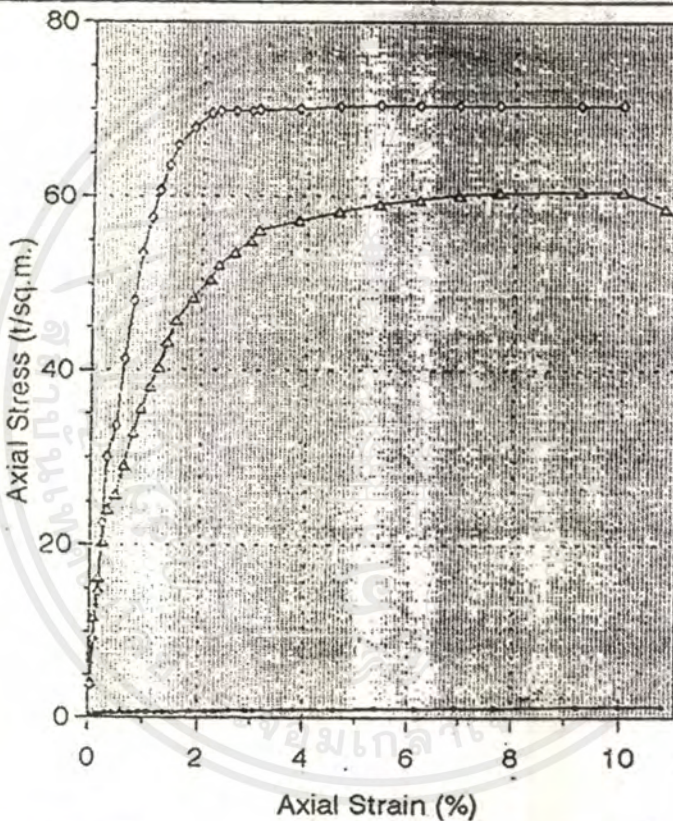
| MATERIAL | DRY DENSITY (t/cu.m.) | Wn (%) | qu | Es at 50 % qu |
|--|--------------------------|-----------|-------------------------|---------------|
| | | | at 14 days (t/sq.m.) | |
| COHESIONLESS SOIL | | | | |
| STABILIZED FINE SANDY SILT NAKORNRAJSIMA | 1.47 | 11 | 542 | 98280 |
| STABILIZED SAND RAYONG | 1.62 | 14 | 604 | 97690 |

รูปที่ 7.19 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบดินซีเมนต์ (โครงการหนองเห่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNCONFINED COMPRESSION TEST RESULTS

CORED SPECIMENS : SOIL-CEMENT STABILIZATION BY JET GROUTING
ON COHESIVE SOIL, SOFT BANGKOK CLAY.



| MATERIAL (BANGKOK CLAY) | DRY DENSITY (t/cu.m.) | W _n (%) | q _u | Es at 50 % q _u |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|---------------------------|
| | | | (t/sq.m.) | |
| VERY SOFT CLAY depth 4 m. | 0.83 | 83 | 1.2 | 50 |
| STABILIZED CLAY depth 3 m. 28 days | 0.67 | 101 | 60.5 | 8140 |
| STABILIZED CLAY depth 6 m. 28 days | 0.71 | 72 | 70.4 | 19900 |

รูปที่ 7.20 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบดินซีเมนต์ (โครงการหนองเห่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.4 ลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง

ลำดับขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. บดอัดทรายถมกลับพื้นที่ปรับระดับทั่วทั้งบริเวณที่จะก่อสร้างลานบิน และลานจอดเครื่องบินขึ้นมาจากนกระทั่งมีระดับสูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 60 เซนติเมตร
2. สร้าง Soil Cement Column โดยวิธี Jet Grouting ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.6 เมตร ลึก 15 เมตร เว้นระยะระหว่างเสา 2.0 เมตร ทั้ง 2 ทิศทาง ฉีดน้ำปูนให้ต่อเนื่องกันขึ้นมาในชั้นทรายถมโดยแผ่ขยายในชั้นบนสุด 30 เซนติเมตร ให้น้ำปูนกระจายติดต่อกันเต็มพื้นที่ระหว่างเสาแต่ละต้นเพื่อสร้างชั้นทรายแข็งเป็นแผ่นหนาเหนือกลุ่ม Soil Cement Column เต็มทั้งบริเวณที่จะรองรับลานบินและลานจอดเครื่องบิน
3. บดอัดคอนกรีต(Roller Compaction Concrete)เป็นชั้นเดียวหนาประมาณ 30 เซนติเมตร
4. สร้างลานบินคอนกรีตเสริมเหล็กหรือลานแอสฟัลท์เหนือชั้นคอนกรีตบดอัดให้ได้คุณสมบัติสอดคล้องตามมาตรฐานการก่อสร้างผิวจราจรลานบิน

7.4.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และแนวโน้มการใช้งานในอนาคต

1. ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เนื่องจาก Jet Grouting Technique สามารถทำ Soil Cement Column ได้ประมาณ 40 ต้น/วัน ในเวลาทำงานปกติเพียง 10 ชั่วโมงโดยใช้เครื่องจักรเจาะฉีดน้ำปูน 1 ชุด ในระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์หลังจากการทำ Soil Cement Column พื้นที่ในบริเวณดังกล่าวจะสามารถพัฒนากำลังในระดับที่เพียงพอจะดำเนินการก่อสร้างในส่วนอื่นๆต่อไป
2. ปริมาตรมวลดินในบริเวณที่มีการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนจะเพิ่มขึ้นประมาณ เท่าๆกับปริมาตรน้ำปูนที่ฉีดเข้าไปปรับปรุงดินเนื่องจากน้ำปูนหลังจากผสมกับดินแล้วจะเปลี่ยนสภาพวัสดุผสมจากของเหลวให้กลายเป็นของแข็งคงตัวเมื่อเวลาผ่านไปแต่ยังมีปริมาตรใกล้เคียงกับปริมาตรของวัสดุผสมจากของเหลวให้กลายเป็นของแข็งคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป แต่ยังมีปริมาตรใกล้เคียงกับปริมาตรของวัสดุผสมในขณะที่ยังมีของเหลวอยู่ จึงมักส่งผลให้พื้นที่ผิวของลานดินถมโดยเฉลี่ยสูงขึ้นจากระดับดินเดิม จากการคาดคะเนปริมาณการพองตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ 30 เซนติเมตร

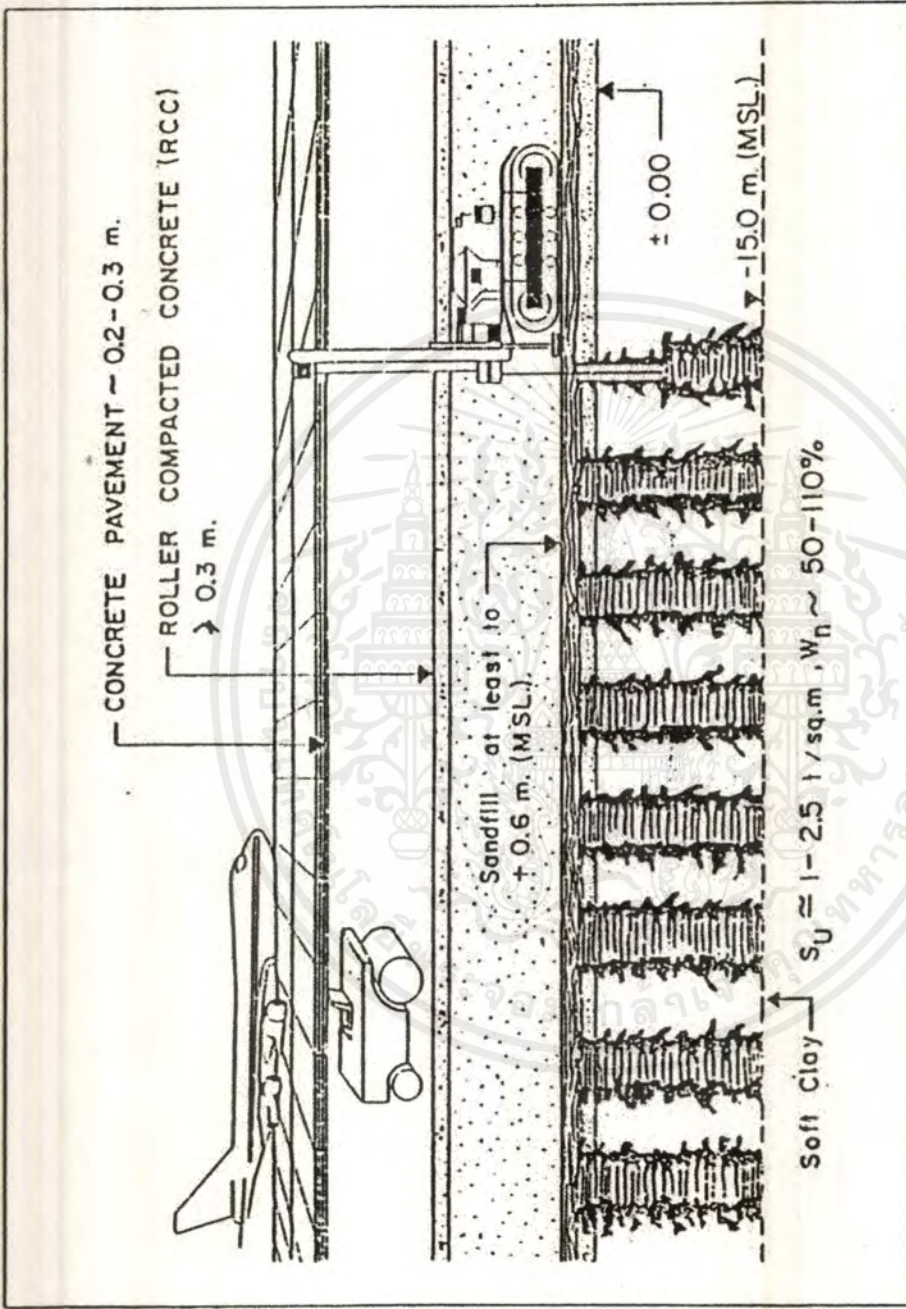
3. ปริมาณการทรุดตัวทั้ง Total Settlement และ Differential Settlement ของ

ลานบินในระยะยาวจะน้อยมากเพราะ Soil Cement Column ที่สร้างขึ้นจะถ่ายน้ำหนักลงไปถึงชั้นดินที่เริ่มแน่น

4. จากการคาดคะเนการทรุดตัวของลานบินซึ่งรองรับด้วยกลุ่ม Soil Cement

Column ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.60 เมตร ลึก 15.00 เมตร โดยคิดจากน้ำหนักบรรทุกกดทับเหนือกลุ่ม Soil Cement Column ด้วยน้ำหนักประมาณ 2.4 ตัน/ตารางเมตร จะช่วยลดการทรุดตัวของผิวลานบินในระยะยาวลงเหลือเพียงประมาณ 0.54 เมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการทรุดตัวของชั้นดินอ่อนที่ไม่มีการเสริม Soil Cement Column ที่ประมาณไว้ 4.33 เมตร ดังตารางที่ 7.7 และ 7.8





รูปที่ 7.21 แสดงแนวคิดในการนำเสาเข็มดินซีเมนต์ไปใช้ในฐานรากสนามบิน
(สมชัย กกกำแหง, 2541)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SETTLEMENT PREDICTION

By: SOMCHAI KOKKAMHAENG

Reported on: 03-Mar-94

Project: SOIL-CEMENT STABILIZED BLOCK BY JET GROUTING METHOD AT NONG NGU HAO AIR PORT

Surcharge: 24.0 kN/sq.m, Soil Type: 1 = Cohesionless Soil, Soil Type: 2 = Cohesive Soil Ground Water = 1.00 m.

(below Ground Surface)

Load is Transferred to Soil at: 0.00 m. below Ground Surface (uniformly distributed)

| Rel Al | SPT | Soil | SPT | Mv | Wn | Cc | Total | Eff. | Eff. | P1' | delta | P1'+ | log(P1'+ | Settlement (cm) | Ground | |
|-------------|------|------|------|----------|-----|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------------|------------|--------|
| Depth (Fid) | Type | (Cr) | | | | | Unit Wt | Unit Wt | Overbdn | | P | delta P | delta P] | in layers of | Settlement | |
| m | N/ft | | N/ft | sq.m/kN | % | 1+e0 | kN/cu.m | kN/cu.m | kN/sq.m | kN/sq.m | kN/sq.m | kN/sq.m | -log(P1] | Sand Clay | cm | |
| | | | | | | | | | | | | | Sum = | 0.99 | 432.95 | 433.93 |
| -0.10 | 1 | 2 | 1.0 | | 133 | | 12.8 | 12.8 | 1.28 | | | | | | | |
| -2.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 133 | 0.741 | 12.8 | 2.8 | 6.60 | 3.94 | 24.00 | 27.9 | 0.851 | 119.84 | 119.84 | |
| -3.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 133 | 0.741 | 12.8 | 2.8 | 10.80 | 6.70 | 24.00 | 32.70 | 0.575 | 63.95 | 163.79 | |
| -5.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 139 | 0.775 | 12.8 | 2.8 | 15.00 | 12.90 | 24.00 | 35.90 | 0.456 | 53.14 | 236.93 | |
| -6.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 109 | 0.602 | 13.3 | 3.3 | 19.95 | 17.48 | 24.00 | 41.48 | 0.375 | 33.91 | 270.84 | |
| -8.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 109 | 0.602 | 13.3 | 3.3 | 24.90 | 22.43 | 24.00 | 46.43 | 0.316 | 28.55 | 299.38 | |
| -9.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 100 | 0.550 | 13.3 | 3.3 | 29.85 | 27.38 | 24.00 | 51.38 | 0.273 | 22.56 | 321.94 | |
| -11.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 125 | 0.695 | 13.3 | 3.3 | 34.80 | 32.33 | 24.00 | 56.33 | 0.241 | 25.14 | 347.08 | |
| -12.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 94 | 0.515 | 12.9 | 2.9 | 39.15 | 36.98 | 24.00 | 60.98 | 0.217 | 16.79 | 363.87 | |
| -14.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 94 | 0.515 | 12.9 | 2.9 | 43.50 | 41.33 | 24.00 | 65.33 | 0.199 | 15.37 | 379.24 | |
| -15.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 81 | 0.440 | 12.9 | 2.9 | 47.85 | 45.68 | 24.00 | 69.68 | 0.183 | 12.10 | 391.34 | |
| -17.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 81 | 0.440 | 13.4 | 3.4 | 52.95 | 50.40 | 24.00 | 74.40 | 0.169 | 11.16 | 402.49 | |
| -18.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 91 | 0.498 | 13.4 | 3.4 | 58.05 | 55.50 | 24.00 | 79.50 | 0.156 | 11.65 | 414.15 | |
| -20.00 | 5 | 2 | 5.0 | | 48 | 0.248 | 16.8 | 6.8 | 68.25 | 63.15 | 24.00 | 87.15 | 0.140 | 5.21 | 419.36 | |
| -21.50 | 6 | 2 | 6.0 | | 46 | 0.248 | 16.8 | 6.8 | 78.45 | 73.35 | 24.00 | 97.35 | 0.123 | 4.58 | 423.94 | |
| -23.00 | 8 | 2 | 8.0 | | 43 | 0.219 | 16.8 | 6.8 | 88.65 | 83.55 | 24.00 | 107.55 | 0.110 | 3.61 | 427.55 | |
| -24.50 | 10 | 2 | 10.0 | | 30 | 0.144 | 18.9 | 8.9 | 102.00 | 95.33 | 24.00 | 119.33 | 0.098 | 2.11 | 429.66 | |
| -25.50 | 14 | 2 | 14.0 | | 24 | 0.109 | 17.5 | 7.5 | 108.50 | 105.75 | 24.00 | 129.75 | 0.089 | 0.97 | 430.63 | |
| -27.00 | 18 | 2 | 18.0 | | 24 | 0.109 | 17.5 | 7.5 | 120.75 | 115.13 | 24.00 | 139.13 | 0.082 | 1.35 | 431.97 | |
| -28.50 | 25 | 2 | 25.0 | | 20 | 0.086 | 17.7 | 7.7 | 132.30 | 128.53 | 24.00 | 150.53 | 0.075 | 0.97 | 432.95 | |
| -30.00 | 37 | 1 | 32.0 | 0.000053 | 20 | | 17.7 | 7.7 | 143.85 | 138.08 | 24.00 | 162.08 | 0.19 | | 433.14 | |
| -31.50 | 28 | 1 | 23.5 | 0.000069 | 20 | | 17.4 | 7.4 | 154.95 | 149.40 | 24.00 | 173.40 | 0.25 | | 433.38 | |
| -33.00 | 15 | 1 | 12.3 | 0.000115 | 20 | | 17.4 | 7.4 | 166.05 | 160.50 | 24.00 | 184.50 | 0.41 | | 433.60 | |
| -34.50 | 58 | 1 | 46.2 | 0.000038 | 20 | | 17.4 | 7.4 | 177.15 | 171.60 | 24.00 | 195.60 | 0.14 | | 433.93 | |

ตารางที่ 7.9 แสดงการคาดคะเนการทรุดตัวของลานบินที่ก่อสร้างบนชั้นดินอ่อนหนา 23 เมตร
(โครงการหนองเห่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SETTLEMENT PREDICTION

By: SOMCHAI KOKKAMHAENG

Reported on: 03-Mar-94

Project: SOIL-CEMENT STABILIZED BLOCK BY JET GROUTING METHOD AT NONG NGU HAO AIR PORT

Surcharge: 24.0 kN/sq.m. Soil Type: 1 = Cohesionless Soil, Soil Type: 2 = Cohesive Soil Ground Water = 1.00 m.
(below Ground Surface)

Load is Transferred to Soil at: 15.00 m. below Ground Surface (uniformly distributed)

| Ref. At | SPT | Soil | SPT | Mv | Wn | Cc | Total | Ek | Ek | P1' | delta | P1'+ | log(P1'+ | Settlement (cm) | Ground | |
|-------------|------|-------|------|----------|-----|-------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------------|------------|-------|
| Depth (Flo) | Type | (Crt) | | | | | Unit Wt. | Unit Wt. | Overbdn | P | delta P | delta P | delta P) | in layers of | Settlement | |
| m | N/tt | | N/tt | sq.m/kN | % | 1+e0 | kN/cu.m | kN/cu.m | kN/sq.m | kN/sq.m | kN/sq.m | kN/sq.m | -log(P1) | Sand Clay | cm | |
| | | | | | | | | | | | | | Sum = | 0.99 | 53.18 | 54.16 |
| -0.10 | 1 | 2 | 1.0 | | 133 | | 12.8 | 12.8 | 1.28 | | | | | | | |
| -2.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 133 | 0.741 | 12.8 | 2.8 | 6.60 | 3.94 | | | | | | |
| -3.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 133 | 0.741 | 12.8 | 2.8 | 10.80 | 8.70 | | | | | | |
| -5.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 139 | 0.776 | 12.8 | 2.8 | 15.00 | 12.90 | | | | | | |
| -6.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 109 | 0.602 | 13.3 | 3.3 | 19.95 | 17.48 | | | | | | |
| -8.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 109 | 0.602 | 13.3 | 3.3 | 24.90 | 22.43 | | | | | | |
| -9.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 100 | 0.550 | 13.3 | 3.3 | 29.85 | 27.38 | | | | | | |
| -11.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 125 | 0.695 | 13.3 | 3.3 | 34.80 | 32.33 | | | | | | |
| -12.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 94 | 0.515 | 12.9 | 2.9 | 39.15 | 36.98 | | | | | | |
| -14.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 94 | 0.515 | 12.9 | 2.9 | 43.50 | 41.33 | | | | | | |
| -15.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 81 | 0.440 | 12.9 | 2.9 | 47.85 | 45.68 | 24.00 | 69.68 | 0.183 | 12.10 | 12.10 | |
| -17.00 | 1 | 2 | 1.0 | | 81 | 0.440 | 13.4 | 3.4 | 52.95 | 50.40 | 24.00 | 74.40 | 0.169 | 11.16 | 23.25 | |
| -18.50 | 1 | 2 | 1.0 | | 91 | 0.498 | 13.4 | 3.4 | 58.05 | 55.50 | 24.00 | 79.50 | 0.156 | 11.65 | 34.91 | |
| -20.00 | 5 | 2 | 5.0 | | 48 | 0.248 | 16.8 | 6.8 | 68.25 | 63.15 | 24.00 | 87.15 | 0.140 | 5.21 | 40.12 | |
| -21.50 | 6 | 2 | 6.0 | | 43 | 0.219 | 16.8 | 6.8 | 78.45 | 73.35 | 24.00 | 97.35 | 0.123 | 4.05 | 44.17 | |
| -23.00 | 8 | 2 | 8.0 | | 43 | 0.219 | 16.8 | 6.8 | 88.65 | 83.55 | 24.00 | 107.55 | 0.110 | 3.61 | 47.78 | |
| -24.50 | 10 | 2 | 10.0 | | 30 | 0.144 | 18.9 | 8.9 | 102.00 | 95.33 | 24.00 | 119.33 | 0.098 | 2.11 | 49.89 | |
| -25.50 | 14 | 2 | 14.0 | | 24 | 0.109 | 17.5 | 7.5 | 109.50 | 105.75 | 24.00 | 129.75 | 0.089 | 0.97 | 50.86 | |
| -27.00 | 18 | 2 | 18.0 | | 24 | 0.109 | 17.5 | 7.5 | 120.75 | 115.13 | 24.00 | 139.13 | 0.082 | 1.35 | 52.20 | |
| -28.50 | 25 | 2 | 25.0 | | 20 | 0.086 | 17.7 | 7.7 | 132.30 | 126.53 | 24.00 | 150.53 | 0.075 | 0.97 | 53.18 | |
| -30.00 | 37 | 1 | 32.0 | 0.000053 | 20 | | 17.7 | 7.7 | 143.85 | 138.06 | 24.00 | 162.06 | | 0.19 | 53.36 | |
| -31.50 | 28 | 1 | 23.5 | 0.000069 | 20 | | 17.4 | 7.4 | 154.95 | 149.40 | 24.00 | 173.40 | | 0.25 | 53.61 | |
| -33.00 | 15 | 1 | 12.3 | 0.000115 | 20 | | 17.4 | 7.4 | 166.05 | 160.50 | 24.00 | 184.50 | | 0.41 | 54.02 | |
| -34.50 | 58 | 1 | 46.2 | 0.000038 | 20 | | 17.4 | 7.4 | 177.15 | 171.60 | 24.00 | 195.60 | | 0.14 | 54.16 | |

ตารางที่ 7.10 แสดงการคาดคะเนการทรุดตัวของลานบินซึ่งรองรับด้วยกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์ 15

เมตร (โครงการหนองงูเห่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.5 โครงการอื่นๆ ที่ใช้ Jet Grouting ในงานก่อสร้าง

ตารางที่ 7.11 ข้อมูลทั่วไปของโครงการต่างๆ

| โครงการ | diameter (m.) | depth (m.) | method | required q_u (ksc) | application |
|--|---------------|------------|--------|----------------------|--|
| (1.) section 3c/1, OBRR('41) | 0.6 | 9.5 | 3 | 6 | foundation for roadway |
| (2.1) ฝ่ายบ้านมะขามสูง | 0.6 | 11.0 | 1 | 10 (7 days) | slope protection |
| (2.2) " | 1.0 | 11.0 | 2 | 10 (7 days) | curtain wall |
| (3.) อุโมงค์บำบัดน้ำเสีย shaft 3.28 (ดินแดง) ('39) | 0.6 | 15.0 | 1 | 6 | water proofing ,basal heaving protection |
| (4.) อุโมงค์บำบัดน้ำเสีย shaft 1.61 ,2.11 ('39) | 1.1 | 1.5 | 2 | 6 | water proofing |
| (5.) อุโมงค์ระบายน้ำเสียไทยออยล์ ('39) | 0.6 | 5.0 | 1 | - | crow strengthening |
| (6.1) โรงปูนซีเมนต์ไทย อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช ('39) | 0.7 | 12.5 | 1 | 10 | foundation for struction |
| (6.2) " | 1.2 | 12.5 | 2 | 10 | foundation for struction |
| (7.) ขอมแซม spun pile ที่ BIG-C SUPER CENTER จ. เพชรบุรี ('40) | 0.8 | 2.5 | 1 | - | deep foundation |
| (8.) ขอมแซมเข็มเจาะโรงพยาบาลศูนย์นครปฐม ('38) | 0.6 | 20.0 | 1 | - | deep foundation |
| (9.) กำแพงกันดินตีกลมพันธ์ 3 ('37) | 0.6 | 14.0 | 1 | 6 | temporary retaining wall |

ตารางที่ 7.11 ข้อมูลทั่วไปของโครงการต่างๆ (ต่อ)

| โครงการ | diameter (m.) | depth (m.) | method | required q_u (ksc) | application |
|---|---------------|------------|--------|----------------------|---------------------------------------|
| (10.) TPI EB/SM ('41) | 0.6 | 10.0 | 1 | - | curtain wall |
| (11.) Lee Garden Plaza อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ('39) | 0.6 | 12.5 | 1 | - | ประกออบกับ sheet pile เบ้ากำแพงกันดิน |
| (12.) อุโมงค์รถไฟใต้ดิน ('41) | 0.6 | 15.0 | 1 | 6 | crowen strengthening |
| (13.) อาคารวิทยาศาสตร์ มศว. | 1.6 | 10,12,15 | 2 | 6 | temporary retaining wall |
| (14.) โครงการกรมชลฯ พระองค์ไชยานุชิต จ.ฉะเชิงเทรา | 0.6 | 18.0 | 1 | 6 | embankment pile |
| (15.) โครงการโรงกรองน้ำมหาสวัสดิ์ บางกรวย | 1.6 | 16.0 | 2 | 6 | temporary retaining wall |
| (16.) โครงการที่พักอาศัย 8 ชั้น ช.ร่วมฤดี | 1.6 | 10.0 | 2 | 6 | temporary retaining wall |
| (17.) โครงการพัฒนาชุมชนน้ำปากพอง | | | | | |
| (17.1) งาน JGP คลองลัด | 1.6 | 8,12,15 | 2 | 6 | slope protection |
| (17.2) งาน JGP ถนน | 1.6 | 5.0 | 2 | 6 | embankment pile |
| (17.3) งาน JGP ประตูหรือสัจญจ | 3.0 | 5.0 | 2 | 6 | embankment pile |
| (17.4) งาน JGP ทำนบกั้นลำน้ำเดิม | 1.6 | | 2 | 6 | slope protection |
| | 1.6 | 18.0 | 2 | 6 | embankment pile |

หมายเหตุ: method 1 : single fluid system method 2 : double fluid system method 3 : single fluid system + blade เพื่อควบคุม diameter

ตารางที่ 7.12 Jet grouting operative parameters

| โครงการ อ้างอิงตามตารางที่ 7.11 | diameter (m.) | type of cement | w/c | Injection pressure | | | Mixing time (min/m.) | quantity of flow (litre/min) | rotation speed r.p.m. | cement content (kg/m. ³) |
|------------------------------------|------------------|-------------------|-------|--------------------|-----------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| | | | | Water jet | Grout jet | Compressed air | | | | |
| (1.) | 0.6 | 1 | 1.3:1 | 100-150 | 200 | - | 1.3 | 72 | 14 | 200 |
| (2.1) | 0.6 | 1 | 1:1 | 100-150 | 350 | - | 1.6 | 72 | 14 | 300 |
| (2.2) | 1.0 | 1 | 1:1 | 100-150 | 200 | 7.5 | 4.3 | 72 | 12 | 300 |
| (3.) | 0.6 | 1 | 1:1 | 100-150 | 300 | - | 1.9 | 78 | 12 | 400 |
| (4.) | 1.1 | 1 | 1:1 | 100-150 | 200 | 7.5 | 6.4 | 78 | 10 | 400 |
| (5.) | 0.6 | 1 | 1:1 | 100-150 | 350 | - | 2.0 | 84 | 10 | 450 |
| (6.1) | 0.7 | 1 | 1:1 | 100-150 | 400 | - | 2.4 | 84 | 12 | 400 |
| (6.2) | 1.2 | 1 | 1:1 | 100-150 | 200 | - | 7.1 | 84 | 12 | 400 |
| (7.) | 0.8 | 1 | 1:1 | 100-150 | 400 | - | 4.3 | 78 | 10 | 500 |
| (8.) | 0.6 | 1 | 1:1 | 100-150 | 300 | - | 2.1 | 72 | 12 | 400 |
| (9.) | 0.6 | 1 | 1:1 | 100-150 | 300 | - | 1.6 | 72 | 12 | 300 |
| (10.) | 0.6 | 1 | 1:1 | 100-150 | 350 | - | 1.6 | 72 | 12 | 300 |

ตารางที่ 7.12 Jet grouting operative parameters (ต่อ)

| โครงการ อ้างอิงตามตารางที่ 7.11 | diameter (m.) | type of cement | w/c | Injection pressure | | | Mixing time (min/m.) | quantity of flow (litre/min) | rotation speed r.p.m. | cement content (kg/m. ³) |
|------------------------------------|------------------|-------------------|--------|--------------------|-----------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| | | | | Water jet | Grout jet | Compressed air | | | | |
| (11.) | 0.6 | 1 | 1:1 | 100-150 | 300 | - | 1.3 | 72 | 12 | 250 |
| (12.) | 0.6 | 1 | 1:1 | 100-150 | 300 | - | 1.9 | 78 | 12 | 400 |
| (13.) | 1.6 | 1 | 1.35:1 | 100-150 | 200 | 7 | 14.0 | 60 | 6 | 250 |
| (14.) | 0.6 | 1 | 1:1 | 100 | 150 | - | 1.4 | 60 | 15 | 225 |
| (15.) | 1.6 | 1 | 1.35:1 | 100-150 | 200 | 7 | 16.8 | 60 | 6 | 300 |
| (16.) | 1.6 | 1 | 1.35:1 | 100-150 | 200 | 7 | 16.8 | 60 | 6 | 300 |
| (17.) | | | | | | | | | | |
| (17.1) | 1.6 | 1 | 1.35:1 | 100-150 | 200 | 7 | 14.0 | 60 | 6 | 250 |
| (17.2) | 1.6 | 1 | 1.35:1 | 100-150 | 200 | 7 | 14.0 | 60 | 6 | 250 |
| (17.3) | 3.0 | 1 | 1.35:1 | 100-150 | 200 | 7 | 49.2 | 60 | 6 | 250 |
| (17.4) | 1.6 | 1 | 1.35:1 | 100-150 | 200 | 7 | 14.0 | 60 | 6 | 250 |

ตารางที่ 7.13 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

| โครงการ อ้างอิงตามตารางที่ 7.11 | soil type | หลังการปรับปรุงคุณภาพ | |
|------------------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|
| | | Age (days) | q_u (ksc) |
| (1.) | Soft clay | 28 | 10 |
| (2.1) | medium clay | 7 | 20 |
| (2.2) | medium clay | 7 | 20 |
| (3.) | Soft clay | 28 | 15 |
| (4.) | Soft clay | 28 | 15 |
| (5.) | clayey sand | - | - |
| (6.1) | medium clay | 28 | 40 |
| (6.2) | medium clay | - | - |
| (7.) | Soft clay | - | - |
| (8.) | Soft clay | - | - |
| (9.) | Soft clay | 28 | 10 |
| (10.) | very loose sand | - | - |
| (11.) | Soft clay | - | - |

ตารางที่ 7.13 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ (ต่อ)

| โครงการ อ้างอิงตามตารางที่ 7.11 | soil type | หลังการปรับปรุงคุณภาพ | |
|------------------------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| | | Age (days) | q_u (ksc) |
| (12.) | Soft clay | 28 | 18 |
| (13.) | Soft clay | 28 | 8 |
| (14.) | Soft clay | 28 | 8 |
| (15.) | Soft clay | 28 | 8 |
| (16.) | Soft clay | 28 | 8 |
| (17.) | | | |
| (17.1) | Soft clay | 28 | 8.8 |
| (17.2) | Soft clay | 28 | 8.3 |
| | Soft clay | 28 | 8.3 |
| (17.3) | Soft clay | 28 | 9 |
| (17.4) | Soft clay | 28 | 8.6 |

บทที่ 8

บทวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ

8.1 การวิเคราะห์ผลจากการปรับปรุงคุณภาพดินโครงการรถไฟฟ้ามหานคร

8.1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ

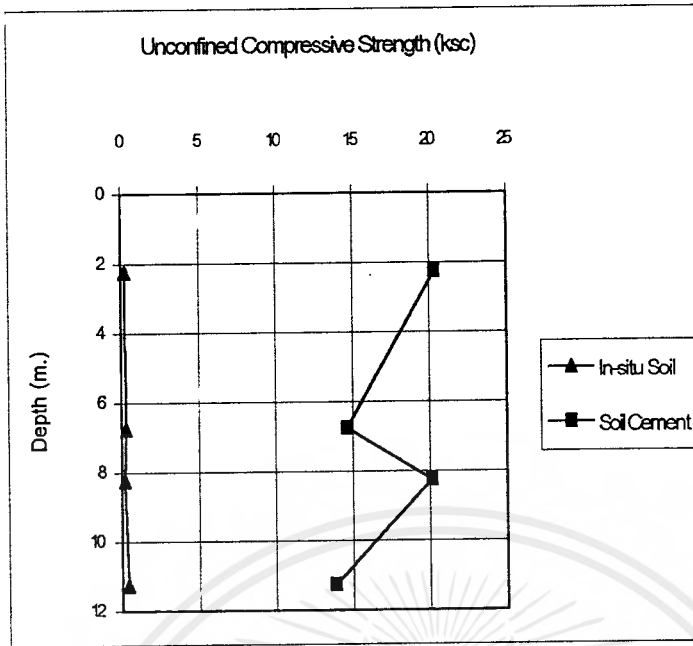
จากข้อมูลการเจาะสำรวจดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพและการนำดินหลังการปรับปรุงคุณภาพไปทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ผลการทดสอบค่า Unconfined Compressive Strength ของดินเดิมและดินหลังการปรับปรุงคุณภาพ (Soil Cement)

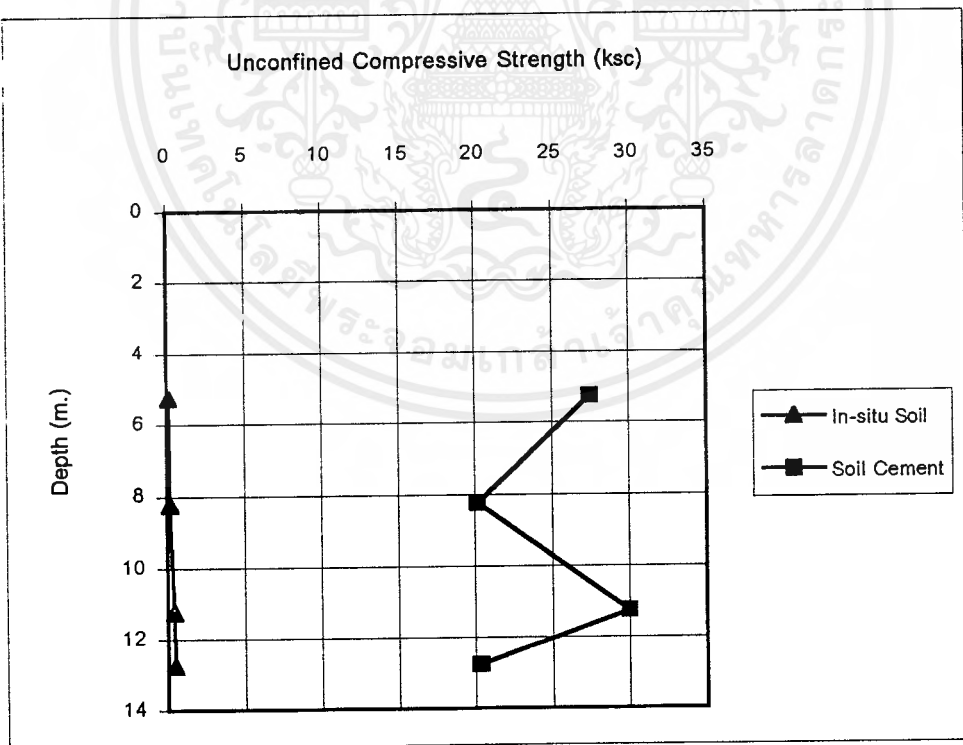
| Sample No. (Column) | Depth (m.) | Average Depth (m.) | Before improvement Q_u (ksc) | After improvement | |
|------------------------|-------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------|
| | | | | Age (days) | Q_u (ksc) |
| 7C | 1.50-3.00 | 2.25 | 0.24 | 18 | 20.30 |
| | 6.00-7.50 | 6.75 | 0.30 | 18 | 14.61 |
| | 7.50-9.00 | 8.25 | 0.21 | 18 | 20.09 |
| | 10.50-12.00 | 11.25 | 0.41 | 18 | 13.89 |
| 3H | 1.50-3.00 | 2.25 | 0.24 | 31 | 24.04 |
| | 4.50-6.00 | 5.25 | 0.15 | 31 | 30.41 |
| | 7.50-9.00 | 8.25 | 0.21 | 31 | 37.94 |
| | 10.50-12.00 | 11.25 | 0.41 | 31 | 33.76 |
| 6H | 4.50-6.00 | 5.25 | 0.15 | 20 | 27.45 |
| | 7.50-9.00 | 8.25 | 0.21 | 20 | 20.11 |
| | 10.50-12.00 | 11.25 | 0.41 | 20 | 29.99 |
| | 12.00-13.50 | 12.75 | 0.46 | 20 | 20.26 |
| 9H | 3.00-4.50 | 3.75 | 0.12 | 38 | 33.88 |
| | 4.50-6.00 | 5.25 | 0.15 | 38 | 23.77 |
| | 6.00-7.50 | 6.75 | 0.30 | 38 | 38.99 |
| | 7.50-9.00 | 8.25 | 0.21 | 38 | 16.93 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

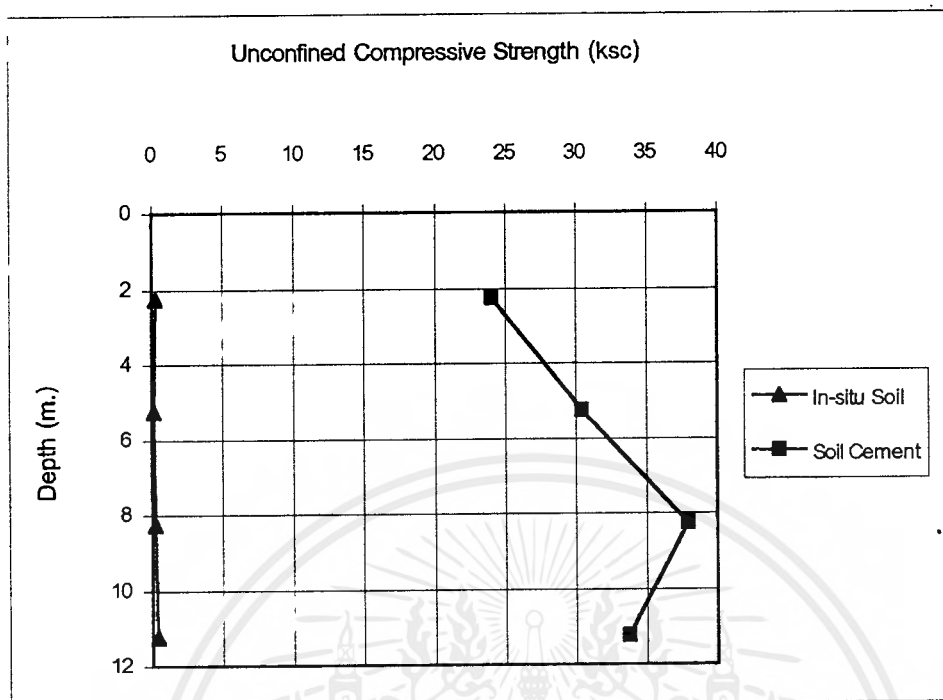


รูปที่ 8.1 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ Column 7C (Age 18 days)

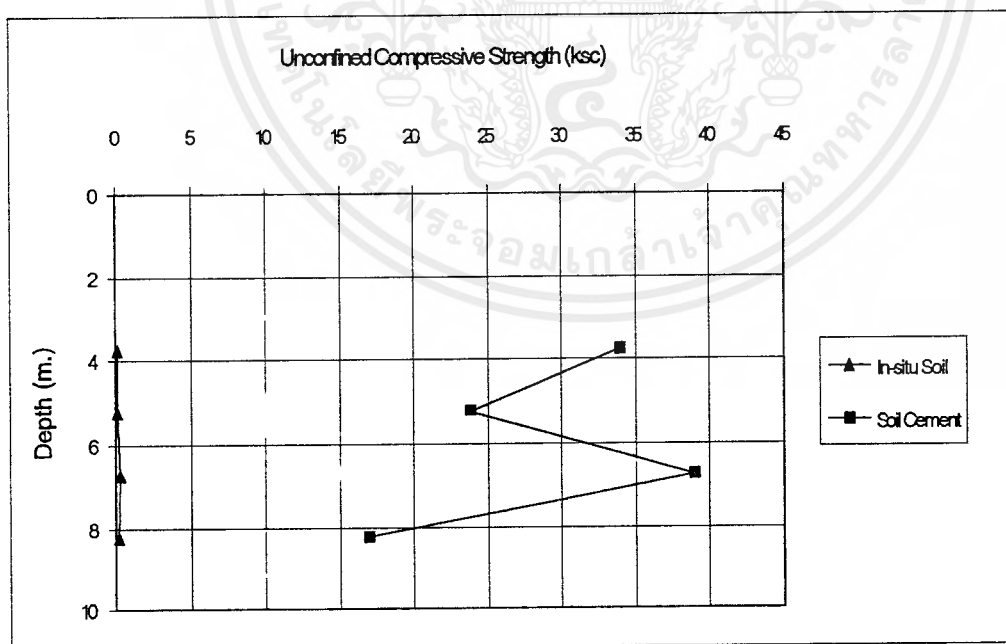


รูปที่ 8.2 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ Column 6H (Age 20 days)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.3 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ Column 3H (Age 31 days)

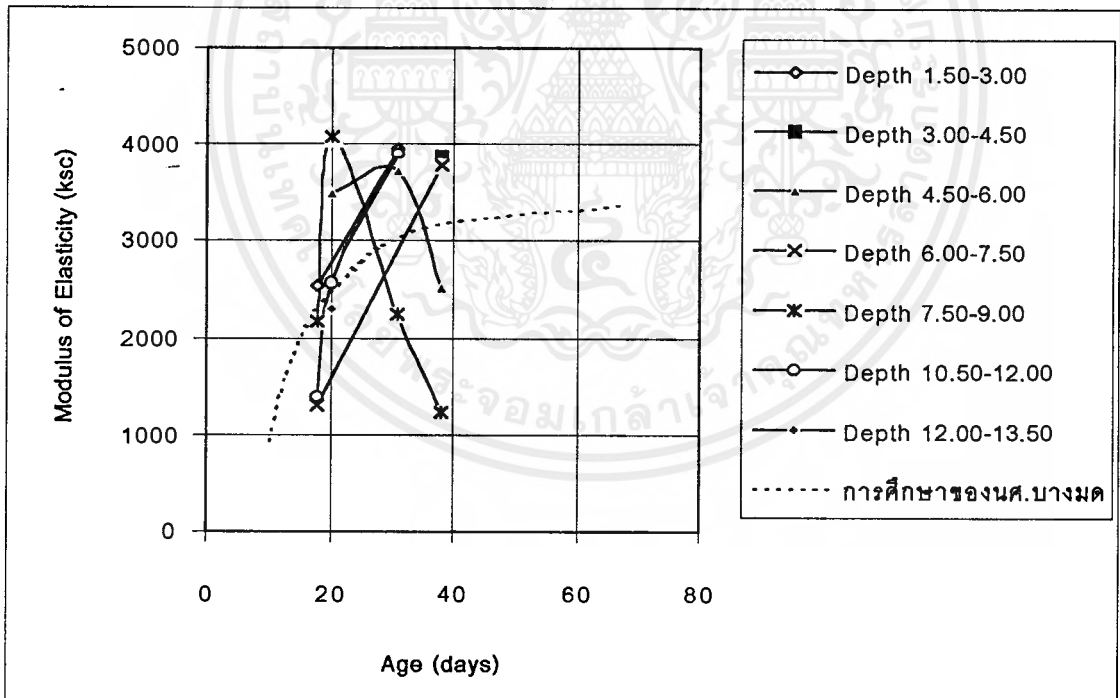


รูปที่ 8.4 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ Column 9H (Age 38 days)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

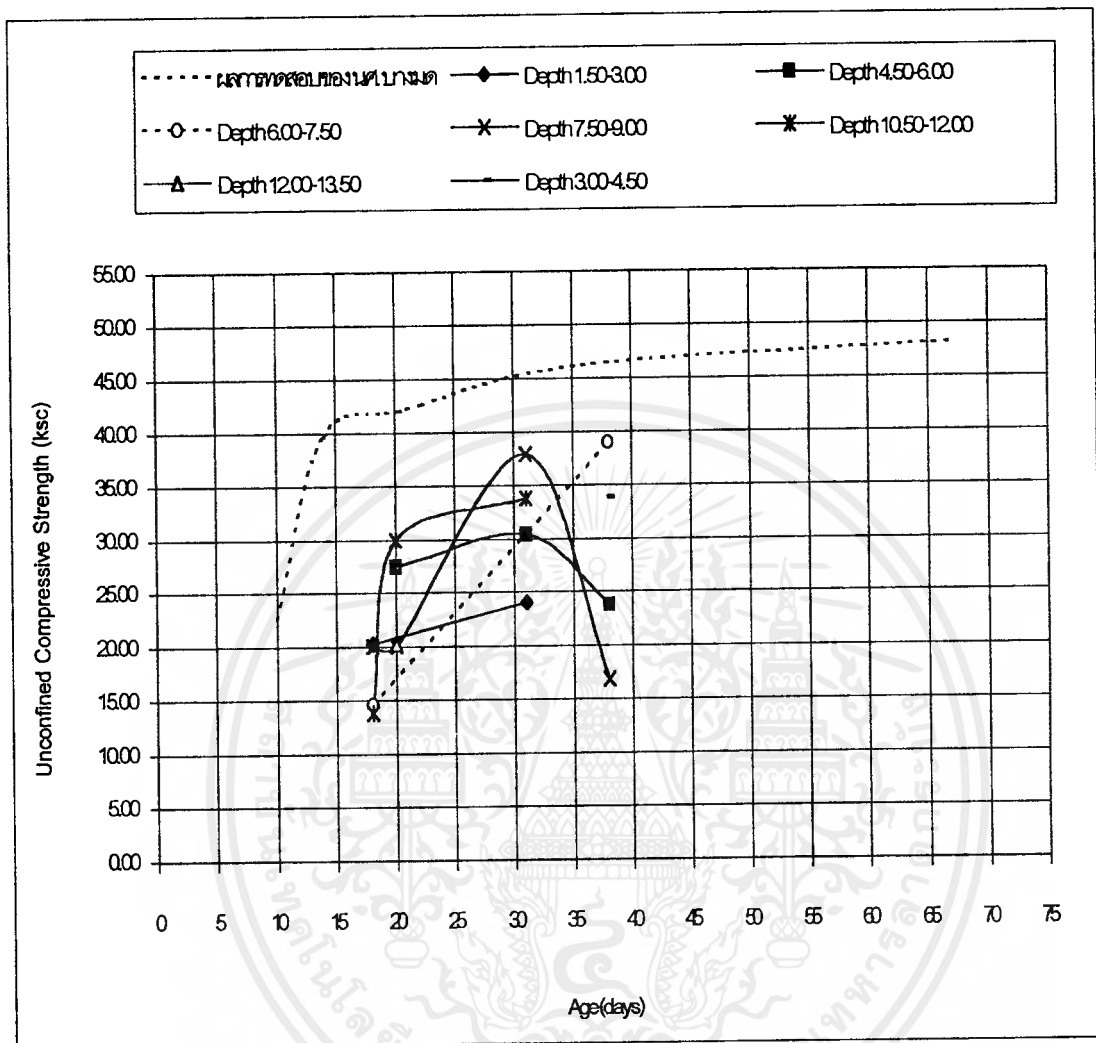
ตารางที่ 8.2 แสดงค่า Modulus of Elastic ที่ระดับความลึกต่างๆ

| Column No. | Modulus of Elastic (ksc) | | | |
|--------------------------|--------------------------|------|------|------|
| | 7C | 6H | 3H | 9H |
| Age (days) Depth (m.) | 18 | 20 | 31 | 38 |
| 1.50-3.00 | 2540 | - | 3950 | - |
| 3.00-4.50 | - | - | - | 3870 |
| 4.50-6.00 | - | 3490 | 3740 | 2510 |
| 6.00-7.50 | 1300 | - | - | 3790 |
| 7.50-9.00 | 2180 | 4080 | 2240 | 1240 |
| 10.50-12.00 | 1390 | 2570 | 3890 | - |
| 12.00-13.50 | - | 2300 | - | - |



รูปที่ 8.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of Elasticity (ksc) กับ อายุบ่ม สำหรับปริมาณ ซีเมนต์ 300 kg/m^3 ของโครงการรถไฟฟ้ามหานครกับผลการศึกษาของ รชฎ เสนีย์ศรี สันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.T ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ อายุบ่ม สำหรับ ปริมาณซีเมนต์ 300 kg/m³ ของโครงการรถไฟฟ้ามหานครกับผลการศึกษาของ รชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทัตทิน และวรวพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.T ปีการศึกษา 2540

8.1.2 วิเคราะห์กราฟ

1.) การเปรียบเทียบค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

1.1) Column 7C (อายุ 18 วัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 8.1 ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงสุด 20.30 ksc และค่าต่ำสุด 13.89 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 34-100 เท่า และเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าค่า Unconfined Compressive Strength มีค่าแปรปรวนมาก

1.2) Column 6H (อายุ 20 วัน)

จากรูปที่ 8.2 ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงสุด 29.99 ksc และค่าต่ำสุด 20.11 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 44-183 เท่า และเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าค่า Unconfined Compressive Strength มีค่าแปรปรวนมาก

1.3) Column 3H (อายุ 31 วัน)

จากรูปที่ 8.3 ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงสุด 37.94 ksc และค่าต่ำสุด 24.04 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 83-203 เท่า และเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าค่า Unconfined Compressive Strength มีค่าแปรปรวนมาก

1.4) Column 9H (อายุ 38 วัน)

จากรูปที่ 8.4 ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงสุด 38.99 ksc และค่าต่ำสุด 16.93 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 80-282 เท่า และเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าค่า Unconfined Compressive Strength มีค่าแปรปรวนมาก

จากผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพในโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานครส่วนที่อุโมงค์ลอดผ่านที่ประชาชนขนาดใหญ่ มีค่า Unconfined Compressive Strength เพิ่มขึ้นประมาณ 80-280 เท่า และค่า Unconfined Compressive Strength มีการแปรปรวนมากอาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก ลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดินมีความแตกต่างกัน เมื่อใช้แรงดัน , ระยะเวลาการชึ้นน้ำปูน และพารามิเตอร์อื่นๆ ค่าเดียว จึงอาจทำให้ซีเมนต์ที่เข้าไปผสมกับดินที่แต่ละความลึกไม่สม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดความลึกของเสาเข็มซีเมนต์ เช่น บริเวณหรือความลึกที่เป็นดินแข็งอาจมีซีเมนต์กระจายตัวเข้าไปผสมได้ไม่ทั่วถึงหรือเป็นเนื้อเดียวกันเท่ากับบริเวณหรือความลึกที่เป็นดินอ่อน เป็นต้น

2.) การเปรียบเทียบค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) กับผลการศึกษาของ รชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.T ปีการศึกษา 2540

จากรูปที่ 8.5 ค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) ของโครงการรถไฟฟ้าฟ้ามหานครส่วนที่อุโมงค์ลอดผ่านที่ประชาชนขนาดใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบกับผล

การศึกษาของ รัชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.Tปีการศึกษา 2540 พบว่ามีค่าทั้งต่ำกว่าและสูงกว่า

3.) การเปรียบเทียบค่า Unconfined Compressive Strength กับผลการศึกษาของ รัชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.Tปีการศึกษา 2540

จากรูปที่ 8.6 ค่า Unconfined Compressive Strength ของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร ส่วนที่อุโมงค์ลอดผ่านท่อประปาขนาดใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินซีเมนต์มีอายุเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ รัชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.Tปีการศึกษา 2540 พบว่ากราฟมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเหมือนกันและ ผลการทดสอบของโครงการรถไฟฟ้ามหานครมีค่าต่ำกว่าประมาณ 1.5-2.4 เท่า

8.1.3 ผลการทดสอบกำลังของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ (จากผลการศึกษาของ รัชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.Tปีการศึกษา 2540) ให้ค่าสูงกว่าการทำงานจริงในสนาม (Jet Grouting) อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก

1.) ความแตกต่างด้านความเป็นเนื้อเดียวกันของดินซีเมนต์

การผสมดินกับซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ สามารถควบคุมคุณภาพการผสมได้โดยใช้เครื่อง กวนผสมดินกับซีเมนต์ จึงทำให้ดินซีเมนต์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าการทำงานจริงในสนาม ซึ่ง เป็นการฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูงเข้าไปผสมกับดินเดิม ดังนั้นการผสมโดยวิธี Jet Grouting จะทำให้ ดินซีเมนต์มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ไม่เหมาะสม เช่น แรงดันการฉีดน้อยเกินไป ทำให้ไม่สามารถ ทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของมวลดินได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้การแทรกซึม ของน้ำปูนเข้าไปผสมไม่ทั่วถึงเช่นกัน , ระยะยกก้านเจาะสูงเกินไป จึงทำให้น้ำปูนเข้าไปผสมไม่ทั่วถึงและสม่ำเสมอ , จำนวนรอบในการหมุนก้านเจาะต่อการยก 1 ครั้ง น้อยเกินไปจึงทำให้การผสมดินกับน้ำปูนไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ
- การควบคุมพารามิเตอร์ไม่ดี เช่น แรงดันการฉีดอาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการ ลีกรอกของรู nozzle

2.) ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ในตอนท้ายสุด ของดินซีเมนต์ที่ทำในห้องปฏิบัติการและการทำ Jet Grouting มีค่าต่างกัน อาจได้ผลลัพธ์มาจาก

ปริมาณน้ำในดินเดิม เนื่องจากดินซีเมนต์ที่มีปริมาณน้ำในดินเดิมสูงจะทำให้อัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งจะมีผลทำให้กำลังของดินซีเมนต์มีค่าลดลง

3.) ปริมาณซีเมนต์

จากผลการศึกษาของรชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.Tปีการศึกษา 2540 พบว่าปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับดินมีอิทธิพลต่อ กำลังของดินซีเมนต์เนื่องจาก การทำ Jet Grouting อาจได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มดิน ซีเมนต์ใหญ่กว่าที่ต้องการ จึงทำให้ปริมาณซีเมนต์ ต่อ ดินซีเมนต์ 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าน้อยลง จึง ทำให้กำลังของดินซีเมนต์ มีค่าลดลงด้วย

4.) คุณสมบัติทางเคมีของดินและน้ำใต้ดิน

ดินที่ใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ และดินที่ทำ Jet Grouting อาจมีคุณสมบัติทางเคมีแตกต่างกันซึ่งมีผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ เช่น ดินบริเวณเดียวกันที่มีค่า PH ต่างกัน เมื่อผสมกับซีเมนต์จะให้กำลังที่ต่างกันด้วย (จากผลการศึกษาของ รชฎ เสนีย์ศรีสันต์ , วรพงษ์ ไชยสุขทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.Tปีการศึกษา 2540)

การนำข้อมูลจากการศึกษาทางวิชาการที่ได้จากห้องปฏิบัติการหรือจากโครงการเดิมที่มีการทำ Jet Grouting ในดินที่มีลักษณะใกล้เคียงกันมาใช้นั้น จะต้องพิจารณาถึงผลความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากปัจจัยต่างๆตามที่ได้เสนอไว้ด้านบน ดังนั้นการนำข้อมูลมาใช้จะต้องมีการเผื่อหรือปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังหรือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มดิน ซีเมนต์เพื่อความมั่นใจและความปลอดภัยในงานก่อสร้างและจะต้องใช้ข้อมูลจากหลายโครงการ แต่หากต้องการค่าพารามิเตอร์ที่ค่อนข้างแน่นอนจะต้องทำ Trial Test ซึ่งจะเสียเวลามาก

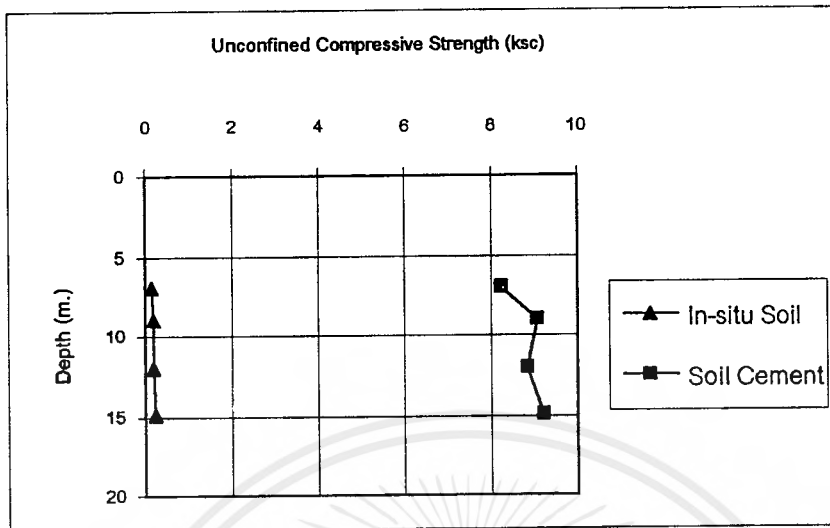
8.2 การวิเคราะห์ผลการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting โครงการประตูระบายน้ำปากพนัง

8.2.1 กราฟความสัมพันธ์ต่างๆ

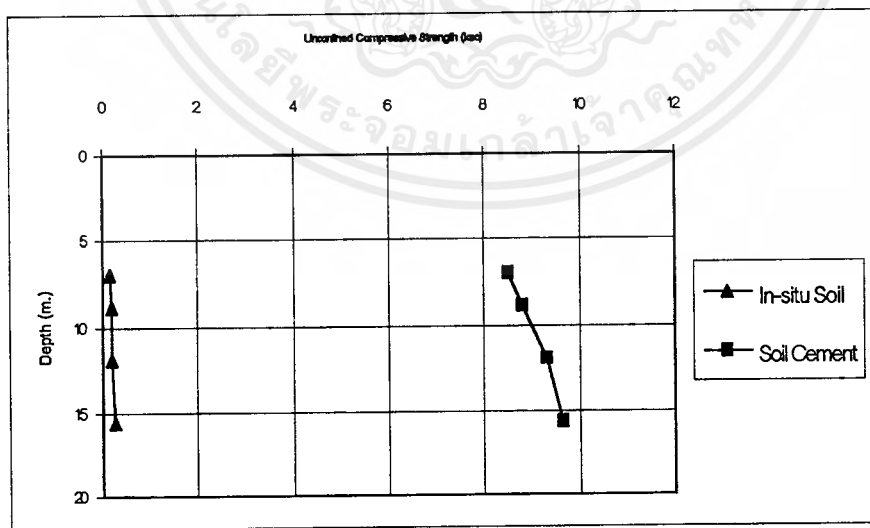
จากข้อมูลการเจาะสำรวจดินก่อนการปรับปรุงคุณภาพและการนำดินหลังการปรับปรุงคุณภาพไปทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 ผลการทดสอบค่า Unconfined Compressive Strength ของดินเดิมและดินหลังการปรับปรุงคุณภาพ (Soil Cement) ที่ระดับความลึกต่างๆ

| Sample No. | Depth (m.) | Average Depth (m.) | before improvement Q_u (ksc) | after improvement | |
|------------|-------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------|
| | | | | Age (days) | Q_u (ksc) |
| A1 | 5.60-8.35 | 6.98 | 0.14 | 28 | 8.24 |
| A2 | 8.60-9.35 | 8.98 | 0.17 | 28 | 9.07 |
| A3 | 11.60-12.35 | 11.98 | 0.20 | 28 | 8.85 |
| A4 | 14.60-15.35 | 14.98 | 0.24 | 28 | 9.22 |
| B1 | 5.55-8.30 | 6.93 | 0.14 | 28 | 8.51 |
| B2 | 8.55-9.30 | 8.93 | 0.17 | 28 | 8.79 |
| B3 | 11.50-12.30 | 11.90 | 0.20 | 28 | 9.32 |
| B4 | 15.30-16.05 | 15.68 | 0.24 | 28 | 9.64 |
| C1 | 5.65-6.40 | 6.03 | 0.13 | 28 | 8.04 |
| C2 | 8.65-9.40 | 9.03 | 0.17 | 28 | 8.43 |
| C3 | 11.65-12.40 | 12.03 | 0.20 | 28 | 7.37 |
| C4 | 14.65-15.40 | 15.03 | 0.24 | 28 | 9.45 |

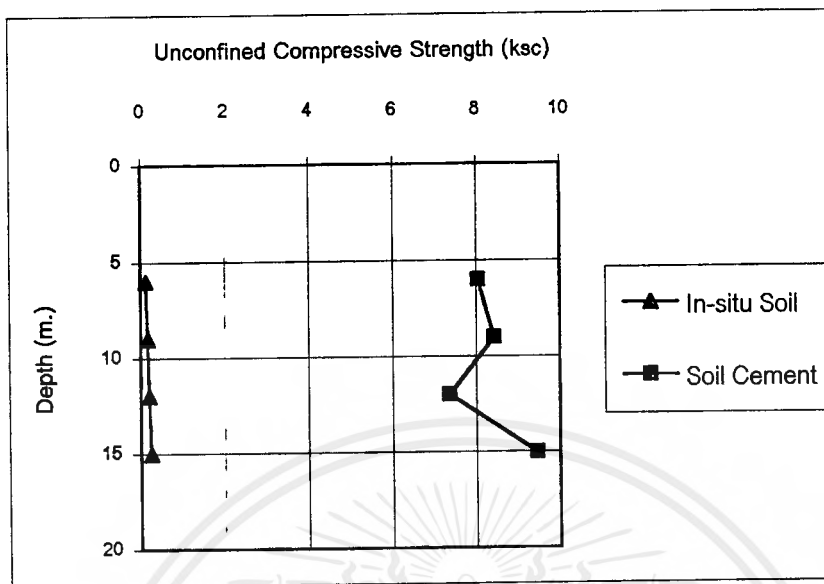


รูปที่ 8.7 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ sample A (Age 28 days)

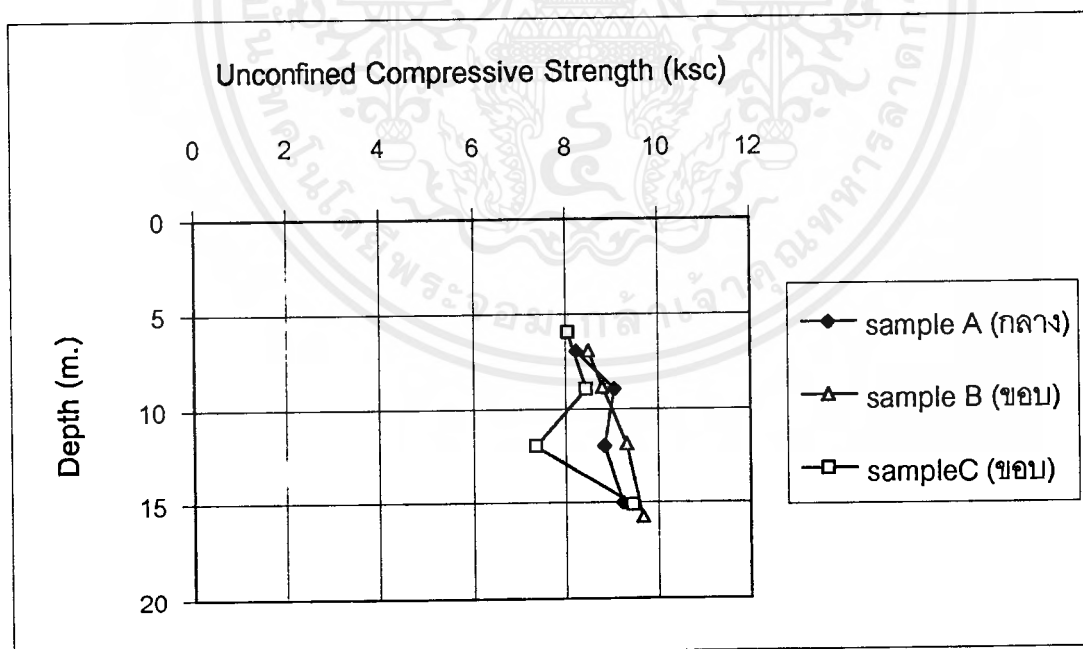


รูปที่ 8.8 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ sample B (Age 28 days)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.9 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของ sample C (Age 28 days)



รูปที่ 8.10 กราฟแสดงค่า Unconfined Compressive Strength ที่ตำแหน่งกลางกับขอบของเสาเข็มดินซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2.2 วิเคราะห์กราฟ

1. การเปรียบเทียบค่า Unconfined Compressive Strength ของดินก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ

1.1 ที่ตำแหน่ง A (อายุ 28 วัน)

จากรูปที่ 8.7 ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงสุด 9.22 ksc และค่าต่ำสุด 8.24 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 39-57 เท่า และเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าค่า Unconfined Compressive Strength มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่

1.2 ที่ตำแหน่ง B (อายุ 28 วัน)

จากรูปที่ 8.8 ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงสุด 9.64 ksc และค่าต่ำสุด 8.51 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 40-59 เท่า และเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าค่า Unconfined Compressive Strength มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่

1.3 ที่ตำแหน่ง C (อายุ 28 วัน)

จากรูปที่ 8.9 ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพมีค่าสูงสุด 9.45 ksc และค่าต่ำสุด 7.37 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 40-61 เท่า และเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าค่า Unconfined Compressive Strength มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่

จากผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพในโครงการประจวบฯ น้ำปากพรางที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ระบุไว้ นั้น มีผลทำให้ค่า Unconfined Compressive Strength เพิ่มขึ้นประมาณ 40-60 เท่า และค่า Unconfined Compressive Strength มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่

2. การเปรียบเทียบค่า Unconfined Compressive Strength ที่ตำแหน่งกลางกับขอบของเสาเข็มดินซีเมนต์

จากรูปที่ 8.10 ค่า Unconfined Compressive Strength ที่ตำแหน่งกลางกับขอบของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละความลึก ซึ่งอาจจะสรุปได้ว่า ซีเมนต์มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงตลอดแนวรัศมีของเสาเข็มดินซีเมนต์ทำให้ดินซีเมนต์มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันตลอดความลึกและแนวรัศมีเสาเข็มดินซีเมนต์ อีกทั้งยังสามารถสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่า Unconfined Compressive Strength และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตามที่ต้องการ เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับดินบริเวณนี้

8.3 องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อขนาด Jet Grouting Pile

การที่จะสามารถทำให้ Jet Grouting Pile มีขนาดตามที่ออกแบบไว้ นั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกัน ถ้าเราสามารถรู้ถึงองค์ประกอบเหล่านั้นว่ามีผลกับขนาดของ Jet Grouting Pile ได้อย่างไรแล้ว จะมีประโยชน์มากในการทำ Jet Grouting Pile จากข้อมูลต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่มีผลกับ Jet Grouting Pile ได้นั้นประกอบด้วย

8.3.1 คุณสมบัติของน้ำปูนซีเมนต์

8.3.1.1 ความหนาแน่น (Specific density) ถ้าน้ำปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นมากจะทำให้ต้องใช้หัวฉีด (Nozzles) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือไม่เช่นนั้นก็ต้องใช้ความดันมากขึ้น จึงจะทำให้ได้พลังงาน ในการฉีดเท่าเดิม เพราะฉะนั้น ถ้าน้ำปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นมากจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Jet Grouting Pile เล็กลง (องค์ประกอบอื่นคงที่)

8.3.1.2 ความหนืด (Viscosity) มีผลต่อขนาดของ Jet Grouting Pile เช่นเดียวกับความหนาแน่น คือถ้าน้ำปูนซีเมนต์มีความหนืดสูงขึ้นจะทำให้พลังงานในการฉีดมีค่าน้อยลงขนาดของ Jet Grouting Pile ก็จะมีขนาดเล็กด้วย

8.3.2 ชนิดของดิน (Soil Type)

8.3.2.1 Cohesive soil ในดินประเภท Cohesive soil ซึ่งเป็นดินประเภทมีแรงยึดเหนี่ยวสูงเพราะฉะนั้นต้องใช้พลังงานในการฉีดมาก เมื่อเทียบกับดินชนิดไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินหรือมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันน้อย เพราะในการทำ Jet Grouting นั้นเป็นการฉีดน้ำปูนเพื่อไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดินเดิม

8.3.2.2 Cohesiveless soil ในดินประเภทนี้ในการทำ Jet Grouting นั้นจะใช้พลังงานในการฉีดน้อยกว่าดินประเภท Cohesive soil แต่สิ่งหนึ่งที่ควรระวังคือกำลังของดิน เพราะน้ำปูนซีเมนต์จะไปได้ไกลมากอาจทำให้น้ำปูนเจือจางได้

8.3.3 ความลึก (Depth) ในการฉีดน้ำปูนในระดับลึกๆ ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเนื่องจากแรงดันของดิน ในระดับที่ลึกกว่าจะมีแรงดันมากกว่าในระดับที่ตื้นกว่า

8.3.4 อัตราการหมุนก้านเจาะ (Rotation velocity) ในการหมุนก้านเจาะนั้น จำเป็นต้องหมุนก้านเจาะให้ครบรอบก่อนถึงจะยกก้านเจาะขึ้นได้ (Stroke) อัตราการหมุนก้านเจาะนั้นถ้าหมุนเร็วจะทำให้ขนาดของ Jet Grouting Pile เล็กกว่าอัตราการหมุนที่ช้ากว่า (องค์ประกอบอื่นคงที่)

8.3.5 พลังงานในการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ ขึ้นกับองค์ประกอบต่อไปนี้

1. ปี่ม โดยสมการของพลังงานคือ

$$W = PQ$$

P = Pressure

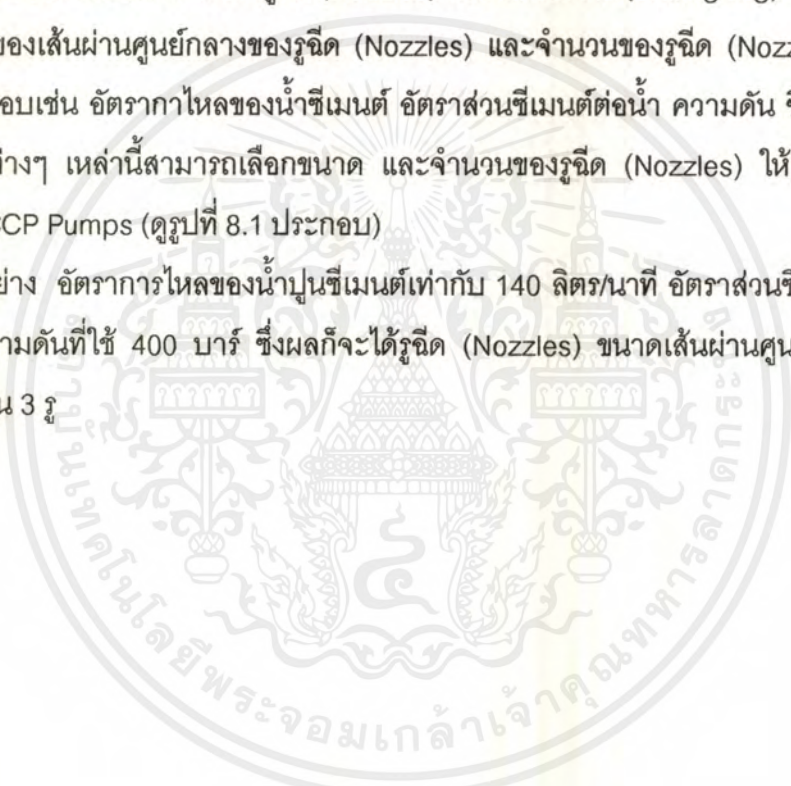
Q = Flow rate

โดยจำเป็นต้องเลือกขนาดและจำนวนของรูฉีด (Nozzles) ให้มีความสัมพันธ์กับขนาดของปี่มด้วย ซึ่งการเลือกขนาดและจำนวนรูฉีดแสดงได้ดังต่อไปนี้

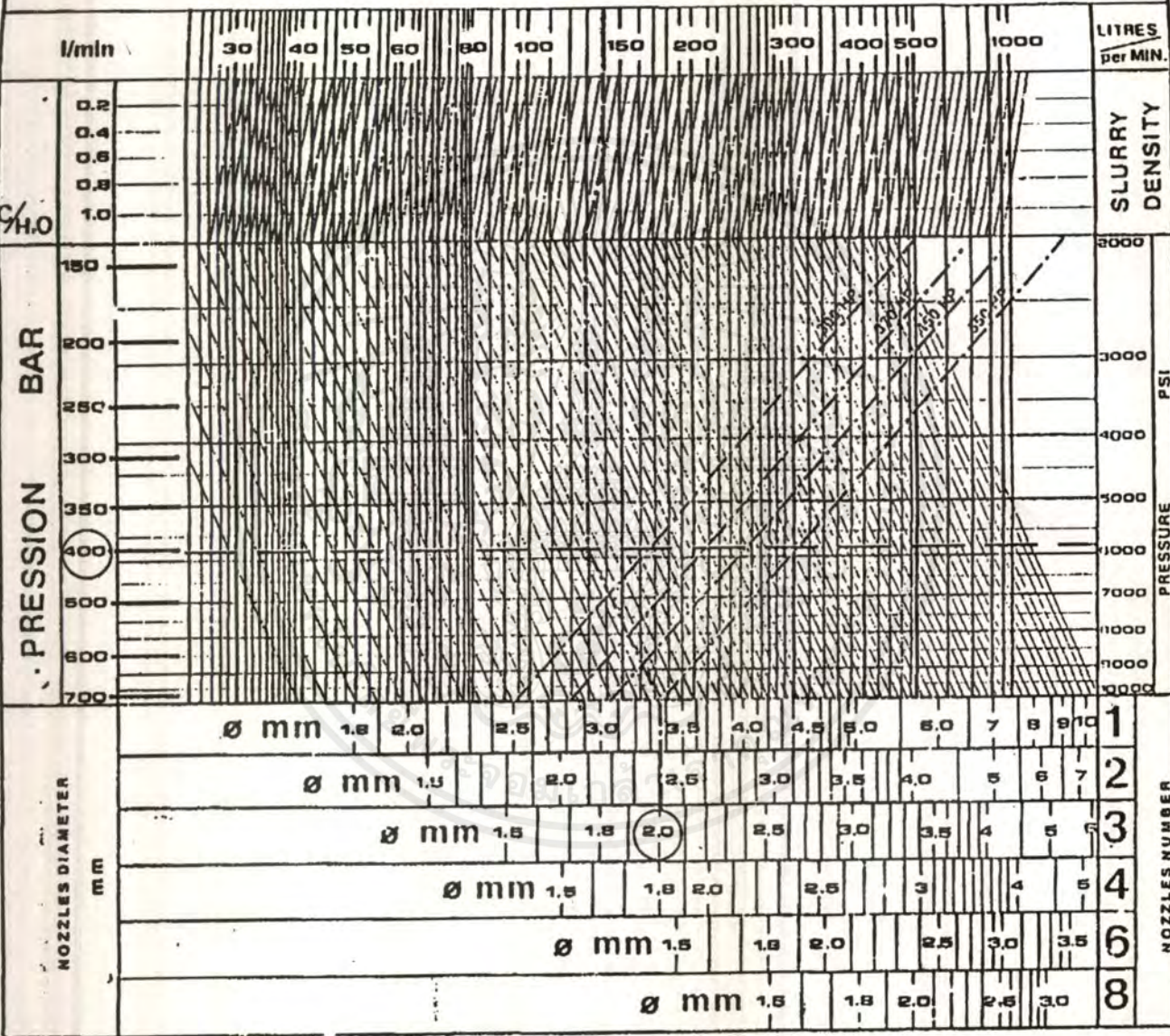
การเลือกจำนวนและขนาดของรูฉีด (Nozzles) สำหรับหัวเจาะ (Drilling Rig)

การเลือกขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูฉีด (Nozzles) และจำนวนของรูฉีด (Nozzles) นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเช่น อัตราการไหลของน้ำซีเมนต์ อัตราส่วนซีเมนต์ต่อน้ำ ความดัน ซึ่งจากความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ เหล่านี้สามารถเลือกขนาด และจำนวนของรูฉีด (Nozzles) ให้เหมาะสมได้ เช่นกราฟของ CCP Pumps (ดูรูปที่ 8.1 ประกอบ)

ตัวอย่าง อัตราการไหลของน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 140 ลิตร/นาที อัตราส่วนซีเมนต์ต่อน้ำเท่ากับ 0.6 ความดันที่ใช้ 400 บาร์ ซึ่งผลก็จะได้รูฉีด (Nozzles) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตรจำนวน 3 รู



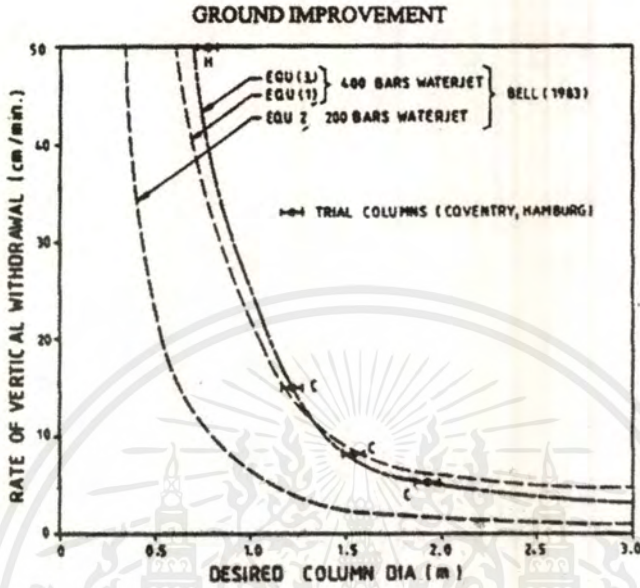
WORK DIAGRAM OF CCP PUMPS



รูปที่ 8.11 WORK DIAGRAM ของ CCP PUMPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อัตราการยก โดยทั่วไปอัตราการยกจะแสดงในหน่วย ซม./นาที ซึ่งจากการศึกษาของ A.L. BELL ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยกกับขนาด Jet Grouting Pile ไว้ ดังรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยกกับขนาดของ Jet Grouting Pile โดย A.L. BELL (1993)

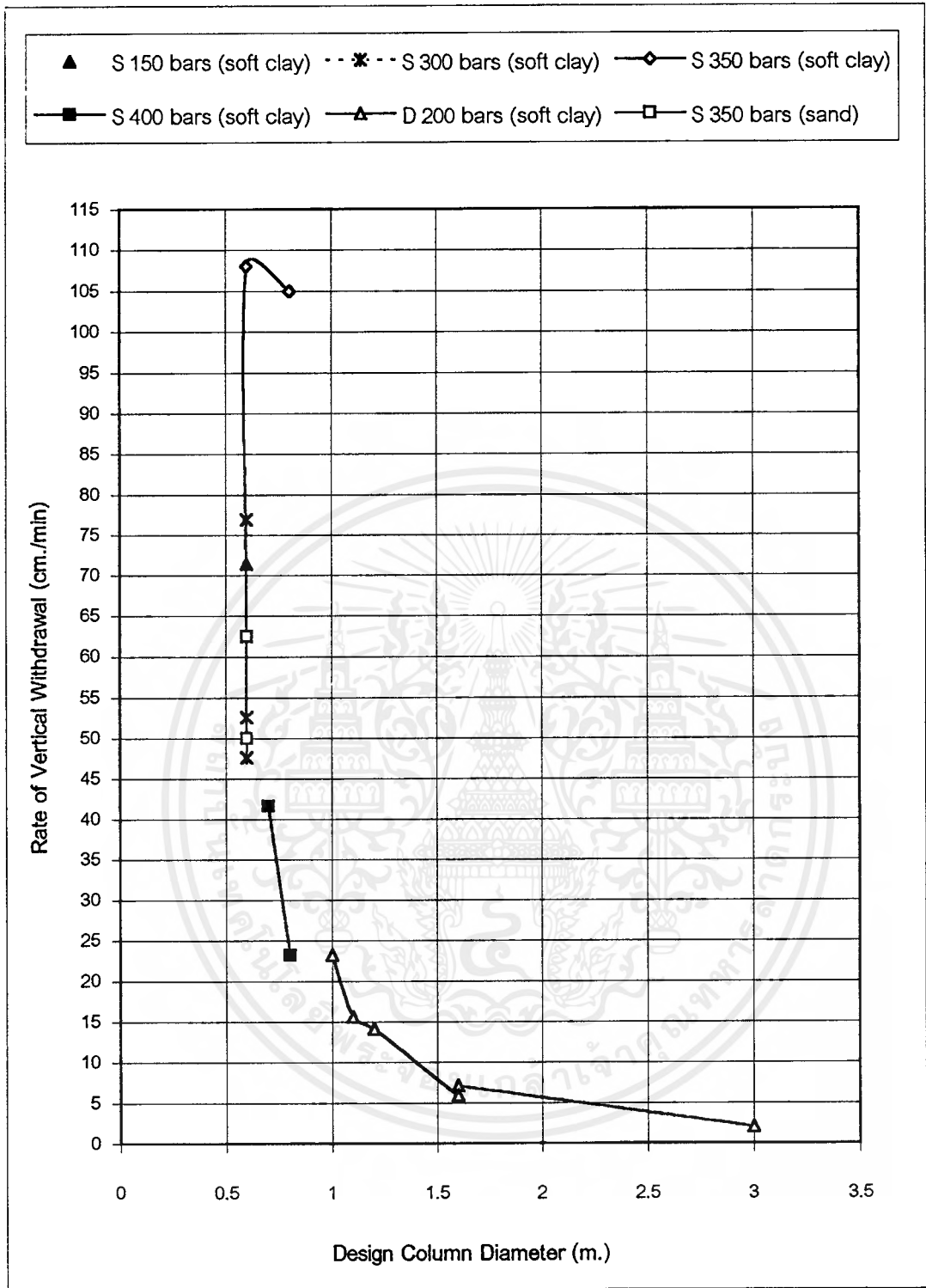
จะเห็นว่า โครงการหลายโครงการในประเทศไทยที่เลือกใช้การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting (แสดงในตารางที่ 8.4) หากนำค่าอัตราการยกที่ใช้และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Jet Grouting Pile มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ (แสดงในรูปที่ 8.14) จะสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการทำ Trial Test สำหรับดินที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 8.4 แสดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง , อัตราการถอนก้านเจาะ และแรงดัน ของตัวอย่างโครงการ

| ชื่อโครงการ | System | ชนิดของดิน | Pressure (bars) | Diameter (m.) | Rate Of Vertical Withdrawal (cm./min) |
|--|--------|-----------------|-----------------|---------------|---------------------------------------|
| 1. โครงการกรมชลประทาน องค์การนิคมอุตสาหกรรมภาคตะวันออก | Single | soft clay | 150 | 0.6 | 71.4 |
| 2. Lee Garden Plaza อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา | Single | soft clay | 300 | 0.6 | 76.9 |
| 3. กำแพงกันดินตึกอโศกพาร์ค 3 | Single | soft clay | 300 | 0.6 | 62.5 |
| 4. ซ่อมแซมเติมแอมเจอร์พบบาดสูญญากาศบริเวณ | Single | soft clay | 300 | 0.6 | 47.6 |
| 5. อุโมงค์บำบัดน้ำเสีย shaft 3.28 (ดินแดง) | Single | soft clay | 300 | 0.6 | 52.6 |
| 6. อุโมงค์รถไฟใต้ดิน (สถานีสุทธิสาร) | Single | soft clay | 300 | 0.6 | 52.6 |
| 7. ฝ่ายบ้านมะขามสูง | Single | soft clay | 350 | 0.6 | 62.5 |
| 8. อุโมงค์ระบายน้ำเสียไทยออยล์ | Single | clayey sand | 350 | 0.6 | 50.0 |
| 9. TPI EB/SM | Single | very loose sand | 350 | 0.6 | 62.5 |
| 10. อุโมงค์รถไฟใต้ดิน (สถานีบ่อนไก่) | Single | soft clay | 350 | 0.6 | 108.0 |
| 11. อุโมงค์รถไฟใต้ดิน (ถนนเทิดพระเกียรติ) | Single | soft clay | 350 | 0.8 | 105.0 |
| 12. โรงบุงชีเมนส์ไทย อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช | Single | medium clay | 400 | 0.7 | 41.7 |

ตารางที่ 8.4 แสดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง , อัตราการถอนก้านเจาะ และแรงดัน ของตัวอย่างโครงการ (ต่อ)

| ชื่อโครงการ | System | ชนิดของดิน | Pressure (bars) | Diameter (m.) | Rate Of Vertical Withdrawal (cm./min) |
|--|--------|-------------|-----------------|---------------|---------------------------------------|
| 13. ซ่อมแซม spun pile ที่ BIG-C SUPER CENTER จ. เพชรบุรี | Single | soft clay | 400 | 0.8 | 23.2 |
| 14. ฝ่ายบ้านมะขามสูง | double | medium clay | 200 | 1 | 23.2 |
| 15. อุโมงค์บำบัดน้ำเสีย shaft 1.61 , 2.11 ('39) | double | soft clay | 200 | 1.1 | 15.6 |
| 16. โรงปูนซีเมนต์ไทย อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช ('39) | double | medium clay | 200 | 1.2 | 14.1 |
| 17. โครงการที่พักอาศัย 8 ชั้น รวบรวมฤดี | double | soft clay | 200 | 1.6 | 5.95 |
| 18. โครงการพัฒนาชุมชนปากพ่อง | | | | | |
| 18.1 งาน JGP คลองลัด | double | soft clay | 200 | 1.6 | 7.14 |
| 18.2 งาน JGP ถนน | double | soft clay | 200 | 1.6 | 7.14 |
| 18.3 งาน JGP ประตูหรือสัญญาณ | double | soft clay | 200 | 3.0 | 2.03 |
| 18.4 งาน JGP ทำนบกั้นลำนํ้าเดิม | double | soft clay | 200 | 1.6 | 7.14 |
| 19. อาคารวิทยาศาสตร์ มทว. | double | soft clay | 200 | 1.6 | 7.14 |
| 20. โครงการโรงกรองน้ำมหาสวัสดิ์ บางกวย | double | soft clay | 200 | 1.6 | 5.95 |



S = Single Fluid System

D = Double Fluid System

รูปที่ 8.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรายกก้านเจาะกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มดินซีเมนต์ของโครงการต่างๆที่ทำในประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4 ASTM ที่เกี่ยวข้องกับงาน Jet Grouting

ทางคณะได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ ASTM ที่เกี่ยวข้องกับงาน Jet Grouting สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 8.5 ASTM ที่เกี่ยวข้องกับงาน Jet Grouting

| สิ่งที่ต้องทดสอบ | มาตรฐาน |
|------------------------------|----------------|
| ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของดิน | |
| ความหนาแน่น (Density) | ASTM-D-854-63 |
| ขนาดของเม็ดดิน (Grain size) | ASTM-D-422-63 |
| Water Content | ASTM-D-2216-84 |
| Liquid limit | ASTM-D-4318-84 |
| Plastic limit | ASTM-D-4318-84 |
| PH | ASTM-G-51-77 |
| ใช้ในการทดสอบกำลังของดิน | |
| Unconfined compression test | ASTM-D-2166-85 |
| Consolidation test | ASTM-D-2143-80 |
| Pile load Test | ASTM-D-1143 |
| วัสดุสำหรับ Cement Grout | |
| ปูนซีเมนต์ | ASTM-C-150 |
| สารผสมเพิ่มสำหรับปูนซีเมนต์ | ASTM-C-494 |

8.5 จำนวนคนที่ใช้ต่อเครื่องมือการทำ Jet Grouting 1 ชุด

- วิศวกร 1 คน (สามารถควบคุมได้ 2-3 ชุด หากการก่อสร้างอยู่ในบริเวณเดียวกัน)
- Operator 1 คน ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานที่รถเจาะ เช่น ความเร็วของการหมุน อัตราการยกก้านเจาะ เป็นต้น
- คนควบคุมเครื่องผสม 1 คน ทำหน้าที่ตรวจเช็คส่วนผสมให้ถูกต้อง และตรวจเช็ควัตถุดิบให้เพียงพออยู่เสมอ คนงานทั่วไป 2 คน ไฟร์แมน 1 คน

8.6 เปรียบเทียบการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ (Jet Grouting Pile) เป็นกำแพงกันดิน กับการใช้เข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile)

1. อุปกรณ์การทำมีขนาดเล็กเคลื่อนที่ด้วยตนเองได้สะดวกเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ตอกเข็มพืดเหล็ก สภาพการทำงานจึงไม่เกะกะกีดขวางการทำงานอื่น จึงสามารถเริ่มดำเนินงานอื่นๆควบคู่กันไปได้ตั้งแต่ระยะแรกของงานก่อสร้าง
2. อุปกรณ์ที่ใช้ไม่ก่อให้เกิดเสียงดังหรือเกิดความสั่นสะเทือนระหว่างการทำงานรบกวนผู้อยู่อาศัยข้างเคียงเหมือนอุปกรณ์ตอกเข็มพืดเหล็ก
3. ทำงานสำเร็จได้รวดเร็วกว่าและต้องการช่วงเวลาพักคอยก่อนขุดเปิดดินน้อยกว่าและไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งค้ำยันเพิ่มเติมในระหว่างขุดเปิดหน้าดินเมื่อเทียบกับการใช้เข็มพืดเหล็กซึ่งต้องมีการติดตั้งระบบค้ำยันต่อไปในระหว่างที่งานขุดดำเนินอยู่แล้ว การใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะประหยัดเวลาในการก่อสร้างโดยส่วนรวมได้มากกว่า
4. การเคลื่อนตัวทางด้านข้างเข้าหาบ่อขุดของกำแพงดินซีเมนต์จะเกิดขึ้นน้อยกว่ากรณีใช้เข็มพืดเหล็ก ดังนั้น โอกาสที่จะก่อความเสียหายแก่อาคารข้างเคียง บ่อขุดจากการเคลื่อนตัวของดินฐานรากจึงลดลงตามไปด้วย
5. ไม่มีภาระการรื้อถอนเมื่องานก่อสร้างใต้ดินแล้วเสร็จ จึงประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายลงได้อีกส่วนหนึ่ง
6. แรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อผนังดินถาวรของห้องใต้ดิน ในกรณีใช้กำแพงดิน-ซีเมนต์จะต่ำกว่ากรณีการใช้เข็มพืดเหล็กกันดินแล้วถอนออกเมื่อเสร็จงานมาก เพราะแรงดันส่วนใหญ่จะถูกต้านรับไปโดยกำแพงดิน-ซีเมนต์แล้ว ดังนั้นจึงสามารถลดความหนาหรือปริมาณการเสริมเหล็กของผนังกำแพงถาวรของห้องใต้ดินลงได้มาก ทั้งนี้เมื่อเทียบกันโดยถือว่าผนังกำแพงถาวรอยู่ในสภาพที่มีอัตราส่วนความปลอดภัยในระดับเดียวกันทั้งสองกรณี

8.7 เปรียบเทียบการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ (Jet Grouting Pile) เป็นกำแพงกันดิน กับการใช้เข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile) ในด้านแนวโน้มของราคา ซึ่งแปรผันตามขนาดและระยะเวลาการก่อสร้างของโครงการ

1. เวลา

ในการก่อสร้างโดยใช้เข็มพืด (Sheet pile) นั้น ถ้าใช้เวลาในการก่อสร้างนาน ค่าเช่า(ในกรณีเช่า) ก็จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการก่อสร้าง แต่กำแพงกันดินซึ่งทำจาก Jet Grouting Pile ราคาจะคงที่แม้เวลาในการก่อสร้างจะยาวนานแค่ไหน เพราะฉะนั้นในการเลือกใช้ว่าจะใช้กำแพงกันดินโดย Jet Grouting Pile หรือ เข็มพืด (Sheet pile) จำเป็นต้องมีการประมาณเวลาในการก่อสร้างแล้วเปรียบเทียบว่าแบบไหนประหยัดกว่ากัน ถึงอย่างไรก็ตามต้องดูเหตุผลอื่นประกอบด้วย

2. ความลึกของงานดินขุด

ในกรณีการขุดดินไม่ลึกมาก กำแพงกันดินแบบ Jet Grouting Pile จะประหยัดกว่าแบบเข็มพืด (Sheet pile) และอีกปัจจัยหนึ่งที่ไม่ควรมองข้ามคือกำแพงกันดินแบบ Jet Grouting Pile ไม่ต้องการรื้อถอนแต่เข็มพืดจำเป็นต้องมีการรื้อถอนเมื่อก่อสร้างเสร็จ (X.L. Clen , Y.H. Lin และ S.D. Zhang ให้คำแนะนำว่าความกว้างของกำแพง Jet Grouting Pile จะอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 0.8 เท่าของความลึกของงานดินขุด และความลึกของกำแพง Jet Grouting Pile ได้ระดับงานขุดลงไปเท่ากับ 0.8 ถึง 1.2 เท่าของความลึกของงานดินขุด ส่วนเข็มพืด (Sheet pile) ในกรณีการขุดลึกมากจำเป็นต้องใช้ระบบยัน)

8.8 เปรียบเทียบวิธีการปรับปรุงดินระหว่างวิธี Rotary Mixing กับ วิธี Jet Grouting

1. ในกรณีทำปริมาณมากๆ การใช้วิธี Rotary Mixing จะประหยัดกว่าวิธี Jet Grouting ซึ่งวิธี Jet Grouting เหมาะสำหรับงานที่ทำกรณีน้อยๆ

2. วิธี Rotary Mixing จะให้คุณภาพของดินซีเมนต์ที่ดีกว่าวิธีแบบ Jet Grouting เนื่องจากวิธี Rotary Mixing มีการผสมโดยใช้ใบพัดทำให้เนื้อดินผสมกับน้ำปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง

3. การปรับปรุงดินโดยวิธี Rotary Mixing จะมีปัญหาเรื่อง Differential Settlement น้อยกว่าวิธี Jet Grouting

ข้อเสนอแนะ ในงานถนนควรใช้วิธีการปรับปรุงดินแบบ Rotary Mixing จะเหมาะสมกว่าแบบ Jet Grouting จากเหตุผลทั้งสามข้อดังกล่าวข้างต้น

8.9 เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนโดยวิธี Jet Grouting เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ในงานปรับปรุงฐานรากถนน

1. เส้าเข็มหินหรือทราย (Stone or Sand Compaction Pile)

เทคนิคเส้าเข็มหินหรือทราย (Stone or Sand Compaction Pile) นั้นในขณะนี้ยังไม่ได้มีการวิจัยในบ้านเรารองรับและไม่มีผู้รับจ้างซึ่งมีประสบการณ์ในประเทศไทยดีพอ วิธีการนี้จึงยังไม่น่าที่จะนำมาใช้

2. วิธีใช้วัสดุช่วยระบายน้ำในแนวตั้ง (Prefabricated Vertical Drain)

เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยวิธีใช้วัสดุช่วยระบายน้ำในแนวตั้ง (Prefabricated Vertical Drain) ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ก่อสร้างในบางโครงการได้เนื่องจากพื้นที่ในการก่อสร้างจำกัดจึงไม่สามารถจะก่อสร้างคันทางให้สูงพอที่จะเป็นน้ำหนักกดทับได้ ทั้งยังต้องปิดการจราจรในช่วงระยะเวลาการท่อดตัวของคันทางอีกด้วย

3. วิธีการใช้เข็มตอกแบบปูพรม

ราคาก่อสร้างจะสูงกว่าแบบ Jet grouting Pile และยังมีปัญหาการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างซึ่งจะมีมากในการตอกเข็ม แต่ Jet Grouting Pile จะมีปัญหาเหล่านี้้น้อยมาก

4. การใช้แผ่นใยหรือตาข่ายสังเคราะห์ (Geotextile or Geogrid)

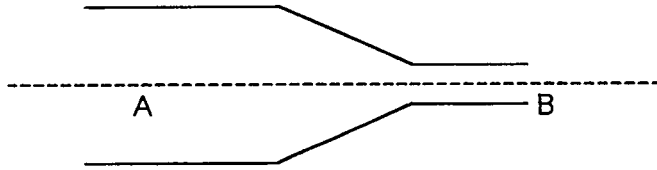
การใช้แผ่นใยหรือตาข่ายสังเคราะห์ (Geotextile or Geogrid) เป็นวัสดุเสริมคุณภาพ (Soil Reinforcement) ในคันทางก็สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของคันทางได้แต่มีได้แก้ปัญหาการท่อดตัวของคันทางโดยตรง

5. การใช้วัสดุมวลเบา

การใช้วัสดุมวลเบา เช่น EPS หรืออื่นๆ ถมแทนทรายถมคันทางสามารถนำมาใช้ได้ ในบางกรณี อย่างไรก็ตามปัญหาการทรุดตัวของคันทางในระยะยาวก็ยังคงมีอยู่ อีกทั้งความคงทนของวัสดุ EPS ยังมีได้ปรากฏอย่างแน่ชัดในระยะยาวนอกจากนั้นวัสดุ EPS ยังมีราคาค่อนข้างแพง



8.10 ลักษณะการทำงานของ Nozzle



ลักษณะการทำงานของ Nozzle ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการของเบอร์นูลลี อธิบายได้ดังนี้

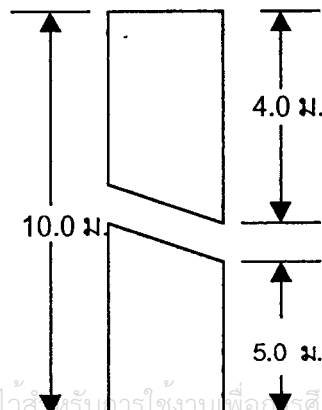
$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + H_L$$

สำหรับ H_L ถ้ามีการจัดลักษณะการคอดโดยใช้องศาการคอดที่เหมาะสมจะช่วยให้ค่า H_L มีค่าน้อยมาก

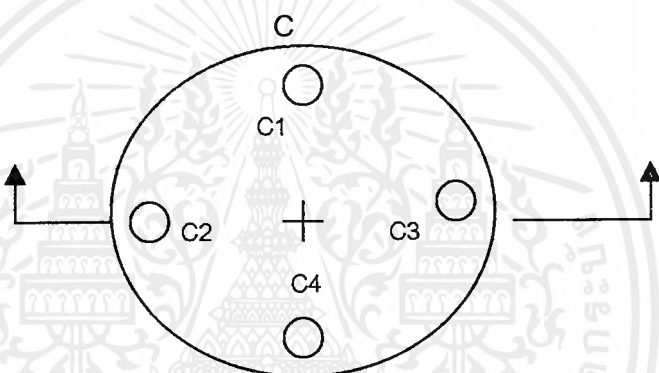
จากสมการเบอร์นูลลีจะพบว่า Nozzle ไม่ได้เพิ่มความดันที่จุด B แต่จะเป็นการเพิ่มความเร็วน้ำปูน (Cement Grout) ซึ่งจะทำให้ น้ำปูนฉีดไปได้ไกลขึ้น ส่วนความดันนั้นจะคงที่ โดยความดันที่ได้ จะได้จาก High pressure pump ซึ่งความดันบางส่วนจะสูญเสียไปบ้าง เนื่องจากแรงเสียดทานของท่อ และข้อต่อต่างๆ ก่อนที่จะถึงจุด A

8.11 ข้อเสนอแนะในการตรวจสอบค่า Core Recovery

ในการตรวจสอบผลการ Coring ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบค่า Core Recovery ได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นการตรวจสอบเฉลี่ยตลอดทั้งต้น ในบางครั้งจะเป็นการไม่เหมาะสม เช่น



จากลักษณะของ Jet Grouting Pile ข้างต้น เมื่อนำมาหาค่า Core Recovery เฉลี่ยตลอดทั้งต้น จะได้ค่าประมาณ 90 % ซึ่งจัดได้ว่าสูงพอสมควรแต่ลักษณะของ Jet Grouting Pile ที่ได้จะไม่เหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของเสาเข็ม ซึ่งจะมีปัญหาในการถ่ายแรง เพราะฉะนั้นควรจะมีการตรวจสอบอย่างละเอียดด้วย เช่น ความสม่ำเสมอของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มตลอดทั้งต้น คือในช่วงความลึกใดๆที่เจาะไม่พบดินซีเมนต์ (Core loss) ให้พิจารณาหุลุมเจาะอื่นๆ ในตำแหน่งในระดับความลึกเดียวกันร่วมด้วย เช่น



ที่ระดับความลึก 3.0 ม. ผลการ Coring เป็นดังนี้

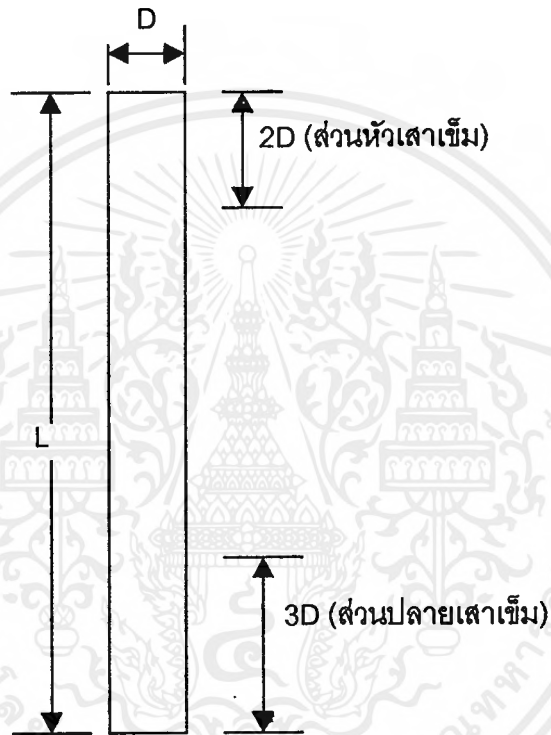
- C1 ไม่พบเนื้อดินซีเมนต์ (Core Loss)
- C2 พบเนื้อดินซีเมนต์
- C3 พบเนื้อดินซีเมนต์
- C4 พบเนื้อดินซีเมนต์

ในระดับความลึกเดียวกัน C1 ผลเจาะไม่พบดินซีเมนต์ แต่ C2 C3 C4 สามารถเจาะพบดินซีเมนต์ ก็สามารถยอมรับได้ในระดับความลึกนี้

ในการเปรียบเทียบที่ระดับความลึกต่างๆ ควรมีการทำเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงความลึก เพื่อความสะดวกควรมีการทำในช่วงความลึกเท่ากับความลึกของกระบอกเก็บตัวอย่างในการ Coring เช่นทุก 1.5 ม.หรือ 3.0 ม. ดูตัวอย่างรูปที่ 6.5 ,6.6 และ 6.7

ในการรับน้ำหนักของเสาเข็มความแข็งแรงของเสาเข็มที่ตำแหน่งต่างๆต้องพิจารณาด้วย เช่นที่หัวเสาเข็มซึ่งมีการถ่ายแรงโดยตรงจากโครงสร้างซึ่งต้องมีค่าความแข็งแรงที่ดีพอ ค่า Core Recovery ไม่ควรน้อยกว่า 75% ในส่วนกลางลำต้นค่า Core Recovery ไม่ควรน้อยกว่า 60 %

และที่ปลายของเสาเข็มซึ่งเป็นการถ่ายแรงให้กับชั้นดินแข็งค่า Core Recoveryไม่ควรน้อยกว่า 75 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.12 แนวทางในการแก้ปัญหาความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของดินซีเมนต์

จากการศึกษาตัวอย่างโครงการก่อสร้างต่างๆ ในประเทศไทยที่ใช้วิธี Jet Grouting ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ นิยมใช้การหมุนก้านเจาะฉีดน้ำปูน 1 รอบต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง จึงทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์ที่สร้างขึ้นไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างเพียงพอ

จากประสบการณ์การทำ Jet Grouting ของผู้รับเหมาในต่างประเทศพบว่า ใช้การหมุนก้านเจาะฉีดน้ำปูน 5-6 รอบ ต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง ทำให้ดินซีเมนต์ที่สร้างขึ้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันเป็นอย่างดี

ดังนั้น หากผู้รับเหมาต้องการแก้ปัญหาความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของดินซีเมนต์ จะต้องเปลี่ยนการหมุนก้านเจาะฉีดน้ำปูนจาก 1 รอบ เป็น 5-6 รอบ ต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง โดยที่ระยะเวลาและ ปริมาณน้ำปูน ต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง ยังคงใช้เท่าเดิม สามารถทำได้ดังนี้ คือ ลดขนาดและเพิ่มจำนวนรู nozzle ให้สอดคล้องกัน เช่น การเพิ่มรู nozzle จาก 1 รู เป็น 2 รู จะช่วยลดระยะเวลาการฉีดน้ำปูนให้ครบรอบเหลือเพียงครึ่งหนึ่ง (ก้านเจาะจะหมุนได้เพิ่มขึ้นเป็น 2 รอบ เมื่อใช้เวลาเท่าเดิม) หรือ เพิ่มเป็น 3 รู จะช่วยลดระยะเวลาการฉีดน้ำปูนให้ครบรอบเหลือเพียง 1 ใน 3 ของเวลาเดิม (ก้านเจาะจะหมุนได้เพิ่มขึ้นเป็น 3 รอบ เมื่อใช้เวลาเท่าเดิม)



หรืออาจเพิ่มจำนวนรอบในการฉีดน้ำปูน โดยการลดอัตราการไหลของน้ำปูน แล้วเพิ่มจำนวนรอบในการฉีดน้ำปูน เช่น ลดอัตราการไหลของน้ำปูนลงครึ่งหนึ่ง แล้วเพิ่มรอบการฉีดน้ำปูนเป็น 2 รอบ จะเห็นว่าจำนวนรอบของการหมุนก้านเจาะเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำปูนจะใช้เท่าเดิม แต่จะทำให้เสียเวลาในการฉีดน้ำปูนเพิ่มขึ้นด้วย

ตัวอย่าง การเพิ่มจำนวนรอบในการหมุนก้านเจาะฉีดน้ำปูนจาก 1 รอบ เป็น 5 รอบ ต่อการยกก้าน
เจาะ 1 ครั้ง โดยที่เวลาและ ปริมาณน้ำปูน ต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง ยังคงใช้เท่าเดิม

จาก

การหมุนก้านเจาะฉีดน้ำปูน 1 รอบต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง

| | |
|---------------------------------|-----------------|
| จำนวน nozzle | 1 รู |
| ขนาด nozzle | 3.5 ม.ม. |
| ความเร็วรอบในการหมุนของก้านเจาะ | 6 รอบต่อนาที |
| อัตราการไหลของน้ำปูน | 230 ลิตรต่อนาที |

เป็น

การหมุนก้านเจาะฉีดน้ำปูน 6 รอบต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง

โดยเพิ่มจำนวน nozzle เป็น 6 รู (จากรูปที่ 8.11 ขนาด nozzle จะลด
เหลือ 1.5 ม.ม.) จะทำให้การหมุนก้านเจาะฉีดน้ำปูนเพิ่ม เป็น 6 รอบต่อการยกก้านเจาะ 1
ครั้ง ในขณะที่ระยะเวลาและ ปริมาณน้ำปูน ต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง ยังคงใช้เท่าเดิม

หรืออาจทำได้โดยการเพิ่มจำนวน nozzle เป็น 3 รู (จากรูปที่ 8.11
ขนาด nozzle จะลดเหลือ 2.1 ม.ม.) จะทำให้การหมุนก้านเจาะฉีดน้ำปูนเพิ่ม เป็น 3 รอบ
ต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง ในขณะที่ยังคงใช้เวลาเท่าเดิม แล้วลดอัตราการไหลของน้ำปูน
เหลือ 115 ลิตรต่อนาที และเพิ่มจำนวนรอบในการฉีดน้ำปูนเป็น 2 เท่า คือ การหมุนก้าน
เจาะฉีดน้ำปูนจะเพิ่มเป็น 6 รอบต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้ง ในขณะที่ยังคงใช้ปริมาณน้ำ
ปูนเท่าเดิม แต่ระยะเวลาต่อการยกก้านเจาะ 1 ครั้งจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า

- การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีต่างๆ โครงการพิเศษปีการศึกษา 2539 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- เกษม เพชรเกต,พินิต ตั้งบุญเต็ม (2540) "เสาเข็มดินซีเมนต์"วิศวกรรมสาร,50,11 (พฤศจิกายน,2540) น.56-60
- เกษม เพชรเกต,พินิต ตั้งบุญเต็ม (2539) "การปรับปรุงดินโดยวิธีอัดฉีดแรงดันสูงสำหรับงานขุดดินลึกบริเวณดินเหนียวกรุงเทพฯ"การสัมมนาทางวิชาการเรื่อง"งานก่อสร้างใต้ดิน 39 "คณะอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี,วสท.น.100-107
- เกษม เพชรเกต,พินิต ตั้งบุญเต็ม (2538) "การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยวิธีผสมลึก"การสัมมนาทางวิชาการ"ทางเลือกใหม่ในงานวิศวกรรมปฐพีประเทศไทย" คณะอนุกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี,วสท.น.69-81
- เกษม เพชรเกต (2538) การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในการป้องกันน้ำท่วมกรุงเทพ,โยธาสาร,7,11 (พฤศจิกายน,2538)น.41-45
- เกษม เพชรเกต,พินิต ตั้งบุญเต็ม (2536) "การนำเสาเข็มดินซีเมนต์มาใช้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ" การประชุมใหญ่ทางวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ประจำปี 2536 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ น.345-357
- เกษม เพชรเกต,พินิต ตั้งบุญเต็ม (2536) "การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยดินซีเมนต์" การประชุมใหญ่ทางวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ประจำปี 2536 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ น.358-365
- เกษม เพชรเกต,พินิต ตั้งบุญเต็ม (2533) "การปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากโดยวิธีอัดฉีดด้วยแรงดันสูง"การประชุมใหญ่ทางวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ประจำปี 2533 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ น.265-272
- ขวัญชัย สิ้นทรัพย์สมบูรณ์ , ปานเพชร ชินันทร (2539) ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม ISBN 974-512-607-1 หน้า 56-59
- นพดล เพ็ชรเวช " โครงการท่าอากาศยานสากลกรุงเทพฯแห่งที่ 2 (หนองงูเห่า) ",โยธาสาร,8,1 (มกราคม,2539),น.17-21
- เทคนิคการ Grouting โครงการพิเศษปีการศึกษา 2539 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

สมชัย กกกำแหง,วิทยาลัยพงษ์เทพูปถัมภ์,ทศพร เนตยานุวัฒน์ (2542)"การประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานก่อสร้างท่าเทียบเรือขนถ่ายอุปกรณ์หนัก" การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5 ,2542,สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ,GTE 57-65

สมชัย กกกำแหง (2539) "การประยุกต์ใช้ Jet grouting Technique สำหรับงานวิศวกรรมปฐพีในประเทศไทย"วารสาร กฟผ. ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 มกราคม 2539,น.43-59

สราวุธ จริตงาม (2542)"การศึกษาออกแบบการใช้ Jet Grouting เพื่อปรับปรุงดินในงานเจาะอุโมงค์ "การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, 2542สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, GTE 80-86

สราวุธ จริตงาม (2542)"การใช้ Jet Grouting เป็นกำแพงกันดินในงานขุดห้องใต้ดิน "การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, 2542,สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, GTE 30-35

สราวุธ จริตงาม(2541) "การปรับปรุงดินโดยใช้ Jet Grout Pile สำหรับงานถนนบนชั้นดินอ่อน"โยธาสาร, 4, 10 (ตุลาคม, 2541), น. 23-30

สราวุธ จริตงาม and Wong K.S. (2538) "การประยุกต์ใช้ Jet Grouting ในงานขุดห้องใต้ดินขนาดเล็กในชั้นดินเหนียวอ่อน"การประชุมใหญ่ทางวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติ ประจำปี 2539,สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

เอกสารทางวิชาการ บริษัท ซอยล์กรีนเทคโนโลยี จำกัด เรื่อง Jet Mixing Method

เอกสารทางวิชาการโครงการ MRTA ถนนเทอดพระเกียรติ และ บ่อนไก่ พศ. 2541

เอกสารประกอบการอบรมสัมมนา ครั้งที่ 2 (2541) โครงการประจวบรายน้ำปากพ่อง อ.ปากพ่อง จ. นครศรีธรรมราช

Anon,(1982),Jet Grouting comes to Britain,Ground Engineering,Vol.15,No.2,p 32-33

Aschier,F.Jamiolkowski,M.,and Tomaghi,R.(1983)Case History of cut-off walls executeby jet grouting.proc.8th ESCMFE,Helsinki,vol.1,121-126.

Bell,A.L.(1983)Control of column geometry;jet grouting in sand,GKN Keller technical report,77pps

Bell,A.L."Jet Grouting" Grouting Improvement,p 154-179

Bell,A.L. KellerColcrete, Wetherby, England and G.K.Burke, Hayward Baker,Odenton,USA"The compressive strength of the ground treated using triple system jet grouting "Grouting in the ground, Thomas Telford,London,1994,p 525-537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Berg,J.,and Samol,H.(1986) Soilcrete-a method of soil improvement applied in soil and water engineering project. Wasser and Boden, 9,S.451-455.
- Coomber,D.B.(1985a) Tunnelling and soil stabilisation by jet grouting.Paper 22Proc.4th Inst.Symposium on tunnelling,Brighton, England.
- Coomber,D.B.(1985b)Groundwater control by jet grouting.Proc.Conf.Groundwater in engineering Geol.Geol.Soc.London,14pps.
- C.S. Covil and A.E.Skinner "Jet grouting – a review of some of the operating parameters that form the basis of jet grouting process "Grouting in the ground, Thomas Telford, London, 1994,p 605-627
- H.Imanishi& Y.Yamauchi"Ground behavior during soil improvement by Jet Grouting"Grouting and Deep Mixing, Yonekura, Terashi&Shibazaki (1996)
- HJ.Liao "Grouting for retaining wall movement control of a deep excavation in soft clay Grouting in the ground, Thomas Telford, London, 1994,p 403-416
- Littlejohn, G.S.(1982) Design of cement-base grouts.Proc.Conf.Grouting in Geotechnique Engineering,ASCE,New Orleans,Louisiana.
- Miki,G.(1984) Japanese experience on sub-soil reinforcement by jet grouting.Lecture Notes for Address Proc.Conf.In-Situ Soil and Rock Reinforcement.paris,9-11th October,25pps
- Raabe,E.W. and Toth,S.(1989)Producing sealing walls and sealing slabs by applying the soilcrete process.Proc.Int.Conf.Piling and Deep Foundation,London,1989.
- Seah,Tian Ho " Quality Control of Deep Stabilization Method "การปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนกรุงเทพฯ (2541)
- Welsh,P,J.,State of the art of grouting in North America,Grouting and Deep Mixing,Yonekura,Terashi,1997 Balkema,Rotterdam,Vol.2,p 825-831



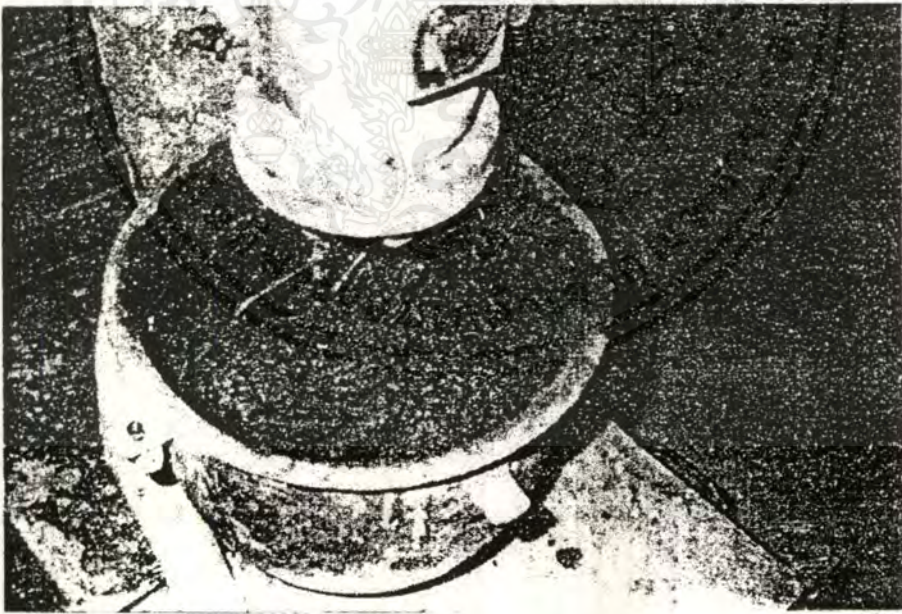
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) ตัวอย่างการศึกษา Soil Cement ในห้องทดลอง



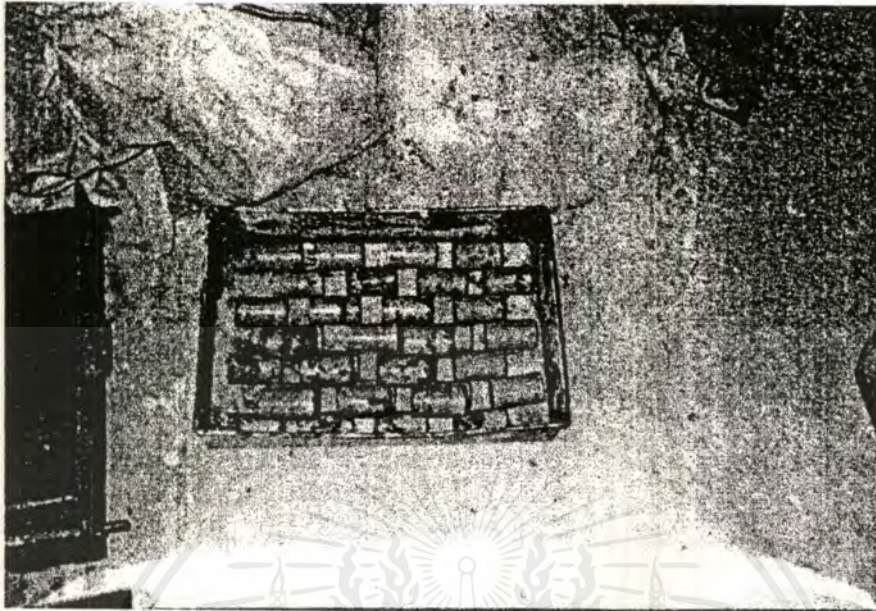
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การศึกษาค่า Unconfined Compressive Strength (Q_u), Modulus of Elasticity (E_{50}), Modulus of Rupture (R) , Slake Durability Index (I) และ X-ray Diffraction ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อดินเหนียว เท่ากับ 250, 300 และ 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินเหนียวเปียก หรือเทียบเป็นร้อยละของปูนซีเมนต์ต่อน้ำหนักของดินแห้ง เท่ากับ 21.9, 26.3 และ 30.7 ตามลำดับ ผสมด้วย Mixer ตามรูปที่ ผ1 ด้วย Water Cement Ratio เท่ากับ 2:1 แล้วนำไปหล่อในแบบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ ผ2 และที่ ผ3 แล้วนำไปบ่มในห้อง โดยใช้กระสอบป่านชุบน้ำคลุมไว้ดังแสดงไว้ในรูปที่ ผ4 เมื่อได้อายุที่ทำการศึกษาก็นำไปทดสอบ (จากการศึกษาของ รชฎ เสนีย์ศรีสันต์, วรพงษ์ ไชยสุข ทักษิณ และวรพล เนียมนิล นักศึกษาชั้นปีที่ 4 KMUT.T ปีการศึกษา 2540 โดยมี รศ.เกษม เพชร เกตุ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา) ได้ผลดังนี้



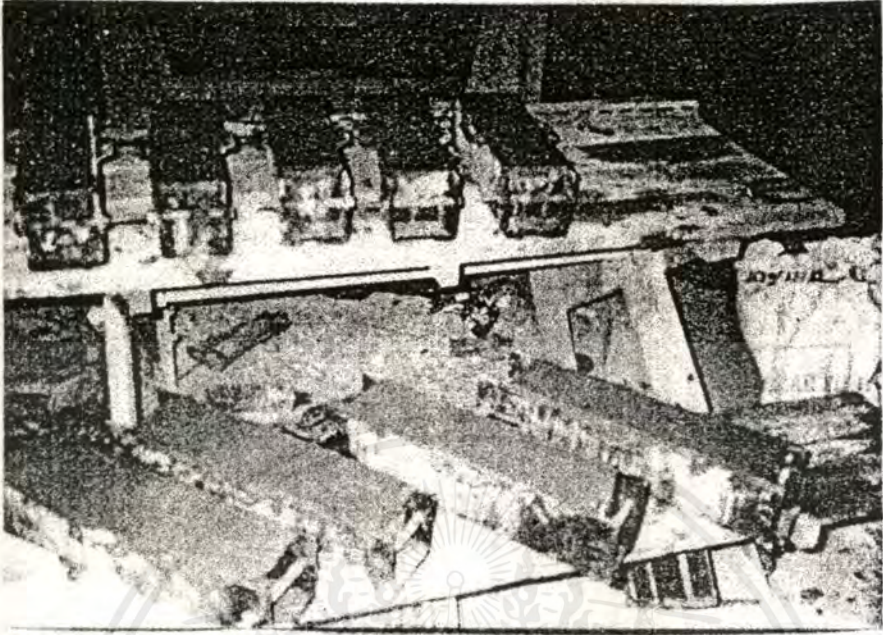
รูปที่ ผ1 เครื่องผสมดินซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

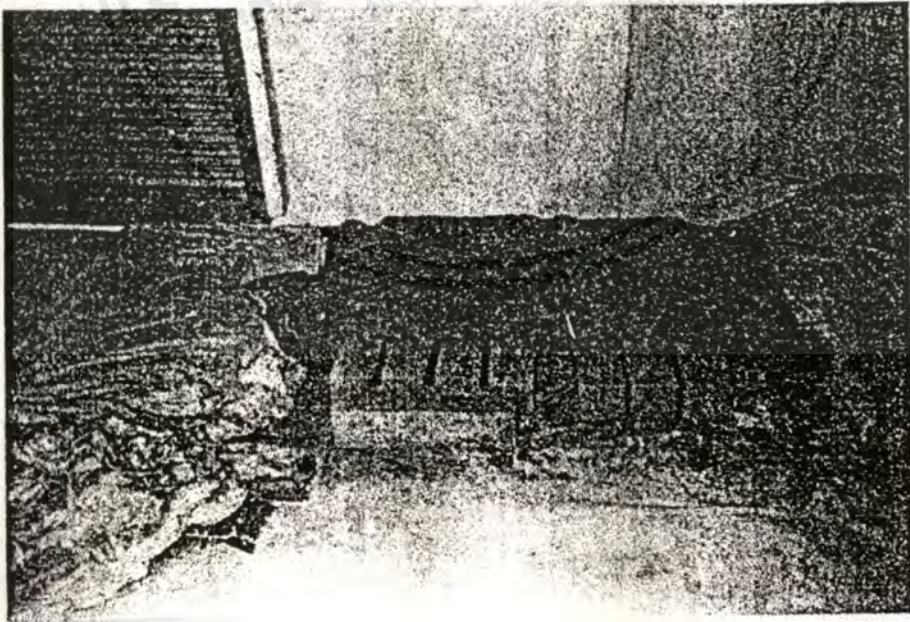


รูปที่ ๗2 การบ่มตัวอย่าง Beam โดยใช้กระสอบและผ้าชุบน้ำ

1.) ค่า Unconfined Compressive Strength (Q_u) Modulus of Elasticity (E_{50}), Modulus of Rupture (R) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจากการศึกษาครั้งนี้ สรุปได้ว่าค่า Q_u , E_{50} และ R เพิ่มขึ้นร้อยละ 16 ต่อการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50 กก. ต่อ ลบ.ม. ของดินเปียก ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๗5-๗7 การทดสอบ Unconfined Compressive Strength และ Flexural Strength ได้แสดงไว้ในรูปที่ ๗8-๗9



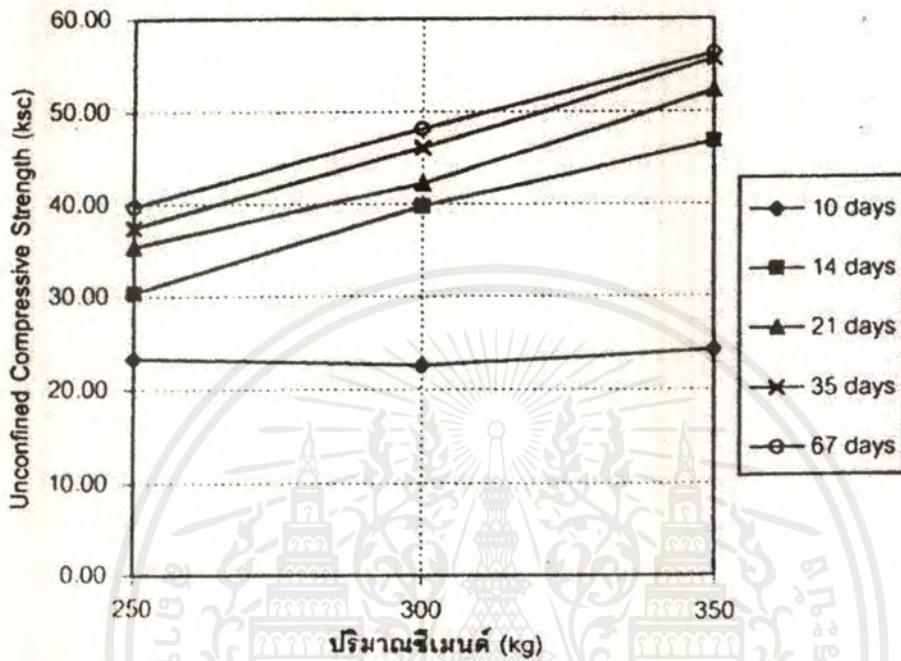
รูปที่ ๘3 ตัวอย่างดินซีเมนต์ในแบบหล่อ Beam



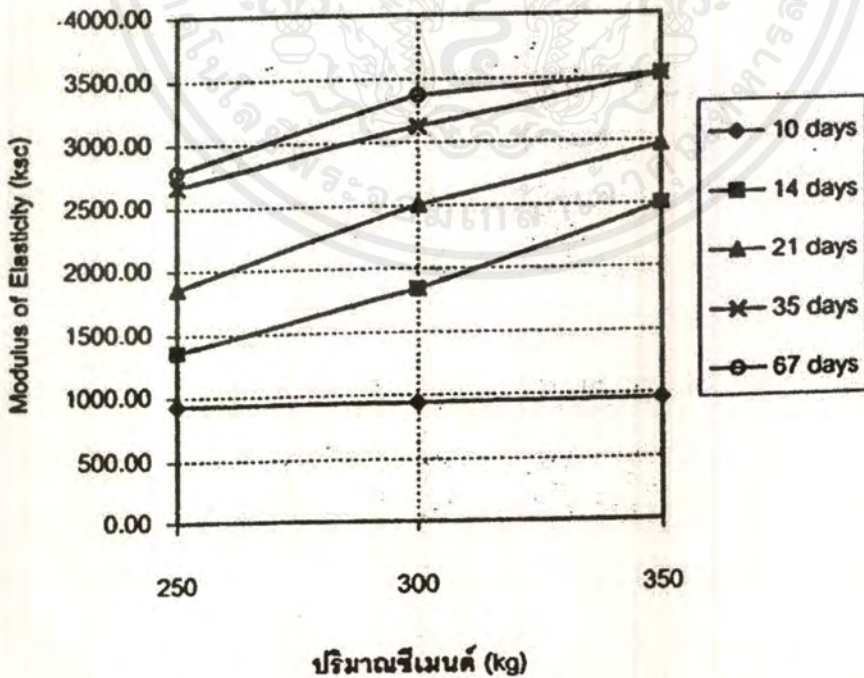
รูปที่ ๘4 การบ่มตัวอย่าง Beam โดยใช้กระสอบและผ้าชุบน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} และ R กับค่า Undrained Shear Strength, S_u จากการศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่า E_u เท่ากับ $110 S_u$ และ R เท่ากับ $0.125 S_u$

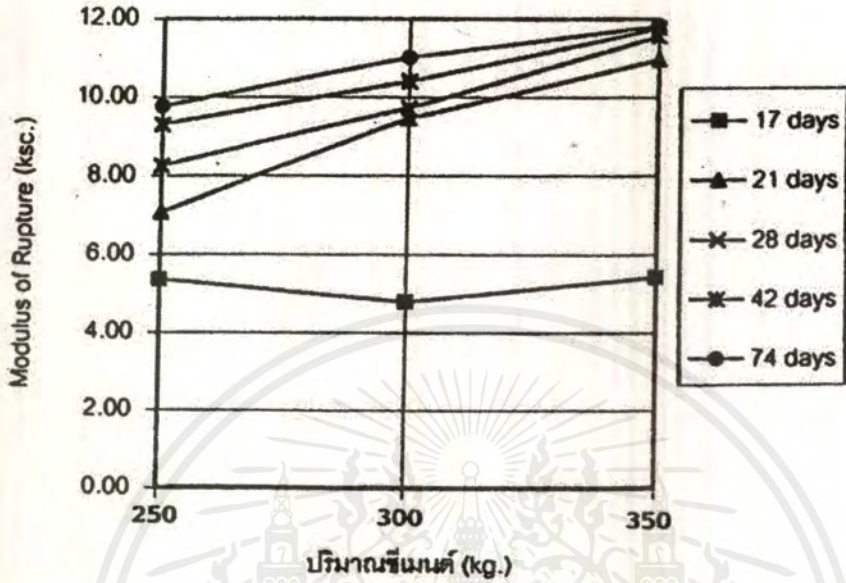


รูปที่ ๕5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับซีเมนต์

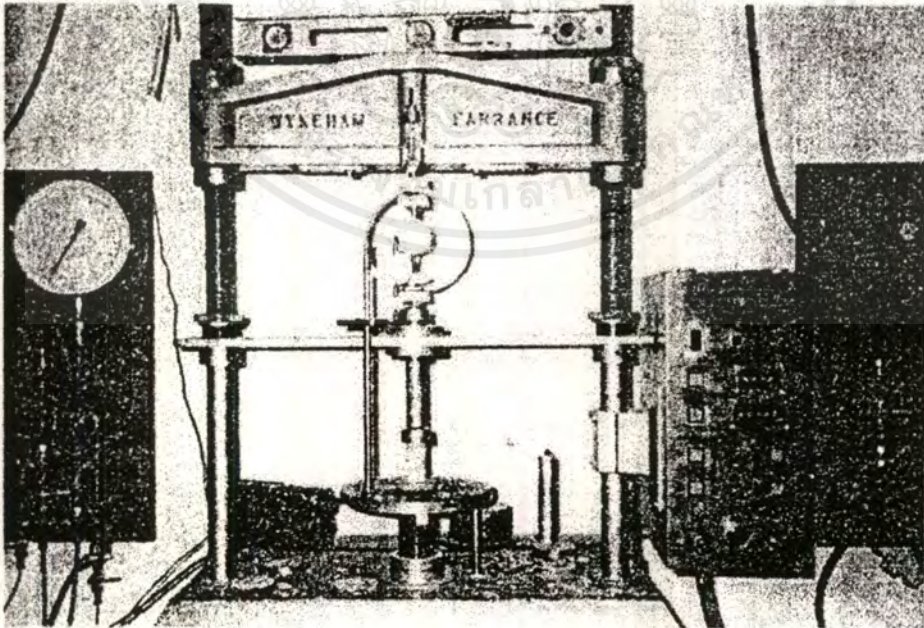


รูปที่ ๕6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of Elasticity กับปริมาณซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

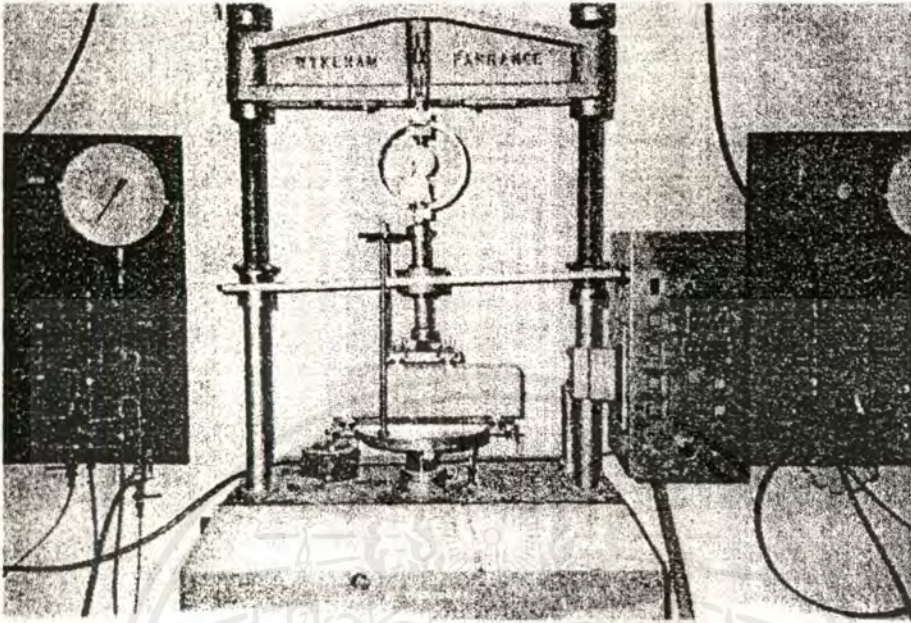


รูปที่ ๗7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Modulus of Rupture



รูปที่ ๗8 ตัวอย่าง Cylinder พร้อมทั้งจะทดสอบ Unconfined Compressive Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๘9 ตัวอย่าง Beam พร้อมที่จะทดสอบ Flexural Test

2.) การหาค่า Slake Durability Index (Id) การหาค่า Slake

Durability Index เพื่อหาค่าความทนทานต่อการแตกสลายของดินซีเมนต์ หรือ Soft Rock ทดสอบตาม ASTM D 4644 ทดสอบโดยนำดินซีเมนต์ที่ได้จากการทดสอบ FLEXURAL STRENGTH มาทุบให้แตกเป็นก้อน ๆ ขนาดก้อนละ 40-60 กรัม หักมุมคม ๆ ทิ้งให้หมด ปิดฝุ่นให้หมด แล้วนำไปใส่ Drum มีขนาดตะแกรง 2 มม. ชั่งน้ำหนักรวม Drum ไว้ได้น้ำหนัก A กรัม แล้วนำ Drum เข้าเตาอบอุณหภูมิ $105^{\circ} + 5^{\circ} \text{C}$ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วนำออกมาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงชั่งน้ำหนัก Drum รวมดินที่อบแล้วได้น้ำหนักเท่ากับ B (กรัม) นำ Drum น้ำหนัก B ใส่ภาดทดลอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๘10 เติมน้ำใส่ภาดทดลองจนจมน้ำถึงกึ่งกลาง Drum 20 มิลลิเมตร เปิดมอเตอร์หมุน Drum ด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ดินซีเมนต์ที่สลายตัวจะแตกออกถ้าส่วนที่แตกออกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2 มม. จะร่วงออกไปในการทดลอง แล้วยก Drum ออกจากภาดทดลอง นำไปเข้าเตาอบอุณหภูมิ $105^{\circ} + 5^{\circ} \text{C}$ จนแห้ง หรือ 16 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งได้น้ำหนัก W_2 แล้วทำซ้ำอีกครั้งหนึ่ง คือ อบดินซีเมนต์ที่เหลือพร้อม Drum แล้วนำ

ไปหมนในน้ำแล้วนำไปอบอีกครั้ง ชั่งน้ำหนักแห้งหลังการอบ 16 ชั่วโมง สุดท้ายได้น้ำหนัก WF ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่า Slake Durability Index ได้ดังนี้

$$W = [(A-B)/(B-C)] \times 100 \text{ --- \%} \quad (4.8)$$

W = Water Content

A = น้ำหนัก Drum + ดินซีเมนต์ตัวอย่าง --- กรัม

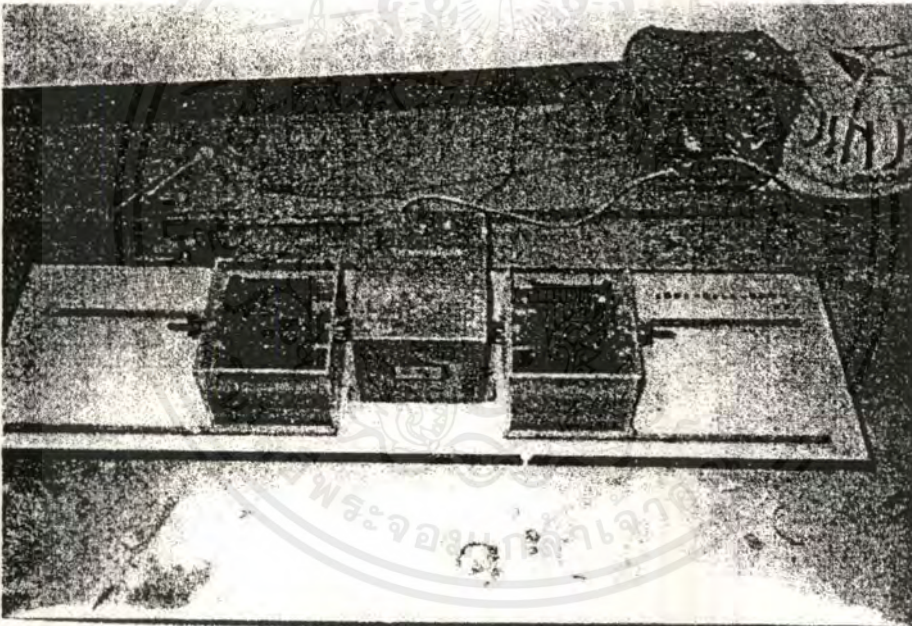
B = น้ำหนัก Drum + ดินซีเมนต์อบแห้งครั้งที่ 1 --- กรัม

C = น้ำหนัก Drum ----- กรัม

$$\text{Slake Durability Index, \%}, I_{d(2)} = [(WF-C)/(B-C)] \times 100 \quad (4.9)$$

$I_{d(2)}$ = Slake Durability Index จากการทดสอบ รอบที่ 2 ----- %

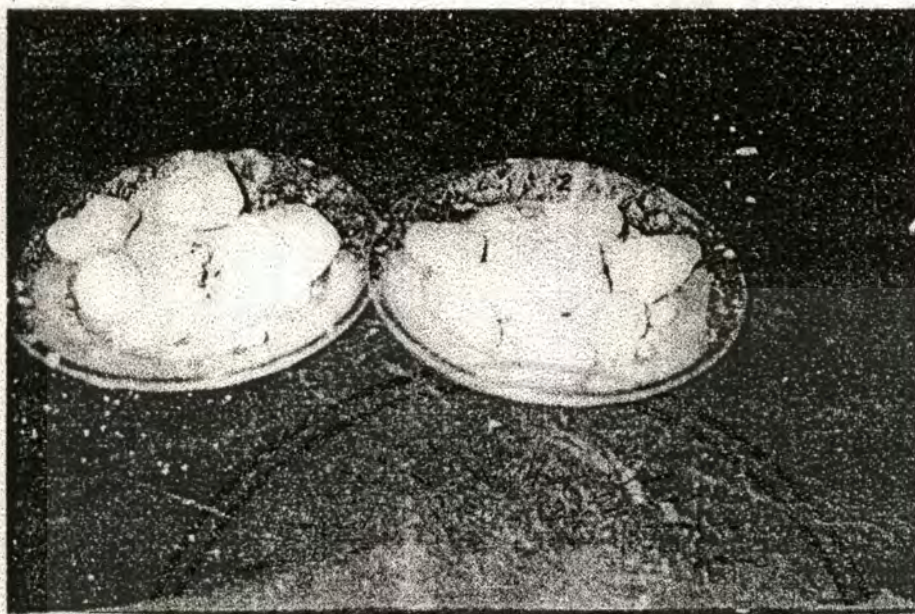
WF = น้ำหนัก Drum + ดินซีเมนต์แห้งครั้งสุดท้าย ----- กรัม



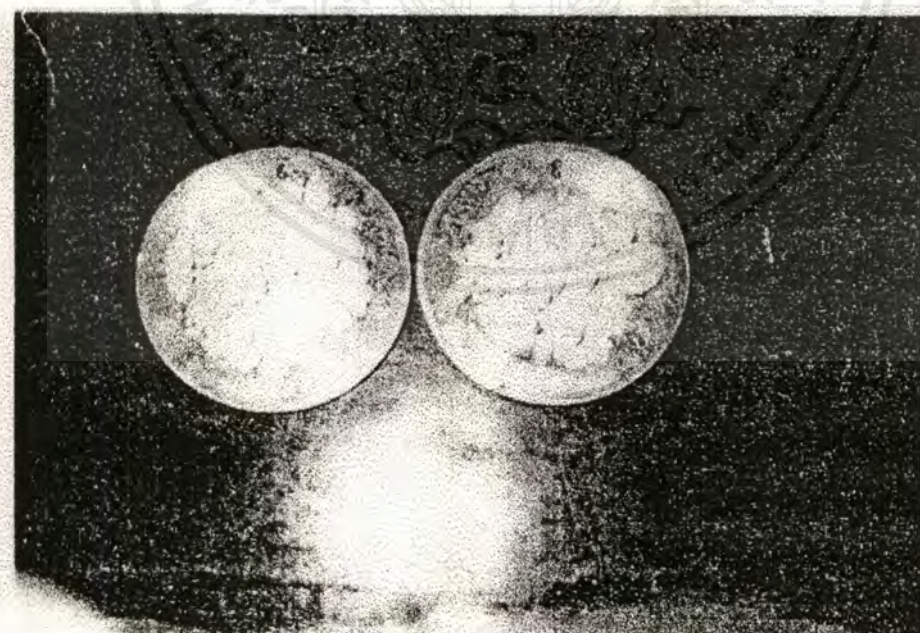
รูปที่ ๘10 เครื่องทดสอบ Slake Durability Test

จากการทดสอบ Slake durability Index (I_d) ครั้งนี้พบว่าค่า I_d ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 21 วันขึ้นไป มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 75-90 ของทุกอัตราส่วนผสม ซึ่งจำแนกตาม Franklin and Chandra (1972) ได้ว่าอยู่ในเกณฑ์สูง ถึงสูงมาก ซึ่งแสดงว่าดินซีเมนต์อัตราส่วนผสมนี้มีความทนทานดี ดังแสดงรูปตัวอย่างทดสอบรอบ 1 และรอบ 2 ไว้ในรูปที่ ๘11-๘12 ส่วนรูปความสัมพันธ์ระหว่าง Slake durability Index กับปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่ม ได้แสดงไว้ในรูปที่ ๘13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

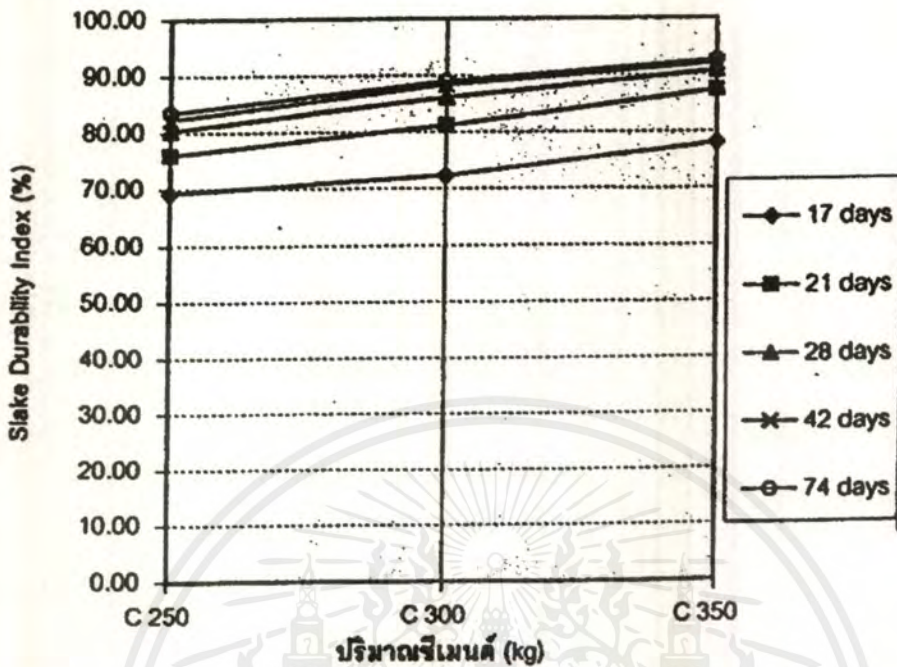


รูปที่ ๑11 ดินซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบ Slake Durability Test รอบที่ 1



รูปที่ ๑12 ดินซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบ Slake Durability Test รอบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑๓ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Slake Durability Index กับปริมาณซีเมนต์

3.) การวิเคราะห์หาแร่ธาตุในดินเหนียวและในดินซีเมนต์ จากการ

ทดสอบ X-Ray Diffraction พบว่าดินเหนียวเดิมมีแร่ Silicon Oxide (SiO_2) มากที่สุด แร่ Illite (I), Monmorillonite (M) และ Kaolinite (K) รองลงมาดังแสดงไว้ในรูปที่ ๑๔ เมื่อนำดินมาผสมกับปูนซีเมนต์และอายุการบ่มไม่มีผลต่อ SiO_2 , M, K แต่มีผลต่อปริมาณ Peak ของ Illite คือมีค่าประมาณ 520 ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 350 kg/m^3 อายุการบ่ม 21 วัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๑๕

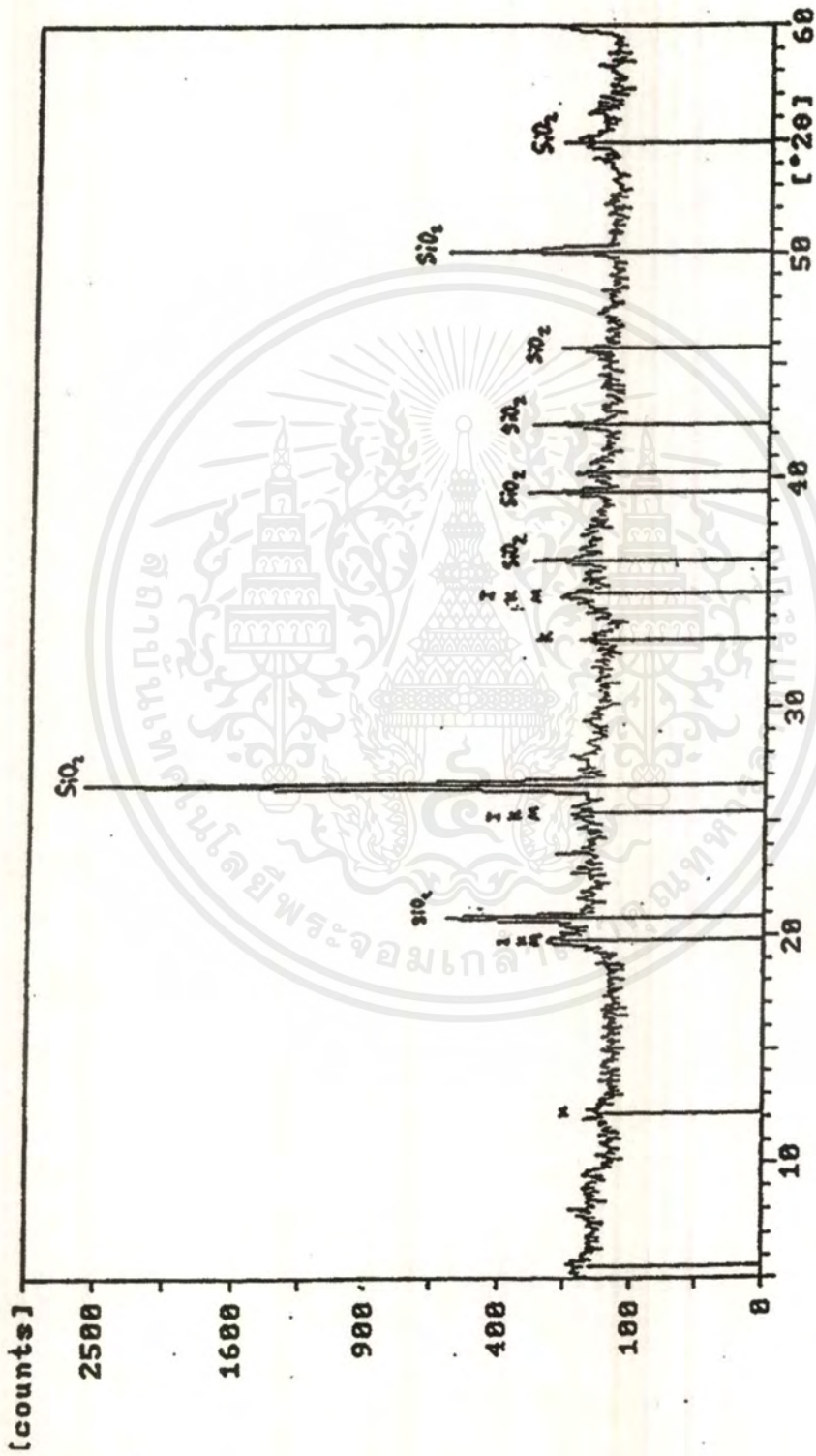
2. การศึกษาผลกระทบกับสิ่งเจือปนที่อาจมีในดินธรรมชาติ จากการศึกษาของนายทินกร กุ่มรินทร์ และนายปริญญา บุญส่ง นักศึกษาระดับปริญญาตรีของ KMUTT. ปีการศึกษา 2539 โดยมี รศ. พินิต ตั้งบุญเต็ม เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ทำโดยนำดินเหนียวกรุงเทพมหานครมาหาคุณสมบัติทางเคมีพบว่า ตัวอย่างที่นำมาศึกษามีค่า pH Value 7.2 มีค่า NaCl content เท่ากับร้อยละ 0.01 และมีค่า Organic matter ร้อยละ 7 แล้วนำดินนี้มาผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ 200 กิโลกรัมต่อดินเหนียวหนึ่งลูกบาศก์เมตร บ่มจนได้อายุ แล้วนำมาทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ผลดังตารางที่ ๑๑

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๘1 ค่าพารามิเตอร์ของดินธรรมชาติ ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 200 กก./ม³ ของดิน
เปียก

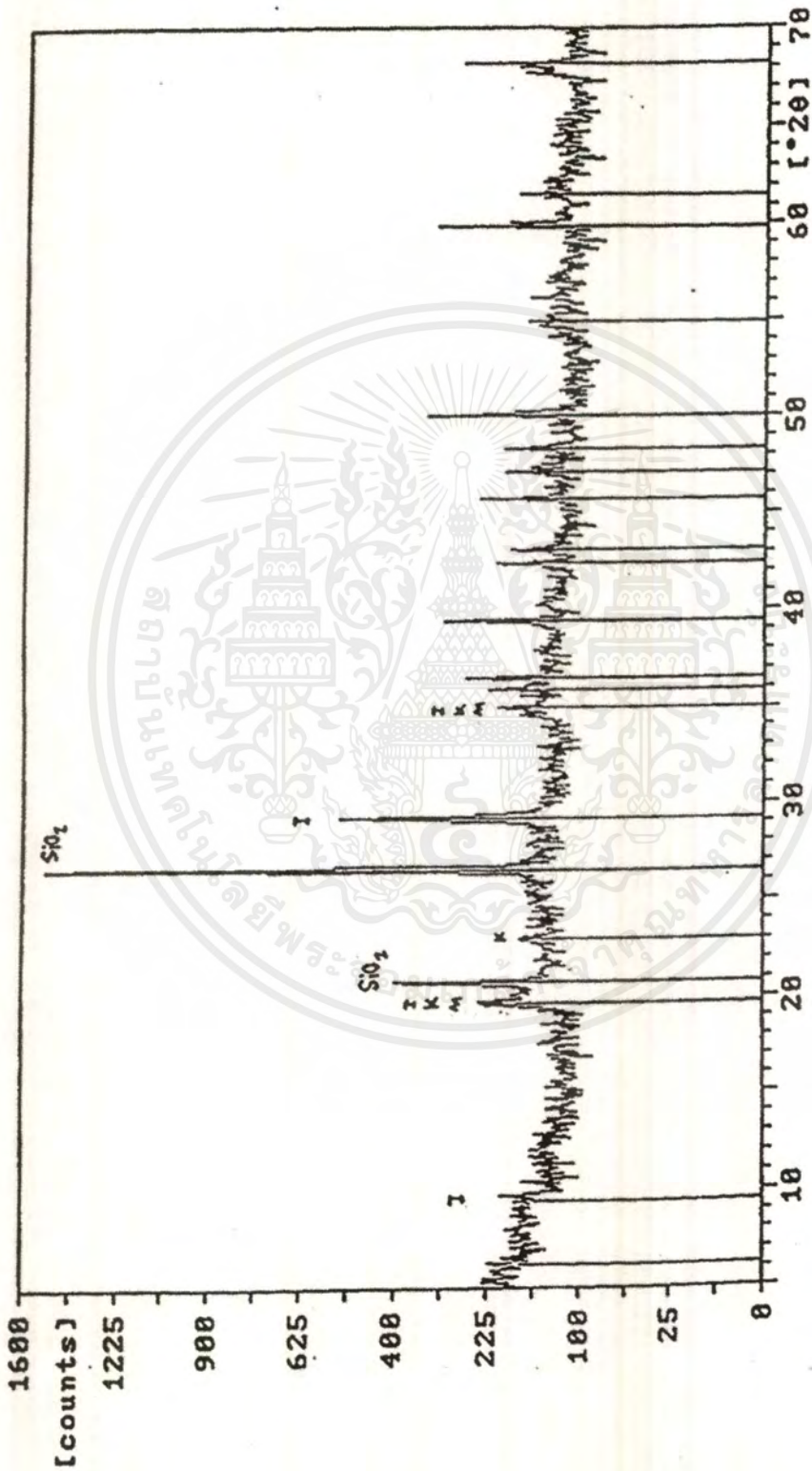
| ปริมาณสารตัวแปร | ระยะเวลาในการบ่ม (วัน) | γ T/m ³ | S_u T/m ² | E50 T/m ² | ω % |
|--------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------|
| ดินเหนียวธรรมชาติ | 3 | 1.63 | 18 | 5,500 | 87.0 |
| มีค่า pH = 7.2 | 7 | 1.64 | 28 | 7,800 | 83.3 |
| NaCl = 0.01% | 14 | 1.63 | 36 | 11,400 | 83.2 |
| Organic Cont. = 7% | 28 | 1.64 | 49 | 15,000 | 85.7 |
| | 60 | 1.62 | 70 | 24,000 | 85.8 |
| | 90 | 1.63 | 80 | 31,000 | 84.4 |

ขณะเดียวกันก็ทำดินให้มีค่า pH แปรผันจาก 5-9 โดยการเติม H_2SO_4 หรือ NaOH แล้ว
แต่กรณี ทำให้ดินให้มีค่า NaCl แปรผันจากร้อยละ 0.04 ถึง ร้อยละ 0.21 โดยเติม NaCl และทำให้
ดินมีค่าสารอินทรีย์แปรผันตั้งแต่ร้อยละ 8 ถึง ร้อยละ 14 โดยเติมปุ๋ยคอก แล้วนำดินที่เตรียมตัว
อย่างเหล่านี้ไปผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราเดียวกันกับดินธรรมชาติคือ 200 กิโลกรัม
ของปูนซีเมนต์ 1 ลบ.ม. ของดินเปียก จากการศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่าการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
มาผสมกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่เติม H_2SO_4 เพื่อให้เป็นกรดและเติม
NaOH เพื่อให้ดินด่าง คือปรับให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5 ถึง 9 และเติมสารละลาย NaCl เพื่อให้ดิน
มีค่าไซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 0.04 ถึง 0.21 นั้น ค่า Undrained Shear Strength มีแนวโน้มสูงกว่า
ดินธรรมชาติผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอายุการบ่มเดียวกัน แต่การใช้ปุ๋ยคอกเติมลงในดิน เพื่อ
ให้ดินมีค่า Organic matter ร้อยละ 8 ถึง 14 นั้น ทำให้ค่า Undrained shear strength มีค่าต่ำลง
กว่าดินธรรมชาติผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราและอายุการบ่มเดียวกันยิ่งปริมาณ Organic
matter สูงค่า Undrained shear strength ยิ่งต่ำ ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๘16-๘21



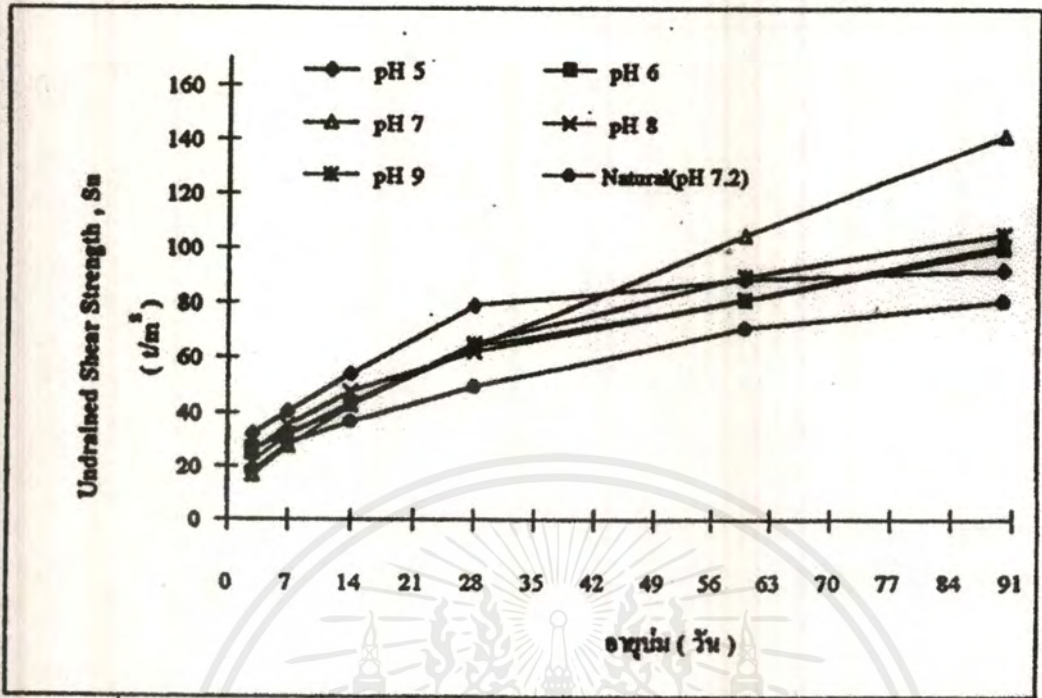
รูปที่ ๘14 กราฟผลการทดสอบหาแร่ธาตุในดินเดิม ด้วยเครื่อง X - Ray Diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

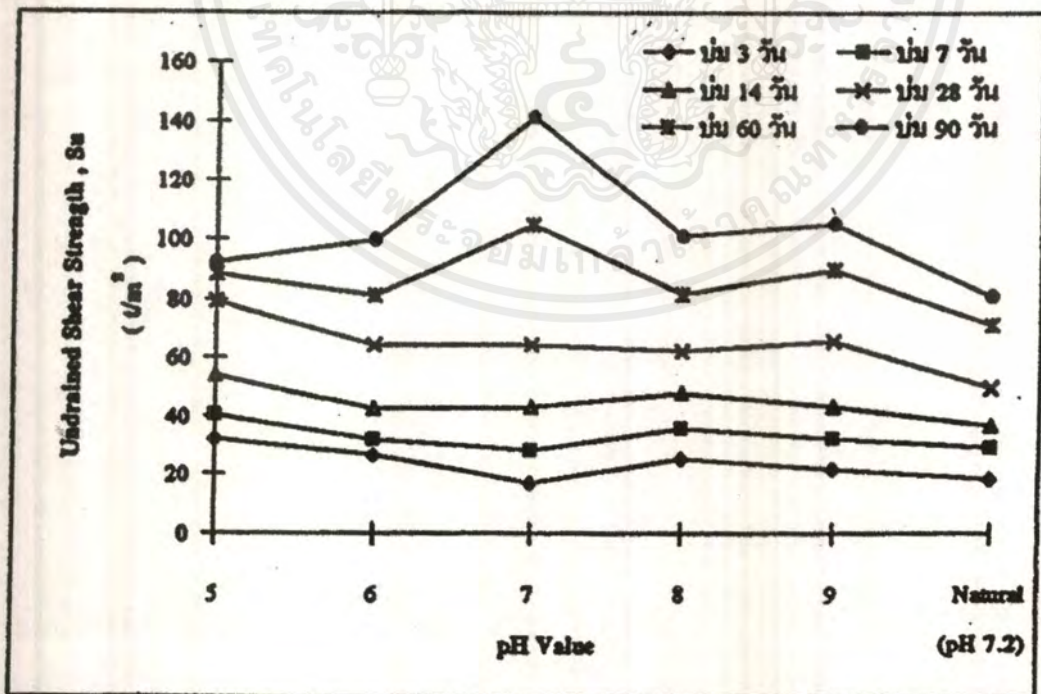


รูปที่ ๑๕ กราฟผลการทดสอบหาแร่ธาตุในดินซีเมนต์ C - 350 ที่อายุการบ่ม 21 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

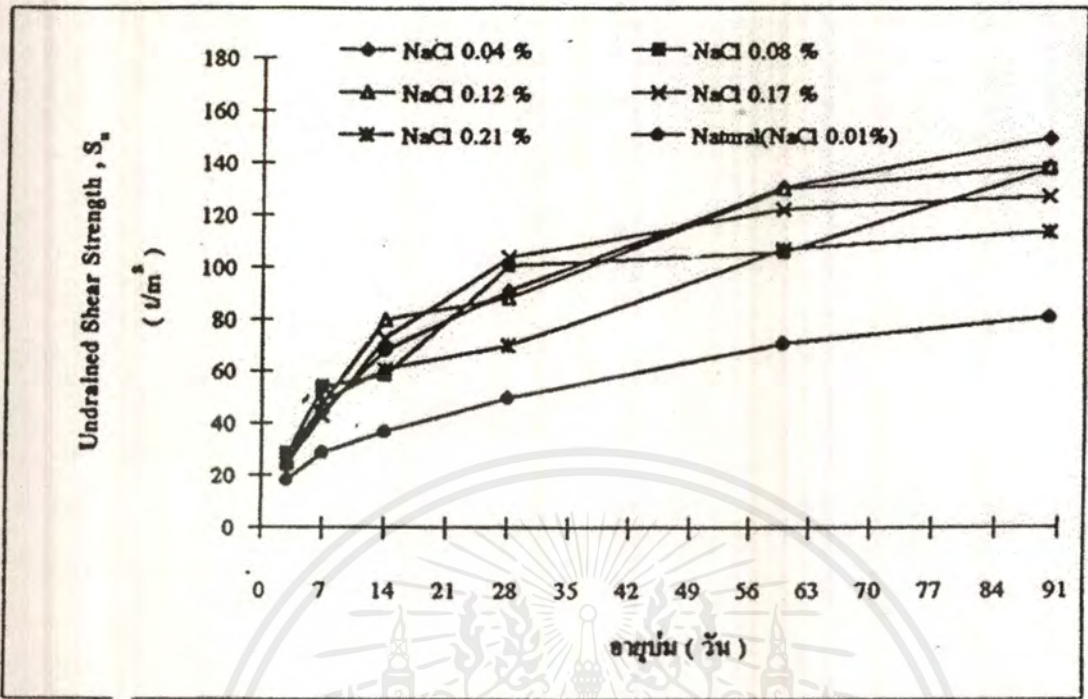


รูปที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่า Undrained Shear Strength เมื่อค่า pH Value เท่ากับ 5, 6, 7, 8 และ 9

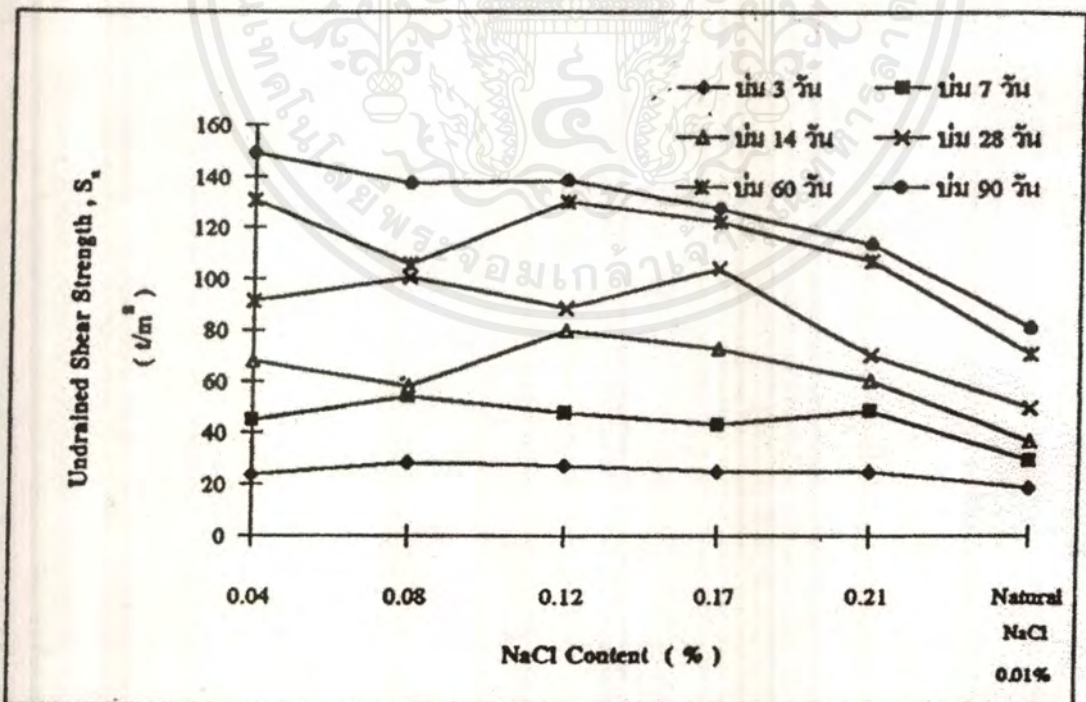


รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH Value กับค่า Undrained Shear Strength ที่อายุการบ่มต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

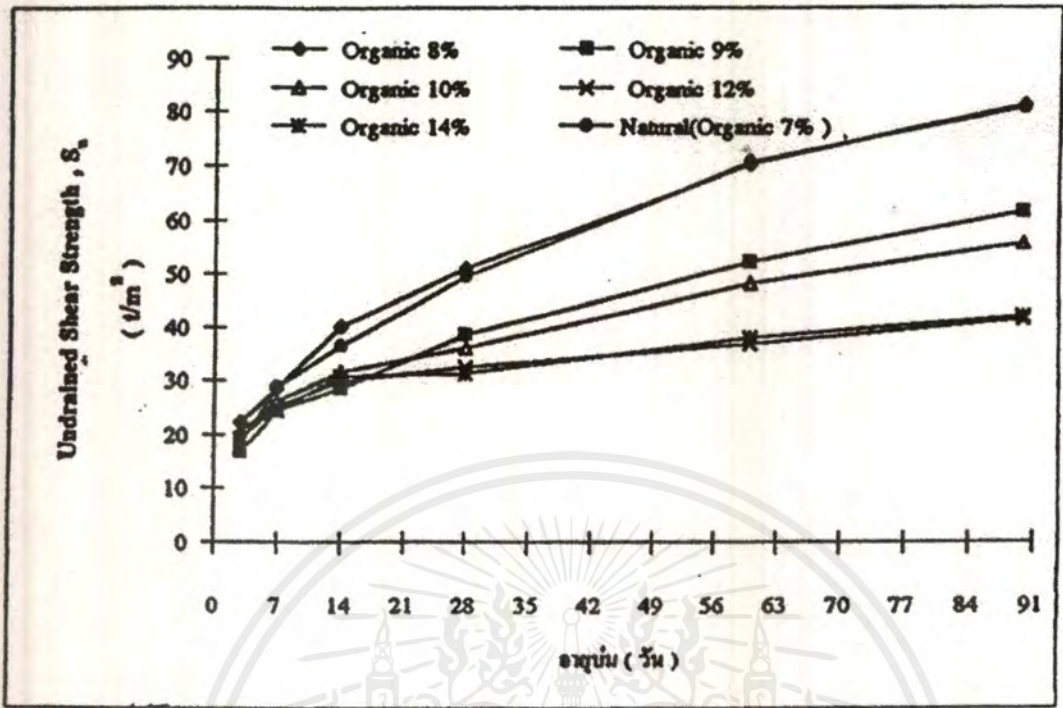


รูปที่ ๑๘ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่า Undrained Shear Strength เมื่อปริมาณโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เท่ากับ 0.04, 0.08, 0.12, 0.17 และ 0.21%

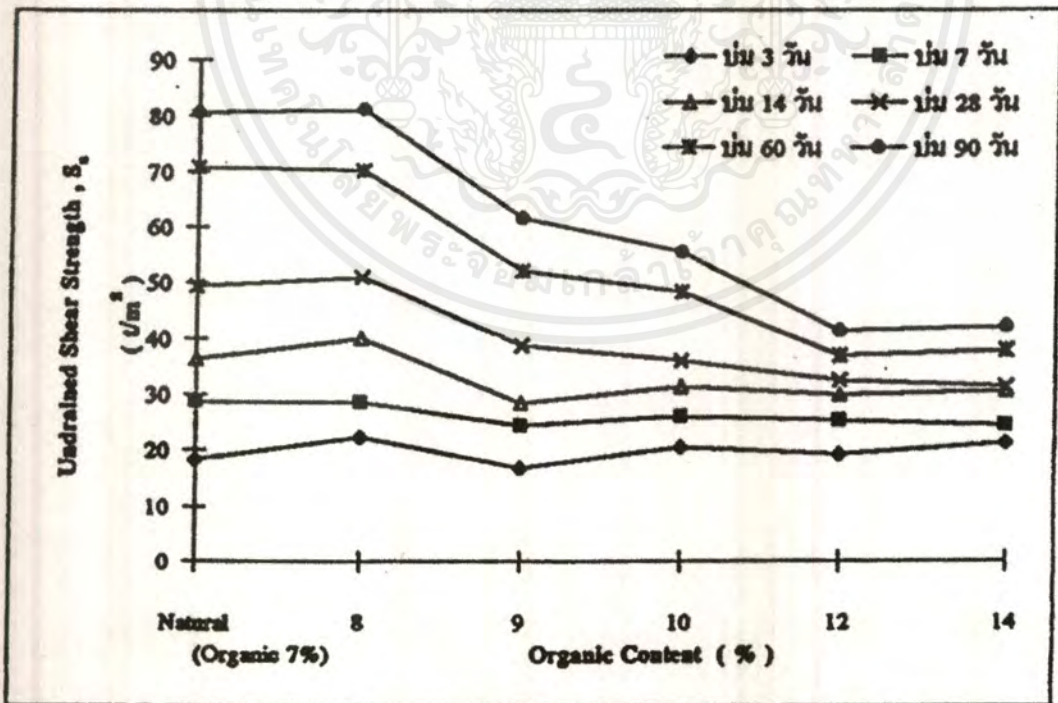


รูปที่ ๑๙ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กับค่า Undrained Shear Strength ที่อายุการบ่มต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒๐ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับค่า Undrained Shear Strength เมื่อปริมาณ Organic เท่ากับ 8,9,10,12 และ 14%



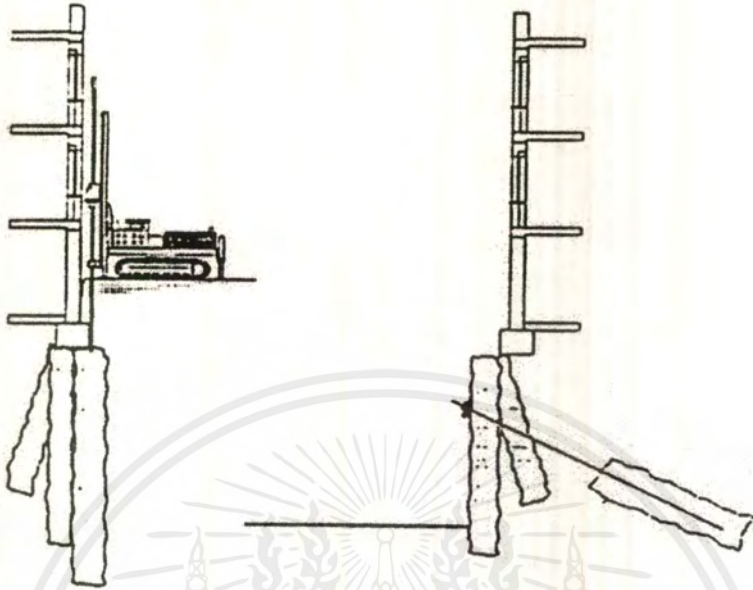
รูปที่ ๒๑ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Organic กับค่า Undrained Shear Strength ที่อายุการบ่มต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

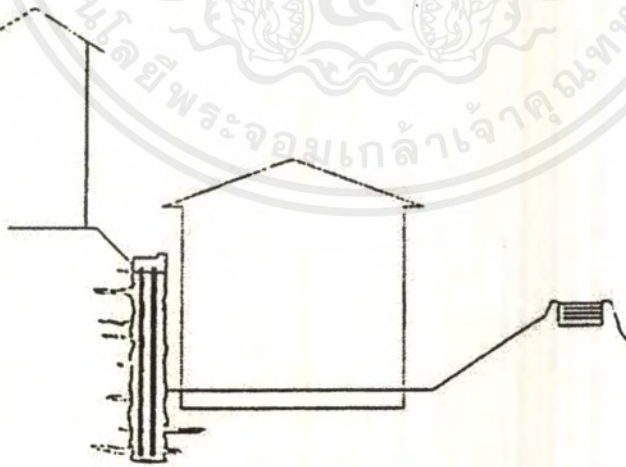
ข) ภาพตัวอย่างการนำวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดย Jet Grouting ไปใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

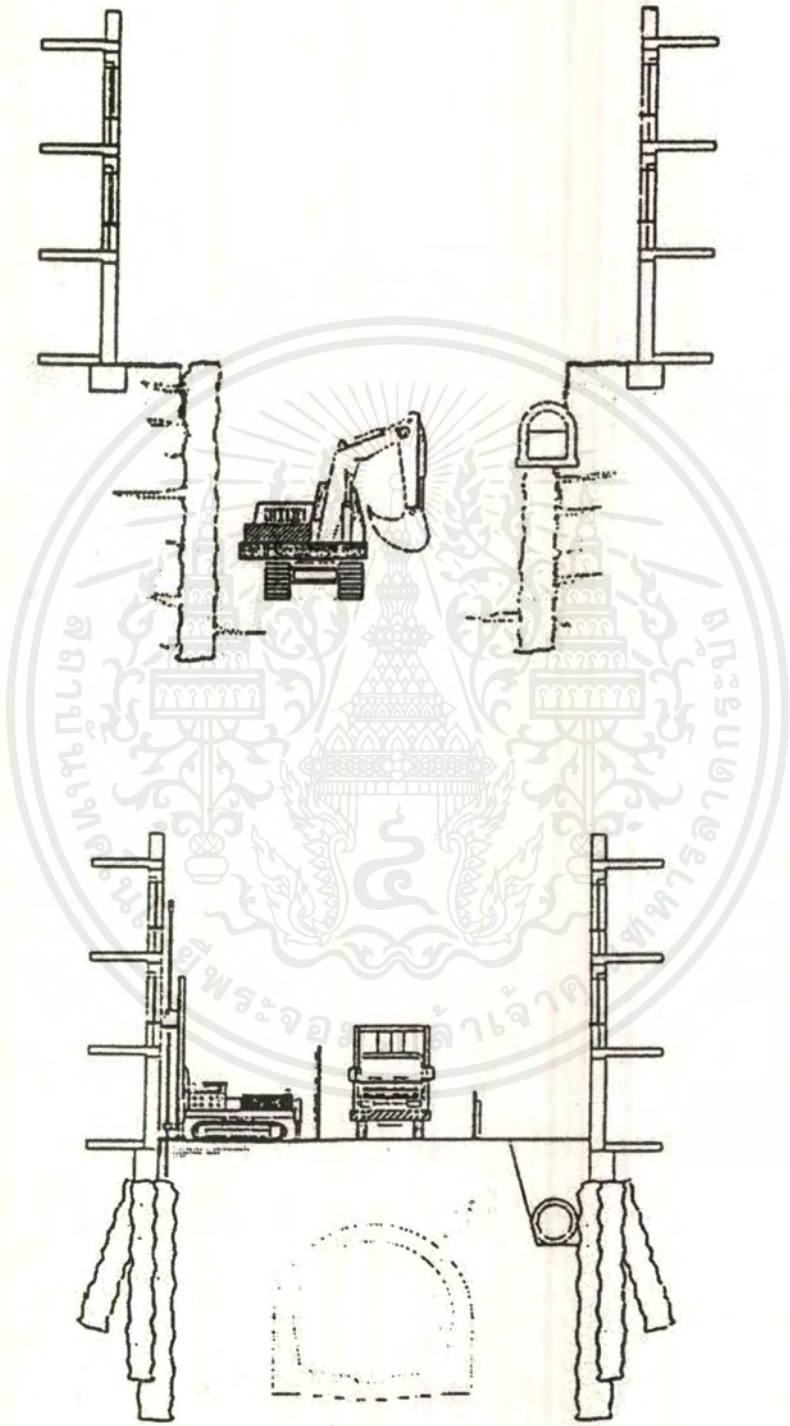


รูปที่ ผ22 เสริมความมั่นคงของฐานรากอาคารเดิมในงานชุดดินลึกประชิดอาคารข้างเคียง



รูปที่ ผ23 ทำเป็นกำแพงป้องกันดินพังทลายโดยเสริมเหล็กในเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานชุดดินก่อสร้างอาคารซึ่งอยู่ประชิดอาคารเดิมหลังบน

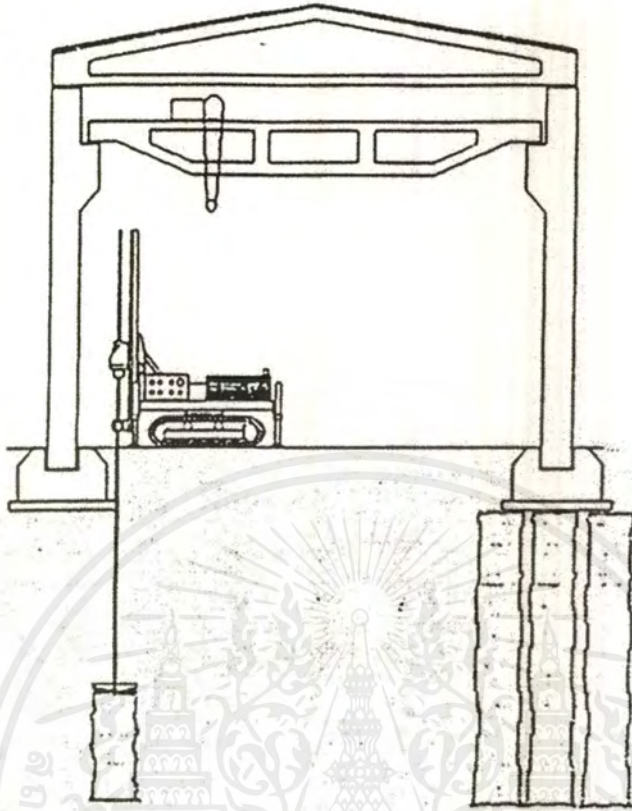
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



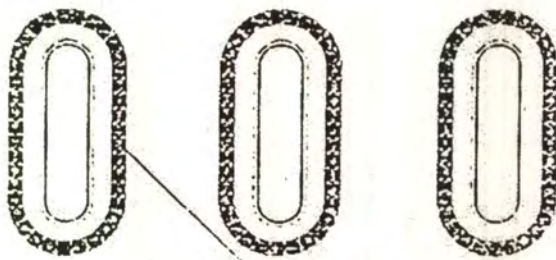
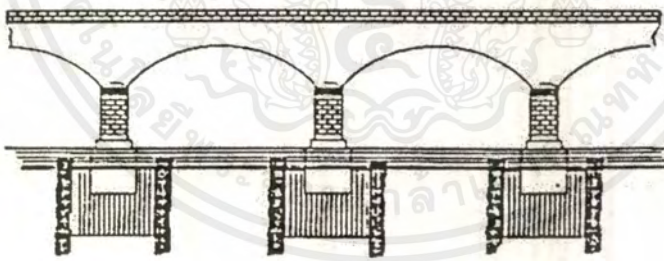
รูปที่ ผ24 ฉีดน้ำปูนสร้างเป็นกำแพงกันดินและเสริมความมั่นคงของฐานรากเพื่อป้องกันความเสถียร

หายของอาคารเดิมในงานขุดดินสร้างอุโมงค์สำหรับทางรถไฟใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



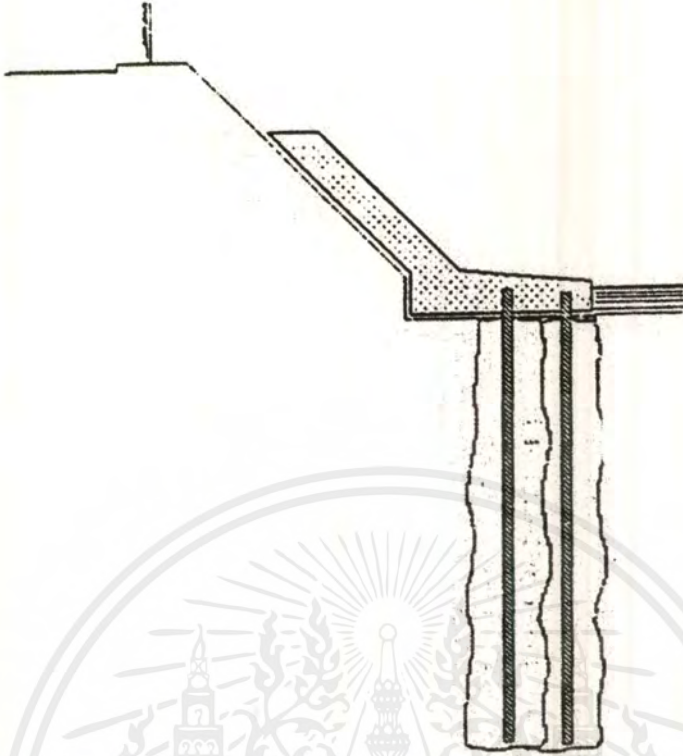
รูปที่ ๘๒๕ ฉีดน้ำปูนปรับปรุงดินใต้ฐานรากเพื่อเสริมความแข็งแรงของอาคาร



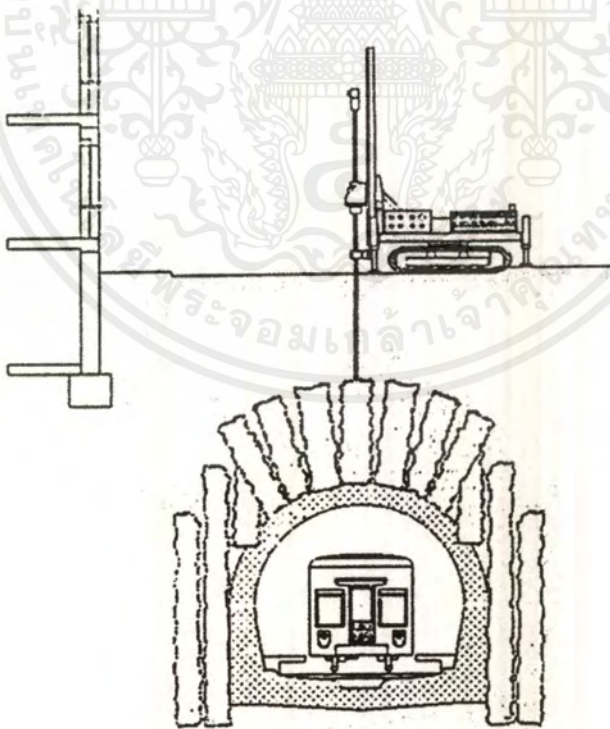
COLONNE JETTING

รูปที่ ๘๒๖ ทำแนวกำแพงล้อมรอบฐานรากของสะพานข้ามแม่น้ำ เพื่อป้องกันกรัดเซาะของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

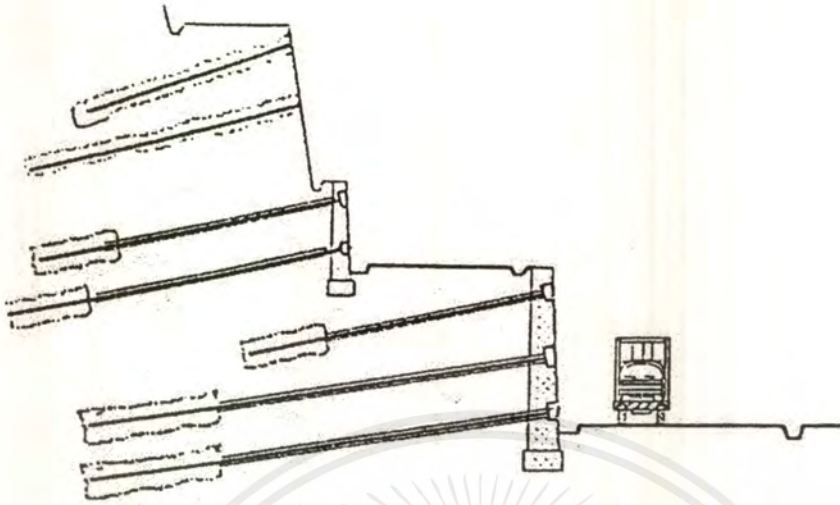


รูปที่ ๘๗ ฉีดน้ำปูนทำผนังกันน้ำและต้านแรงกัดเซาะของน้ำและต้านแรงกัดเซาะ

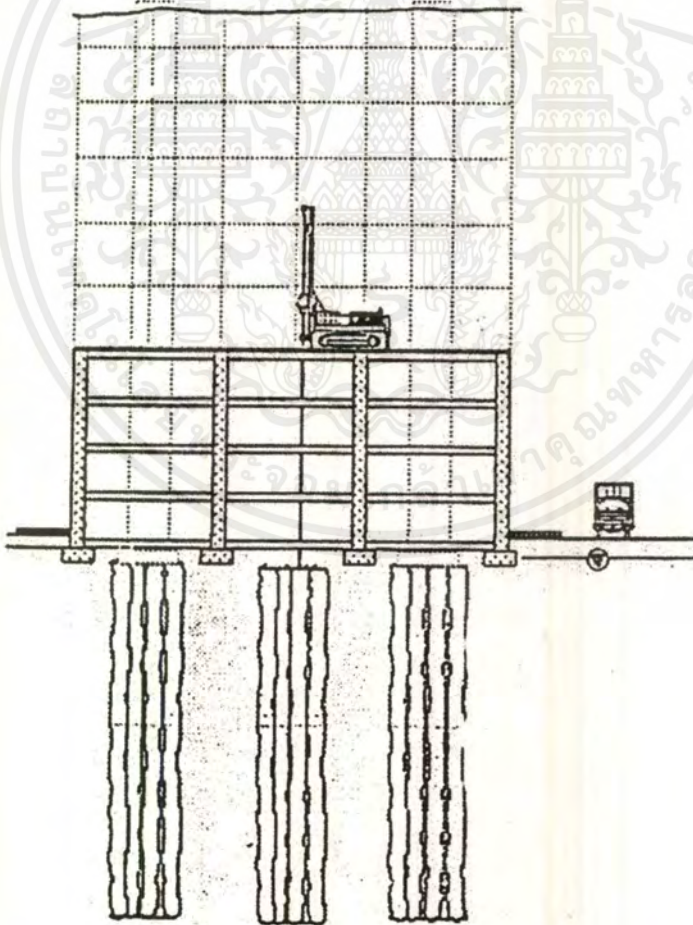


รูปที่ ๘๘ ปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้ดินรอบอุโมงค์ป้องกันไม่ให้ดินยุบตัวลงมา
ในขณะที่ขุดและสามารถทำผนังอุโมงค์ถาวรที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

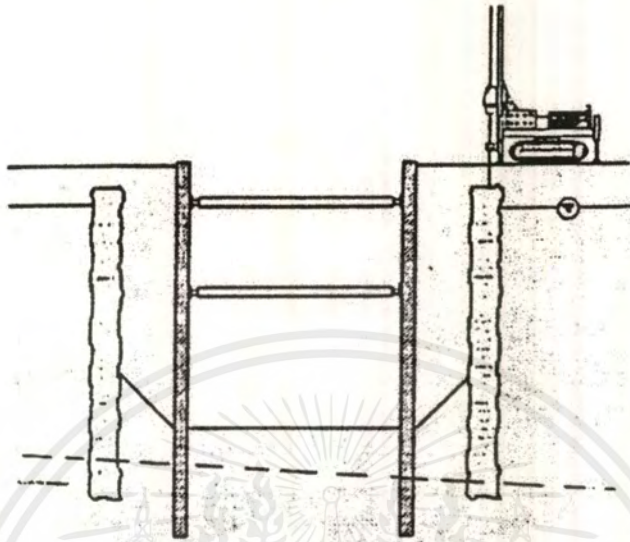


รูปที่ ๘๒๙ ทำเป็นสมอยึดรั้งกำแพงกันดินตามไหล่เขาดินตัดที่มีความชันมาก

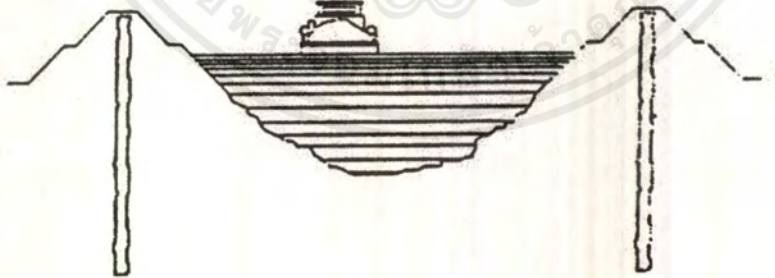


รูปที่ ๘๓๐ เสริมความแข็งแรงให้ฐานรากอาคารเก่าที่มีการทรุดตัวสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

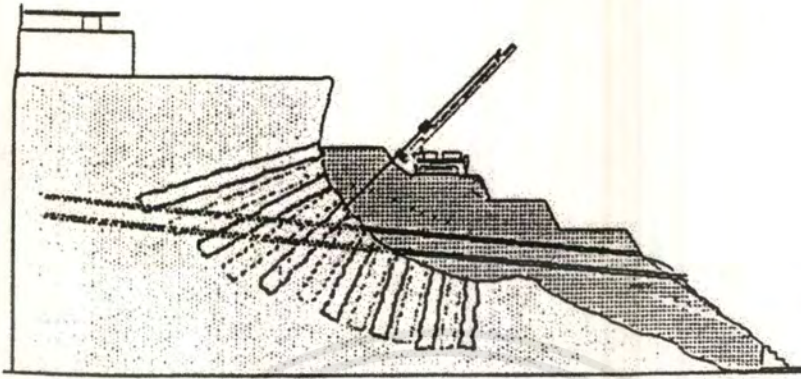


รูปที่ ผ31 ขีดน้ำปูนสร้างผนังกันน้ำโดยรอบบริเวณที่จะขุดดินในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงและชั้นดินมีก้อนวัสดุขนาดใหญ่ใช้ระบบเข็มเหล็กพืดไม่ได้

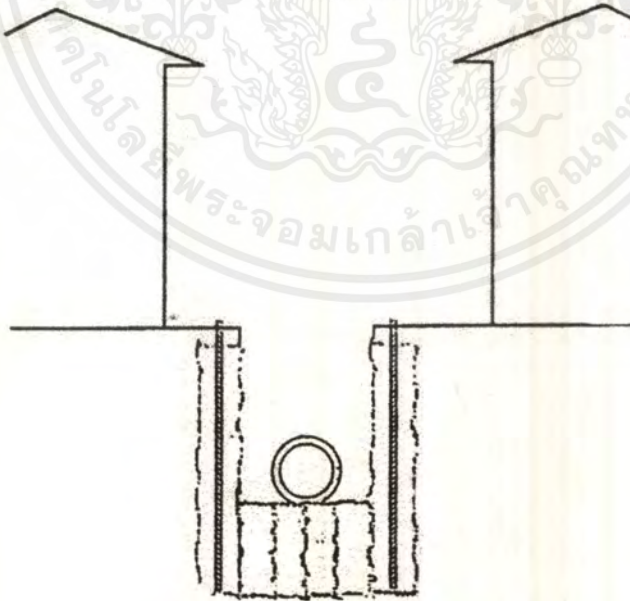


รูปที่ ผ32 ทำเป็นแนวกำแพงป้องกันการรั่วซึมผ่านคันดินของคลองส่งน้ำและอ่างเก็บน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๘33 ทำเป็นเสาเข็มเพื่อเสริมความแข็งแรงให้ดินและเพิ่มเสถียรภาพให้ไหล่ดินตัด



รูปที่ ๘34 สร้างกำแพงกันดินพังทลายในขณะที่ขุดร่องวางท่อน้ำในบริเวณที่ค้ำแคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้