รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

คู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting : กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม

Work Manual of Ground Improvement by Jet Grouting: Case study of MRT Orange Line Project

นายกฤษฎา เทพบุตร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

คู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting : กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม

Work Manual of Ground Improvement by Jet Grouting: Case study of MRT Orange Line Project

นายกฤษฎา เทพบุตร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงงานสหกิจศึกษา คู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting : กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม

ชื่อ–สกุล นักศึกษา นายกฤษฎา เทพบุตร

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ **ภาควิชา** วิศวกรรมโยธา

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ดร.ศลิษา ไชยพุทธ

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายไพศาล ติ่งพัฒนะ

สถานประกอบการ บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล็อปเมนต์ จำกัด (มหาชน)

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในชั้นดินกรุงเทพ เนื่องจากในหน่วยงานฝ่ายขุดเจาะอุโมงค์ได้นำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet- Grouting มาใช้เพื่อเป็นแนวป้องกันดินพังน้ำใต้ดินในบริเวณหน้ากำแพงกันดินของแต่ละสถานี และเพื่อเป็นบริเวณสำหรับการเปลี่ยนฟันหัวเจาะ ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพนี้ถูกทำในช่วงของการเตรียมงานก่อนการขุดเจาะอุโมงค์ ด้วยเป็นนโยบายของหน่วยงานเพื่อให้เป็นกรณีศึกษาของโครงการและเพื่อให้วิศวกรให้มีความรู้ ความสามารถ และเข้าใจในการทำงานได้ดีขึ้นจึงทำให้เกิดโครงงานเล่มนี้เกิดขึ้น โดยเนื้อหาจะครอบคลุมไปถึงการทดสอบเพื่อหาขั้นตอนการทำงานที่จำเป็นสำหรับในชั้นดินกรุงเทพ (ชั้นดินเหนียวอ่อน, ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่1 และชั้นทราย) และเพื่อหาค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการทำเสาดิน-ซีเมนต์ที่จะนำไปสู่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานจริง ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จะอยู่การทดลองภาคสนาม (Field Trials) เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานจริงแล้ว ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการทำงานจริง ต่อมาในการทำงานจริงมีขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอนคือ การเจาะ การ Pre-cutting และการเกร๊าท์ และสภาพหน้างานที่ทำให้ระยะทางจากปั๊มแรงดันสูงและเครื่องเจาะไกลขึ้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ใช้ทำเสาดิน-ซีเมนต์ จึงจำเป็นปรับเปลี่ยนค่าอัตราการยกก้านขึ้น (Uplift rate) เพื่อรักษาพลังงาน นอกจากนี้เนื้อหาในคู่มือยังมีการรวบรวมงานประยุกต์ต่างๆเพื่อเป็นประโยชน์สูงสุดสำหรับโครงการก่อสร้างนี้ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: Jet Grouting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cooperative Title: Work Manual of Ground Improvement by Jet Grouting: Case study of MRT Orange Line Project

Student intern name: Mr.Kisada Tepabut

Faculty: Engineering **Department:** Civil Engineering

Advisor name: Dr.Salisa Chaiyaput

Mentor name: Mr. Paisan Tingpatana

Company: ITALIAN-THAI DEVELOPMENT PUBLIC COMPANY

ABSTRACT

This research is a study of soil quality improvement operations by Jet Grouting in the Bangkok soil. Because the tunnel department has adopted soil quality improvement to using Jet-Grouting method. For the tunnel drilling department has adopted the soil quality improvement using Jet-Grouting method to be used as a protection against soil and ground water erosion of the retaining wall area of each station and using the Jet Grouting to be the area for change TBM Cutter bit, this quality improvement will be made during the pre-tunnel preparation work. The content of work manual will cover the tests for find the necessary work procedures for the Bangkok soil (Bangkok soft clay, the first stiff clay and Bangkok aquifer sand), for finding the energy to use for Jet grouted column that will lead to the Jet grouting parameters for the actual work which these steps will be in field trials, when can get the Jet grouting parameters already, the all of Jet grouting parameters was used by 3 steps which is the drilling, the pre-cutting, and the grouting. However, due to the condition of the work site that make the distance of the pressure pump and the drilling machine far away, so that is the cause to lose the energy to make Jet grouted column, that why we must change the rate of uplift rate for save the energy. In addition, the content in the manual also includes various to apply to be the most beneficial for this construction project in the future.

Keywords: Jet Grouting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานสหกิจศึกษาฉบับนี้ ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.ศลิษา ไชยพุทธ อาจารย์ที่ปรึกษาใน โครงการสหกิจศึกษาซึ่งมอบโอกาสในการเรียนรู้ ให้คำแนะนำเป็นอย่างดี อีกทั้งบริษัท อิตา- เลียนไทย ดีเวล็อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) หน่วยธุรกิจระบบขนส่งมวลชน โครงการรถไฟฟ้าสายสีส้มที่มอบโอกาสให้ผู้วิจัยได้เรียนรู้ และสั่งสมประสบการณ์ในสายงานที่ได้ตั้งใจไว้ได้อย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ นายสัญญา ถิรขจรวงศ์ ผู้จัดการโครงการฝ่ายอุโมงค์ที่มอบโอกาสให้ผู้วิจัยได้ไฝ่หาความรู้ และประสบการณ์ในการทำงานในงานอุโมงค์ ตลอดการฝึกงานในโครงการสหกิจศึกษาทางผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง ในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ นายไพศาล ติ่งพัฒนะ ผู้นิเทศงาน และนายทีปต์ วนชยางกูร ผู้เป็นพี่เลี้ยงที่ให้ความรู้ ความสามารถ และประสบการณ์ในด้านการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting และดูแลตลอดการฝึกงานใน โครงการสหกิจศึกษา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำกำลังใจในการดำเนินการ และองค์ประกอบต่างๆ ที่ทำให้ โครงงานสหกิจศึกษาฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ นายศุภชัย โอฬารกิจเรืองชัย นายสมยศ หอมจันทร์ นายปิยะพงษ์ นันตา นายศราวุธ บุญเต็ม และนายอนวรรษ ขัดวิลาส ผู้ให้ความรู้ ความสามารถ และประสบการณ์การทำงานในงานอุโมงค์ ตลอดการฝึกงานในโครงการสหกิจศึกษา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณป้า คุณลุง พี่สาว น้องสาว และญาติพี่น้องทุกท่านที่คอยสนับสนุนและคอยเป็น กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำ ปรึกษาและคอยช่วยเหลือดูแลกัน จนสามารถทำโครงงานสหกิจศึกษาสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อทุกท่านที่ได้กล่าวนามข้างต้น และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มิได้กล่าวนามใน ข้างต้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านข้อมูล และให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยขอมอบคุณงามความดีอันใดที่จะเกิดจากโครงงานสหกิจศึกษาฉบับนี้ให้แก่ทุกๆ ท่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ขั้นตอนการทำงาน	5
2.2 ระบบที่ใช้ในการเกร๊าท์	10
2.2.1 Single fluid system	12
2.2.2 Double fluid system	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 Triple fluid system 13

2.3 การซ้อนทับของเสาดิน-ซีเมนต์ 13

2.4 การเสริมกำลังของเสาดิน-ซีเมนต์ 16

2.5 ส่วนผสมของสารเกร๊าท์และดินส่วนเกิน 16

2.5.1 ส่วนผสมของสารเกร๊าท์ 16

2.5.2 ดินส่วนเกิน 17

2.6 Jet Grouting Plant 19

2.6.1 เครื่องมือพื้นฐาน 19

2.6.2 เครื่องผสม 20

2.6.3 ปั๊มและคอมเพรสเซอร์ 20

2.6.4 เครื่องเจาะ 20

2.7 ค่าพารามิเตอร์ในการทำการปรับปรุงคุณภาพดิน 22

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 25

3.2 การวางกรอบแนวความคิด กำหนดแนวทางในการดำเนินงานวิจัย 28

3.3 ศึกษาในภาคสนามเพื่อรวบรวมข้อมูลและปัญหาต่างๆ 28

3.4 การจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กรณีศึกษาในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม 29

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 การทดลองภาคสนาม (Field Trials) 30

4.1.1 วัตถุประสงค์ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การควบคุม 30

4.1.3 การทดลองภาคสนามในโครงการ 31

4.1.4 ขั้นตอนการทำการทดลองภาคสนาม 34

4.1.5 ผลที่ได้จากการทำงาน Jet Grouting ในการทดลองภาคสนาม 37

4.1.6 การทดสอบในภาคสนามและกการทดสอบในห้องปฏิบัติการ 41

4.1.7 ข้อสรุปจาการทดลองภาคสนาม 46

4.2 การทำงานจริงในภาคสนาม 49

4.2.1 ระบบที่ใช้ในการทำ Jet Grouting ในโครงการ 49

4.2.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับในการทำงาน 49

4.2.3 วัสดุที่ใช้ในการทำเสาดิน-ซีเมนต์ 53

4.2.4 ขั้นตอนการทำงาน Jet Grouting ในภาคสนาม 55

4.2.5 การทดสอบเพื่อตรวจสอบผลจาการปรับปรุงคุณภาพดิน 66

4.2.6 การคำนวณปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการทำงานในหน้างาน 67

4.3 การประยุกต์ 71

4.3.1 องค์ประกอบและโครงสร้าง 71

4.3.2 โครงสร้างฐานราก 73

4.3.3 โครงสร้างป้องกันดิน 81

4.3.4 กำแพงกันน้ำ 86

4.3.5 อุโมงค์ 91

4.3.6 การใช้งานอื่นๆ 95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย 97

5.2 ข้อเสนอแนะ 99

เอกสารอ้างอิง 100

ประวัติผู้เขียน 101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน 23

ตาราง 2.2 ค่าพาริเตอร์ที่ได้จากการพิสูจน์ 23

ตาราง 2.3 ค่าพารามิเตอร์ทั่วไปที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน 24

ตาราง 4.1 ตารางระบุขนาดของเสาและการใช้ Pre-cutting สำหรับที่ใช้ในการทดลองภาคสนาม 32

ตาราง 4.2 ตารางระบุค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองภาคสนาม 36

ตาราง 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำงานที่มาจากผลการทดลองภาคสนาม 48

ตาราง 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบ Double (air) fluid system ที่ใช้โครงการ 61

ตาราง 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบ Single-fluid system ที่ใช้โครงการ 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 วิธีการยกก้าน	6
รูป 2.2 รูปร่างของเสาดิน-ซีเมนต์	8
รูป 2.3 ตัวอย่างเสารูปร่าง Candy shape	9
รูป 2.4 ระบบของงาน Jet Grouting	11
รูป 2.5 Schematic drawings of the monitors	11
รูป 2.6 ภาพตัวอย่างของอุปกรณ์ของระบบ double fluids system	12
รูป 2.7 การซ้อนทับของเสาดิน-ซีเมนต์	14
รูป 2.8 ตัวอย่างของลำดับการทำเสาดิน-ซีเมนต์แบบ fresh in hard ของกลุ่มเสาที่ซ้อนทับกัน	15
รูป 2.9 รูปลักษณะของเสาดิน-ซีเมนต์ของงานเพดานอุโมงค์	15
รูป 2.10 ดินส่วนเกินหรือ spoil	18
รูป 2.11 Jet Grouting Plant ของระบบ single fluid system	19
รูป 2.12 เครื่องเจาะ (Drilling and grouting rigs)	21
รูป 3.1 หนังสือ Jet Grouting Technology, Design and Control	26
รูป 3.2 บทความเชิงวิชาการ Ground improvement by means of jet-grouting ของ University of Parmar	27
รูป 3.3 หนังสือ Execution of special geotechnical works —Jet grouting จาก BSI British standards – BS EN 12716-2001	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 3.4 เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการคู่มือการก่อสร้างและแนว 28
ทางแก้ไขปัญหาการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์: กรณี
ศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ
จากศูนย์วิจัย และพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก
ภาควิชาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รูป 4.1 การยกตัวของดินที่เกิดจากการ Pre-cutting แบบยกก้านขึ้น 38

รูป 4.2 การยกตัวของดินที่เกิดจากการเกร๊าท์โดยไม่มีการ Pre-cutting 39

รูป 4.3 การขุดเปิดหน้าดินเพื่อตรวจสอบด้วยสายตาของเสาในกลุ่ม A 40

รูป 4.4 ผลจากการขุดเปิดหน้าดินเพื่อตรวจสอบขนาดเสาในกลุ่ม B, C และD 40

รูป 4.5 เครื่องจักรที่ใช้ในการ Coring 41

รูป 4.6 ชิ้นตัวอย่างที่ได้มาจากการ Coring 42

รูป 4.7 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ Unconfined compressive strength 42

รูป 4.8 การทดสอบ Standard Penetration Test 44

รูป 4.9 การทดสอบ in-situ Lefranc water test 46

รูป 4.10 เครื่องเจาะ SOILMEC SM-14 50

รูป 4.11 อุปกรณ์การบันทึกค่าพารามิเตอร์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ 51
สำหรับใช้ในขั้นตอนการเจาะและการเกร๊าท์ JEAN LUTZ LT3

รูป 4.12 Computerize magnetic bi-axial inclinometer and 51
recorder JEAN LUTZ TIGOR

รูป 4.13 องค์ประกอบ Automatic grout mixing plant 52

รูป 4.14 ปั๊มแรงดันสูง (high-pressure pump) 52

รูป 4.15 ตู้อัดอากาศ (Air compressor) 53

รูป 4.16 ชุดอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติทางกลของสารเกร๊าท์ 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.17 การทดสอบสารเกร๊าท์ 54

รูป 4.18 การสกัดพื้นคอนกรีตเพื่อเตรียมพื้นที่การทำงาน 55

รูป 4.19 ถอนงานระบบที่อยู่ใต้ดินบริเวณทำงาน 56

รูป 4.20 การวางแผ่นเหล็กเพื่อตั้งเครื่องจักร 56

รูป 4.21 การใช้เชือกที่แบ่งระยะเพื่อหาตำแหน่งหลุมเจาะ 57

รูป 4.22 การเข้าตำแหน่งตรงหลุมเจาะ 58

รูป 4.23 การตรวจสอบความดิ่งของก้านเจาะ 58

รูป 4.24 TIGOR 69

รูป 4.25 ตัวอย่างกราฟที่แสดงผลจาก TIGOR 60

รูป 4.26 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ในขั้นตอน Drilling 63

รูป 4.27ตัวอย่างกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์จากการทำงานในขั้นตอน Pre-cutting 64

รูป 4.28 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์จากการทำงานในขั้นตอนการเกร๊าท์ 65

รูป 4.29 ชิ้นส่วนโครงสร้าง Jet Grouting ลักษณะ 2-3 มิติ 72

รูป 4.30 ฐานรากที่ได้จากการทำ Jet Grouting 75

รูป 4.31 ลำดับขั้นตอนการทำฐานรากด้วย Jet-grouted block 76

รูป 4.32 ลักษณะโครงสร้างปล่องที่ทำจากเสาดิน-ซีเมนต์ด้วยวิธี Jet Grouting 76

รูป 4.33 การเสริมกำลังรับน้ำหนักของฐานรากด้วยเสาดิน-ซีเมนต์แบบเดี่ยว 78

รูป 4.34 การแก้ปัญหาฐานรากด้วยวิธี Jet Grouting โดยมีเสาดิน-ซีเมนต์ ทำหน้าที่ค้ำยันฐานราก (underpinning) 79

รูป 4.35 การปรับปรุงคุณภาพดินของอาคารที่มีอยู่แล้วด้วยการ Jet Grouting 80

รูป 4.36 ตัวอย่างโครงสร้างรองรับการขุดเจาะปล่องวิธีการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยการทำ Jet Grouting 8 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.37 โครงสร้างกันดินที่ทำจากการ Jet Grouting 84

รูป 4.38 ตัวอย่างโครงสร้างกำแพงกันดินแบบ“Inverted V” 85

รูป 4.39 ตัวอย่างโครงสร้างกำแพงกันดินแบบมีสมอยึดรั้ง 85

รูป 4.40 การวางตัวของเสาดิน-ซีมนต์ หรือแผ่นดิน-ซีเมนต์ (Jet-grouted panels) ในโครงสร้างกำแพงกันน้ำ 86

รูป 4.41 รูปตัดกำแพงกันน้ำที่ทำจากการ Jet Grouting 88

รูป 4.42 ตัวอย่างการแก้ปัญหาการรั่วไหลและการแก้ปัญหาชิ้นส่วนคอนกรีตที่มีความบกพร่อง 89

รูป 4.43 ตัวอย่างงาน Jet Grouting ที่ใช้แก้ปัญหาการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน 90

รูป 4.44 Bottom plug ที่ทำจากการ Jet Grouting 90

รูป 4.45 ระบบค้ำยันอุโมงค์ที่สร้างจากการทำ Jet Grouting 91

รูป 4.46 รูปแบบแปลน Canopy Technique 92

รูป 4.47 ลำดับการทำอุโมงค์ด้วยวิธี Canopy Technique 94

รูป 4.48 รูปแบบการวิบัติทางกล 95

รูป 4.49 ตัวอย่างงานประยุกต์ประเภทอื่นๆ 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เมื่องานวิศวกรรมโยธาต้องการการปรับปรุงดินเพื่อสร้างโครงสร้างใหม่หรือเพื่อฟื้นฟูสิ่งที่มีอยู่เดิมนั้นระบบ Jet Grouting จะถูกนำมาใช้ การปรับปรุงคุณภาพดินประกอบด้วยการปรับเปลี่ยนและเพิ่มสมบัติทางกล, ความแข็งแรง และโมดูลัสความยืดหยุ่นและในขณะเดียวกันจะลดการซึมผ่านของดินเดิม Jet Grouting เป็นวิธีการที่ทันสมัยและรวดเร็วในดินและในหินที่อ่อนแอสำหรับการสร้างรากฐานที่ลึก การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีนี้ดินจะถูกผสมเข้าด้วยกันกับวัสดุเชื่อมประสาน (ซีเมนต์และน้ำ) ซึ่งจะถูกฉีดที่ความดันสูงออกจากหัวฉีดที่อยู่ตรง “monitor” ทำลายโครงสร้างของดินตามธรรมชาติและก่อให้เกิดการผสมระหว่างดินกับวัสดุเชื่อมประสาน ผลที่ได้คือองค์ประกอบโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกันและต่อเนื่องโดยมีสมบัติทางกล, ความแข็งแรง, โมดูลัสความยืดหยุ่นและลดการซึมผ่านของดินเดิมได้ดีขึ้น

ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมานี้เป็นผลให้มีการใช้วิธีปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าเพิ่มความแข็งแรงให้กับดินอ่อนและสามารถลดอัตราการซึมผ่านของน้ำได้อย่างดี จึงมีการนำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting มีการนำมาใช้งานก่อสร้าง, ซ่อมแซมและงานป้องกันโครงสร้าง อาทิเช่น งานซ่อมแซมฐานรากเพื่อแก้ไขปัญหาการวิบัติของดินใต้ฐานราก, การเสริมกำลังรับน้ำหนักของดินใต้ฐานราก, การแก้ไขปัญหาการทรุดตัวของฐานราก (Underpinning), งานก่อสร้างและขุดเจาะอุโมงค์, งานสร้างแนวกำแพงกันน้ำหรืออุดรอยรั่วซึมของน้ำในโครงสร้างใต้ดิน (Water barrier), งานโครงสร้างกำแพงกันดิน (Retaining structures) และอื่นๆ

ในปัจจุบันโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้มในส่วนของสัญญาการรับเหมาก่อสร้างของบริษัท อิ-ตาเลียนไทย ดีเวล็อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) หน่วยงานธุรกิจการก่อสร้างระบบขนส่งมวลชน หรือ MRT ฝ่ายงานขุดเจาะอุโมงค์ ได้นำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting มาใช้ในโครงการการก่อสร้างในขั้นตอนการเตรียมงานก่อนการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งเป็นการนำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีนี้มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากกาขุดเจาะจะทำการเจาะในชั้นดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง และชั้นดินทราย ด้วยจากข้อดีที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับดินอ่อน ลดการซึมของน้ำใต้ดินในชั้นดินทราย ด้วยการขุดเจาะด้วยวิธี Earth Pressure Balance (EPB) จึงจำเป็นที่จะต้องสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเสาดิน-ซีเมนต์นี้ในบริเวณหน้ากำแพงกันดินของสถานี และปล่องระบายอากาศ (TBM Break- in และ TBM Break out) เพื่อป้องการพังทลายของดินที่มีความชื้นสูงและมีกำลังรับน้ำหนักที่ต่ำ และการไหลเข้าของน้ำใต้ดินในระหว่างการเจาะทะลุผ่านกำแพงกันดิน (Soft Eye zone) และการสร้างกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์เพื่อใช้ในการเปลี่ยนฟันหัวเจาะ (TBM Maintenance Cutter bits) ซึ่งกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์นี้จะเป็นส่วนป้องกันพังของดินและน้ำใต้ดินในระหว่างการเปลี่ยนฟันหัวเจาะ และเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยลดการใช้ระบบ Air locking ในการป้องกันการพังของดินขณะเปลี่ยนฟันหัวเจาะ ซึ่งระบบระบบ Air locking ทำให้เสียเวลาอย่างมากในการขุดเจาะ

เนื่องด้วยนโยบายของฝ่ายการขุดเจาะอุโมงค์ที่จะให้มีบุคลากรภายในฝ่ายขุดเจาะ ให้มีความรู้และมีความสามารถในการควบคุมงานได้ง่ายขึ้นและเข้าใจถึงปัญหาหน้างานที่เกิดขึ้นและเพื่อเป็นกรณีศึกษาในหน่วยงานในการทำการก่อสร้างในโครงการต่อไป ซึ่งปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting นี้มีเนื้อหาในเชิงเบื้องลึกกว่าการเรียนในห้องเรียน และมีการทำงานที่มีขั้นตอนต่างๆที่สอดแทรกที่มากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้เกิดโครงงานสหกิจศึกษาเล่มนี้เกิดขึ้น

ดังนั้นโครงงานสหกิจศึกษาฉบับนี้ได้ทำการนำ ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบการทำงานของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ขั้นตอนการทำงานจากเริ่มต้นการได้มาของตัวแปรสำหรับที่ใช้ในการทำงานไปจนถึงการทำงานจริงในภาคสนามจากการวิเคราะห์ในงานวิจัยจากในประเทศและต่างประเทศรวมไปถึงประสบการณ์ว่ามีขั้นตอนอย่างไร ปัญหาที่เกิดขึ้นเกิดจากสิ่งใด การรักษาระดับพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนสถานที่ทำงานที่มีระยะทางจากปั๊มและเครื่องเจาะที่ไกลขึ้น การคำนวณในหน้างานเพื่อปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำงาน และงานประยุกต์ใช้ต่างๆ เพื่อเป็นกรณีศึกษาในหน่วยงาน และเพิ่มคุณภาพให้แก่วิศวกรที่ควบคุมการก่อสร้างนี้ได้ดียิ่งขึ้น แก้ไขปัญหาได้ดีและรวดเร็วขึ้น มีความถูกต้อง และลดปัจจัยเสี่ยงต่างๆ ในการทำงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในชั้นดินกรุงเทพ
2. เพื่อศึกษาลำดับขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำงานจริงจากกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์ต้นแบบ
3. เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น
4. เพื่อศึกษาการนำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เพื่อนำผลจากการศึกษาที่ได้มาเป็นคู่มือสำหรับการทำงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet- Grouting สำหรับใช้ในหน่วยงานฝ่ายขุดเจาะอุโมงค์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตด้านประชากร

กลุ่มตัวอย่างกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาโครงงาน คือ วิศวกรในบริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) หน่วยงานธุรกิจการก่อสร้างระบบขนส่งมวลชน หรือ MRT ฝ่ายงานขุดเจาะอุโมงค์ (ในส่วนผู้รับเหมารายใหญ่) และ วิศวกรและผู้ควบคุมเครื่องจักรในบริษัท อิตัลไทย เทรวี่ จำกัด (ในส่วนผู้รับเหมารายย่อย)

ขอบเขตด้านเนื้อหา

Method Statement ในการทำงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในหน่วยงาน และหนังสือวิจัยทั้งในต่างประเทศ คือคู่มือการก่อสร้างและแนวทางแก้ไขปัญหา การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์: กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ, พฤติกรรมของกำแพงกันดินเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้กับงานขุดดินลึกด้วยระบบ top down ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ, Execution of special geotechnical works Jet grouting, Jet Grouting Technology, Design and Control และ Ground improvement by means of jet-grouting

ขอบเขตด้านสถานที่เก็บข้อมูล

สถานที่ก่อสร้างบ่อดันของสถานีคลองบ้านม้า (OR22) และปล่องระบายอากาศที่ 17 (IVS17)

ขอบเขตด้านระยะเวลา

งานวิจัยใช้เวลาในการเก็บข้อมูล ตั้งแต่ 8 สิงหาคม พ.ศ.2561 – 20 พฤศจิกายน พ.ศ.2561 รวมเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 104 วัน

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

ศึกษาการเรียนรู้การทำงานเบื้องต้นสำหรับการปฏิบัติงานจริงด้วย Method Statement ในการทำงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในหน่วยงานให้สอดคล้องกับการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงในภาคสนามเพื่อทำการศึกษาในขั้นแรกเริ่ม ศึกษางานวิจัยต่างประเทศที่เกี่ยวข้องเพื่อทำการศึกษาในเชิงทฤษฎี และทำการปฏิบัติงานจริงเพื่อเก็บข้อมูลในภาคสนามพร้อมกับศึกษาปัญหาต่างๆในการทำงานจริงในภาคสนาม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นกรณีศึกษาในเรื่องการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในชั้นดินกรุงเทพฯ
2. เพื่อเป็นข้อมูล และเป็นกรณีศึกษาของหน่วยงานเพื่อที่จะนำไปใช้ในโครงการก่อสร้างอื่นๆ ต่อไปในอนาคต
3. ทราบถึงปัจจัยของปัญหาต่างๆในภาคสนาม และมีความเข้าใจถึงหลักการในทางทฤษฎีและการปฏิบัติเพื่อนำไปแก้ไขปัญหาได้ดียิ่งขึ้น
4. เพื่อเป็นคู่มือ หรือแนวทางในการพัฒนาบุคลากรในส่วนงานที่เกี่ยวข้องให้มีความสามารถควบคุมการก่อสร้างนี้ได้ดียิ่งขึ้น แก้ไขปัญหาได้ดีและรวดเร็วขึ้น มีความถูกต้อง และลดปัจจัยเสี่ยงต่างๆ ในการทำงานได้ดีขึ้น
5. เพื่อเป็นแนวทางการศึกษา และการปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงานหรือประยุกต์กระบวนการทำงานสำหรับผู้ที่สนใจ ถึง ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงานสหกิจศึกษาฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขั้นตอนการทำงาน (Jet Grouting Procedure)

งาน Jet Grouting จะสามารถทำงานให้เสร็จสิ้นได้โดยสิ่งที่เรียกว่า Jet Grouting string หรือเรียกว่า ก้านเจาะ ก้านเจาะถูกทำให้เป็นก้านโดยการนำท่อเหล็ก (rods) ที่ได้เตรียมไว้มาต่อเรียงกัน ซึ่งข้างในท่อประกอบด้วยท่อข้างในอีกอาจจะมี 1ท่อ, 2ท่อ และ 3ท่อก็ได้ ทำหน้าที่ส่งของเหลวไปยังเครื่องมือที่เรียกว่า "monitor[1]" ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่ตรงปลายก้านเจาะ โดย monitor มีหัวฉีดขนาดเล็กติดอยู่ ซึ่งหัวฉีดอาจจะมี 1หัวหรือมากกว่านั้น หัวฉีดจะทำหน้าที่แปลงของเหลวที่ถูกอัดมาด้วยแรงดันสูงให้เป็นการเคลื่อนที่ของของเหลวที่มีความเร็วสูงเมื่อทำการฉีดพ่นออกไป

ขั้นตอนการทำงานต่างๆสามารถเลือกวิธีการทำงานในแต่ละขั้นตอนนั้นได้แตกต่างกัน ได้โดยการเลือกจากองค์ประกอบที่เหมาะสมในการเจาะ (Drilling) และการเกร๊าท์ (Grouting) โดยปกติแล้วการดำเนินการทั้งสองขั้นตอนนี้จะดำเนินการโดยใช้อุปกรณ์เครื่องจักรแบบเดียวกันซึ่งสามารถควบคุมการหมุนและการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของก้านเจาะและ monitor

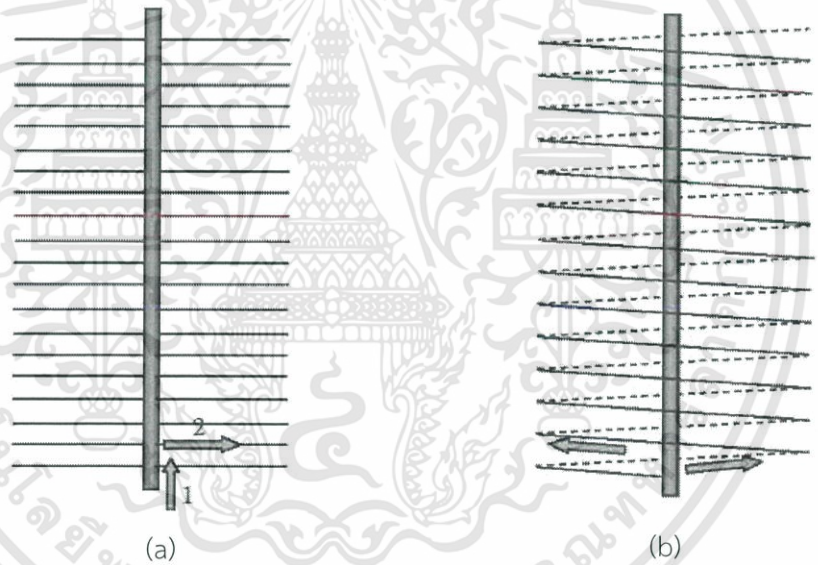
การเจาะ (Drilling) จะดำเนินการจนถึงระดับความลึกที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการใช้ระบบหมุนก้านเจาะโดยใช้เครื่องโรตารี่ที่เป็นระบบ rotary-percussive direct drilling system หัวเจาะ (Bit) ที่ติดอยู่ตรงปลาย monitor ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าก้านเจาะเล็กน้อย ด้วยขนาดที่ใหญ่กว่าก้านเจาะทำให้มีช่องว่างระหว่างก้านเจาะและผนังของหลุมเจาะ โดยปกติหลุมเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 120 ถึง 150 มิลลิเมตร แต่ในบางกรณีหลุมเจาะอาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ถึง 300 มิลลิเมตร การเจาะสามารถทำได้โดยการใช้น้ำ ,อากาศ ,สารเกร๊าท์หรือโฟมเป็นตัวกลางในการล้างหลุม โดยทั่วไปการหมุนเวียนของของเหลวที่ใช้ในการเจาะซึ่งของเหลวนี้จะไหลลงไปในหลุมโดยมีท่อกลวงที่อยู่ในท่อเหล็ก (rods) เป็นตัวลำเลียง และจะไหลขึ้นมาผ่านพื้นที่ช่องว่างระหว่างก้านเจาะและผนังหลุมเจาะ ของเหลวที่ใช้ในการเจาะนี้เป็นตัวนำพาเศษดินที่ได้จากการเจาะขึ้นมายังปากหลุมและนอกจากนี้ยังสามารถรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะอีกประการหนึ่ง

หมายเหตุ: [1] monitor คือ เครื่องมือติดตั้งที่ส่วนท้ายของก้านเจาะ เพื่อทำให้สามารถทำการพ่นของของเหลวลงในดินได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกร๊าท์หรือการฉีดน้ำปูน (Grouting / Jetting) จะดำเนินการฉีดผ่านหัวฉีดอย่างน้อยหนึ่งตัวที่ติดอยู่บน monitor ซึ่งมีการหมุนก้านและยกก้านขึ้น ดินที่ถูกเปลี่ยนสภาพจากขั้นตอนการฉีดพ่นและส่วนของของเหลวจากการฉีด ดินที่ได้จากกระบวการนี้จะไหลขึ้นมายังบนผิวดินผ่านช่องว่างระหว่างก้านเจาะกับผนังหลุมเจาะซึ่งจะเป็นรูปแบบของโคลนที่เรียกว่า “spoil”

การยกก้านเจาะขึ้นจะทำการยกเป็นระยะ โดยระยะในการยกอยู่ที่ 40 ถึง 100 มิลลิเมตร ในขณะที่ทำการยกก้านขึ้นแต่ละครั้งจำนวนการหมุนของก้านจะถูกนำมาใช้ด้วย (รูปที่ 2.1a) ในบางกรณีการยกก้านขึ้นจะดำเนินการอย่างต่อเนื่องโดยการยกก้านในอัตราการยกที่คงที่ ทำให้ขนะทำการฉีดน้ำปูนแต่ละครั้งจะมีลักษณะเป็นเส้นเกลียว (รูป 2.1b) อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วการยกแบบเป็นระยะๆหรือเป็นจังหวะ เป็นที่นิยมอย่างมากเพราะทำให้การปรับปรุงคุณภาพดินมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการยกก้านในลักษณะนี้ทำให้มีการฉีดน้ำปูนซ้ำในช่วงการยกแต่ละครั้ง



รูป 2.1 วิธีการยกก้าน: (a)การยกก้านที่เป็นจังหวะ (1.ยก, 2ฉีด), (b)การยกก้านแบบต่อเนื่อง (spiral path)
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

ไม่ว่าการเลือกการยกก้านจะเป็นแบบไหนก็ตาม ความเร็วในการหมุนก้านเจาะจะยังคงที่ตลอด ดังนั้นรูปร่างของเสาซีเมนต์จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก (รูป 2.2a)

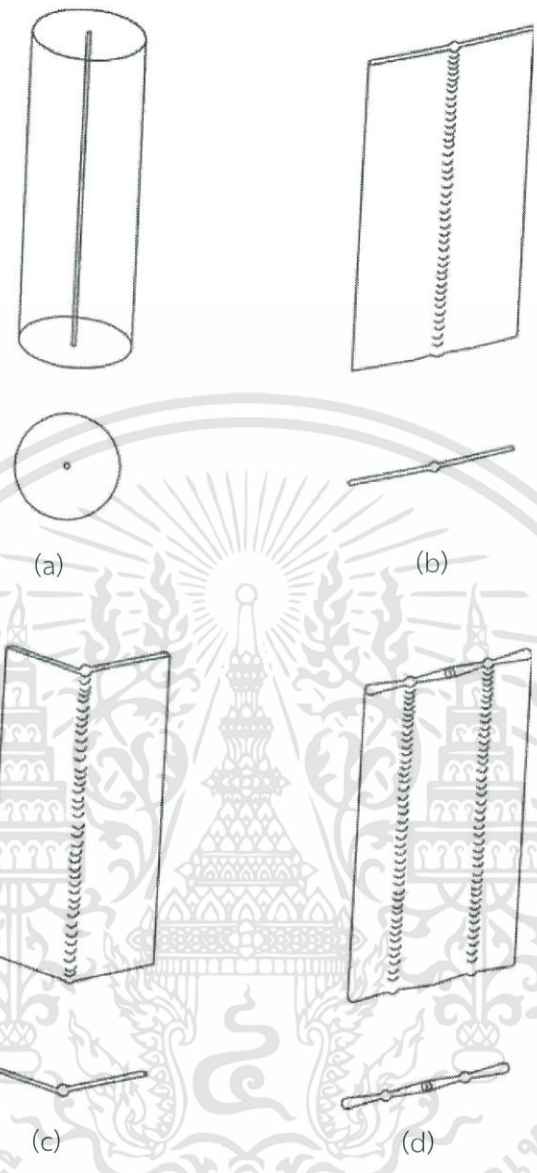
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ก้านเจาะถูกยกขึ้นนั้นโดยไม่มีการหมุนก้านไปพร้อมกับการยกทำให้รูปร่างเสาดิน-ซีเมนต์มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบบางที่เรียกว่า “jet-grouted panel” (รูป 2.2b) ในกรณีที่หัวฉีดถูกติดตั้งให้ทำมุมในแนวระนาบเข้าด้วยกันจะได้รูปทรงของเสาซีเมนต์เป็นลักษณะของรูปตัว V หรือ “V-shape” (รูป 2.2c)

รูปร่างที่มีลักษณะซับซ้อนมากขึ้นอาจทำได้โดยการ จำกัดมุมการหมุนและโดยการหมุนท่อตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาหรือโดยการเปลี่ยนความเร็วในการหมุนระหว่างการฉีดน้ำปูนโดยเฉพาะการวางหัวฉีดตรงข้ามกับอีกด้านหนึ่งและโดยการเปลี่ยนความเร็วในการหมุนในแต่ละครั้ง รูปร่างลักษณะของเสาซีเมนต์จะเป็น “candy หรือ butterfly shape” (รูป 2.2d และรูป 2.3) ในหลักการรูปทรงหลายเหลี่ยมอื่น ๆ อาจได้มาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุน (Shibazaki, 2003) ในการทำรูปร่างที่ประยุกต์จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนก้านอาจจะดูยุ่งยากและซับซ้อนเกินไปที่จะนำมาทำงานได้

ไม่ว่าในกรณีใดการทำงาน jet grouting ส่วนใหญ่จะใช้เสาซีเมนต์รูปร่างทรงกระบอกเหมาะสมที่สุดและด้วยเหตุนี้โครงงานเล่มนี้จึงมีการนำเสนอเสาซีเมนต์ ซึ่งจะเป็นเสาเดี่ยวหรือลักษณะที่นำเสาหลายๆต้นมาซ้อนทับกัน (overlapping)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.2 รูปร่างของเสาดิน-ซีเมนต์: (a) column, (b) panel, (c) V-shape และ (d) candy-shape (Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 2.3 ตัวอย่างเสารูปร่าง Candy shape
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

ขั้นตอนการเจาะและการเกร๊าท์ (Grouting) อาจมีวิธีต่างจากปกติจากที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ โดยมี 2 วิธีขั้นตอนทางเลือกที่นำมาใช้ด้วยคือวิธี “Pre-jetting” หรือที่รู้จักกันว่า “Pre-cutting”และ “downward jet grouting”

ด้วย Pre-jetting จะมีการฉีดน้ำที่ความเร็วสูงจากหัวฉีดแบบแนวรัศมีในระหว่างขั้นตอนการขุดเจาะเพื่อเริ่มต้นในการทำลายพันธะของดินในหลุมเจาะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำการปรับปรุงคุณภาพดินในลำดับขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนการ Pre-jetting อาจดำเนินการในขั้นตอนการยกก้านในขั้นต้นอย่างน้อยหนึ่งขั้นตอน ในกรณีเช่นนี้หลังจากผ่านการ Pre-jetting ไปแล้วจะมีการฉีดน้ำปูนจากด้านล่างระหว่างขั้นตอนการยกขั้นสุดท้ายในกรณีนี้ขั้นตอนโดยรวมมักเรียกว่า “double treatment system” วิธีการทำ Pre-jetting อาจเป็นวิธีประหยัดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพดินที่ทนทานต่อการกัดกร่อนเช่นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหรือดินเหนียวแข็ง

การทำ Downward jet grouting เป็นขั้นตอนที่ประกอบไปด้วยระหว่างการฉีดน้ำปูนด้วยความเร็วสูงในแนวรัศมีไปพร้อมกับขั้นตอนการเจาะ วิธีนี้อาจใช้ร่วมกับ Pre-jetting เมื่อทำการ Pre-jetting ถึงช่วงค่าความลึกหนึ่งและทำการปรับปรุงคุณภาพดินต่อลงไป ความลึกของ Pre-jetting และ downward jet grouting (โดยปกติอยู่ที่ความลึกระหว่าง 1/3 และ 1/2 ของความยาวของเสาทั้งหมด) จะถูกปรับเปลี่ยนตามแต่ละกรณีเพื่อลดการไหลออกของส่วนผลมของดินกับของเหลวที่เป็นส่วนเกิน (spoil) ด้วยเหตุนี้ลักษณะของส่วนผลมของดินกับของเหลวที่เป็นส่วนเกินจะต้องถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

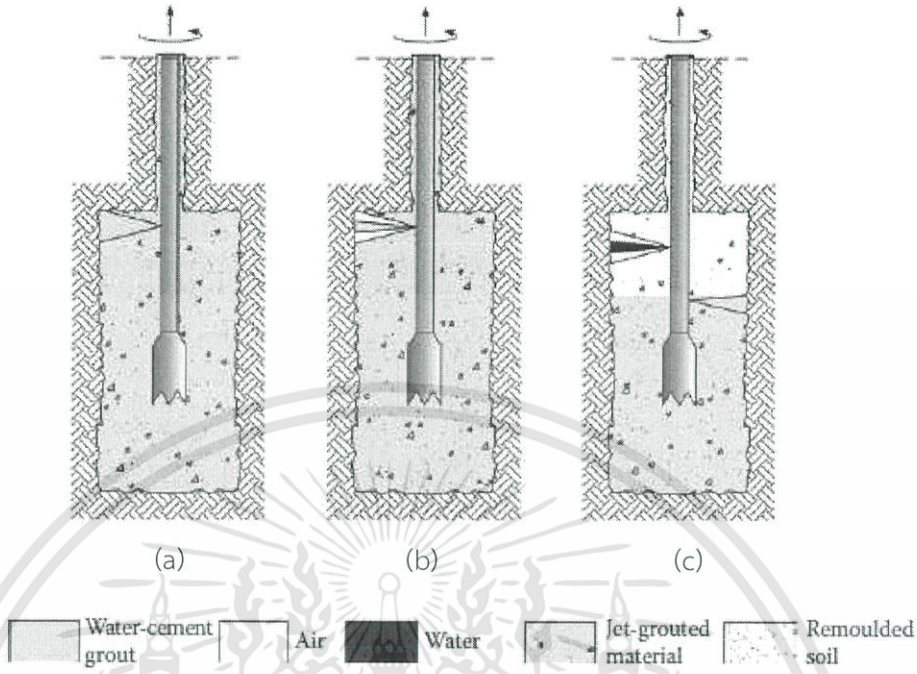
ตรวจสอบอย่างต่อเนื่องเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบและเพื่อควบคุมประสิทธิภาพของขั้นตอนในการปรับปรุงคุณภาพดิน ในช่วงขั้นตอนการ Pre-jetting ครั้งแรก spoil เป็นเพียงส่วนผสมของน้ำและดินที่ถูกเจาะซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีความหนาแน่นต่ำ การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของ spoil แสดงให้เห็นว่าการไหลเวียนของน้ำปูนที่ฉีดขึ้นด้านบนสามารถเข้าถึงได้ระดับพื้นดิน เมื่อเกิดเหตุการณ์นี้เสาซีเมนต์ได้ก่อตัวจนถึงระดับพื้นดินแล้ว ด้วยวิธีนี้ spoilที่ไหลออกมาจะถูกจำกัดและอาจทำให้การทำงานนั้นมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากขึ้นด้วย

2.2 ระบบที่ใช้ในการเกร๊าท์ (Jet Grouting Systems)

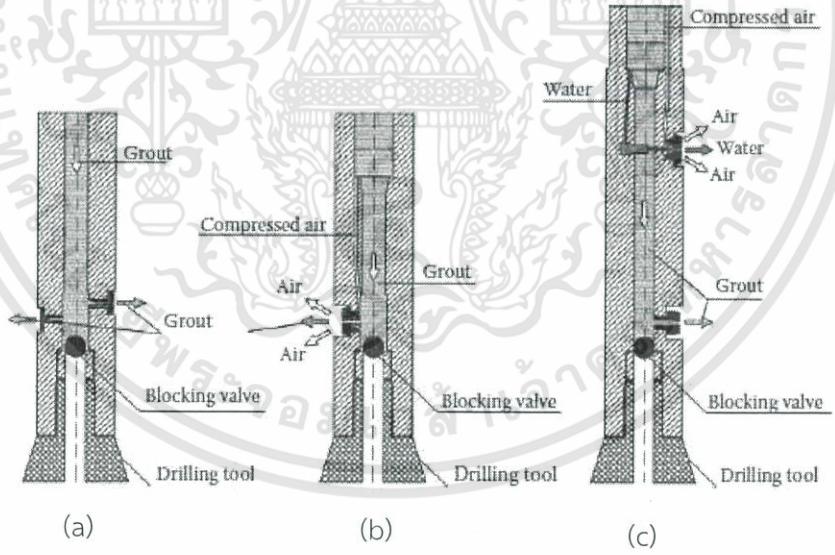
ลักษณะเด่นที่สำคัญที่สุดของเทคนิคของงาน Jet Grouting ประกอบด้วยชนิดและจำนวนของของเหลวที่ฉีดเข้าไปในดิน โดยทั่วไปแล้วเทคนิคของงาน Jet-grouting หลักๆแล้วจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ single, double และ triple fluid systems ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของของไหลที่ฉีดเข้าไปในชั้นดิน ของไหลที่ใช้ในการเกร๊าท์ (น้ำผสมซีเมนต์) สำหรับระบบ single fluid system จะใช้สารเกร๊าท์เพียงอย่างเดียว ในส่วนของระบบ double fluid system จะใช้สารเกร๊าท์และอากาศในการฉีด และสำหรับระบบ triple fluid systems จะใช้น้ำ, สารเกร๊าท์ และอากาศในการฉีด

จากระบบการทำงาน Jet-grouting ที่ขึ้นอยู่กับจำนวนของเหลวที่ใช้ในการฉีดนั้น โดยก้านเจาะ (Jet Grouting string) จะใช้ประเภทที่ต่างกัน และ monitor ที่ใช้จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป monitor ที่เป็นกระบอกเหล็กที่ติดอยู่ระหว่างส่วนของหัวเจาะและปลายก้านเจาะ เป็นที่อยู่ของหัวฉีดซึ่งมีการใช้สารเกร๊าท์, อากาศและน้ำที่ได้รับการฉีดในระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการทำงาน Jet-grouting โดยปกติแล้วหัวฉีดที่ใช้ในการฉีดพ่นของเหลวที่ใช้ในการเจาะนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 2 ถึง 8 มิลลิเมตร monitor จะมีรูตรงส่วนล่างซึ่งจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าหัวฉีด ซึ่งจะใช้ในขั้นตอนการเจาะ (Drilling) เพื่อที่จะใช้น้ำเป็นตัวลำเลียงเศษดินขึ้นมายังปากหลุม เมื่อถึงขั้นตอนการเกร๊าท์ได้เริ่มขึ้นรูที่อยู่ด้านล่างของ monitor จะถูกปิดและของเหลวแรงดันสูงจะถูกฉีดออกมาทางหัวฉีดที่ติดอยู่ด้านข้างของ monitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

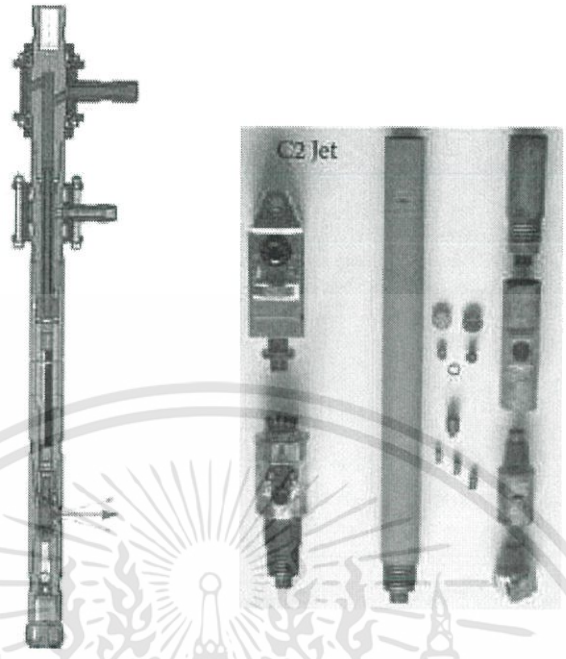


รูป 2.4 ระบบของงาน JET GROUTING : (a) single fluid, (b) double fluid and (c) triple fluid. (Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)



รูป 2.5 Schematic drawings of the monitors: (a) single fluid, (b) double fluid และ (c) triple fluid. (Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

รูป 2.6 ภาพตัวอย่างของอุปกรณ์ของระบบ double fluids system : (a) ภาพตัดขวางของหัวเจาะและท่อฉีด ,(b) ภาพชิ้นส่วนประกอบ
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

2.2.1 Single fluid system

ในระบบ Single fluid system นี้จะใช้สารเกร๊าท์ (ซีเมนต์ผสมน้ำ) ฉีดเข้าไปยังดินที่ต้องการทำการปรับปรุง โดยระบบนี้ดินที่ถูกเปลี่ยนสภาพจะกระบวนการเจาะและ pre-cutting จะถูกผสมเข้ากับสารเกร๊าท์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน (รูป 2.4a และรูป 2.5a)

2.2.2 Double fluid system

ในระบบ Double fluid system แบบดั้งเดิม การเปลี่ยนสภาพดินและการเกร๊าท์จะถูกดำเนินไปด้วยของเหลวชนิดเดียว แต่การเกร๊าท์จะทำการฉีดน้ำปูนควบคู่ไปกับอากาศ (รูป 2.4b และรูป 2.5b) ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานโดยการลดการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการเกร๊าท์ การพ่นอากาศจะถูกพ่นออกมาจากหัวฉีดที่พ่นลมที่อยู่รอบๆหัวฉีดสารเกร๊าท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรุ่นที่พบได้น้อยของระบบ Double fluid system จะประกอบไปด้วยการฉีดน้ำผ่านหัวฉีดที่ติดอยู่ส่วนบนของ monitor และการฉีดสารเกร๊าท์จะถูกฉีดผ่านหัวฉีดที่อยู่ส่วนล่างของ monitor ด้วยระบบนี้การกัดเซาะดินและการเปลี่ยนสภาพดินจะถูกทำโดยน้ำที่ถูกพ่นออกมาตรงส่วนบน ขณะที่สารเกร๊าท์ที่ถูกฉีดออกมาจะเป็นวัสดุประสานดินที่ถูกกัดเซาะและดินที่ถูกเปลี่ยนสภาพจากการพ่นน้ำก่อนหน้านี้ เมื่อพิจารณาการใช้น้ำในการกัดกร่อนดินหรือเปลี่ยนสภาพดิน และขั้นตอนในการใช้น้ำปูนเพื่อเชื่อมประสานดินนั้นของระบบ Double fluid- system จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบ Triple fluid system ในแง่ปฏิกิริยาเชิงกลระหว่างน้ำปูนและดิน

2.2.3 Triple fluid system

ด้วยระบบ Triple fluid system การเปลี่ยนสภาพของดิน (การทำให้ดินมีลักษณะร่วนซุย) และการฉีดพ่นสารเกร๊าท์เพื่อเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินถูกแยกออกจากกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกระจายตัวของดินที่เกิดจากการพ่นน้ำด้วยความเร็วสูงโดยผ่านหัวฉีดที่อยู่บนส่วนบนของ monitor (รูป 2.4c และรูป 2.5c) การพ่นน้ำจะพ่นควบคู่ไปกับการพ่นอากาศที่พ่นโดยหัวฉีดรอบๆหัวฉีดที่พ่นน้ำซึ่งคล้ายคลึงกับระบบ Double fluid- system สารเกร๊าท์จะถูกพ่นออกจากหัวฉีดที่แยกออกมา ซึ่งหัวฉีดนี้จะอยู่บริเวณส่วนล่างของ monitor การทำ การเกร๊าท์ด้วยระบบนี้ สารเกร๊าท์จะมีหน้าที่เป็นตัวประสานดินที่ถูกเปลี่ยนสภาพจากการฉีดน้ำก่อนหน้านี้เท่านั้น ด้วยเหตุนี้สารเกร๊าท์ที่ถูกพ่นออกมาจะมีความเร็วที่ต่ำกว่า

รูปแบบการทำงานด้วยการฉีดของเหลวทั้ง 3 ชนิดนี้ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยการฉีดน้ำและสารเกร๊าท์ด้วยความเร็วสูง เพื่อให้ดินถูกกัดกร่อนและมีความร่วนซุยซึ่งสามารถเพิ่มรัศมีในการปรับปรุงคุณภาพดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Shen, 2009)

2.3 การซ้อนทับของเสาดิน-ซีเมนต์ (Columns Overlapping)

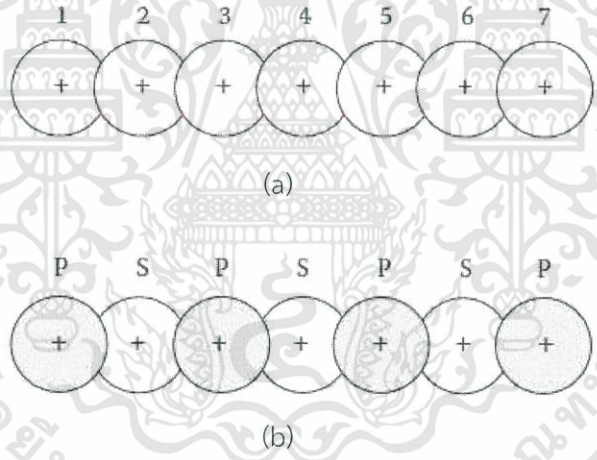
งาน Jet Grouting ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ต่างๆนั้นมีหลายแบบ โดยขึ้นอยู่กับการนำเสาดิน-ซีเมนต์มาทำการซ้อนทับของเสาให้มีรูปแบบตามที่ได้กำหนดไว้ โดยการซ้อนทับนี้จะมีการซ้อนทับเพียงบางส่วนของเสาดิน-ซีเมนต์เท่านั้น เพื่อใช้เรียกเป็นลำดับในการทำงานทั้ง 2 วิธีที่จะนำมาใช้โดยมแต่ละลำดับมีชื่อเรียกเรียกว่า “fresh in fresh” และ “fresh in hard”

ลำดับการทำเสาดิน-ซีเมนต์แบบ fresh in fresh (รูป2.7a) เสาดิน-ซีเมนต์ที่อยู่ติดกันจะถูกสร้างขึ้นโดยทำการปรับปรุงคุณภาพดินแบบต่อเนื่องในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยไม่ต้องรอให้สารเกร๊าท์มีการแข็งตัว ด้วยวิธีนี้ส่วนหนึ่งของเสาดิน-ซีเมนต์ที่สร้างขึ้นก่อนหน้านี้สามารถถูกกัดเซาะและถูกฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

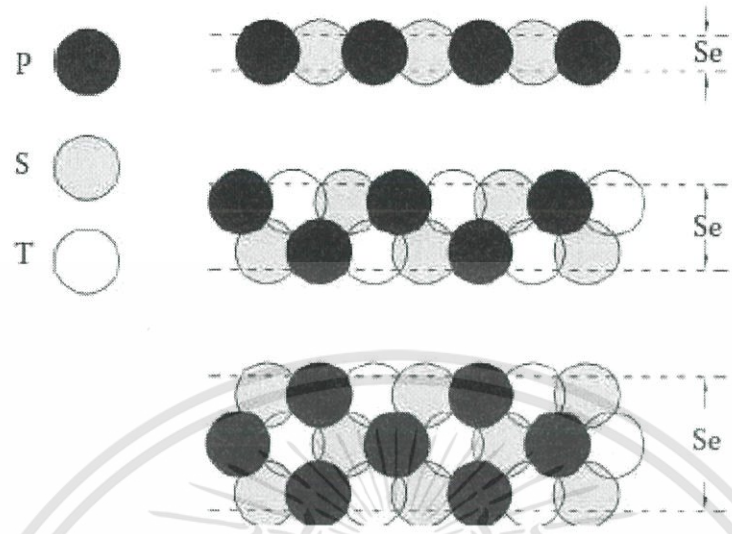
ได้อีกครั้งโดยการทำการปรับปรุงคุณภาพดินอีกครั้งในเสาต้นต่อไปทำให้มีปริมาณซีเมนต์ที่ต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามควรระมัดระวังเป็นพิเศษในขั้นตอนการขุดเจาะ ซึ่งน้ำที่ใช้ในระหว่างการเจาะจะทำให้เกิดการชะล้างซีเมนต์ของเสาก่อนหน้าที่ยังไม่มีการแข็งตัว

ลำดับการทำเสาดิน-ซีเมนต์แบบ fresh in hard (รูป 2.7b) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "primary-secondary sequence" โดยเสาดิน-ซีเมนต์ต้นใหม่แต่ละต้นจะต้องทำหลังจากมีการแข็งตัวของเสาต้นที่อยู่ติดกัน หากใช้ลำดับนี้จำเป็นต้องจัดทำแผนการทำงานโดยละเอียดซึ่งประกอบด้วยชุดเสาดิน-ซีเมนต์ primary (P), secondary (S) และบางครั้งอาจจะมี tertiary (T) ซึ่งควรมีการระบุแผนการทำงานดังกล่าวอย่างเหมาะสมทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างที่จะทำขึ้น (รูป 2.8 และรูป 2.9) ลำดับขั้นตอนการทำเสาดิน-ซีเมนต์แบบ fresh in hard ได้รับความนิยมในการทำงานเป็นอย่างมาก แต่มักก่อให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า "shadow effect" เพราะเสาต้นที่อยู่ติดกันที่มีการแข็งตัวแล้วจะไม่ถูกกัดกร่อนหรือถูกกัดกร่อนได้น้อยจากการฉีดน้ำหรือสารเกร๊าท์เป็นผลให้เสาที่อยู่ในลำดับที่2 และที่ 3 มีขนาดที่ลดลง (van Tol, 2004)

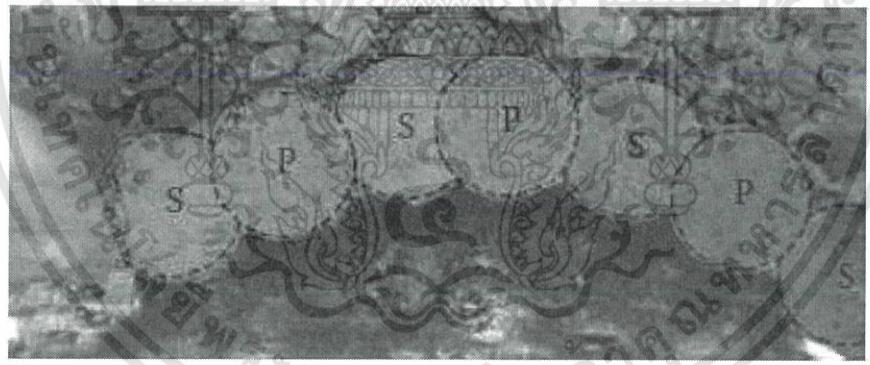


รูป 2.7 การซ้อนทับของเสาดิน-ซีเมนต์: (a) ลำดับการทำเสาดิน-ซีเมนต์แบบ fresh in fresh และ (b)ลำดับการทำเสาดิน-ซีเมนต์แบบ fresh in hard (โดย P และ S คือกลุ่มเสา primary และ secondary ตามลำดับ)
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.8 ตัวอย่างของลำดับการทำเสาดิน-ซีเมนต์แบบ fresh in hard ของกลุ่มเสาที่ซ้อนทับกัน (โดย P ,S และ T คือกลุ่มเสา primary ,secondary และ tertiary ตามลำดับ)
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)



รูป 2.9 รูปลักษณะของเสาดิน-ซีเมนต์ของงานเพดานอุโมงค์ (โดย P และ S คือกลุ่มเสา primary และ secondary ตามลำดับ)
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การเสริมกำลังของเสาดิน-ซีเมนต์ (Columns Reinforcement)

เสาดิน-ซีเมนต์ต้นเดี่ยวหรือโครงสร้างขนาดใหญ่ที่เกิดจากการนำเสาดิน-ซีเมนต์จำนวนหลายต้นที่นำมาใช้ สามารถเสริมกำลังโดยการใส่เหล็กเส้น ,ท่อ หรือวัสดุเสริมกำลังอื่นๆ เพื่อเสริมกำลังรับแรงดึงและกำลังต้านทางแรงดัดของโครงสร้าง เหล็กเสริมอาจถูกนำไปใส่ในเสาที่ซีเมนต์ยังมีความสดใหม่ (ซีเมนต์ยังไม่แข็งตัว) หรือนำไปใส่ในตอนที่ซีเมนต์แข็งตัวทั้งหมดหรือเพียงบางส่วนโดยการทำการเจาะรูตรงเสาดิน-ซีเมนต์และทำการปิดรูด้วยการอัดสารเกร๊าท์ด้วยแรงดันที่ต่ำ จากการเสริมกำลังของเสาดิน-ซีเมนต์ที่ได้กล่าวมานั้นซึ่งเป็นไปได้สำหรับการทำ Jet Grouting ในความลึกอยู่ที่ระดับตื้นเท่านั้น เพราะการใส่เหล็กเสริมลงไปยังเสาที่มีซีเมนต์ที่ยังมีความสดใหม่นั้นเป็นเรื่องที่ยากมากที่ระดับความลึก ในทางตรงกันข้ามการเจาะและการเกร๊าท์สามารถทำได้ในระดับความลึกใดๆ แต่กระบวนการในการทำงานมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ในทุกกรณีหากมีตำแหน่งที่ต้องให้ความสำคัญในด้านการเสริมกำลังสามารถาสริมกำลังได้ตามจุดที่ต้องการได้

ในบางกรณีอาจเสริมกำลังด้วยวัสดุที่ประกอบไปด้วยไฟเบอร์กลาสโดยมีส่วนประกอบที่ทำจากเมทริกซ์โพลีเมอร์ซึ่งเสริมด้วยเส้นใยแก้ว เส้นใยแก้วมีจะถูกวางตามแนวแกนดังนั้นลักษณะทางกลขององค์ประกอบเหล่านี้จึงมีลักษณะเป็น anisotropic ส่วนประกอบของไฟเบอร์กลาสมีความยืดหยุ่นมาก และไม่สามารภต้านทานแรงดัดได้แต่สามารถรับแรงดึงได้มากโดยมีค่ารับกำลังอยู่ที่ 600 MPa สำหรับแบบท่อ และ 1000 MPa สำหรับแบบเส้น การเสริมกำลังด้วยไฟเบอร์กลาสดังกล่าวเหมาะอย่างยิ่งสำหรับการเสริมกำลังบริเวณหน้าอุโมงค์ เนื่องจากหัวเจาะสามารถตัดผ่านได้ง่าย ด้วยความสามารถที่มีความยืดหยุ่นและการพังได้ง่าย ไฟเบอร์กลาสจะสามารถนำไปติดตั้งได้เพียงตอนขุดเจาะและการเกร๊าท์เท่านั้น

2.5 ส่วนผสมของสารเกร๊าท์และดินส่วนเกิน (Grout mix and Spoil)

2.5.1 ส่วนผสมของสารเกร๊าท์ (Grout mix)

ส่วนผสมของสารเกร๊าท์จะประกอบไปด้วยน้ำและปูนซีเมนต์ตามอัตราส่วนน้ำหนัก (W/C ratio) โดยปกติแล้วจะอยู่ช่วงระหว่าง 0.6 และ 1.3 โดยค่า W/C ratio ควรถูกพิจารณาตามความเหมาะสมในแต่ละโครงการในการสร้าง โดยพิจารณาว่าการเพิ่ม W/C ratio จะส่งผลให้ผลให้ประสิทธิภาพในการกัดกร่อนสูงขึ้นต่ลดความแข็งแรงของวัสดุในการทำ Jet Grouting โดยทั่วไปแล้วไม่มีข้อจำกัดในเรื่องประเภทของปูนซีเมนต์ที่ต้องใช้ ซึ่งประเของปูนซีเมนต์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการก่อสร้าง หรือในบางกรณีอาจจำเป็นที่จะต้องใช้ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ ตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากต้องการให้มีการแข็งตัวได้เร็วให้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) หรือหากมีการก่อสร้างตรงบริเวณที่มีสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ทั่วไปให้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ประเภท pozzolanic หรือ blast-furnace cement

ในบางครั้งในการทำเสาดิน-ซีเมนต์อาจจะใช้สารผสมเพิ่มที่ใช้ในการเติมแต่ง โดยที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือ สารเบนโทรไนต์ (bentonite) ซึ่งเบนโทรไนท์จะช่วยลดการเยิ้มน้ำของซีเมนต์ โดยเฉพาะ W/C ratio ที่ใช้มีค่าสูงถึงสูงมาก เบนโทรไนต์สามารถลดปัญหานี้ได้

สารผสมเพิ่มที่ใช้ในการเติมแต่งอื่นๆที่นำมาใช้อย่างเช่น สารแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride)จ ะถูกใช้เพื่อเร่งการแข็งตัวของสารเกร๊าท์ สารโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) จะถูกใช้เพื่อเร่งการก่อตัวของสารเกร๊าท์และการใช้สารผสมเพิ่มเพื่อป้องกันการไหลทะลักอันเนื่องมาจากการไหลของน้ำใต้ดิน การเติมสารผสมเพิ่มประเภทเร่งความเร็วในการก่อตัวและแข็งตัวนั้นควรทำการเติมอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษ ซึ่งสารเหล่านี้เมื่อทำการเติมในปริมาณที่เกินกว่าค่าที่เหมาะสมอาจทำให้ปูนซีเมนต์หรือสารเกราท์แข็งตัวเกือบจะทันที โดยปกติแล้วมีสองวิธีในการเพิ่มลงในสารเกร๊าท์ คือ วิธีแรกทำการใส่เครื่องกวนในท่อ (Static Mixer) หลังจากผ่านเครื่องกวน (agitator) ทันทีก่อนที่จะส่งซีเมนต์ที่ผ่านการผสมเข้าเครื่องปั๊มแรงดันสูง (high pressure pump) เพื่อลดความเสี่ยงต่อการแข็งตัวภายในอุปกรณ์ วิธีที่สองทำโดยการฉีดสารโซเดียมซิลิเกตผ่านท่อที่แยกไว้ต่างหากผสมกับปูนซีเมนต์โดยตรงลงชั้นพื้นดิน

2.5.2 ดินส่วนเกิน (Spoil)

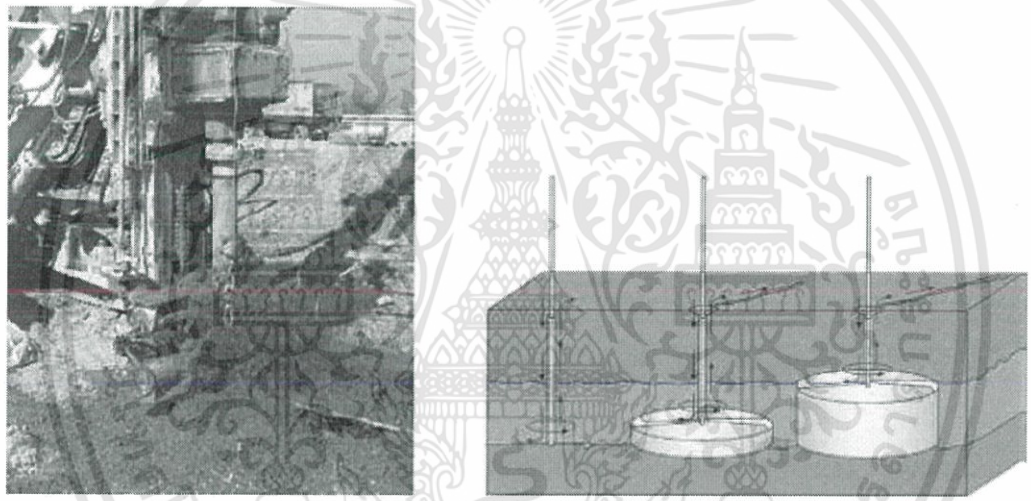
ดังที่กล่าวมาในข้างต้นระหว่างการทำงาน Jet Grouting มีส่วนผสมส่วนหนึ่งที่ได้จากการฉีดอีดน้ำปูนและในส่วนของดินที่ถูกกัดก่อนหรือถูกทำให้มีความร่วนซุยนั้น ไหลขึ้นมายังพื้นผิวดินซึ่งผ่านระหว่างช่องว่างระหว่างก้านเจาะและผนังของหลุม สิ่งเหล่านี้จะถูกเรียกว่า “spoil ” (รูป 2.10) เห็นได้ชัดว่า Spoil เป็นของเสียที่ไม่สามารถมาใช้ในการทำงานระหว่าง Jet Grouting ได้ ซึ่งตามหลักการแล้วควรให้มีปริมาณที่น้อยที่สุดเพื่อความคุ้มทุนและลดปัญหาในการกำจัดหรือการรีไซเคิลซึ่งอยู่ภายใต้กฎระเบียบข้อบังคับทางสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตาม Spoil ที่ไหลขึ้นมาเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำ Jet Grouting ว่าดีหรือเพราะ หากมีการไหลของ Spoil มีอัตราการไหลที่ไม่ช้าจนเกินไปทำให้สามารถรับรู้ได้ว่าหลุมเจาะที่ทำการเกร๊าท์นั้นไม่มีการอุดตัน ถ้าหากมีการพังของหลุมเจาะหรือเหตุการณ์ใดก็ตามที่ทำให้ไม่มีช่องว่างระหว่างก้านเจาะและผนังหลุมเจาะ จะเกิดแรงดันตรงที่หลุมเจาะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้อากาศหรือของเหลวออกไปตามช่องว่างภายในหลุมเจาะเป็นผลให้เกิดการรั่วไหลของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกนอกพื้นที่ทำงานอากก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างโดยรอบได้ นอกจากนี้อาจทำให้เกิดการยกตัว (heave) ที่พื้นผิวดินและมีการเคลื่อนไหวของดินบริเวณที่ทำงานซึ่งเป็นอันตรายได้ต่อโครงสร้างที่อยู่ใกล้เคียงด้วยเช่นกัน

จากกรณีการพังของผนังหลุมเจาะในการทำงานมีวิธีต่างๆเพื่อรักษาเสถียรภาพได้อาทิเช่น การเติมสารเบนโทรไนต์ ซีเมนต์หรือสารช่วยพยุงดินในระหว่างขั้นตอนการเจาะ หรีการใส่ปลอกเหล็ก (casing) ในหลุม แต่อย่างไรก็ตามการใส่ปลอกเหล็กทำให้มีขั้นตอนในการทำงานนั้นยุ่งยากมากขึ้นและมีค่าใช้จ่ายที่สูง เพราะการดึงปลอกเหล็กขึ้นจะต้องทำสลับกับขั้นตอนในการเกร๊าท์



รูป 2.10 ดินส่วนเกินหรือ spoil: (a)การไหลออกของดิน spoil และ (b)ทิศทางการไหลของดิน spoil
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

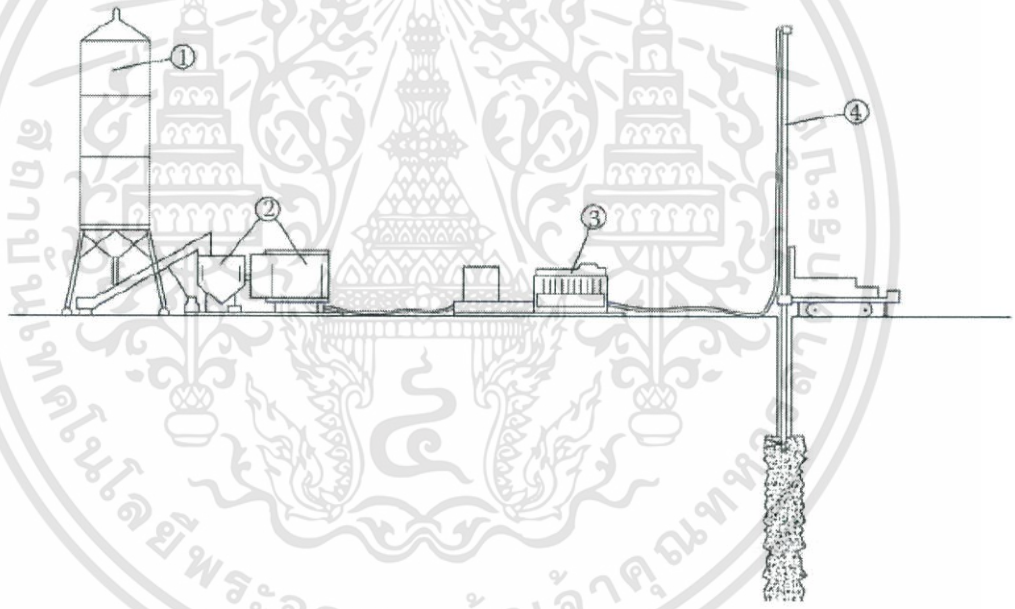
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 Jet Grouting Plant

2.6.1 เครื่องมือพื้นฐาน (Fundamental tools)

โดยทั่วไปแล้ว Jet Grouting Plant จะจัดเป็นลักษณะตามรูป 2.11 ซึ่งในรูปจะอ้างอิงจากระบบ single fluid system เนื่องจากเป็นระบบที่มีลักษณะที่ง่ายที่สุด สำหรับระบบ double fluid system จะมีการนำเครื่องอัดลม (air compressor) มาใช้ในการทำงานด้วย และสำหรับระบบ triple fluid system จะมีการนำเครื่องอัดลมและปั๊มน้ำแรงดันสูง (high-pressure water pump) นำมาใช้ในการทำงาน

เครื่องมือพื้นฐานจะประกอบไปด้วยระบบการผลิตสารเกราท์หรือน้ำปูน ,เครื่องปั๊มน้ำและสารเกร๊าท์ ,เครื่องเจาะ ,ก้านเจาะ ,Monitor และระบบท่อไฮโดรลิค (ท่อและข้อต่อทนแรงดันสูง)



รูป 2.11 Jet Grouting Plant ของระบบ single fluid system (โดย 1.ถังเก็บผงปูนซีเมนต์ (cement silo) , 2. ถังพัก และเครื่องผสม ,3.ปั๊มแรงดันสูง (high-pressure pump) และ 4. อุปกรณ์ใช้ในการเจาะ (drilling equipment)
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 เครื่องผสม (Grout mixing)

สารเกร๊าท์จะถูกผสมโดยเครื่องผสม (automatic grout mixing plant) ซึ่งเครื่องผสมจะต้องมีการทำงานอย่างต่อเนื่อง และต้องได้รับข้อมูลปริมาณของส่วนผสมในการผสมแต่ละครั้ง ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำจะถูกกำหนดตามอัตราส่วนน้ำหนักระหว่างน้ำและซีเมนต์ (W/C ratio) ในส่วนของสารผสมเพิ่มจะใช้ในปริมาณในการใช้ที่เหมาะสมโดยมีการใช้อุปกรณ์ในการวัดปริมาตร

ส่วนผสมที่เกิดขึ้นจากเครื่องผสมเมื่อมีการผสมเสร็จสิ้น ส่วนผสมจะถูกลำเลียงไปยังถังพัก (agitator) และจะถูกส่งไปยังปั๊มแรงดันสูง การผลิตส่วนผสมสารเกร๊าท์ที่จำเป็นสำหรับแต่ละพื้นที่การทำงานโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 m^3/hr.

2.6.3 ปั๊มและคอมเพรสเซอร์ (Pumps and compressors)

องค์ประกอบที่สำคัญสำหรับงาน Jet Grouting คือระบบปั๊ม ในการทำงานไม่ว่าจะเป็นระบบ single , double และ triple fluid system (triple fluid system จะใช้ปั๊มเพื่ออัดให้น้ำมีแรงดันสูง) ล้วนจำเป็นต้องใช้ปั๊มแรงดันสูง (มีแรงดันสูงถึง 50 MPa หรือมากกว่านั้น) เข้ามาทำงาน การทำให้ปั๊มมีการปล่อยสารเกร๊าท์ด้วยแรงดันที่สูงจะอาศัยการทำงานของปั๊มที่ใช้ลูกสูบชนิดพิเศษ ซึ่งปั๊มชนิดนี้จะถูกขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลและมีชุดเกียร์เพื่อปรับอัตราการไหลตามที่ได้กำหนดไว้ ความดันสูงที่ได้กล่าวมามักไม่มีความจำเป็นสำหรับในช่วงการเกร๊าท์ด้วยระบบ triple fluid system เนื่องจากในกรณีนี้มีกระบวนการเปลี่ยนสภาพดินจากการฉีดเพื่อกัดกร่อนจะใช้การฉีดน้ำเป็นตัวทำการกัดกร่อนดินในหลุมเจาะแทน ดังนั้นในช่วงกระบวนการเกร๊าท์ของระบบ triple fluid system จะใช้แรงดันในการเกร๊าท์ไม่เกิน 100 bar

เครื่องอัดลมที่จะถูกใช้ในการทำงาน Jet Grouting ในระบบ double และ triple fluid system จะต้องสามารถอัดลมได้ที่แรงดันในช่วง 12 ถึง 25 bar และมีอัตราการไหลของลมอยู่ที่ 200 ถึง 300 l/s

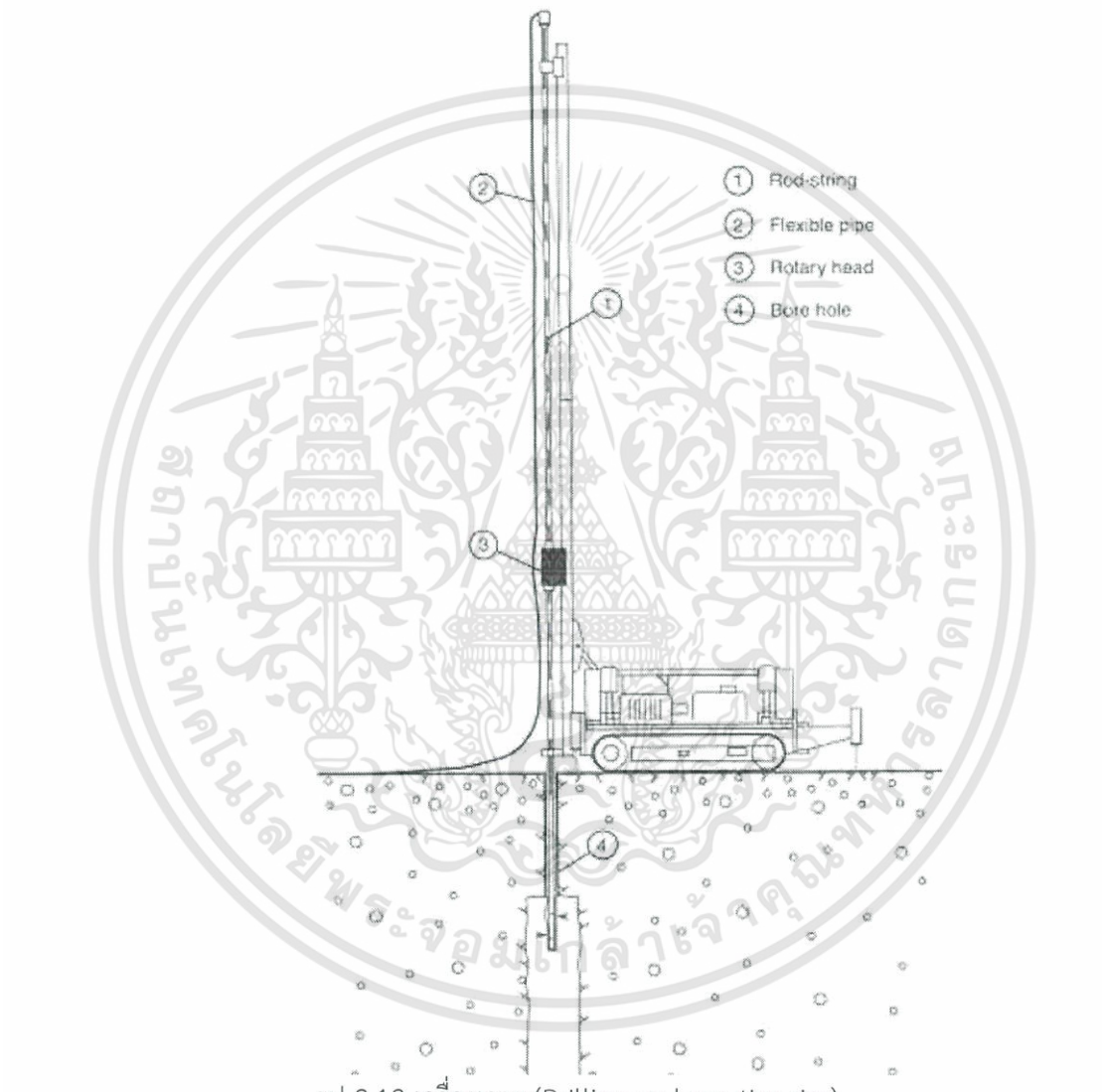
2.6.4 เครื่องเจาะ (Drilling and grouting rigs)

เครื่องเจาะที่ใช้สำหรับการเจาะและการเกร๊าท์จะมีลักญณะที่แตกต่างกันสำหรับในที่กลางแจ้งและงานใต้ดิน เครื่องเจาะแต่ละเครื่องจะมีท่อเหล็กที่มีลักษณะเป็นท่อกลวง และมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 60 ถึง 140 mm. ท่อเหล็กที่ใช้ในงานระบบ single fluid system ซึ่งมีท่อที่อยู่ภายในเพียงท่อเดียวและมีความแข็งแรงมากกว่าท่อที่ใช้ในระบบ double และ triple fluid system โดยมีท่อข้างใน 2 และ 3 ท่อตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีท่อเหล็กชนิดพิเศษที่สามารถเจาะแบบหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกระแทกไปพร้อมกัน (rotary percussion drilling) ซึ่งจะถูกใช้งานในการทำการเจาะทะลุในชั้นดินที่มีความแข็ง หิน และงานปูน

อุปกรณ์จำพวก monitor และการเจาะ จะถูกติดตั้งไว้ตรงส่วนปลายของก้านเจาะ ท่อเชื่อมที่ติดตั้งอยู่ด้านบนก้านเจาะและเชื่อมต่อกับปั๊มและคอมเพรสเซอร์ผ่านท่อที่มีจำนวนเท่ากับของจำนวนของของเหลวที่ใช้ในการเกร๊าท์



รูป 2.12 เครื่องเจาะ (Drilling and grouting rigs)

(P.LUNARDI, 1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ค่าพารามิเตอร์ในการทำการปรับปรุงคุณภาพดิน (Treatment Parameters)

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting จะสามารถดำเนินการปรับปรุงได้โดยการกำหนดและการควบคุมชุดคุณลักษณะทางด้านเทคนิคซึ่งสามารถเรียกได้ว่าเป็น "พารามิเตอร์การปรับปรุงขั้นพื้นฐาน (basic treatment parameters)" และสามารถจัดกลุ่มได้ดังนี้ (ตาราง 2.1)

- ลักษณะทางกายภาพของเครื่องมือที่ใช้ (Geometrical characteristics)
- ตัวแปรทางจลศาสตร์ที่กำหนดการเคลื่อนที่ของก้านเจาะ (Kinematic variables)
- ส่วนประกอบ ,ความดัน และอัตราการไหลที่ถูกฉีดออกไป (injected fluids)

เห็นได้ชัดว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting แต่ละระบบ (single, double และ triple fluid) จะมีการใช้ค่าพารามิเตอร์ในการเกร๊าท์ที่แตกต่างกัน ค่าพารามิเตอร์บางค่าเช่น ค่าความดัน (fluid pressures), ค่าขนาดหัวฉีด (nozzle diameter) และ อัตราการไหล (flow rates) ไม่สามารถกำหนดค่าแต่ละค่าได้ตรงๆเพราะค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์กัน

ในทางปฏิบัตินั้นจะมีการอ้างอิงค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้แสดงในตาราง 2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจากการพิสูจน์มีดังต่อไปนี้

- ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ขึ้นของ monitor
- การหมุนของ monitor ในแต่ละช่วงการยกก้าน
- ปริมาณการฉีดสารเกร๊าท์ต่อหน่วยความยาวในการปรับปรุงคุณภาพดิน
- จำนวนปูนซีเมนต์ที่ใช้ต่อหน่วยความยาวในการปรับปรุงคุณภาพดิน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์พื้นฐานและค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับมาจากการพิสูจน์จะถูกแสดงในตาราง 2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับมาจากการพิสูจน์จะมีประโยชน์มากในการเปรียบเทียบวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับการใช้วิธีเชิงที่ได้จากการทดลองและวิธีการเชิงตัวเลขในการประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาดิน-ซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.1 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน

พารามิเตอร์	รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	
			หน่วย S.I.	หน่วยที่ใช้ในการปฏิบัติ
Geometrical	Number of nozzles	M	–	–
	Nozzle diameter	d	m	mm
	Lifting step	Δs	m	cm
Kinematic	Time interval per step	Δt	s	s
	Rotational velocity	ω	rad/s	round/min
	W-C ratio by weight	W/C	–	–
Injected fluids	Fluid pressure[1]	p_g, p_w, p_a	MPa	bar
	Fluid flow rate[1]	Q_g, Q_w, Q_a	m^3/s	L/min

หมายเหตุ : [1]เกร๊าท์ (g), น้ำ (w) และ อากาศ(a)

ตาราง 2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการพิสูจน์

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการพิสูจน์	ความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในตาราง 1	หน่วย
Average lifting speed of the monitor	$v_r = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	mm/s
Monitor rotations for each lifting step[1]	$n_g = \omega \cdot \Delta t$	-
Injected grout volume per treatment unit length	$V_g = \frac{Q_g}{v_r}$	m3/m
Mass of injected cement per treatment unit length[2]	$w_g = \frac{\rho_g \cdot v_g}{1 + w/c}$	kg/m

หมายเหตุ : [1] ω คืออัตราเร็วในการหมุน (RPM)

[2] ρ_g คือความหนาแน่นของสารเกร๊าท์

(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินทั่วไปจะถูกแสดงในตาราง 2.3 จากค่าพารามิเตอร์ที่ให้มาในตารางเป็นเพียงช่วงที่ได้แนะนำซึ่งในบางครั้งอาจจะใช้ค่าพารามิเตอร์นอกเหนือจากที่ได้แนะนำ นอกจากนี้ด้วยเทคโนโลยีของปั๊ม, monitor, หัวฉีด และขั้นตอนการทำงาน ได้รับการพัฒนาไปได้อย่างรวดเร็ว และช่วงค่าพารามิเตอร์ที่ให้ในตารางอาจจะอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญภายในอนาคตอันใกล้นี้

ตาราง 2.3 ค่าพารามิเตอร์ทั่วไปที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน

ค่าพารามิเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย	ระบบ		
			Single fluid	Double fluid	Triple fluid
Lifting step	Δs	mm	40–50	40–80	40–100
Average lifting speed	v_r	mm/s	4–10	1–8	0.5–5
Rotational velocity	ω	rpm	5– 40	3–30	1– 40
Nozzle diameter	d	mm	2–8.0	2–8	2–8
Number of nozzles	M	–	1–2	1–2	1–2
Grout pressure	p_g	MPa	30–55	20– 40	2–10
Air pressure	p_a	MPa	–	0.5–2.0	0.5–2.0
Water pressure	p_w	MPa	–	–	20–55
Grout flow rate	Q_g	L/s	2–10	2–10	2.0–5
Air flow rate	Q_a	L/s	–	200–300	200–300
Water flow rate	Q_w	L/s	–	–	0.5–2.5
W-C ratio by weight	W/C	–	0.60–1.25	0.60–1.25	0.40–1.0

(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอคู่มือกาปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กรณีศึกษาในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยจะแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ เริ่มต้นจากค้นคว้าหาบทความ งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งทางอินเทอร์เน็ตและนิตยสาร ทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎี และหลักการในเชิงเทคนิคเบื้องต้น จากนั้นเป็นการวางกรอบแนวความคิด เพื่อจัดการข้อมูล และกำหนดแนวทางในการวิจัย และต่อมาคือการศึกษาการปฏิบัติงานจริงด้วยการออกภาคสนาม และศึกษาในภาคสนามเพื่อรวบรวมข้อมูลและปัญหาต่างๆ ในส่วนการปรับปรุงคุณภาพดินในชั้นดินกรุงเทพฯเพื่อนำมาทำคู่มือ สุดท้ายคือการจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กรณีศึกษาในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม เพื่อเป็นหนังสือคู่มือสำหรับการพัฒนาบุคลากรของหน่วยงานต่อไปในอนาคต ตามเป้าหมายของงานวิจัย

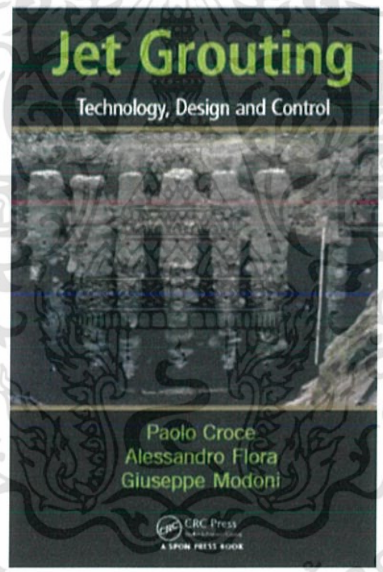
3.1 ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาค้นคว้าความรู้และทฤษฎีที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย โดยทำการรวบรวมจากบทความทาง วิชาการ หนังสือ เอกสารต่างๆ การเข้าร่วมฟังบรรยายในการประชุมในทุกสัปดาห์ บทสัมภาษณ์จากผู้ที่เกี่ยวข้อง และวิทยานิพนธ์จากทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อทำความเข้าใจกับงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในชั้นดินกรุงเทพฯซึ่งมีขอบเขตและเนื้อหาดังนี้

1) แนวคิด และหัวข้อในเล่มที่เหมะสมของคู่มือที่ควรมีสำหรับการปฏิบัติงาน
2) แนวคิด และความสำคัญของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting สำหรับงานเตรียมการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินกรุงเทพฯ
3) แนวคิดและทฤษฎีของของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting
4) แนวทางการปฏิบัติงานสำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ
5) ผลงานวิจัย หรืองานศึกษาค้นคว้าต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยจะทำการศึกษา การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting จาก บทความทางวิชาการ หนังสือ เอกสารต่างๆ และวิทยานิพนธ์จากทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งเป็นแนวทางในการจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กรณีศึกษาในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้มของผู้วิจัย ประกอบไปด้วย Jet Grouting Technology, Design and Control, บทความเชิงวิชาการ Ground improvement by means of jet-grouting ของ University of Parmar,หนังสือ Execution of special geotechnical works —Jet grouting จาก BSI British standards – BS EN 12716-2001, เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ คู่มือการก่อสร้างและแนวทางแก้ไขปัญหาการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์: กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ จากศูนย์วิจัย และพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ Method Statement ในหน่วยงาน



รูป 3.1 หนังสือ Jet Grouting Technology, Design and Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ground improvement by means of jet-grouting

Introduction

The jet-grouting technique

รูป 3.2 บทความเชิงวิชาการ Ground improvement by means of jet-grouting ของ University of Parmar

BRITISH STANDARD

BS EN 12716:2001

Execution of special geotechnical works — Jet grouting

BSI

รูป 3.3 หนังสือ Execution of special geotechnical works —Jet grouting จาก BSI British standards – BS EN 12716-2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 3.4 เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการคู่มือการก่อสร้างและแนวทางแก้ไขปัญหาการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์: กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ จากศูนย์วิจัย และพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2 การวางกรอบแนวความคิด กำหนดแนวทางในการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้ได้คู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ที่มีความถูกต้องครบถ้วน และสามารถนำไปใช้งานได้จริง ได้มีการพิจารณาในหัวข้อย่อยๆดังต่อไปนี้

1) ทบทวนวัตถุประสงค์ของงานวิจัย
2) ทบทวนเนื้อหา
3) ศึกษาการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting
4) วิเคราะห์ และสรุปผลงานวิจัย

3.3 ศึกษาในภาคสนามเพื่อรวบรวมข้อมูลและปัญหาต่างๆ

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ทำควบคู่ไปกับการศึกษาหลักการและทฤษฎีในบทความทางวิชาการ หนังสือ เอกสารต่างๆ และวิทยานิพนธ์จากทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบเพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงสาเหตุในการปรับเปลี่ยนขั้นตอนในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting แล้วนำมาสรุปผลนำไปสู่การทำคู่มือต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กรณีศึกษาในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting สำหรับในชั้นดินกรุงเทพฯทั้งในส่วนทฤษฎี และปฏิบัติแล้วขั้นตอนนี้คือการจัดทำคู่มือ “คู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กรณีศึกษาในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม” โดยในคู่มือนั้นจะประกอบด้วยขั้นตอนการทำการทดลองาคสนาม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการทำเสาดิน-ซีเมนต์ในการก่อสร้างจริง (Field trials) การการทำงานจริงในภาคสนาม และงานประยุกต์ ซึ่งเนื้อหาถูกรวบรวมไว้ในบทที่ 4 ของเล่มโครงงานสหกิจนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะมีเนื้อหาในส่วนของเล่มคู่มือการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม ซึ่งเนื้อหาทางผู้วิจัยที่จัดทำขึ้นจะมีหัวข้อตั้งแต่การเริ่มปฏิบัติงานในขั้นต้น คือ การทดลองภาคสนาม (Field Trials) การปฏิบัติงานจริง และ งานประยุกต์ โดยเนื้อหาทั้งหมดจะมีดังนี้

4.1 การทดลองภาคสนาม (Field Trials)

4.1.1 วัตถุประสงค์

ทดลองภาคสนาม (Field Trials) จะประกอบไปด้วยการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในขั้นต้นและการทดสอบสำหรับหาผลของการปรับปรุงคุณภาพดินเป็นไปตามที่ออกแบบได้กำหนดไว้ จุดประสงค์ของการทดลองภาคสนามสามารถสรุปได้ดังนี้

- เพื่อเลือกระบบการทำ Jet Grouting และเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานปรับปรุงคุณภาพดิน
- เพื่อประเมินผลการปรับปรุงคุณภาพดินตามข้อกำหนดของโครงการก่อสร้าง
- เพื่อตรวจสอบผลกระทบของการปรับปรุงคุณภาพดินต่อสภาพแวดล้อมโดยรอบและโครงสร้าง
- เพื่อปรับแต่งขั้นตอนการควบคุมที่จะใช้ในระหว่างการก่อสร้าง

4.1.2 การควบคุม

การทดลองภาคสนามจึงเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับการเชื่อมโยงการเปลี่ยนแปลงระหว่างการออกแบบและการดำเนินงาน Jet Grouting ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนที่จะเริ่มทำงานจริงจึงช่วยลดความไม่แน่นอนและป้องกันการเกิดผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ การตรวจสอบผลของการทดลองภาคสนามอาจนำไปสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับเทียบการแก้ปัญหาจากที่ได้พิจารณาไว้ในช่วงแรกหรือในบางกรณีอาจนำไปสู่การออกแบบใหม่ได้

การทดลองภาคสนามเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการสร้างโครงสร้างจากงาน Jet Grouting ที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย ดังนั้นการทดลองภาคสนามควรดำเนินการด้วยความระมัดระวังรอบคอบ และเน้นทุกประเด็นที่เกี่ยวข้องที่ต้องผ่านการทดสอบที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามความสำคัญของผลการทดลองภาคสนามขึ้นอยู่กับความคล้ายคลึงกันของสภาพธรณีวิทยาเมื่อเทียบกับพื้นที่ก่อสร้างจริง ดังนั้นการทดสอบภาคสนามควรดำเนินการในบริเวณใกล้เคียงกับที่ทำงานหรืออย่างน้อยที่สุดควรให้มีการทดลองในสภาพดินในทางธรณีวิทยาที่คล้ายคลึงกัน

ระบบต่างๆที่ใช้ในการทำงาน Jet Grouting (Single, Double หรือ Triple fluid) และชุดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินอาจถูกทดสอบในระหว่างการทดลองภาคสนามด้วย โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับเทียบขั้นตอนการปฏิบัติและการดำเนินงานตามความคุ้มค่าทางด้านต้นทุน โดยจุดมุ่งหมายนี้สามารถทำได้โดยการสร้างเสาดิน-ซีเมนต์ต้นแบบที่มีการผสมผสานค่าพารามิเตอร์การปรับปรุงคุณภาพดินที่แตกต่างกันและเปรียบเทียบผลลัพธ์ เมื่อใดก็ตามที่เป็นไปได้ควรขุดดินรอบข้างหลังการบำบัดเพื่อวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาและตรวจสอบความต่อเนื่องของวัสดุที่ได้จากการทำ Jet- Grouting

4.1.3 การทดลองภาคสนามในโครงการ

ในส่วนการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินตั้งแต่สถานีหัวหมากจนถึงสถานีคลองบ้านม้า มีการปรับปรุงคุณภาพดินในชั้นดินดังต่อไปนี้

1) ชั้นดินเหนียวอ่อน (Bangkok soft clay)
2) ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่ 1 (First stiff clay)
3) ชั้นทราย (Bangkok aquifer sand)

ข้อกำหนดในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในโครงการจะต้องมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

1) ดินที่ถูกปรับปรุงจะต้องมีเนื้อเดียวกัน โดย Total Core Recovery (TCR) ≥ 85% มีการประเมินผลโดยการตรวจสอบลักษณะชิ้นงานที่เก็บขึ้นมาจากหลุมเจาะด้วยตาเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) Unconfined compressive strength (UCS) ที่อายุครบ 28 วัน อยู่ในช่วง 500 ถึง 1,500 kPa ซึ่งจะต้องตรวจสอบในห้องทดลอง

3) ดินที่ถูกปรับปรุงอายุครบ 28 วันจะต้องมีค่าซึมผ่านน้อยกว่า 1×10^{-6} m/s ทดสอบ ณ สถานที่ก่อสร้างด้วยวิธี Lefranc water test

กลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์ที่สร้างขึ้นในระหว่างการทดลองภาคสนาม (Field Trials) ประกอบด้วย 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม A, B, C และ D ตามลำดับ ซึ่งขนาดของเสาและกระบวนการ Pre-cutting ที่ใช้ในแต่ละกลุ่มเสาจะแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ตารางระบุขนาดของเสาและการใช้ Pre-cutting สำหรับที่ใช้ในการทดลองภาคสนาม

กลุ่มเสา	รหัสเสา	ขนาดหน้าตัดเสา (m.)	ระดับบนสุดของเสา (m.)	ระดับล่างสุดของเสา (m.)	ความยาวเสา (m.)	Pre-cutting ด้วยน้ำ
A (Double-fluid)	A2	1.4	-2.00	-5.00	3.00	ใช้
	A3	1.6	-2.00	-5.00	3.00	ใช้
	A4	1.4	-2.00	-5.00	3.00	ไม่ใช้
	A5	1.6	-2.00	-5.00	3.00	ไม่ใช้
B (Double-fluid)	B1-B6	1.4	-2.00	-16.00	14.00	ขึ้นกับผลที่ได้จากเสากลุ่ม A
C (Double-fluid)	C1-C6	1.6	-2.00	-26.00	24.00	ดินเหนียว : ขึ้นกับผลที่ได้จากเสากลุ่ม A ดินทราย : ใช้
D (Single-fluid)	D1-D10	0.80	-2.00	-16.00	14.00	ขึ้นกับผลที่ได้จากเสากลุ่ม A

หมายเหตุ : กำหนดให้ระดับผิวดินอยู่ที่ 0.00 เมตร

กลุ่ม A ถูกสร้างขึ้นเป็นเสาเดี่ยวมีความลึกอยู่ในระดับตื้นโดยมีความลึกอยู่ที่ 5 เมตร วิธีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินจะใช้การ Jet Grouting ด้วยระบบ Double-fluid (air) system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบไปด้วยเสาดิน-ซีเมนต์ต้นเดี่ยวจำนวน 4 เสา ประกอบไปด้วย A2, A3, A4 และA5 วัตถุประสงค์หลักของกลุ่ม A รวมถึงการตรวจสอบวิธีการปฏิบัติงานในการทำงาน Jet Grouting ด้วยระยะเวลาที่เหมาะสมและคุณภาพ รวมถึงการใช้ผลจากการตรวจสอบเพื่อเป็นพื้นฐานในการตั้งค่าพารามิเตอร์ในกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์ในกลุ่มต่อไป

การตรวจสอบกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์กลุ่ม A จะทำการตรวจสอบโดยการขุดเปิดหน้าดินจนถึงระดับบนสุดของเสาดิน-ซีเมนต์เพื่อนำขนาดหน้าตัดจริงของเสาไปเปรียบเทียบกับขนาดหน้าตัดของเสาที่ได้คาดไว้

กลุ่ม B ถูกสร้างเป็นกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์ขนาดใหญ่ ในกลุ่มเสาประกอบไปด้วยเสาดิน-ซีเมนต์จำนวน 6 ต้น โดยมีความลึกในการเจาะอยู่ที่ 16 เมตร และความลึกในการเกร๊าท์ทั้งหมดอยู่ที่ 14 เมตร ส่วนปลายของเสาจะฝังลึกลงไปในชั้นดินเหนียวแข็ง (First stiff clay) เป็นระยะ 1 เมตร ในการทดลองภาคสนามของการปรับปรุงคุณภาพดินของกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์กลุ่ม B จะเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินในส่วนของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok soft clay) ระยะจากจุดศูนย์กลางเสาถึงจุดศูนย์กลางเสาในต้นถัดไปออกแบบไว้ที่ระยะห่าง 1.055เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ออกแบบไว้ที่ 1.40 เมตร เสาในกลุ่ม B จะใช้ระบบ Double-fluid (air) system

เสาดิน-ซีเมนต์ในกลุ่ม B ถูกออกแบบไว้ให้เป็นเสาต้นแบบของการปรับปรุงคุณภาพดินในสถานที่ดังต่อไปนี้

1. Intervention Shaft 15 (IVS15)
2. สถานีลำสาลี (OR20)
3. Intervention Shaft 16 (IVS16)
4. สถานีศรีบูรพา (OR21)
5. Intervention Shaft 17 (IVS17)
6. สถานีคลองบ้านม้า (OR22)

กลุ่ม C ถูกสร้างเป็นกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์ที่มีความลึกในการเจาะถึง 26 เมตรประกอบไปด้วยเสาดิน-ซีเมนต์เป็นจำนวนเสา 6 ต้น ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ออกแบบไว้ 1.60 เมตร ซึ่งวิธีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินจะใช้การ Jet Grouting เป็นไปด้วยระบบ Double-fluid (air) system เสาในกลุ่ม C จะมีการเริ่มใช้กระบวนการ Pre-cutting ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการปรับปรุงคุณภาพดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชั้นทรายชั้นบน แต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนการ Pre-cutting ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok soft clay) จะขึ้นอยู่กับผลที่ได้จากการทดลองภาคสนามในกลุ่มเสากลุ่ม A

ระยะจากจุดศูนย์กลางเสาถึงจุดศูนย์กลางเสาในต้นถัดไปออกแบบไว้ที่ระยะห่าง 1.055 เมตร ระยะทางดังกล่าวถูกเลือกไว้อย่างรอบคอบสำหรับเสาในกลุ่มนี้เพื่อให้แน่ใจว่ามีการทับซ้อนกันของเสาดิน-ซีเมนต์ตลอดความลึก โดยสถานที่ที่เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์จากเสาต้นแบบในเสากลุ่ม C คือ สถานีหัวหมาก (OR19)

กลุ่ม D ถูกสร้างขึ้นจากกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์จำนวนเสา 10 ต้น โดยการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยระบบ Single fluid system ที่ความลึก 16 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาในกลุ่มนี้ถูกออกแบบไว้ที่ 0.80 เมตร เสาในกลุ่มนี้จะมีขนาดเล็กว่าเสาในกลุ่มอื่นๆ เนื่องจากเสาในกลุ่ม D ไม่ได้มีการใช้ลมเข้ามาใช้งานด้วยในขั้นตอนการ Pre-cutting และขั้นตอนการเกร๊าท์

วิธีการของการทำเสาในกลุ่ม D จะใช้ในสถานที่ที่คาดการณ์ไว้ในกรณีที่ต้องใช้ Jet Grouting ที่มีลักษณะที่เอียงเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางใต้ดินและไม่สามารถใช้วิธี Double-fluid (air) systemเนื่องจากระดับความเอียงทำให้เกิดการพังของดินในหลุมเจาะจากแรงดันลมที่ใช้

4.1.4 ขั้นตอนการทำการทดลองภาคสนาม

4.1.4.1 ขั้นตอนในการทำเสาดิน-ซีเมนต์ต้นแบบ

เสาดิน-ซีเมนต์ในกลุ่ม A จะถูกทำขึ้นก่อนกลุ่มเสากลุ่มอื่นๆ ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการทดลองทำเสากลุ่ม A เพื่อต้องการทราบวิธีในการทำงานในพื้นที่ที่จะก่อสร้างนั้น มีวิธีในการทำงานให้มีคุณภาพอย่างไร หลังจากเสร็จสิ้นการทำเสาดิน-ซีเมนต์ในกลุ่ม A จะทำการขุดเปิดหน้าดินที่ความลึก 2 m. ใต้พื้นดินสำหรับดูผลที่ได้จากการ Jet Grouting ตรงส่วนด้านบนของเสาดิน-ซีเมนต์ หลังจากตรวจสอบผลที่ได้จากการทดลองทำกลุ่มเสาในกลุ่ม A เสาในกลุ่ม B, C และD จะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการทำงานจากผลสรุปที่ได้จากการทำเสาในกลุ่ม A

นอกจากนี้หลังจากเสร็จสิ้นการทำเสาดิน-ซีเมนต์ในกลุ่มต่างๆ จะมีการทำการขุดเปิดหน้าดินเพื่อทำการตรวจสอบและยืนยันการทำงานเป็นไปด้วยวิธีที่มีคุณภาพ

4.1.4.2 วิธีการทำ Pre-cutting

เพื่อลดระยะเวลาในการทำงาน กระบวนการ Pre-cutting จะถูกทำแบบวิธียกก้านเจาะขึ้น เมื่อเสร็จสิ้นการเจาะความดันน้ำจะเพิ่มขึ้นเป็น 30 MPa และความดันอากาศจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MPa ในขณะที่ก้านเจาะจะถูกยกขึ้นจากก้นหลุมเจาะจนถึงระดับสูงสุดที่จะทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความเร็วในการยกก้านที่ได้ถูกกำหนดไว้

ด้วยแนวคิดที่ว่าการหลีกเลี่ยงกระบวนการ Pre-cutting ตลอดความลึกของหลุมเจาะจะสามารถลดระยะเวลาในการทำเสาดิน-ซีเมนต์ นอกจากนี้หากสามารถหลีกเลี่ยงขั้นตอน Pre-cutting ได้ในดินเหนียวอ่อนในกรุงเทพฯจะช่วยให้การทำงานในแต่ละเสาเร็วขึ้น ดังนั้นตัวเลือกระหว่างการทำ Pre-cutting แบบดึงก้านเจาะขึ้น(upstage) และการไม่มีการทำ Pre-cutting จะถูกนำมาสร้างเสาดิน-ซีเมนต์ในกลุ่ม A เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อที่จะนำไปใช้และปรับเปลี่ยนในการทำเสาในกลุ่มต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองภาคสนาม

ตาราง 4.2 ตารางระบุค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองภาคสนาม

Parameters	A2	A3	A4	A5	B1-B6	C1-C6	D1-D10
Jetting							
Depth from bottom of borehole (m)	3.00	3.00	3.00	3.00	8.00	14.00	14.00
W/C ratio	1.0				1.11		
Grout pressure (MPa)	40						
Nozzle (nos.)	2						
Nozzle dia. (mm.)	3						
Uplift rate (cm/min)	30	21.4	30	21.4	24	18.5	36.9
Flow rate (l/min)	150	152	145.7	152	183.6		
Rotation speed (rpm)	24						
Air pressure (MPa)	0.7				1.0		-
Air flow (l/min)	10,000				15,000		-
Backfilling							
Depth from bottom of borehole (m)	ไม่มีการ Backfill				6.00	10.00	-
W/C ratio					1.11		-
Grout pressure (MPa)					40		-
Nozzle (nos.)					2		-
Nozzle dia. (mm.)					3		-
Uplift rate (cm/min)					34.3		-
Flow rate (l/min)					183.6		-
Rotation speed (rpm)					24		-
Air pressure (MPa)					1.0		-
Air flow (l/min)					15,000		-
Cement content (kg/m3)					244	187	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง 4.2 อัตราการยกก้านเจาะขึ้น (uplift rate) ของการทำ Jet Grouting ในกลุ่ม B, C และ D ที่แสดงในตารางเป็นค่าที่ถูกเลือกนำมาใช้จากผลการทำ Jet Grouting ขอเสาในกลุ่ม A ค่าเหล่านี้มีความแตกต่างกันในระหว่างกลุ่มเสาเพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินที่แตกต่างกันไป ซึ่งส่งผลให้มีความแตกต่างของขนาดเสาดิน-ซีเมนต์

สำหรับเสาในกลุ่ม B และ C จะมีการเกร๊าท์จากก้นหลุมตามมาด้วยการ backfill ระดับของความลึกที่เริ่มทำการ backfill ที่ -8.00 เมตร และ -12.00 เมตร ตามลำดับ จนถึงระดับที่ -2.00 เมตร จากผิวดิน (ให้ผิวดินมีระดับ 0.00 เมตร)

ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองภาคสนามโดยเฉพาะเสาในกลุ่ม B, C และ Dได้รับการคัดเลือกอย่างละเอียดเพื่อให้มั่นใจได้ว่าเสาดิน-ซีเมนต์จะต้องมีคุณภาพเพื่อให้ผ่านและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบ (Prove test) อาทิเช่น TCR, UCS, SPT และค่าอัตราการซึม

4.1.4.4 การจัดการ Spoil

ในระหว่างการทำงาน Jet Grouting ได้มีการสร้างร่องสั้นและหลุมขนาดเล็กเพื่อให้สามารถรับ Spoil จากหลุมเจาะและนำออกโดยใช้รถขุด (backhoe) ไปยังถังเก็บภายในพื้นที่ก่อสร้าง หลังจากนั้นจะดำเนินการขนถ่ายออกโดยรถบรรทุกเพื่อนำไปกำจัดในพื้นที่ที่ได้จัดเตรียมไว้

4.1.4.5 แผนการตรวจสอบดินและอาคาร

เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากการทรุดตัวของดินและการยกตัวของดินที่เกิดจากการทำงาน Jet Grouting ที่ผิวดินและบนอาคาร โครงสร้างและงานระบบใต้ดินที่มีอยู่รอบๆบริเวณที่ทำการทดลองภาคสนามจะต้องถูกติดตั้งระบบตรวจสอบการทรุดตัวของดินและการยกตัวของดินในช่วงตอนเริ่มทำการทดลองภาคสนาม

4.1.5 ผลที่ได้จากการทำงาน Jet Grouting ในการทดลองภาคสนาม

4.1.5.1 ผลของการ Pre-cutting ด้วยน้ำ

จากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าพบว่าวิธีการ Pre-cutting แบบยกก้านขึ้น (จากก้นหลุมสู่ปากหลุม) ไม่สามารถทำได้ในชั้นดินกรุงเทพฯ การพังของมวลดินในหลุมเจาะระหว่างการ Pre-cutting แบบยกก้านขึ้นส่งผลให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีดภายนอกทำให้เกิดแรงดันที่ปั๊มเพิ่มสูงขึ้นและ Spoil ไม่ไหลขึ้นสู่บนผิวดิน ทำให้ Spoil เกิดการอุดตันซึ่งทำให้ดินมีการยกตัว (heave) ในระหว่างการทำ Pre-cutting และการเกร๊าท์ (รูป 4.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมีการอุดตันของ Spoil เป็นผลให้เกิดแรงดันภายในหลุมเจาะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้แรงดันลมและน้ำในหลุมเจาะจะระบายออกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินรอบๆหลุมเจาะ ซึ่งผลที่ตามมาก็คือมีการรั่วไหลของลมและ Spoil ในพื้นที่รอบข้างทำให้โครงสร้างรอบๆบริเวณที่ทำการ Jet Grouting ได้รับความเสียหายจากการทำงานนี้ได้

การทำการเกร๊าท์โดยปราศจากขั้นตอนการ Pre-cutting ในการทำเสาดิน-ซีเมนต์ในเสากลุ่ม A เป็นผลให้เกิดการยกตัวของดินอย่างรุนแรงระหว่างขั้นตอนการเกร๊าท์ (รูป 4.2)

ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยทำการ Pre-cutting ด้วยวิธีการกดก้านเจาะลง (downstage) จากระดับใกล้ผิวดินจนถึงระดับที่ก้นหลุมเจาะ จากการ Pre-cutting ด้วยวิธีนี้ทำให้ขนาดช่องทางออกของ Spoil เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การไหลของ Spoil มีประสิทธิภาพมากขึ้นและยังช่วยหลีกเลี่ยงการอุดตันของหัวฉีดในระหว่างการพังของดินในหลุมเจาะ

อย่างไรก็ตามข้อเสียของขั้นตอน Pre-cutting ในการทำงานคือการเสียเวลา ซึ่งขั้นตอนนี้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ตลอดความลึกของหลุมเจาะ สำหรับการทดลองภาคสนามในเสากลุ่ม B, C และ D จะมีการ Pre-cutting จากบนลงล่างด้วยความดันที่ 300 bar ด้วยอัตราการกดก้านลงที่ไม่น้อยกว่า 15 m/hr.

รูป 4.1 การยกตัวของดินที่เกิดจากการ Pre-cutting แบบยกก้านขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.2 การยกตัวของดินที่เกิดจากการเกร๊าท์โดยไม่มีการ Pre-cutting

4.1.5.2 ขนาดของเสาดิน-ซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจริง

หลังจากเสร็จสิ้นการทำเสาดิน-ซีเมนต์ในกลุ่ม A จึงได้ทำการขุดเปิดหน้าดินลงไปที่ระดับ -2.00 เมตร โดยทำการเปิดหน้าดินที่เสาต้น A2, A3 ,A4 และA5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาแต่ละต้นอยู่ที่ระหว่าง 1.80 ถึง 1.90 เมตร และเป็นที่แน่ชัดว่าที่ความลึกที่เพิ่มขึ้นทำให้มีขนาดของเสาลดลงไปด้วยเนื่องจากน้ำหนักกดทับของดิน

อย่างไรก็ตามยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าเหตุใดอัตราการยกที่แตกต่างกันของเสาในกลุ่ม A จึงไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาดิน-ซีเมนต์ ในกรณีอย่างเช่นระหว่างทำการเกร๊าท์มีการเกิดการยกตัวของดินทำให้ขนาดของเสาไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการยกก้านขึ้น เนื่องจากแรงดันที่ทำในการเกร๊าท์ได้แพร่ออกไปในพื้นที่รอบๆที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้

หลังจากเสร็จสิ้นการทำเสาดิน-ซีเมนต์ในกลุ่ม B, C และD ได้ทำการขุดเปิดหน้าดินลงไปที่ระดับ -2.00 เมตร เพื่อตรวจสอบด้วยสายตา เมื่อขุดจนถึงระดับบนสุดของเสาจึงได้ทำการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการคาดการณ์ไว้พร้อมพ่นด้วยสีเพื่อนำขนาดไปเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจริง (รูป 4.4)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาที่เกิดขึ้นจริงของเสาในกลุ่ม B และC ซึ่งระดับบนสุดของเสามีการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการ Backfill (อัตรายกก้านขึ้นที่ 34 cm/min) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจริงอยู่ระหว่างที่ 2.40 – 2.50 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาที่เกิดขึ้นจริงของเสาในกลุ่ม D ซึ่งมีการใช้วิธีในการเกร๊าท์ด้วยระบบ single fluid system ใช้อัตราการยกก้านขึ้นที่ 36.9 cm/min มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจริงอยู่ระหว่างที่ 1.00 – 1.40 เมตร

เมื่อเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้ของเสาในกลุ่ม A และ กลุ่มBและC พบว่าในกลุ่ม BและC มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าเสาในกลุ่ม A ถึงแม้ว่าอัตราการยกก้านขึ้นสำหรับการ Backfill ของเสาในกลุ่ม B และC (34 cm/min) จะมีค่ามากกว่าอัตราการยกก้านขึ้นของการทำเสาในกลุ่ม A (36.9 cm/min) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการ Pre-cutting มีอิทธิพลอย่างยิ่งกับขนาดของเสาดิน-ซีเมนต์ ซึ่งการ Pre-cutting ควรทำจากบนลงล่างสุดของหลุมเจาะเพื่อทำให้เสามีขนาดและกลมโดยไม่ก่อให้เกิดการยกตัวของดิน

รูป 4.3 การขุดเปิดหน้าดินเพื่อตรวจสอบด้วยสายตาของเสาในกลุ่ม A

รูป 4.4 ผลจากกรขุดเปิดหน้าดินเพื่อตรวจสอบขนาดเสาในกลุ่ม B, C และD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 การทดสอบในภาคสนามและกการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.1.6.1 Coring and Total Core Recovery Test (TCR)

การ Coring และการทดสอบ Total Core Recovery Test (TCR) มีวัตถุประสงค์เพื่อทราบความสมบูรณ์ของกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์ ซึ่งการทดสอบนี้จะมีส่วนช่วยในเรื่องหาการซ้อนทับของเสาดิน-ซีเมนต์ว่าซ้อนทับกันหรือไม่ เนื่องจากด้วยน้ำหนักกดทับของดินและความหนาแน่นของดินจะเพิ่มขึ้นตามความลึก ทำให้ขนาดของเสาเล็กลงตามละดับความลึกทำให้ไม่มีการซ้อนทับของเสาในกลุ่มนั้นเกิดขึ้น ดังนั้นการทดสอบ Total Core Recovery Test (TCR) จึงช่วยลดข้อกังวลนี้ได้

การ Coring จะมีการดำเนินการเจาะที่เสาดิน-ซีเมนต์ที่มีอายุครบ 28 วัน ซึ่งประกอบไปด้วยการ Coring จำนวน 4 ชุดในแต่ละกลุ่มเสา (กลุ่ม B, C และD) โดยจะต้องมีหนึ่งตำแหน่งที่ต้องเก็บตัวอย่างตรงจุดศูนย์กลางของเสา หนึ่งตำแหน่งสำหรับตำแหน่งที่ 2 ใน 3 ของรัศมีของเสา และสองตำแหน่งสำหรับพื้นที่ที่มีการซ้อนทับของเสา ในส่วนของการเก็บชิ้นตัวอย่างจะทำการเก็บโดยใช้ Core barrel ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 2 นิ้ว (50.8 มิลลิเมตร)

คุณภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting จะมีการตรวจสอบโดยการวิธี Total Core Recovery Test (TCR) ซึ่งจะต้องมีค่า TCR ไม่น้อยกว่า 85% ของชิ้นตัวอย่างที่ได้หลุมเจาะ หากค่า TCR ที่ได้จากการเก็บชิ้นตัวอย่างทั้งหมดน้อยกว่า 85% จะถือว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet- Grouting นี้ไม่ผ่านเกณฑ์ โดยจากผลการทำการทดสอบค่า TCR อยู่ที่ 93 - 100% ถือได้ว่าเสาดิน-ซีเมนต์ต้นแบบในกาทำการทดลองภาคสนามมีความสมบูรณ์

รูป 4.5 เครื่องจักรที่ใช้ในการ Coring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.6 ชิ้นตัวอย่างที่ได้มาจากการ Coring

4.1.6.2 Unconfined Compressive Strength Test

ค่า Unconfined compressive strength หรือค่า UCS เป็นลักษณะทางกลหลักของดินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting โดยหลักการแล้วใช้ทดสอบกำลังความสามารถในการรับแรงเฉือนของดินเหนียวที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) โดยผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ซึ่งจะต้องผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีการใช้ชิ้นตัวอย่างจำนวน 3 ชิ้นต่อหลุมที่ถูกทำการ Coring ในตำแหน่ง ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างสุดของหลุมเจาะที่ทำการเก็บตัวอย่างขึ้นมา

รูป 4.7 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ Unconfined compressive strength

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการทดสอบ UCS จากห้องปฏิบัติการจะต้องมีค่าน้อยสุดละมากสุด (500 kPa ≤ ค่า UCS ที่ 28 วัน ≤ 1500 kPa) ตามข้อกำหนดที่ถูกออกแบบมา ในบางกรณีอย่างเช่นผลการทดสอบของชิ้นตัวอย่าง ซึ่งอาจจะมีค่าที่ได้จากการทดสอบ UCS ไม่ผ่าน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการวางชิ้นตัวอย่างไม่มีการตั้งฉากกับเครื่องกดตัวอย่างทั้งสองด้าน สังเกตจากการแตกหักของชิ้นตัวอย่างเพียงเล็กน้อยเมื่อได้รับกำลังอัดในแนวแกนและมีลักษณะการพังที่น้อยมากเมื่อนำไปเทียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างอื่นๆ หรืออาจเป็นผลมาจากการเก็บชิ้นตัวอย่างที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาได้รับการรบกวนจากแรงภายนอกซึ่งทำให้ชิ้นตัวอย่างได้รับความเสียหาย และประการที่ร้ายแรงสุดคือค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างไม่ได้ตามที่กำหนด

เพื่อให้ได้ค่า UCS ตามที่ถูกกำหนดไว้จึงได้ทำการนำชิ้นตัวอย่างที่ถูกเก็บมาจากหลุมเดียวกันที่ความลึกเดียวกันมาทดสอบอีกครั้ง ซึ่งผลที่ได้มาจากชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบเพิ่มมีค่า UCS ที่ผ่าน ซึ่งอาจเป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าในชุดกลุ่มเสาที่ถูกทำขึ้นในการทดลองภาคสนามเป็นที่ยอมรับได้จากผลการทดสอบค่า Unconfined compressive strength หรือค่า UCS ของกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม อยู่ที่ 500 kPa - 1400 kPa ถือได้ว่าผ่าน

4.1.6.3 Standard Penetration Test (SPT)

Standard Penetration Test (SPT) หรือการตอกทดลองมาตรฐานเป็นการตรวจสอบความแข็งแรงของชั้นดินที่นิยมที่สุดในประเทศไทย การทดสอบดำเนินการร่วมไปกับการเก็บตัวอย่างโดยกระบอกผ่า หลักการทดสอบคือ เมื่อเจาะดินถึงระดับที่ต้องการทราบความแข็งแรง กระบอกผ่าจะถูกตอกลงไปในดินเป็นความลึก 18 นิ้ว โดยใช้ลูกตุ้มขนาดมาตรฐานหนัก 140 ปอนด์ ยกสูง 30 นิ้ว ระยะจม 18 นิ้ว ถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง ช่วงละ 6 นิ้ว แต่ละช่วงจะทำการบันทึกจำนวนครั้งที่ใช้ในการตอกเพื่อให้กระบอกผ่าจมลงไป 6 นิ้ว ดังนั้นถ้าชั้นดินเป็นดินแข็งจะต้องให้พลังงานในการตอกมากหรือใช้จำนวนครั้งในการตอกมากนั่นเอง จำนวนการตอกใน 6 นิ้ว แรกจะไม่นำมาใช้เนื่องจากสภาพดินกันหลุมอาจถูกรบกวนจากการเจาะสำรวจมากทำให้ความแข็งแรงของดินเปลี่ยนไปจำนวนการตอกในช่วงที่เหลือจำนำมารมกันให้ได้ค่าจำนวนครั้งการตอกมาตรฐานหรือค่า N ดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบต่อไป

การทดสอบ SPT เหมาะสำหรับการทดสอบ ดินเหนียวแข็งถึงแข็งมากและทรายแน่น (Stiff-Clay, Hard Clay และ Dense Sand) แต่ไม่เหมาะสำหรับดินเหนียวอ่อน ถึงแข็งปานกลางและทรายหลวม (Soft Clay, Medium Clay และ Loose Sand) ทั้งนี้เพราะดินอ่อนไม่สามารถต้านพลังงานจากการตอกได้ บางครั้งการตอกครั้งเดียว การบอกผ่าอาจจมลงไปมากกว่า 18 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งของดินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting จะต้องได้รับการทดสอบโดยใช้วิธี Standard Penetration Test หรือ SPT ที่ระดับความลึกที่ถูกกำหนดไว้ (ส่วนบน, ส่วนกลาง และส่วนล่าง)ของหลุมเจาะ ตรงบริเวณพื้นที่ที่มีการซ้อนทับของเสาดิน-ซีเมนต์ ทั้งนี้การทดสอบ SPT เป็นการทดสอบเพื่อให้มีความสอดคล้องกับการทดสอบ Unconfined Compressive Strength Test หรือไม่ ซึ่งโดยหลักทฤษฎีแล้วค่า SPT จะมีความสัมพันธ์กับค่า UCS

จากผลการทดสอบ SPT และความแน่นสัมพัทธ์ของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพเมื่อนำมาเทียบกับดินธรรมชาติ จากผลการทดสอบ SPT พบว่าความแน่นสัมพัทธ์ของดินที่ผ่านการปรับปรุงทั้งหมดจะอยู่ในช่วงชั้นดินเหนียวแข็ง (SPT > 30 N/ft และ UCS ≥ 4 ksc or 392 kPa) หรือชั้นทรายที่มีความแน่นมาก (SPT > 50 N/ft)

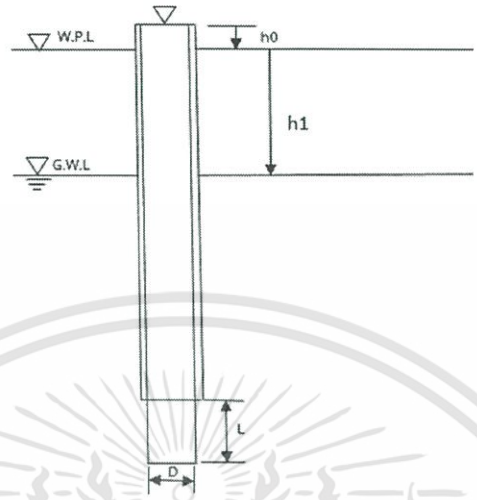
รูป 4.8 การทดสอบ Standard Penetration Test

4.1.6.4 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในภาคสนาม (In-situ Permeability Test)

การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) หรือสัมประสิทธิ์การซึม (hydraulic conductivity) ของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพในขั้นตอนการทดลองภาคสนาม ซึ่งสามารถทดสอบด้วยวิธี in-situ Lefranc water test ตรงบริเวณความลึกที่ได้กำหนดไว้ โดยการทดสอบจะใช้หลักการรักษาระดับน้ำหลังจากมีการลดระดับน้ำตามเวลาที่ได้กำหนด ในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึม (K) ต้องไม่มากกว่า 1×10^{-6} m/s ตามค่าที่ถูกกำหนดไว้ จากผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึม (K) อยู่ที่ 3.6×10^{-8} - 4.0×10^{-7} m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบจะทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในภาคสนามโดยจะมีการบันทึกผลและการคำนวณดังนี้



สูตรการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

$$C = \frac{2\pi}{\ln(2L/D)}$$

$$H = h0 + h1 \text{ m.}$$

$$K = \frac{Q}{(C \times H \times 1000)} \text{ m/s.}$$

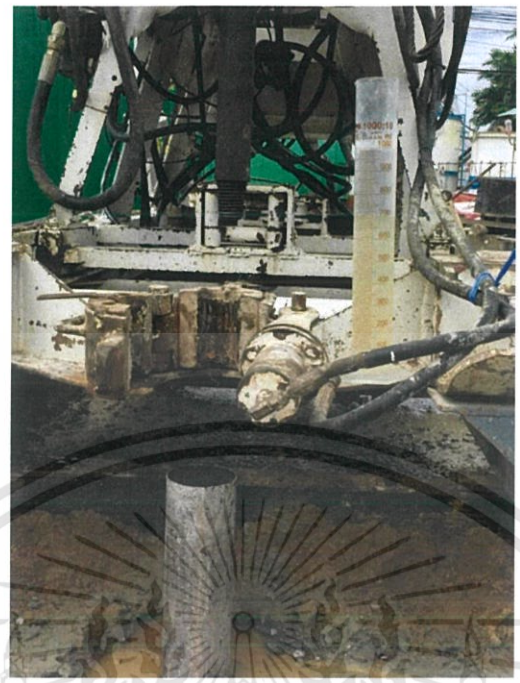
โดยค่า L = ระดับของก้นหลุมถึงระดับของก้นปลอกเหล็ก เท่ากับ 0.50 m.

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะ m.

h0 = ระยะของระดับน้ำถึงระดับพื้นดินเดิม m.

h1 =ระดับน้ำใต้ดิน m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.9 การทดสอบ in-situ Lefranc water test

4.1.7 ข้อสรุปจากการทดลองภาคสนาม

หลังจากเสร็จสิ้นการทำ Jet Grouting และการทดสอบเสาดิน-ซีเมนต์ (Prove test)ตามที่ถูกกำหนดไว้ ในขั้นตอนการทดลองภาคสนาม เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถทำงานได้จริง

โดยผลจากการทดลองภาคสนามที่มาจากการทดสอบในคุณสมบัติต่างๆนี้มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์ทุกประการ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองภาคสนามสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม (ช่วงหัวหมาก-คลองบ้านม้า)

จากประสบการณ์ที่ได้จากการทำงานในขั้นตอนการทดลองภาคสนาม ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานที่สามารถทำงานได้จริง และเพื่อลดโอกาสเสี่ยงจากการทำงานจริงจึงมีคำแนะนำในการทำ Jet Grouting ในที่ทำงานจริงสำหรับโครงการก่อสร้างก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม มีดังนี้

- ขั้นตอนการ Pre-cutting เป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นสำหรับการทำ Jet Grouting และขั้นตอนในการทำควรทำจากบนลงล่าง (กดก้านเจาะลง) ตลอดความลึกที่ทำการเจาะเพื่อเป็นการลดการยกตัวของดินและเพื่อให้ได้ขนาดของเสาตามที่ได้ออกแบบไว้
- การจัดการ spoil รวมไปถึงถังที่ใช้รองรับและรถที่ใช้ในการขนถ่ายเพื่อนำไปกำจัดจะต้องมีการทำงานที่ต่อเนื่องตลอดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในทางด้านความปลอดภัยบริเวณที่ทำงาน การ backfill หรือการปิดปากหลุมเจาะด้วยซีเมนต์ที่ใช้ในการเกร๊าท์ตรงบริเวณปากหลุมเจาะ ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อลดการพังของหน้าดินตรงปากหลุมเนื่องจากหากไม่มีการ backfill ด้วยซีเมนต์ ดินที่อยู่ตรงบริเวณปากหลุมจะมีความอ่อนมากจากกระบวนการ Pre-cutting ซึ่งมีการรับน้ำหนักได้น้อยอาจเป็นอันตรายในการทำงานในอนาคตอันใกล้ได้
- การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในชั้นดินทราย (1st sandy layer) จะต้องทำงานด้วยความระมัดระวังในเรื่องแรงดันของน้ำใต้ดินและการไหลขึ้นมาของน้ำจากชั้นหินอุ้มน้ำ ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถทำให้หลุมเจาะมีการถล่มส่งผลให้มีการอุดตันที่หัวฉีดได้
- ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำ Jet Grouting ในการทำงานจริงถูกสรุปไว้ในตาราง 4.3 แรงดันที่ใช้ในการเกร๊าท์สามารถปรับได้ โดยการปรับค่า uplift rate และ grout flow rate เพื่อเป็นการรักษาเครื่องปั๊มแรงดันและท่อส่งทำงานเกินขีดจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำงานที่มาจากผลการทดลองภาคสนาม

รายการ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาดิน-ซีเมนต์ (m)		
	1.40	1.60	0.80
ชั้นดินที่ทำการปรับปรุง	ชั้นดินเหนียวอ่อน	ชั้นดินเหนียวอ่อนและ ชั้นทราย	ชั้นดินเหนียวอ่อน
ระยะห่างกันระหว่างจุดศูนย์กลางเสา	1.055		0.55
ระบบที่ใช้ในการทำงาน	Double-fluid (air)		Single-fluid
จำนวนหัวฉีด	2		
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (mm)	3		
ค่าพารามิเตอร์ในขั้นตอน Pre-cutting (บนลงล่าง)			
Water pressure (MPa)	30		
Water flow rate (l/min)	180-200		
Penetration rate (m/hr)	≥15		
Rotation speed (rpm)	30		
Air pressure (MPa)	0.7		-
Air flow rate (l/min)	10,000		-
ค่าพารามิเตอร์ในขั้นตอนการเกร๊าท์ (ล่างขึ้นบน)			
Water/cement ratio	1.11		
Grout pressure (MPa)	40		
Uplift rate (cm/min)	24	18.5	36.9
Rotation speed (rpm)	24		
Air pressure (MPa)	1		-
Air flow rate (l/min)	15,000		-
Cement content (kg/m^3)	348	346	693

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทำงานจริงในภาคสนาม

หลังจากทำการทดลองภาคสนาม (Field trials) เสร็จสิ้นข้อสรุปสำหรับการทำงานและค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจะถูกนำมาใช้จริงในการทำงานจริงในภาคสนาม ซึ่งการทำงานในภาคสนามจริงจะมีการใช้องค์ประกอบต่างๆในการทำงานตั้งแต่ในเรื่องของอุปกรณ์ที่ใช้ การทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของสารเกร๊าท์ ขั้นตอนการทำงานในระยะเริ่มต้นก่อสร้างจนถึงระยะการทำเสาดิน-ซีเมนต์และการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการทำงานเพื่อรักษาพลังงานที่ใช้สร้างเสาดิน-ซีเมนต์จากการทำ Jet Grouting ในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม (ช่วงหัวหมาก-คลองบ้านม้า) จะถูกอธิบายในหัวข้อนี้

4.2.1 ระบบที่ใช้ในการทำ Jet Grouting ในโครงการ

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม (ช่วงหัวหมาก-คลองบ้านม้า) จะใช้ระบบ double (air) fluid system เป็นหลัก อย่างไรก็ตามอาจนำระบบ single fluid system เข้ามาใช้ในการทำงานด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

- มีสิ่งกีดขวางที่อยู่บนผิวดินหรืองานระบบที่อยู่ใต้ดิน (ท่อเคเบิ้ล, ท่อประปา, ท่อน้ำทิ้ง และอื่นๆ) ที่ไม่สามารถทำการเบี่ยงหรือถอนออกมาได้ จำเป็นต้องมีการทำเสาดิน-ซีเมนต์ในลักษณะเอียงเป็นมุมมากกว่า 10° ในแนวดิ่ง
- เสาดิน-ซีเมนต์ที่จะสร้างอยู่ใกล้เคียงกับฐานรากและโครงสร้างมาก
- ในสถานที่การทำงานที่มีความต้องการให้มีผลกระทบจากการทำงาน (การยกตัวของดินหรือการทรุดตัวของดิน) ในพื้นที่ข้างเคียงที่น้อยที่สุด

4.2.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับในการทำงาน

ในส่วนของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพดินบริเวณหน้า soft eye zone (TBM break in – out) และในส่วนการปรับปรุงคุณภาพดินในบริเวณที่เปลี่ยนฟันหัวเจาะ (TBM maintenance cutter bits) ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีส้มมีดังนี้

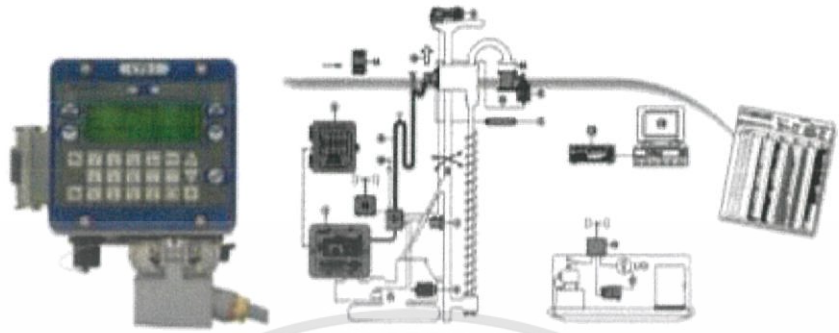
1) เครื่องเจาะ SOILMEC SM-14 (รูป 4.10) พร้อมอุปกรณ์การบันทึกค่าพารามิเตอร์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในขั้นตอนการเจาะและการเกร๊าท์ JEAN LUTZ LT3 (รูป 4.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

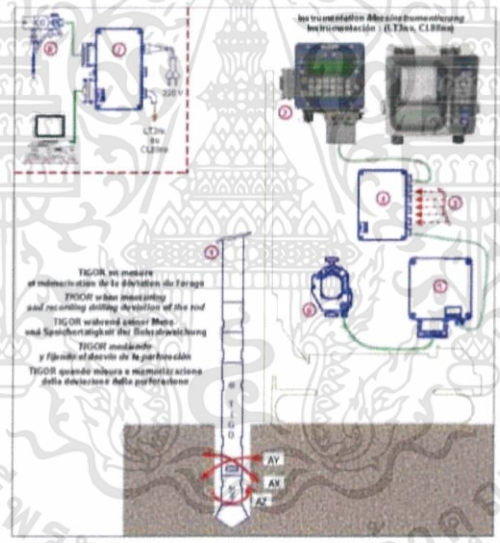
2) Computerize magnetic bi-axial inclinometer and recorder JEAN LUTZ TIGOR (รูป 4.12)
3) Automatic grout mixing plant ประกอบไปด้วย ถังเก็บผงปูนซีเมนต์ (cement silo) ขนาดความจุอยู่ที่ 30 ตัน (รูป 4.13a), ถังผสม (Mixer) (รูป 4.13b) และ ถังพัก (Agitator) ขนาดความจุอยู่ที่ 2 m^3 (รูป 4.13c)
4) ปั๊มแรงดันสูง (high-pressure pump) SOILMEC 5T-400J สามารถให้แรงดันสูงสุดที่ 500 bar (รูป 4.14)
5) ตู้อัดอากาศ (air compressor) ที่สามารถส่งลมได้ต่ำสุด 21,000 l/min ณ แรงดันต่ำสุดที่ 20 bar (รูป 4.15)
6) ถังสำหรับใส่น้ำ
7) ถังสำหรับพักและขนถ่าย spoil
8) ก้านเจาะสำหรับระบบ double (air) fluid system ขนาดเส้นผ่านูนย์กลาง 114 mm. , monitor, หัวฉีด, หัวเจาะ และอื่นๆ
9) เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 100 kw
10) ชุดเครื่องมือสำหรับทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของสารเกร๊าท์ และชุดเครื่องมือสำหรับทดสอบหาค่าความหนืดของสารเกร๊าท์ (รูป 4.16)

รูป 4.10 เครื่องเจาะ SOILMEC SM-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.11 อุปกรณ์การบันทึกค่าพารามิเตอร์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในขั้นตอนการเจาะและการเกร๊าท์ JEAN LUTZ LT3



รูป 4.12 Computerize magnetic bi-axial inclinometer and recorder JEAN LUTZ TIGOR

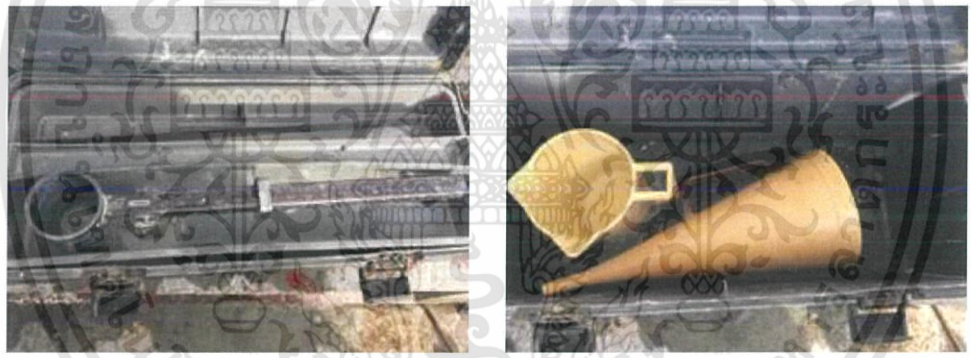
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.13 องค์ประกอบ Automatic grout mixing plant : (a) ถังเก็บผงปูนซีเมนต์ (cement silo), (b) ถังผสม (Mixer) และ (c) ถังพัก (Agitator)

รูป 4.14 ปั๊มแรงดันสูง (high-pressure pump) SOILMEC 5T-400J

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.15 ตู้อัดอากาศ (Air compressor)



(a) (b)

รูป 4.16 ชุดอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติทางกลของสารเกร๊าท์: (a) Baroid mud balance และ (b) Marsh cone

4.2.3 วัสดุที่ใช้ในการทำเสาดิน-ซีเมนต์

4.2.3.1 น้ำ (Water)

น้ำสำหรับที่ใช้เป็นส่วนผสมของสารเกร๊าท์จะต้องใส และสะอาด น้ำที่ใช้จะต้องปราศจากเกลือ และสารอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 ซีเมนต์ (Cement)

ซีเมนต์ที่ใช้สำหรับเตรียมเป็นส่วนผสมสารเกร๊าท์จะใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement type 1) ซึ่งถูกจัดเก็บในที่แห้งอย่างเช่นในถังเก็บผงปูนซีเมนต์ (cement silo)

4.2.3.3 สารเกร๊าท์ (Grout mix)

สารเกร๊าท์สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting จะต้องเป็นส่วนผสมระหว่างน้ำและซีเมนต์ โดยค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำกับซีเมนต์ (W/C ratio) จะต้องอยู่ในช่วง 0.8-1.11 สารเกร๊าท์ที่ได้จากการผสมแล้วจะต้องผ่านการทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของสารเกร๊าท์มีดังนี้

- หน่วยน้ำหนัก (Density) หน่วย g/cm^3 โดยการทดสอบ Baroid mud balance
- ความหนืด โดยวัดจากเวลาที่ใช้ในการไหลของสารเกร๊าท์ที่ปริมาตร 1 ลิตร (Apparent viscosity) หน่วย วินาที โดยการทดสอบ Marsh cone

(a) (b)

รูป 4.17 การทดสอบสารเกร๊าท์: (a) Baroid mud balance (b) Marsh cone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ขั้นตอนการทำงาน Jet Grouting ในภาคสนาม

4.2.4.1 การเตรียมพื้นที่ทำงาน (Preparation of the work platform)

ในช่วงเวลาก่อนทำ Jet Grouting อันดับแรกจะต้องทำการปรับระดับพื้นที่ทำงาน ซึ่งพื้นที่ทำงานจะต้องมีความมั่นคง แข็งแรง สามารถรับน้ำหนักที่ถ่ายลงมาจากอุปกรณ์ต่างๆของงานกิจกรรม Jet Grouting ได้

ความมั่นคง แข็งแรงของพื้นผิวที่จะทำกิจกรรมเกี่ยวกับงาน Jet Grouting นั้นขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่จะทำนั้นถูกเตรียมด้วยดินที่มีขนาดคละที่ดี (well-grade) และชั้นหินบดอัด (stone base) หรือ คอนกรีตหยาบ (lean concrete)

โดยหน้างานแล้วจะใช้แผ่นเหล็กในการกระจายน้ำหนักจากเครื่องจักรลงสู่หน้าพื้นผิวดินในเขตที่ทำการ Jet Grouting ในระหว่างการเตรียมพื้นที่นั้นสิ่งกีดขวางการทำงานทั้งที่อยู่ใต้ดิน พื้นผิวดินที่ทำงานและ ที่ลอยฟ้าในบริเวณทำการจะต้องถูกถอนออกหรือย้ายตำแหน่งออกไป คูหรือหลุมที่ขุดสำหรับการถอนเปลี่ยนตำแหน่งงานระบบที่อยู่ใต้ดิน (สายเคเบิ้ล ,ท่อน้ำทิ้งและอื่นๆ) จะต้องถูกปิดกลับด้วยคอนกรีตหยาบ (lean concrete)

นอกจากนี้พื้นที่ที่เป็นหลุมบ่อต่างๆที่อยู่ใกล้เคียงพื้นที่บริเวณหลุมเจาะ Jet Grouting จะต้องถูกถมกลับด้วยวัสดุที่เหมาะที่จะทำการบดอัด เพื่อให้สามารถมั่นใจได้ว่าสามารถตั้งเครื่องจักรได้อย่างมั่นคง พื้นผิวถนนที่อยู่ใกล้กับแนวกลุ่มเสาซีเมนต์ (Jet grouting column) จะต้องทำการสกัดออก ทั้งนี้ทั้งนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมดินที่ไหล-ออกมา(spoil return) จากกระบวนการเจา, กระบวนการ Pre-cuttingด้วยน้ำ และกระบวนการเกร๊าท์น้ำปูน (Jet)

รูป 4.18 การสกัดพื้นคอนกรีตเพื่อเตรียมพื้นที่การทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.19 ถอนงานระบบที่อยู่ใต้ดินบริเวณทำงาน

รูป 4.20 การวางแผ่นเหล็กเพื่อตั้งเครื่องจักร

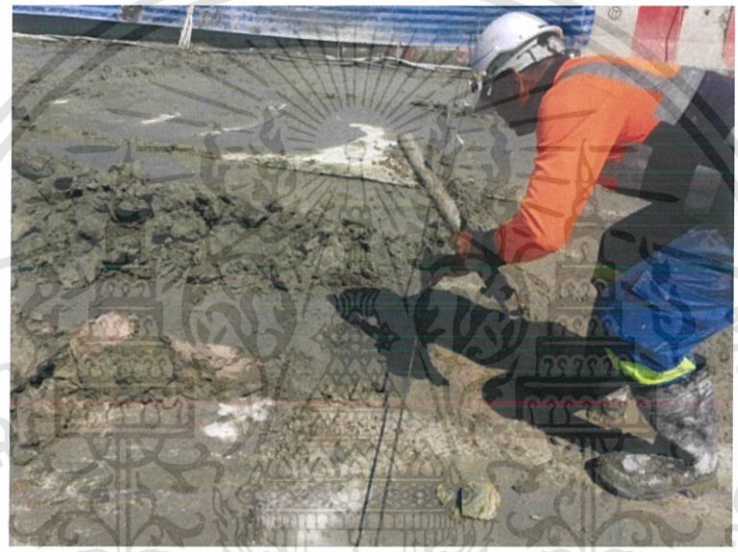
4.2.4.2 การเตรียมหลุมเจาะ (Setting out of boreholes)

ทีมช่างสำรวจ (surveyor) จะต้องทำการระบุตำแหน่งแนวแนวเสาซีเมนต์ (Jet grouting column) ด้วยการทำเครื่องหมายบอกตำแหน่งบนพื้นที่ทำงานให้ชัดเจนและมั่นคง ในขั้นตอนปฏิบัติการบอกตำแหน่งนั้นอาจทำการให้ตำแหน่งตรงพื้นที่หลุมเจาะไม่ได้ ซึ่งสภาพพื้นที่บริเวณหลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นมีการเคลื่อนเครื่องจักรตลอดเวลา อาจทำการให้ตำแหน่งโดย ให้ตำแหน่งที่ขยับ (offset) หัวและท้าย หากต้องการจะทำเสาซีเมนต์ให้ใช้เชือกที่ทำการแบ่งระยะแต่ละเสาขึงตรงหัวและท้ายของแถวจากที่ได้ offset ไว้ใช้ในการบอกตำแหน่งแทน

ในขั้นตอนนี้หากมีงานระบบที่อยู่ใต้ดินที่อยู่ตรงบริเวณทำงาน Jet Grouting ที่ไม่สามารถทำการถอนออกหรือเบี่ยงแนวออกไปได้ สิ่งเหล่านี้จะต้องถูกตรวจหาและทำเครื่องหมายบอกให้ชัดเจนไว้บนบริเวณพื้นที่ทำงาน เพื่อที่จะไม่ให้เกิดความเสียหายจากการปฏิบัติงาน Jet Grouting



รูป 4.21 การใช้เชือกที่แบ่งระยะเพื่อหาตำแหน่งหลุมเจาะ

4.2.4.3 การตั้งเครื่องเจาะ (Placement of the drill rig)

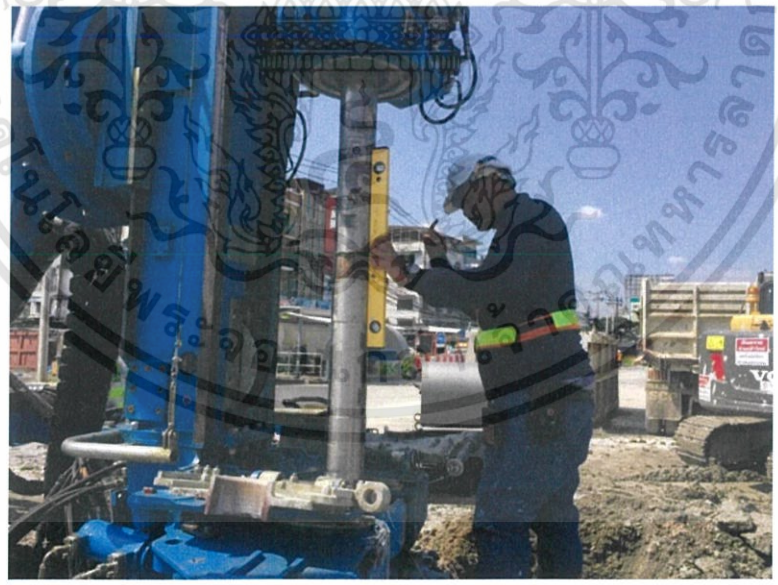
เครื่องเจาะ (Drill rig) จะต้องเข้าทำการตั้งเครื่องตรงบริเวณหลุมเจาะโดยตรงจุดศูนย์กลางก้านเจาะ (Drill bit) นั้นจะต้องอยู่ตำแหน่งเดียวหลุมเจาะ ซึ่งตำแหน่งหลุมเจาะจะถูกให้ตำแหน่งบนพื้นที่ทำงาน

การปรับแก้ความเอียงของตัวก้านเจาะนั้นทำโดยการใช้ระดับน้ำตรวจสอบความตรงของเสาให้มีความดิ่ง การใช้ระดับน้ำนี้จะต้องวัดดิ่งทั้ง 2 แกนของก้านเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความคาดเคลื่อนของตำแหน่งในการเจาะจากแนวแกนของหลุมเจาะนั้นโดยทางทฤษีแล้ว สามารถคาดเคลื่อนจากตำแห่งสูงสุดได้ 50 มิลลิเมตร จากเส้นรอบวงภายในของหลุมเจาะ

รูป 4.22 การเข้าตำแหน่งตรงหลุมเจาะ



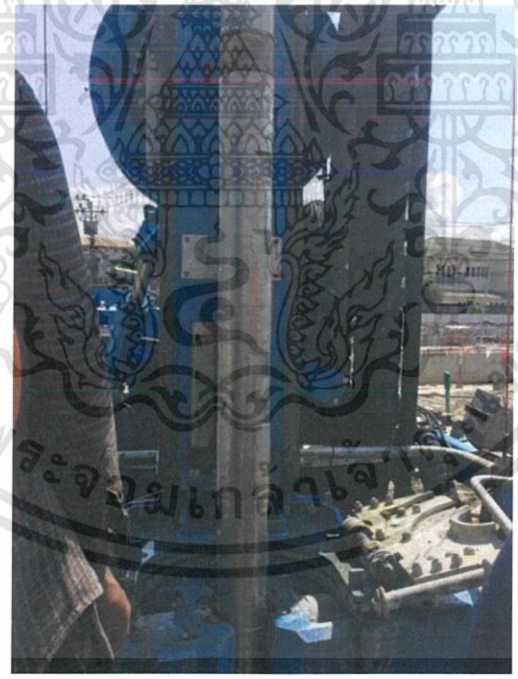
รูป 4.23 การตรวจสอบความดิ่งของก้านเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.4 การเจาะ (Drilling and Pre-cutting)

Drilling เป็นขั้นตอนแรกในการเจาะ ซึ่งเป็นขั้นตอนในการเจาะนำ โดยการจาะนำนี้จะเจาะโดยใช้หลักการหมุนของหัวเจาะ (drag-bit หรือ tri-cone) โดยหัวเจาะจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ถึง 7 นิ้ว ในการเจาะนี้จะใช้น้ำระหว่างการเจาะด้วย

ในขั้นตอนการ Drilling จะต้องมีการตรวจวัดความเอียงหรือความเบี่ยงเบนจากแนวเดิมของหลุมเจาะ ค่าความเบี่ยงเบนของหลุมเจาะจากทางทฤษฎีแล้วจะต้องมีการบันทึกระหว่างขั้นตอนการเจาะนที่ความลึกทุกๆ 5 เมตร โดยการใช้เครื่อง Computerize magnetic bi-axial inclinometer หรือ TIGOR ซึ่งติดตรงบริเวณปลายก้านเจาะ(rod string) โดยเครื่องนี้จะทำการวัดค่าความเอียงในแนวแกน 2 ระนาบ คือระนาบ X / Y หรือ north-south / east-west โดยระนาบทั้งหมดนี้จะถูกแสดงผลในรูปของกราฟ ค่าความเบี่ยงเบนของการขุดเจาะจากแนวแกนหลุมเจาะจากทางทฤษฎีควรเป็น 2% หรือน้อยกว่าสำหรับระดับความลึกได้ถึง 20 เมตร

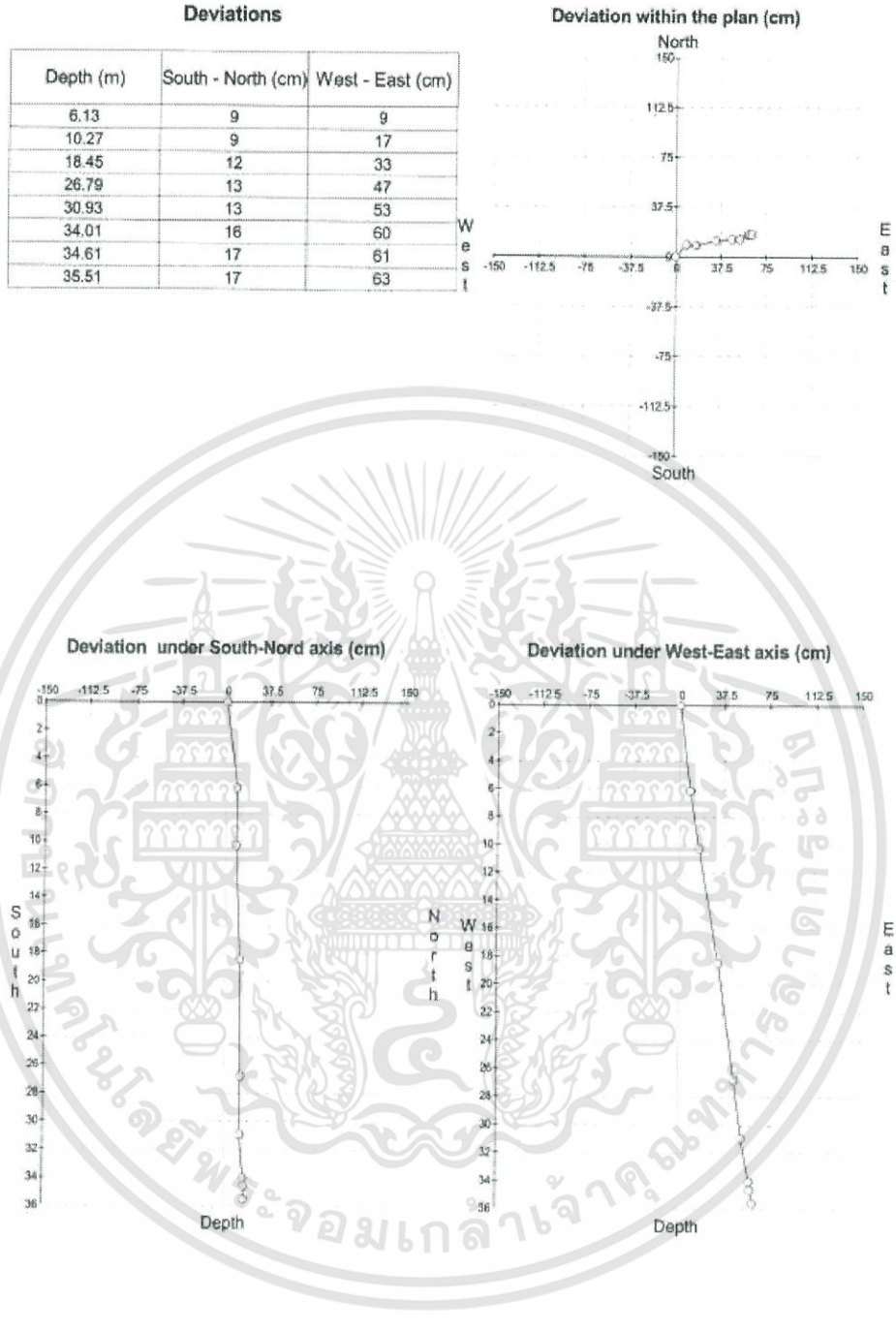


รูป 4.24 TIGOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deviations

Depth (m)	South - North (cm)	West - East (cm)
6.13	9	9
10.27	9	17
18.45	12	33
26.79	13	47
30.93	13	53
34.01	16	60
34.61	17	61
35.51	17	63



รูป 4.25 ตัวอย่างกราฟที่แสดงผลจาก TIGOR

ขั้นตอนการ Pre-cutting โดยน้ำแรงดันสูง (แรงดันอยู่ที่ประมาณ 250-350 bar) ถูกนำมาใช้เพื่อที่จะเพิ่มความคล่องตัวในการระบาย Spoil และทำ Spoil ไหลออกมายังพื้นผิวดินได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างอิสระไม่ไปอุดตันในหลุมในขณะทำการฉีดอัดน้ำปูน (Jetting) เนื่องจากดินที่ทำการปรับปรุงนั้นเป็นดินเหนียว ซึ่งอาจไปอุดตันทางเดินของ Spoil และอากาศที่อัดเข้าไป ผลจากการทำการทดลองภาคสนาม นั้น การ Pre-cutting โดยน้ำแรงดันสูงจะต้องถูกนำมาใช้ในกระบวนการทำเสาดิน-ซีเมนต์ทุกครั้งเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน Jet Grouting

ในขั้นตอนการ Pre-cutting ในหน้างานมีการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

- Depth
- Drilling rate (cm/sec), (cm/min)
- Rotation speed (rpm)
- Water pressure (bar)
- Water flow (l/min)
- Air pressure (bar)
- Air flow (l/sec)

4.2.4.5 การเกร๊าท์ (Jetting or Grouting)

เมื่อทำการ Pre-cutting จนถึงความลึกที่ระดับก้นหลุมเจาะ สามารถเริ่มทำการทำการฉีดน้ำปูน (Jetting) ได้ โดยทำการ Jetting จากก้นหลุมขึ้นมายังปากหลุมด้วยอัตราการยกก้านขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้

การเกร๊าท์จะดำเนินการทำงานต่อเนื่องโดยปราศจากสิ่งรบกวนหรือขัดจังหวะจนถึงระดับบนสุดของเสาดิน-ซีเมนต์ที่ได้ออกแบบไว้ ยกเว้นในเวลาเดียวกันในขั้นตอนการเกร๊าท์มีการเคลื่อนตัวของปากจับโรตารี่ เมื่อสุดระยะช่วงดึงก้านเจาะของปากจับโรตารี่

ตาราง 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบ Double (air) fluid system ที่ใช้โครงการ

Grout pressure	MPa	35-45
Grout flow rate	l/min	150-200
Compressed air pressure	MPa	1.0-1.5
Compressed air delivery	l/min	10,000-15,000
Rods withdrawal speed	cm/min	15-60
Rods rotation speed	rpm	10-30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบ Single-fluid system ที่ใช้โครงการ

Grout pressure	MPa	35-45
Grout flow rate	l/min	150-200
Compressed air pressure	MPa	-
Compressed air delivery	l/min	-
Rods withdrawal speed	cm/min	15-60
Rods rotation speed	rpm	10-30

ค่าพารามิตอร์จะถูกใช้ในการเกร๊าท์ (Jetting) ซึ่งจะถูกกำหนดตามผลการวิเคราะห์จากผลของ Field trial test ค่าพารามิตอร์จะถูกแสดงผลและบันทึกค่าโดย Computerized recorder mounted ที่ติดอยู่กับเครื่องเจาะ (Drill rig)

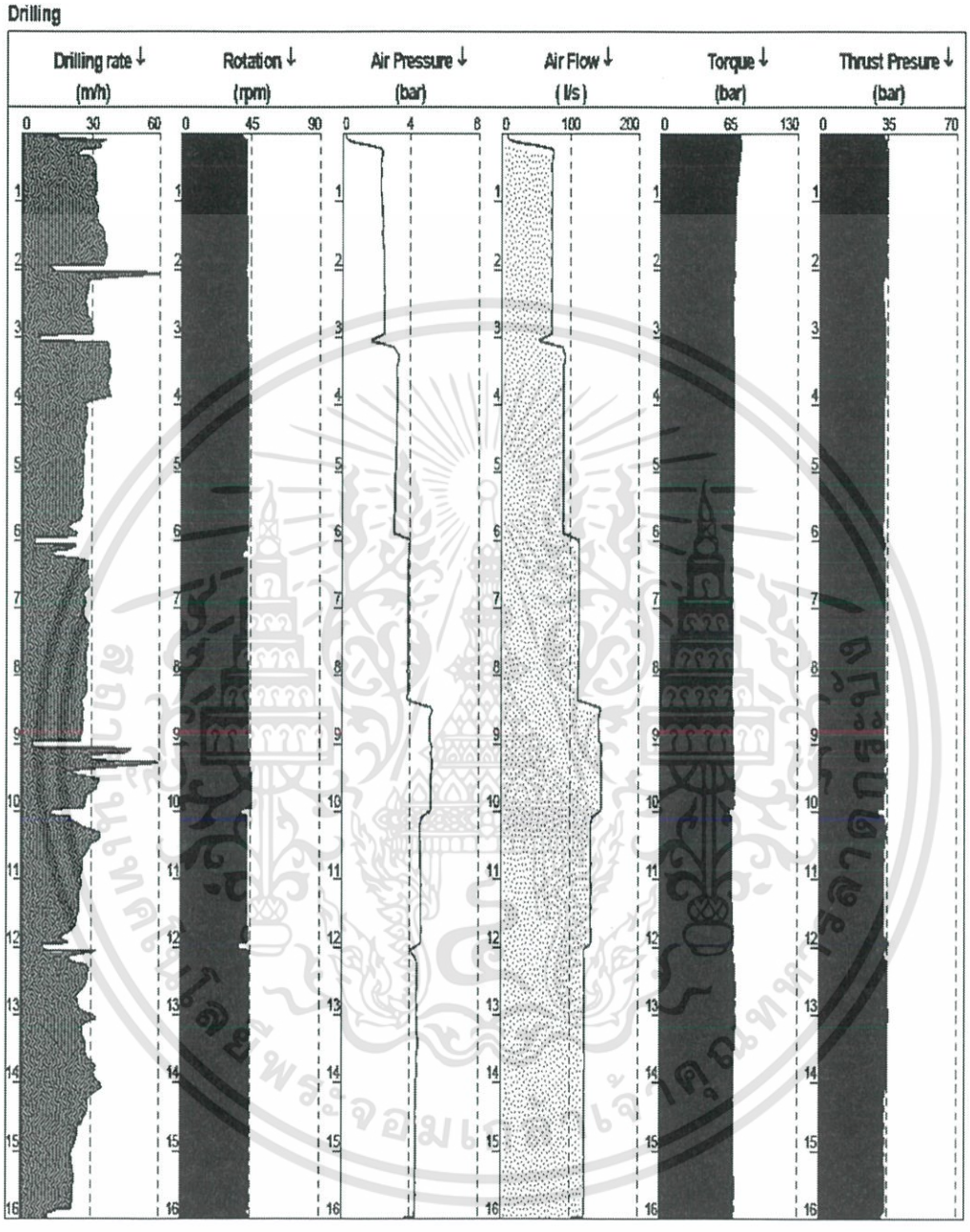
ในขั้นตอนการเกร๊าท์ในหน้างานมีการใช้พารามิเตอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

- Depth
- Uplift rate (cm/sec), (cm/min)
- Rotation speed (rpm)
- Water pressure (bar)
- Water flow (l/min)
- Air pressure (bar)
- Air flow (l/sec)
- Grout pressure (bar)
- Grout flow (l/min)
- Grout unitary volume (l/m), (m^3/m)

หมายเหตุ : เนื่องจากการทำ Jet Grouting เป็นระบบ Double (air) fluid system จะไม่มีการใช้น้ำในขั้นตอนการเกร๊าท์ ซึ่งการใช้น้ำในขั้นตอนการเกร๊าท์จะอยู่ในระบบ

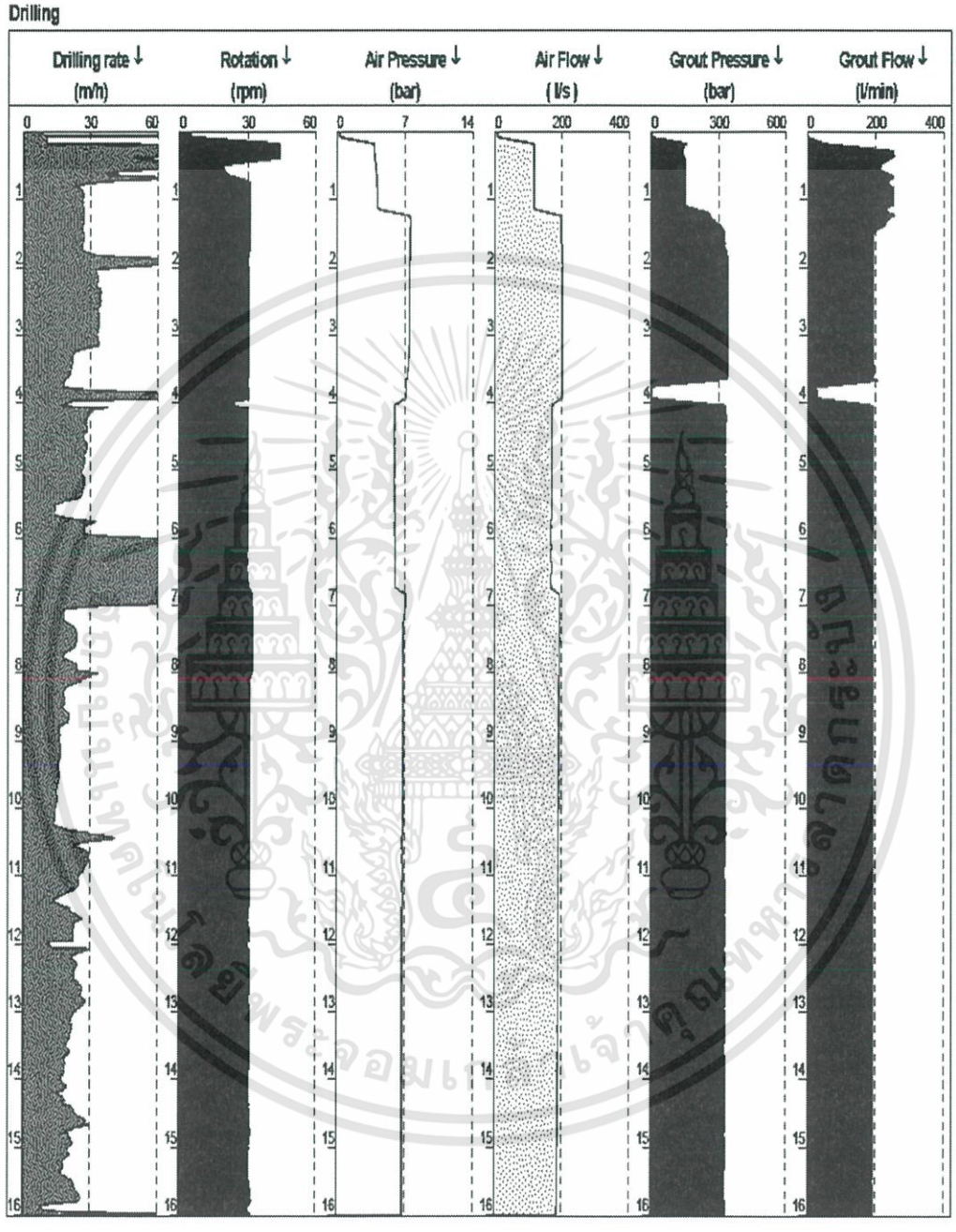
ปริมาณและลักษณะทางกล (หน่วยน้ำหนัก และความหนืด) ของ spoil ที่ขึ้นมาบนผิวดินข้างบนปากหลุมจะต้องได้รับการตรวจสอบซ้ำอีกครั้งระหว่างการเกร๊าท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



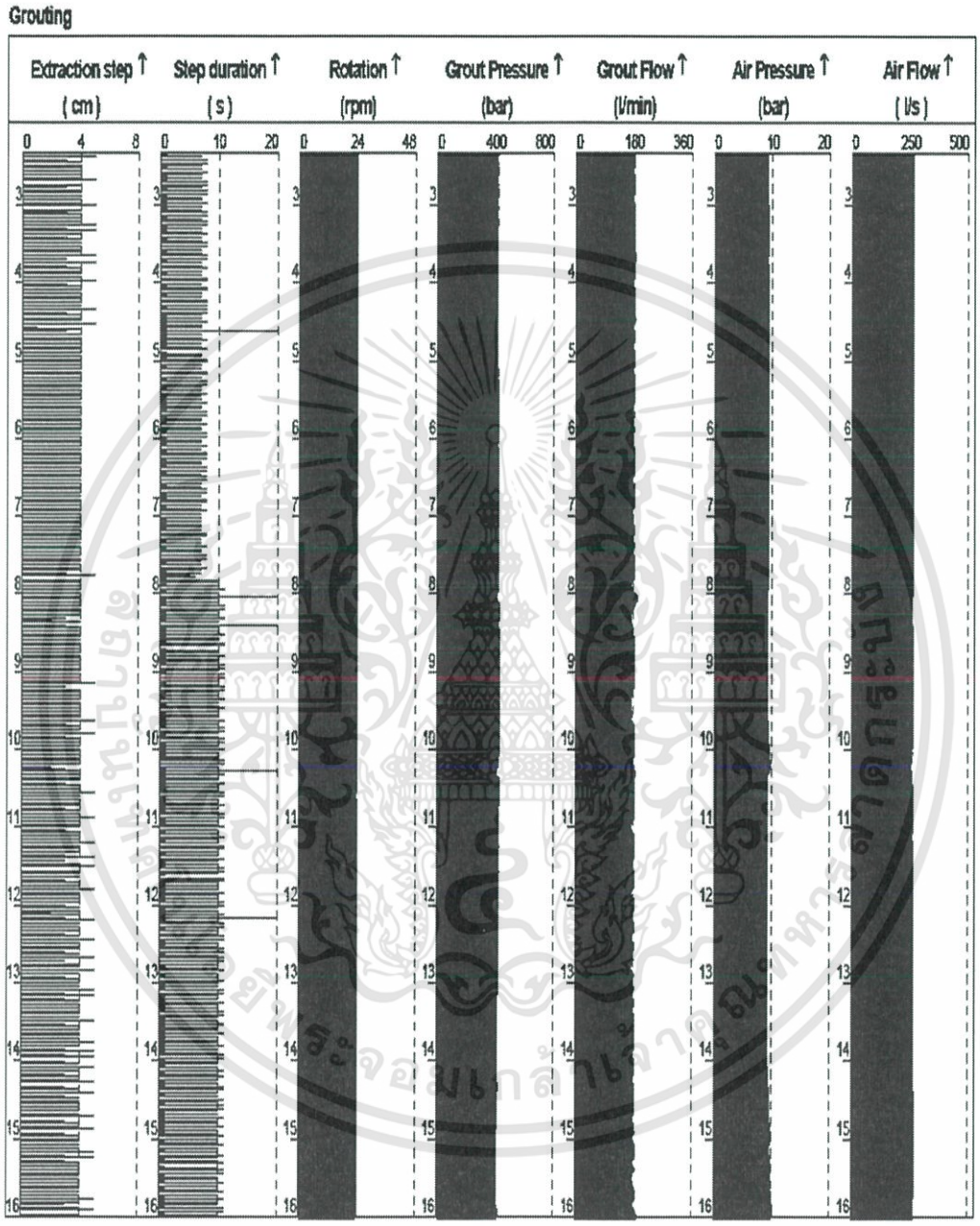
รูป 4.26 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ในขั้นตอน Drilling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.27ตัวอย่างกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์จากการทำงานในขั้นตอน Pre-cutting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.28 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์จากการทำงานในขั้นตอนการเกร๊าท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.6 การเดินทางและการกำจัด Spoil

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นแล้วว่า Spoil ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet- Grouting โดย Spoil ที่ไหลขึ้นมายังบนพื้นผิวเป็นส่วนผสมระหว่างดินและสารเกร๊าท์ที่เกินออกมา ซึ่งจะไหลขึ้นมาตามช่องว่างระหว่าก้านเจาะและผนังของหลุมเจาะ

ดิน Spoil จะถูกเก็บไว้ลงในถังพัก เพื่อป้องกันการการหกเลอะบนพื้นที่สารธารณะ และเพื่อป้องกันการไหลลงไปในท่อน้ำทิ้งในเมืองได้ ในระหว่างการทำงานจะต้องมีการกำจัดดินประเภทนี้ออกตลอดโดยการใช้รถบรรทุกใช้ในการขนไปยังพื้นที่ที่ใช้ในการกำจัดต่อไป สิ่งสำคัญที่สุดในการนำดินประเภทนี้ไปกำจัดคือการปิดรอยรั่วของตัวถังรถบรรทุกเพื่อป้องกันการหกในพื้นที่ชุมชนและถนนระหว่างการขนส่ง

4.2.5 การทดสอบเพื่อตรวจสอบผลจาการปรับปรุงคุณภาพดิน

ผลการทดสอบตามคุณลักษณะที่ได้กำหนดไว้จาการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ซึ่งจะเป็นผลที่ได้จาการทดสอบ Coring ,SPT และการทดสอบในสถานที่จริงและจากห้องทดลอง

การทดสอบ SPT จะใช้หลุมในการทดสอบเป็นจำนวน 8 หลุม ทุกๆการปรับปรุงคุณภาพดินในปริมาณดิน 1000 ลูกบาศก์เมตร การทดสอบ SPT จะถูกเลือกจุดทดสอบแบบสุ่มเลือกในบริเวณที่มีการซ้อนทับของเสาดิน-ซีเมนต์ที่อยู่ใกล้เคียงกัน โดยเสาดิน-ซีเมนต์จะต้องมีอายุครบ 28 วัน สำหรับการทดสอบ SPT จะมีการทดสอบบริเวณ หัว ,กลาง และล่างสุดของเสาดิน-ซีเมนต์

การ Coring จะมีการเก็บตัวอย่างของเสาดิน-ซีเมนต์เป็นจำนวน 4 หลุม ทุกๆการปรับปรุงคุณภาพดินในปริมาณดิน 1000 ลูกบาศก์เมตร เช่นกัน โดยมีการเก็บตัวอย่างให้มีความยาวเท่ากับความยาวเสาดิน-ซีเมนต์ การ Coring จะมีการเจาะตรงบริเวณที่มีการซ้อนทับของเสาดิน-ซีเมนต์ที่อยู่ใกล้เคียงกัน โดยเสาดิน-ซีเมนต์จะต้องมีอายุครบ 28 วัน ชิ้นตัวอย่างจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50มิลลิเมตร ที่ได้กำหนดไว้ และการเก็บชิ้นตัวอย่างจากหลุมจะต้องใช้ core barrel ในการเก็บชิ้นตัวอย่างขึ้นมา

การทดสอบคุณภาพในขั้นตอนการทำ Jet Grouting จะถูกประเมินจากชิ้นตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาได้ทั้งหมด หรือ Total Core Recovery (TCR) และการทดสอบ Unconfined Compressive Strength

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TCR ที่เก็บขึ้นมาได้จะต้องมีความยาวของชิ้นตัวอย่างไม่น้อยกว่า 85% ของความยาว core barrel หากมีค่าน้อยกว่า 85% จะต้องมีการ Coring เพิ่ม 2 หลุมโดยต้องเป็นหลุมที่เจาะบนเสาดิน-ซีเมนต์ทีอยู่ใกล้เคียงกัน หากหลุมที่มีการทำการ Coring เพิ่มมีค่า TCR ต่ำกว่าทั้งหมด การทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ถือว่าไม่ผ่าน

การทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) จะใช้ชิ้นตัวอย่างบริเวณหัว, กลาง และล่างสุดของเสาดิน-ซีเมนต์ โดยค่า UCS จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า และสูงกว่าตามค่าที่ได้กำหนด (สำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายสีส้มอยู่ที่ 5 ถึง 15 ksc) หากชิ้นตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าหรือสูงกว่าช่วงที่กำหนดจะต้องมีการนำชิ้นตัวอย่างจำนวน 2 ชิ้น จากหลุมที่เก็บขึ้นมาในหลุมเดียวกันมาทดสอบ หากชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบเพิ่มไม่ผ่านทั้งหมด การทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ถือว่าไม่ผ่านเช่นกัน

4.2.6 การคำนวณปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการทำงานในหน้างาน

เพื่อให้ได้ขนาดเสาตามที่ต้องการโดยการอาศัยพลังงานจากการฉีดลมและสารเกร๊าท์ ซึ่งพลังงานเหล่านี้ที่ถูกนำมาใช้ในการทำงานจริงได้มาจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทำการทดลองภาคสนาม (Field trials)

อย่างไรก็ตามด้วยสภาพหน้างานที่แตกต่างกัน ระยะทางจากปั๊มถึงเครื่องเจาะที่ไกลขึ้น ทำให้มีแรงดันที่เกิดขึ้นที่หัวฉีดลดลงจากเดิมเนื่องจากการสูญเสียพลังงานระหว่างทางของสารเกร๊าท์ รวมไปถึงประสิทธิภาพของปั๊มที่อัดแรงดันไม่สามารถให้แรงดันตามแรงดันที่ได้ออกแบบไว้ จึงทำให้จำเป็นมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์บางค่า

ในหัวข้อนี้จึงได้มีตัวอย่างการคำนวณเพื่อรักษาพลังงานที่ใช้ทำเสาดิน-ซีเมนต์ด้วยวิธี Jet-Grouting ซึ่งจะเป็นตัวอย่างกรณีปรับแก้ค่าอัตราการยกก้านเจาะ (Uplift rate) เพื่อรักษาพลังงานที่ใช้ทำงานในระบบ Double fluid (air) system ในขั้นตอนการเกร๊าท์

จาก $E_T = E_a + E_g$

โดย E_T คือ พลังงานที่ใช้ทำเสาดิน-ซีเมนต์ทั้งหมด หน่วย MJ/m

E_a คือ พลังงานที่ได้จากการฉีดลม หน่วย MJ/m

E_g คือ พลังงานรวมที่ได้จากการฉีดสารเกร๊าท์ หน่วย MJ/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรพลังงานที่ได้จารการฉีดลม

$$E_a = 0.035 \times Q_a \times [(10 \times p_a)^{0.29} - 1] \times \frac{1}{v_r} \text{ ; MJ/m}$$

โดย Q_a คือ อัตราการไหลของลม (Flow rate) หน่วย l/min

p_a คือ แรงดันลม (Air pressure) หน่วย MPa

v_r คือ อัตราการยกก้านเจาะ (Uplift rate) หน่วย cm/min

สูตรพลังงานที่ได้จากการฉีดสารเกร๊าท์

$$E_g = 0.10 \times p_g \times Q_g \times \frac{1}{v_r} \text{ ; MJ/m}$$

โดย Q_g คือ อัตราการไหลของสารเกร๊าท์ (Flow rate) หน่วย l/min

p_g คือ แรงดันที่ใช้ในการเกร๊าท์ (Grout pressure) หน่วย MPa

v_r คือ อัตราการยกก้านเจาะ (Uplift rate) หน่วย cm/min

สูตรอัตราการไหลของสารเกร๊าท์

$$Q_g = \mu_{pump} \times No._{nozzle} \times D_{\text{nozzle}}{}^2 \times \left(\frac{10 \times p_g}{\rho_g}\right)^{0.5} \text{ ; l/min}$$

โดย μ_{pump} คือ ประสิทธิภาพของปั๊ม (Empirical Coefficient of Pump)

$No._{nozzle}$ คือ จำนวนหัวฉีด

D_{nozzle} คือ ขนาดของหัวฉีด หน่วย mm.

p_g คือ แรงดันที่ใช้ในการเกร๊าท์ (Grout pressure) หน่วย MPa

ρ_g คือ ความหนาแน่นของสารเกร๊าท์ (Density) หน่วย Kg/l

สูตรอัตราการยกก้านเจาะ (Uplift rate)

$$v_r = \frac{\Delta s}{\Delta t} \text{ ; cm/ sec}$$

โดย Δs คือ ระยะต่อการยก 1 ครั้ง (Step length) หน่วย cm

Δt คือ ระยะเวลาต่อการยก 1 ครั้ง (Step Duration) หน่วย sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง กรณีคิดจากค่าพารามิเตอร์ของการทำเสาดิน-ซีเมนต์ด้วยวิธี Jet Grouting ของกลุ่มเสา B ของการทดลองภาคสนาม ซึ่งถูกใช้ในการทำงานที่ความลึก 16 เมตร ขนาดเสา 1.40 เมตร มีค่าดังต่อไปนี้

แรงดันที่ใช้ในการเกร๊าท์ (Grout pressure) 400 bar หรือ 40 MPa

แรงดันลม (Air pressure) 10 bar หรือ 1 MPa

อัตราการไหลของลม (Flow rate) อยู่ที่ 15,000 l/min

ประสิทธิภาพของปั๊ม (Empirical Coefficient of Pump) อยู่ที่ 0.62

จำนวนหัวฉีด จำนวน 2 หัวฉีด

ขนาดของหัวฉีด อยู่ที่ 3 mm.

ความหนาแน่นของสารเกร๊าท์ (Density) อยู่ที่ 1.478 Kg/l

อัตราการยกก้านเจาะ (Uplift rate) อยู่ที่ 24 cm/min

1. หาค่าอัตราการไหลของสารเกร๊าท์ (Flow rate)

จาก $Q_g = \mu_{pump} \times No._{nozzle} \times D_{\text{nozzle}}{}^2 \times \left(\frac{10 \times p_g}{\rho_g}\right)^{0.5}$

$= 0.62 \times 2 \times 3^2 \times \left(\frac{10 \times 40}{1.478}\right)^{0.5}$

$= 183.60 \text{ l/min}$

2. หาค่าพลังงานที่ได้จากการฉีดสารเกร๊าท์

จาก $E_g = 0.10 \times p_g \times Q_g \times \frac{1}{v_r}$

$= 0.10 \times 40 \times 183.60 \times \frac{1}{24}$

$= 30.60 \text{ MJ/m}$

3. พลังงานที่ได้จารการฉีดลม

จาก $E_a = 0.035 \times Q_a \times [(10 \times p_a)^{0.29} - 1] \times \frac{1}{v_r}$

$= 0.035 \times 15{,}000 \times [(10 \times 1)^{0.29} - 1] \times \frac{1}{24}$

$= 20.80 \text{ MJ/m}$

4. พลังงานที่ใช้ทำเสาดิน-ซีเมนต์

จาก $E_T = E_a + E_g$

$= 20.80 + 30.60$

$= 51.40 \text{ MJ/m}$ สำหรับทำเสาที่ขนาด 1.40 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการย้ายสถานที่ทำงานปรับปรุงคุณภาพดินไปยังสถานที่อื่น ตำแหน่งของปั๊มและเครื่องเจาะมีระยะห่างกันมากขึ้นทำให้เกิดแรงดันที่ส่งไปยังเครื่องเจาะลดน้อยลง ดังนั้นปั๊มจะต้องเพิ่มกำลังแรงดันที่มากขึ้นแต่ด้วยความสามารถของปั๊มมีข้อจำกัดจึงทำให้มีการเกร๊าท์ด้วยแรงดันที่ลดลง

เพื่อรักษาระดับพลังงานให้สามารถสร้างเสาดิน-ซีเมนต์ให้ได้ขนาดเท่ากับที่ออกแบบไว้จึงมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ในการทำงาน โดยการปรับแก้พารามิเตอร์มีตัวอย่างแสดงดังนี้

แรงดันที่ใช้ในการเกร๊าท์ (Grout pressure) 360 bar หรือ 36 MPa

แรงดันที่ปั๊มที่ส่งสารเกร๊าท์มายังเครื่องเจาะ อยู่ที่ 410 bar 41MPa

5. หาค่าอัตราการไหลของสารเกร๊าท์ (Flow rate) ที่ 410 bar

จาก $Q_g = \mu_{pump} \times No._{nozzle} \times D_{\text{nozzle}}{}^2 \times \left(\frac{10 \times p_g}{\rho_g}\right)^{0.5}$

$= 0.62 \times 2 \times 3^2 \times \left(\frac{10 \times 41}{1.478}\right)^{0.5}$

$= 185.90 \text{ l/min}$

6. หาค่าอัตราการยกก้านเจาะ (Uplift rate) เพื่อรักษาพลังงานจากการเกร๊าท์ที่ 30.60 MJ/m

จาก $E_g = 0.10 \times p_g \times Q_g \times \frac{1}{v_r}$

$30.60 = 0.10 \times 36 \times 185.90 \times \frac{1}{v_r}$

$v_r = 21.87 \text{ cm/min}$

7. ตรวจสอบพลังงานลม

จาก $E_a = 0.035 \times Q_a \times [(10 \times p_a)^{0.29} - 1] \times \frac{1}{v_r}$

$= 0.035 \times 15{,}000 \times [(10 \times 1)^{0.29} - 1] \times \frac{1}{21.87}$

$= 22.80 \text{ MJ/m}$

8. พลังงานที่ใช้ทำเสาดิน-ซีเมนต์ที่แรงดันที่ใช้ในการเกร๊าท์ (Grout pressure) 360 bar หรือ 36 MPa

จาก $E_T = E_a + E_g$

$= 22.80 + 30.60$

$= 53.38 \text{ MJ/m} > 51.40 \text{ MJ/m}$

จากพลังงานที่ได้จากการปรับแก้ค่าอัตราการยกก้านเจาะ (Uplift rate) เพื่อรัการะดับพลังงานที่ได้จากการฉีดสารเกร๊าท์ซึ่งทำให้ค่าพลังงานจากการฉีดลมมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ขนาดเสามี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย ด้วยขนาดที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้มีผลดีต่อการซ้อนทับของเสา เนื่องจากโดยหลักการเมื่อที่ระดับความลึกของดินที่ลึกขึ้นทำให้ขนาดเสานั้นลดลงตามไปด้วยมีผลทำให้เกิดการซ้อนทับของเสาไม่เพียงพอ ซึ่งขนาดเสาที่ใหญ่ขึ้นนั้นจะสามารถช่วยลดข้อกังวลนี้ได้

4.3 การประยุกต์

4.3.1 องค์ประกอบและโครงสร้าง

ความสำเร็จของการ Jet Grouting เป็นไปได้ว่ามีสาเหตุมาจากประโยชน์ของการสร้างความแข็งแรงของชิ้นส่วนใต้ผิวดินในหลายๆรูปร่างและขนาด คุณสมบัติทางกลที่ดีและการแทรกของการเจทเกร๊าท์ที่ลดลงเป็นที่น่าสนใจมากเพราะการปรับปรุงคุณภาพดินที่สามารถใช้ได้ในสภาวะการทำงานที่ยาก เช่นการทำงานในพื้นที่แคบ หรือที่ที่ยากในการเข้าถึง

ชิ้นส่วนที่ซับซ้อนอาจจะสำเร็จได้อย่างง่ายและสะดวกโดยการเพิ่มเสามากขึ้น และการใช้มาตรการการก่อสร้างที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น โดยการแบ่งความโน้มเอียงของการปรับปรุง หรือโดยการรบกวนการเกร๊าท์ในบางช่วงของการเจาะ ชิ้นส่วนที่ได้จากการทำ Jet Grouting สามารถเสริมความแข็งแรงด้วยการใส่โลหะหรือแท่งแก้วไฟเบอร์ หรือท่อที่สามารถยืดหยุ่นและเสริมแรงดึงได้

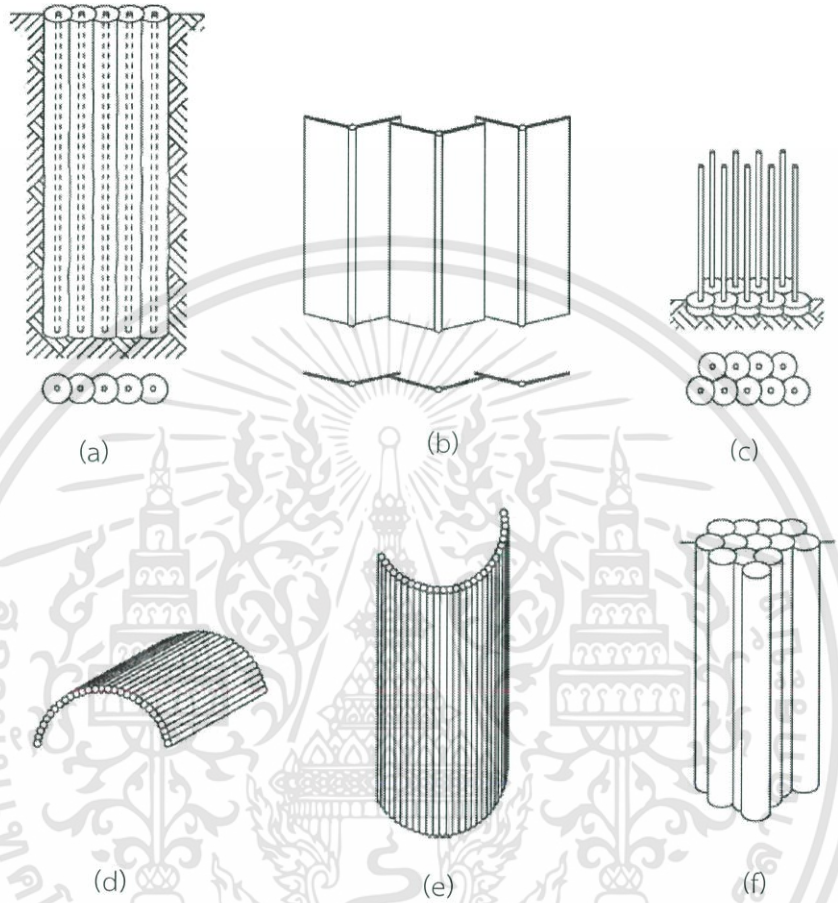
ในหลายๆกรณี การพิจารณาความหลากหลายทางเรขาคณิตที่ถูกทำโดยการปรับปรุงคุณภาพดินแบบ Jet Grouting สามารถจำแนกความแข็งแรงของชิ้นส่วนโดยมีทั้งรูปร่างและการใช้งานเป็นพื้นฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในมุมมองของการเสริมความแข็งแรง ซึ่งแบ่งออกเป็นของ 3 ประเภทหลัก คือ 1 มิติ 2มิติ และ 3 มิติ

องค์ประกอบ 1 มิติ ประกอบด้วยเสาที่แยกออกมาเฉพาะ ความยาวจะใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางมาก โครงสร้างเจทเกร๊าท์ทั่วไปสร้างโดยองค์ประกอบ 1 มิติซึ่งถูกเรียกว่า “โครงสร้างพื้นฐานเสริมความแข็งแรง(reinforced foundation)” ซึ่งในการทำเสาดิน-ซีเมนต์จะเป็นไปตามรูปแบบเลขาคณิตของฐานรากพรม (pile raft) แบบดั้งเดิม ที่อาจเรียกว่า “jet-grouted raft” ในกรณีนี้ เสาดิน-ซีเมนต์จะทำหน้าที่เพิ่มกำลังรับน้ำหนักและการทรุดตัวของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนพื้นดิน

ในทางตรงกันข้าม เมื่อการปรับปรุงคุณภาพถูกแทนที่ไปเรื่อยๆ มันสามารถใช้ชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรงใน2 ถึง 3 มิติ (รูป 4.29) ความเป็นจริงแล้ว ถ้าแนวหลักในการปรับปรุงคุณภาพใกล้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงพอ ซีเมนต์ที่ถูกเกร๊าท์ออกไปมีการซึมซึมเข้าไปตลอดหนึ่งหรือหลายๆแนวของชิ้นส่วนในรูปร่างราบ ทรงกระบอก หรือโคน ซึ่งต้องการการออกแบบ



รูป 4.29 ชิ้นส่วนโครงสร้าง Jet Grouting ลักษณะ 2-3 มิติ : (a) และ (b) jet-grouted diaphragms, (c) jet-grouted slabs, (d) jet-grouted canopy, (e) jet-grouted shaft และ (f) jet grouted block
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

ชิ้นส่วนระนาบในแนวตั้ง โดยมีเสาดิน-ซีเมนต์ที่ถูกสร้างติดกันตลอดความยาว (รูป 4.30a) ถูกใช้บ่อยในการสร้างกำแพงเจทเกร๊าท์ซึ่งสามารถใช้กับโครงสร้างพวกกำแพงกันดิน หรือกำแพงกันน้ำ การใช้งานต่อมาสามารถใช้กับชิ้นส่วนรูปตัว V ที่เหลื่อมติดกัน (รูป 4.29b) ชิ้นส่วนระนาบในแนวนอน ทั่วไปเรียกว่า “Jet-grouted slab” สามารถใช้สร้างกำแพงกั้นน้ำที่ก้นของโพรง (รูป 4.30c) ชิ้นส่วนนี้ใช้จำกัดความยาวของการเกร๊าท์ในช่วงสั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางครั้ง เสาดิน-ซีเมนต์ถูกจัดเตรียมเพื่อสร้างฟรัสตรัม[1]ของโคน (รูป 4.30d) ซึ่งสามารถใช้เป็นเพดานสำหรับพยุงดินในการขุดเจาะอุโมงค์ชั่วคราว หรือในรูปแบบทรงกระบอกใช้เจาะปล่องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่(รูป 4.29e)

ชิ้นส่วน 3 มิติขนาดใหญ่ เรียกว่า "jet-grouted blocks" จะได้รับการปรับปรุงคุณภาพดินแบบ Jet- Grouting เพื่อทำให้ดินปริมาณมากแข็งตัว (รูป 4.29f) ในความเป็นจริง ใช้วัสดุขนาดใหญ่เพื่อให้ได้กำแพงที่มีแรงโน้มถ่วงของโลกมากหรือเพื่อสร้างที่อุดกันน้ำที่ก้นไม่ให้รั่วโดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้างฐานราก

ในเรื่องจุดประสงค์ของการออกแบบที่เป็นไปได้ การปรับปรุงคุณภาพอาจจะถูกทำไม่ใช่เพื่อก่อสร้างโครงสร้างใหม่ให้สำเร็จแต่ยังทำเพื่อปรับปรุงหรือแก้ไขโครงสร้างที่มีอยู่แล้วด้วยโครงสร้างที่ทำจากการ Jet Grouting อาจมีการใช้งานที่ถาวรหรือชั่วคราว

ในบทเรื่องการประยุกต์ใช้งาน Jet Grouting จะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่ม ดังต่อไปนี้

- โครงสร้างฐานราก (Foundations)
- โครงสร้างป้องกันดิน (Retaining structures)
- โครงสร้างกั้นน้ำ (Water barriers)
- อุโมงค์ (Tunnels)
- และ อื่นๆ

4.3.2 โครงสร้างฐานราก

การ Jet Grouting ถูกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินภายใต้โครงสร้างฐานรากที่เป็นคอนกรีต เช่น คาน พื้นหรือ ฐานรากเดี่ยว มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับกำลังและลดการทรุดตัวของโครงสร้างที่อยู่บนดิน

โดยทั่วไปการ Jet Grouting จะเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินให้ดินส่วนที่ลึกลงไปข้างล่างและดินที่อยู่บนผิวดินมีคุณลักษณะที่เหมือนกัน แต่ทว่าลักษณะทางเลขาคณิตถูกกำหนดโดยความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางและช่องว่างระหว่างเสา

หมายเหตุ: [1] ฟรัสตรัม คือ รูปทรงเรขาคณิตที่เป็นส่วนหนึ่งของพีระมิดหรือทรงกรวย โดยการตัดด้วยระนาบสองระนาบที่ขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแก้ปัญหาทั้ง 2 แบบควรทำให้แตกต่างกัน โดยการแก้ปัญหาแรก คือเมื่อระยะจากจุดศูนย์กลางหนึ่งไปยังอีกจุดศูนย์กลางหนึ่งของแกนเจาะมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเสา ดังนั้นการปรับปรุงแต่ละแบบทำให้ได้ทรงกระบอกที่เรียวบาง(ชิ้นส่วน 1 มิติ) ในกรณีที่ 1 นี้ การจัดเตรียมเสาคล้ายกับฐานรากที่เป็นอันเดียวไม่มีฐานรากเดี่ยว และโครงสร้างฐานรากที่ได้นี้ เรียกว่า "jet-grouted raft" (รูป 4.30a) jet-grouted raft นี้บ่อยครั้งที่ถูกเลือกเป็นตัวเลือกหนึ่งของฐานรากพรม เมื่อลักษณะเฉพาะของชั้นใต้ผิวดินไม่เอื้ออำนวยให้กับการติดตั้งการทำเสาเข็มเจาะหรือเสาเข็มตอก ตัวอย่างเช่น เมื่อมีหินขนาดใหญ่แทรกอยู่ในดิน โดยทั่วไปjet-grouted raft มีประสิทธิภาพมากในการลดการทรุดตัว แต่ในหลายๆกรณี มันมีความต้านทานแนวนอนไม่เพียงพอต่อการกระทำแนวนอนเนื่องมาจากความแข็งแรงต่อการดัดและความแข็งแรงต่อการเฉือนที่น้อยของเสาดิน-ซีเมนต์ แม้ว่ามีการใส่แท่งเหล็กหรือท่อเข้าไปในเสาดิน-ซีเมนต์ แต่ความเค้นการดัดก็ยังคงน้อยเหมือนเดิม สรุปว่า เสาบางต้นเหมาะที่จะเอียงเพื่อรับแรงกระทำในแนวนอน ดังรูป 4.30b (Falcao, 2001)

ถ้าความผิดปกติของโหลดมีค่าสูง จะสร้างการเสริมกำลังขนาดใหญ่ได้สะดวก เมื่อระยะจากจุดศูนย์กลางหนึ่งไปยังอีกจุดศูนย์กลางหนึ่งของการเจาะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเสา ในกรณีนี้ การปรับปรุงคุณภาพนี้จะสร้างวัสดุที่ถูก Jet Grouting ซึ่งเป็นบล็อคขนาดใหญ่ โดยมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ หรือท่อขนานกว้าง (รูป 4.30C) บล็อคนี้สามารถถูกเสริมกำลังด้วยแท่งเหล็ก และท่อซึ่งขยายขึ้นไปในพื้นคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังแบบซ้อนทับ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของความต้านทางต่อความเค้นดึงและความเค้นเฉือน

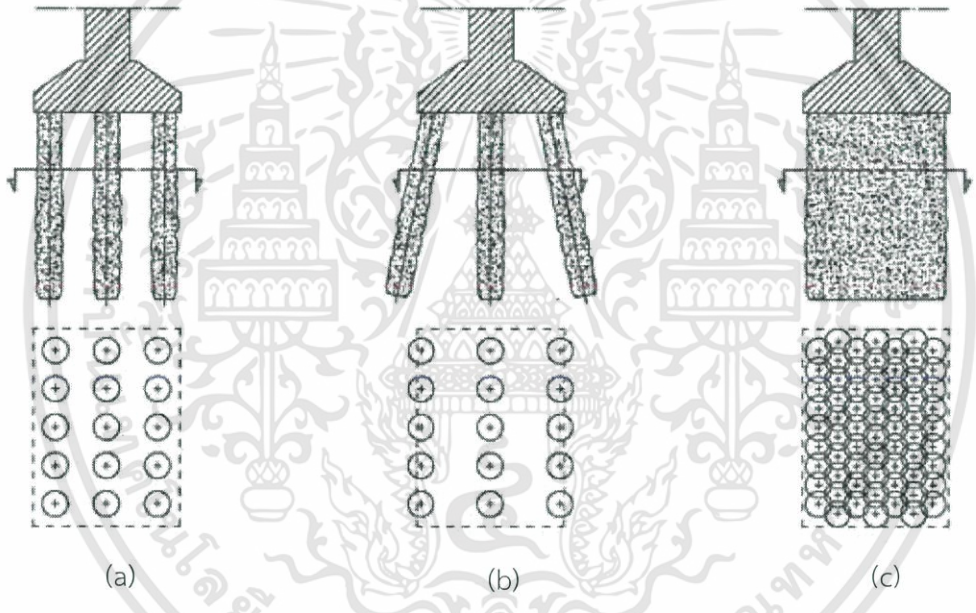
หนึ่งในโครงการแรกของการทำงานชนิดนี้รายงานไว้เป็นลายลักษณ์อักษรเกี่ยวกับ สะพานรถไฟทางหลวงสร้างขึ้นในอิตาลี เมื่อปี 1990 (Croce et al. 1990) สะพานรถไฟนี้ประกอบไปด้วยไป 2 โครงสร้าง หนึ่งคือทางวิ่งที่มีโครงสร้างฐานรากแบบปกติ อีกอย่างหนึ่งตั้งอยู่บนทางลาดชันบนดินหยาบ (รูป 4.31) แต่ละโครงสร้างฐานรากถูกสร้างโดยการทำบล็อกที่ถูก Jet Grouting ขนาดใหญ่ที่ประกอบไปด้วยเสาดิน-ซีเมนต์ 166 ต้น เป็นการปรับปรุงคุณภาพในแนวตั้งกระทำเป็นตารางสามเหลี่ยม โดยมีช่องว่างระหว่างเสา 1.10 เมตร ในทางลาดชันจำเป็นต้องทำไปทีละขั้นโดยทำลงมาตามทางลาดนั้น ในความเป็นจริง โครงสร้างค้ำยันชั่วคราวนั้นถูกสร้างมาจากชิ้นส่วน Jet Grouting กึ่งทรงกระบอก บล็อคจากการทำ Jet Grouting ที่เป็นโครงสร้างฐานรากถูกสร้างมาจากการปรับปรุงคุณภาพดิน 2 แบบ คือการทำงานจาก 2 ระดับที่ไม่ต่อเนื่อง และสุดท้ายเสริมกำลังด้วยท่อเหล็กเข้าไปในวัสดุที่ถูก Jet Grouting โดยการเจาะและการเกร๊าท์

ตัวอย่างอื่นๆของการเสริมความแข็งแรงในโครงสร้างพื้นฐานที่ถูกสร้างในสถาวะในชั้นผิวดินที่ยากลำบากถูกรายงานโดย Langhorst (2012) ในกรณีนี้การเสริมความแข็งแรงด้วยวิธี Jet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

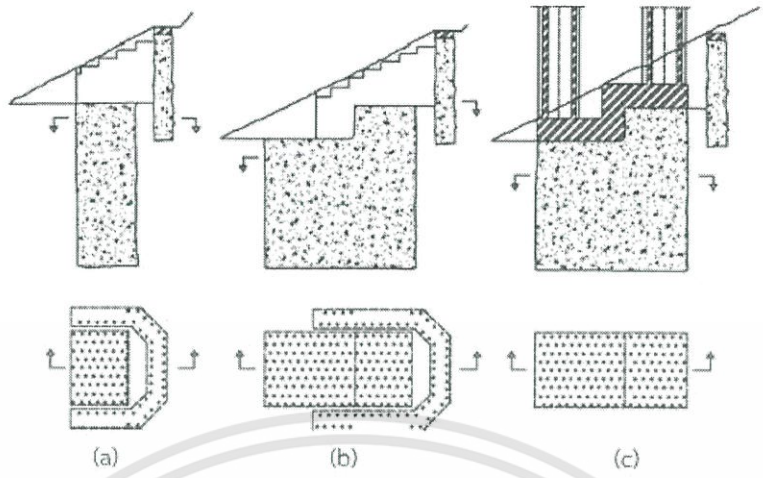
Grouting จำเป็นมากในการเพิ่มความสามารถในการรับกำลังและลดการทรุดตัวของตอม่อและตัวค้ำยันของสะพานที่ตั้งในที่ลุ่มที่มีดิน โครงสร้างฐานรากต้องถ่ายกำลังไปในชั้นดินที่ลึกกว่าโดยไม่ทำให้ PVC foil ซึ่งอยู่ใต้โครงสร้างฐานรากเสียหาย ในตัวอย่างนี้ การเลือกข้อจำกัดของการ Jet Grouting (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ชนิดของซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก) ควรคำถึงถึงเป็นพิเศษเพื่อให้มั่นใจว่ามีความต้านทานและความแข็งที่เพียงพอต่อวัสดุเกร๊าท์

โครงสร้างฐานรากขนาดใหญ่มีชนิดที่แตกต่างกันเนื่องมาจากการขุดปล่องขนาดใหญ่แล้วเติมด้วยคอนกรีตเข้าไป (Balossi Rastelli และ Profeta , 1985)

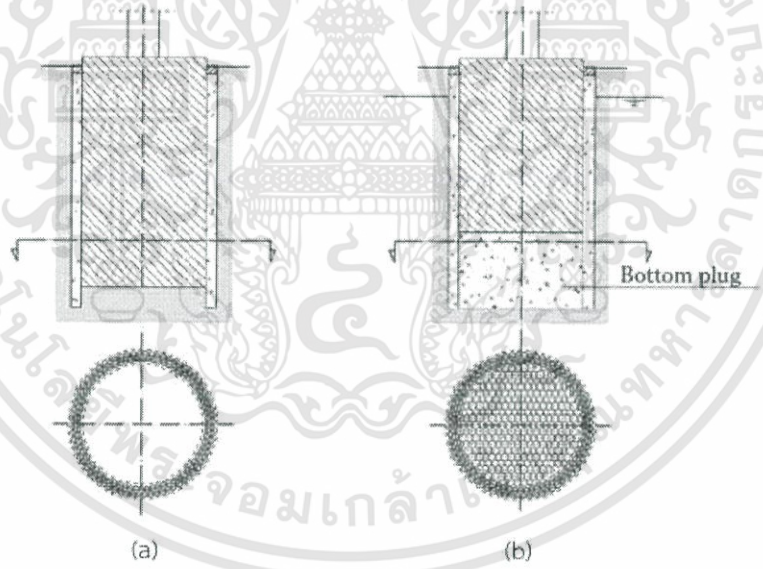


รูป 4.30 ฐานรากที่ได้จากการทำ Jet Grouting: (a และ b) jet-grouted raft และ (c) jet-grouted block
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.31 ลำดับขั้นตอนการทำฐานรากด้วย Jet-grouted block : (a) ลำดับแรก ทำส่วนป้องกันดินรอบข้างขุดดินส่วนด้านบนและเกร๊าท์ตรงบริเวณยอดเนิน, (b)ลำดับที่สอง ขุดดินบริเวณตีนเนินและเสร็จสิ้นการเกร๊าท์ และ (c) ลำดับที่สาม ทำฐานรากครอบเสริมกำลังด้วยคอนกรีต
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)



รูป 4.32 ลักษณะโครงสร้างปล่องที่ทำจากเสาดิน-ซีเมนต์ด้วยวิธี Jet Grouting: (a) ก้นปล่องอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน และ (b) ก้นปล่องอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

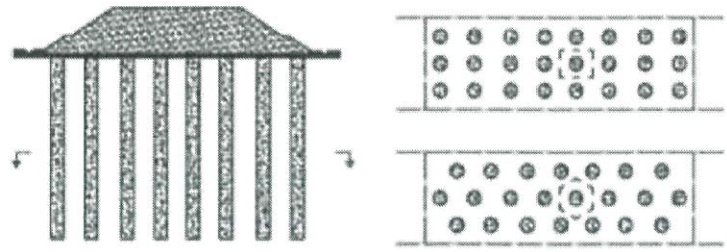
ในกรณีนี้ ต้องทำการเกร๊าท์ให้มีจำนวนมากเพื่อรองรับความเสถียรของปล่องเจาะ ด้วยจุดประสงค์นี้ เสาดิน-ซีเมนต์ ถูกจัดเตรียมตลอดแนวปล่องเจาะเป็นจำนวน 1 หรือ 2แถว เพื่อทำให้องค์ประกอบของโครงสร้างมีลักษณะเป็น 2 มิติที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (รูป 4.32a) ถ้าชิ้นส่วนทรงกระบอกมีความต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ การขุดเจาะปล่องอาจจะทำได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเสริมกำลัง องค์ประกอบของโครงสร้างประพฤติตัวเรียงกันเป็นวงแหวนส่วนมากรับกำลังอัดในแนวนอนในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม ควรมีการใส่เหล็กเสริมกำลังในแนวตั้งตลอดเสาดิน-ซีเมนต์ หรือ โครงเหล็กวงกลมเพื่อให้ความต้านทานในจุดที่อ่อนแอที่สามารถเกิดขึ้นได้ สำหรับปล่องขุดใต้ระดับน้ำควรใส่ตัวเสริมกำลังและตัวกันน้ำ โดยวิธี shortcrete เพราะข้อบกพร่องของการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting เฉพาะที่อาจมีผลที่ไม่สามารถควบคุมน้ำได้ซึ่งทำให้เกิดอันตรายระหว่างการเจาะได้

บางครั้งฐานรากของปล่องที่มีขนาดใหญ่ถูกสร้างขึ้นจาก 2 ชิ้นส่วนที่ซ้อนทับกัน ส่วนด้านบนเป็นปล่องเจาะและการเทคอนกรีตตามมาเหมือนดังที่ได้อธิบายมาแล้ว ในขณะที่ส่วนด้านล่างประกอบไปด้วยบล็อคที่ทำจากเสาดิน-ซีเมนต์แบบทรงกระบอก(รูป 4.32b) การแก้ปัญหาแบบหลังนี้มีประโยชน์ในเรื่องข้อจำกัดของความลึกในการเจาะ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความลึกด้วยน้ำหนักตัวบล็อค ความผิดปกติลดลงต่อความลึก และความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มที่จะหายไป (Croce, 2006) ดังนั้น ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องขยายส่วนของคอนกรีตเสริมกำลังของโครงสร้างฐานรากใต้ความลึกดังกล่าว นอกเหนือจากนั้นถ้าใช้ปล่องเจาะที่ระดับต่ำกว่าระดับน้ำ บล็อคที่ทำจากเสาดิน-ซีเมนต์จะกลายเป็นตัวอุดที่กันปล่องเพื่อป้องกันน้ำในระหว่างการก่อสร้าง (รูป 4.32b) ในกรณีหลังนี้บล็อคที่ทำจากเสาดิน-ซีเมนต์ต้องถูกสร้างจากระดับพื้นดินก่อนเริ่มการเจาะ

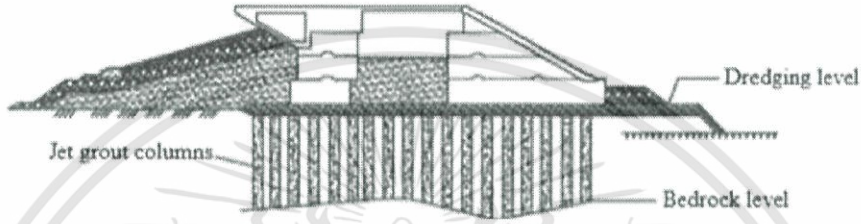
การเสริมกำลังโครงสร้างฐานด้วยฐานรากเดี่ยว 2 กรณีถูกบันทึกในรูป 4.33 ในตัวอย่าง (รูป 4.33a) การ Jet Grouting ถูกทำก่อนการก่อสร้างทำนบเพื่อลดการทรุดตัวที่เกิดจากแรงอัดของดินอ่อน (Croce and Modoni 2010) การเชื่อมกันของเสาด้วยทำนบเพื่อหลีกเลี่ยงความเค้นที่มากเกินไป ทำได้โดยการลดระยะห่างระหว่างเสา (ไม่ควรเกิน2-2.5เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง) หรือโดยการติดตั้งฝาครอบคอนกรีตเสริมกำลังที่ด้านบนสุดของเสา

ในตัวอย่างที่ 2 (รูป 4.33b) เสาดิน-ซีเมนต์ที่เรียงหนาแน่นนั้นถูกสร้างขึ้นเพื่อค้ำยันเกาะเทียม (the Sculpture Plaza ที่ Doha, Qatar) เสาดิน-ซีเมนต์ถูกออกแบบให้เว้นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางหนึ่งไปยังอีกจุดศูนย์กลางหนึ่งหลายๆค่า (1.0-2.0 เมตร) ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกที่ถูกถ่ายโดยโครงสร้างที่วางตัวอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



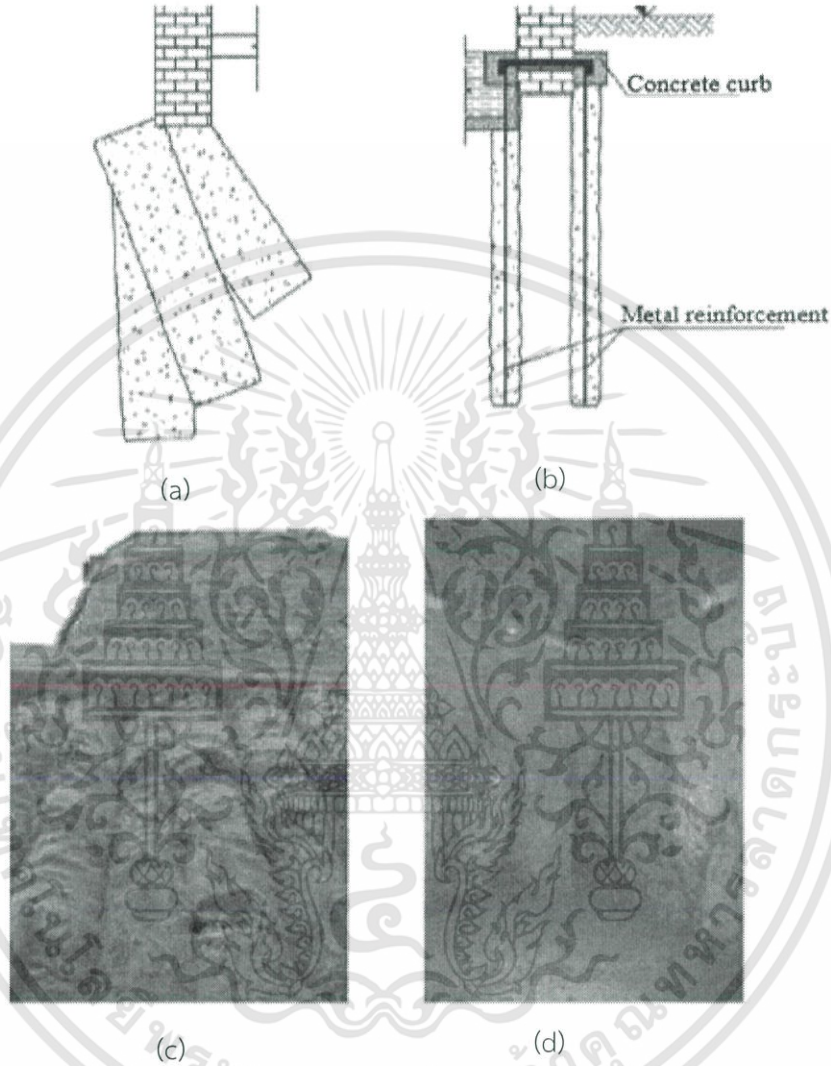
(b)

รูป 4.33 การเสริมกำลังรับน้ำหนักของฐานรากด้วยเสาดิน-ซีเมนต์แบบเดี่ยว: (a) ฐานรากคันดิน และ(b) ฐานรากโครงสร้างนอกชายฝั่ง
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

ชนิดของโครงสร้างฐานรากที่ถูกบรรยายมาก่อนหน้านี้ถูกนำมาใช้ในการสร้างโครงสร้างใหม่ๆ แต่การทำงาน Jet Grouting ถูกใช้บ่อยสำหรับการหนุนโครงสร้างฐานรากของโครงสร้างที่มีอยู่แล้ว รวมไปถึงอาคารโบราณและอนุสาวรีย์ (รูป 4.34) จุดประสงค์ของการค้ำจุนเพื่อให้ความแข็งแรงกับโครงสร้างฐานรากของอาคารที่จะล้ม หรือเพื่อเสริมกำลังชั่วคราวในตอนที่มีการเจาะเกิดขึ้นใกล้กับอาคารที่มีอยู่แล้ว การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ในที่ลาดเอียง (รูป 4.34a) หรือในแนวตั้ง (รูป 4.34b) และเสาดิน-ซีเมนต์อาจจะเสริมกำลังได้ด้วยแท่งเหล็กหรือท่อ ในหลายๆกรณีการหลีกเลี่ยงการรบกวนจากผลกระทบระหว่างการเจาะและการเกร๊าท์เป็นสิ่งสำคัญมากเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขยายตัวของพื้นผิวดินและการยกตัวของโครงสร้างฐานรากที่มีอยู่แล้วอาจเกิดขึ้นถ้าการไหลออกของ Spoil ติดขัดเพราะหลุมเจาะอุดตันหรือในกรณีที่พลังงานในการปรับปรุงคุณภาพดินมากเกินไปมาก ปัญหาในทางตรงกันข้าม (การทรุดตัวของโครงสร้าง) สามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อการทำงาน Jet Groutingถูกใช้กับดินที่ยุบตัวได้และดินที่ไม่อิ่มตัว ในโครงการสนับสนุนส่วนใหญ่ ความเพียงพอในการเชื่อมเสาดิน-ซีเมนต์กับโครงสร้างฐานรากที่มีอยู่แล้วนั้นจำเป็นมาก ความต้องการอย่างหลังนั้นอาจทำได้ด้วยวิธีใช้คานที่เชื่อมต่อกันซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

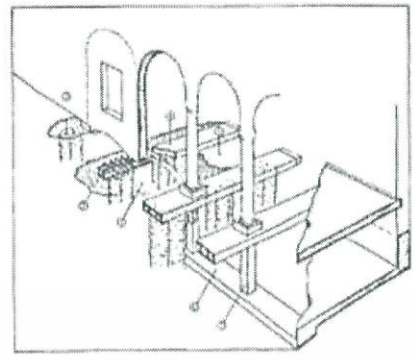
ทำมาจากเหล็กหรือคอนกรีตเสริมกำลัง (รูป 4.34b) ตัวอย่างอื่นๆของงานสนับสนุนถูกบันทึกเป็นลายลักษณ์อักษร (Garassino, 1983; Ichihashi, 1992; Popa, 2001)



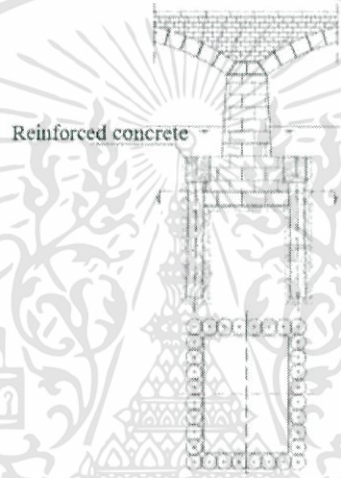
รูป 4.34 การแก้ปัญหาฐานรากด้วยวิธี Jet Grouting โดยมีเสาดิน-ซีเมนต์ทำหน้าที่ค้ำยันฐานราก (underpinning) : (a) แบบไม่มีการเสริมกำลัง, (b)แบบเสริมกำลัง, (c)และ(d) การค้ำยันหลังจากมีการ Jet Grouting เสร็จสิ้น

(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูป 4.35 การปรับปรุงคุณภาพดินของอาคารที่มีอยู่แล้วด้วยการ Jet Grouting (a) การการแก้ปัญหาฐานรากด้วยวิธี Jet Grouting โดยมีเสาดิน-ซีเมนต์ทำหน้าที่ค้ำยันฐานรากอาคารโบราณ และ(b) การป้องกันฐานรากสะพาน
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดของการปรับปรุงคุณภาพดินของอาคารที่มีอยู่แล้วด้วยการ Jet Grouting สามารถดูได้ในรูปที่ 4.35 ในตัวอย่าง (รูป 4.35a) การเสริมกำลังของอาคารในประวัติศาสตร์ใกล้กับเมืองปาร์มาในอิตาลี เสาดิน-ซีเมนต์ที่ถูกเชื่อมไว้ส่วนบนสุดด้วยการเสริมกำลังด้วยคานคอนกรีตเป็นการเสริมกำลังโครงสร้างด้านบนแบบถาวร การยืดออกของเสาด้านบนที่อยู่ใต้ดินถูกสร้างด้วยคอนกรีตเสริมกำลังเพื่อสร้างชั้นที่ต่ำกว่า มีการใช้ประโยชน์ที่คล้ายๆกันที่ตึกโบราณโดยใช้กำแพงกันดิน ซึ่งถูกบันทึกไว้โดย Burke (2007) และBurke และYoshida (2013).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2 (รูป 4.35b) เป็นการป้องกันของสะพานท่าเรือจากการการกัดเซาะ ในกรณีนี้เสาดิน-ซีเมนต์ปกติแล้วถูกจัดเตรียมเพื่อสร้างวงแหวนล้อมรอบโครงสร้างฐานรากของท่าเรือ เทคนิคนี้ถูกนำไปใช้ ตัวอย่างเช่น ถนนข้ามแม่น้ำ Bazoul Constantine ใน แอลจีเลีย (Fruguglietti, 1989) ใน Port Elizabeth ใน แอฟริกาใต้ใช้กระบวนการเดียวนี้ในการหยุดน้ำ เพื่อป้องกันไม่ให้คลื่นเซาะทำให้เกิดโพรงใต้ดิน (Parry Davies, 1992)

4.3.3 โครงสร้างป้องกันดิน

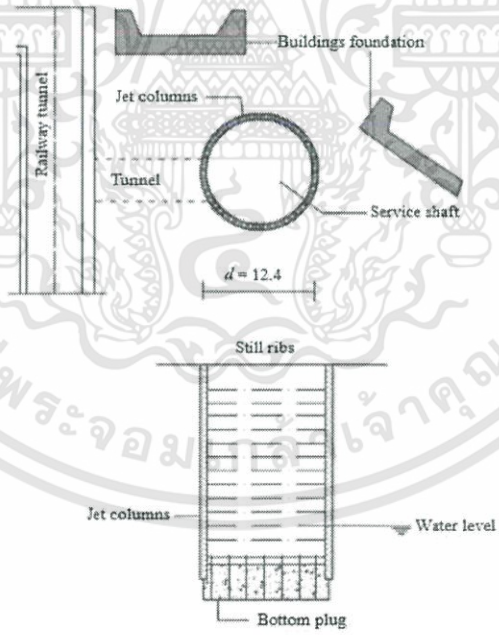
การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ถูกใช้สร้างโครงสร้างป้องกันดินชั่วคราวหรือถาวรในบางครั้ง ด้วยจุดประสงค์นี้การซ้อนกันของเสาเพื่อสร้างองค์ประกอบของโครงสร้างที่ถูกทำด้วยการทำ Jet Grouting เป็น 2 หรือ 3 มิติเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก

ในการเจาะที่เป็นระนาบแบบวงกลม เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อสร้างโครงสร้างเปลือก (Shell Structure) มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกคล้ายกับโครงสร้างปล่องที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้แล้ว (ดูรูป 4.32) ในทางตรงกันข้าม การขุดเจาะขนาดใหญ่หรือการเตรียมการโดยใช้เป็นระนาบตามยาวดิน-ซีเมนต์จะถูกวางเป็นเส้นขนาน 1 เส้นหรือมากกว่าเพื่อสร้างกำแพงในแนวตั้ง ความเค้นที่กระทำบนชิ้นส่วนที่อัดแน่นแตกต่างกันอย่างชัดเจนกับ 2แบบก่อนหน้านี้

ในความเป็นจริงแล้ว องค์ประกอบของโครงสร้างที่ถูกทำด้วยการทำ Jet Grouting ที่ถูกนำมาใช้รองรับที่มีลักษณธแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะโก่งตัวในแนวนอน ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในการทำ Jet- Grouting อยู่ภายใต้แรงกดที่เหมาะสมโดยเฉพาะกับลักษณะทางกลของวัสดุที่นำมาใช้ ประสิทธิภาพของการทำ Jet Grouting สำหรับกำแพงกันดินชนิดนี้ถูกรับประกันตราบเท่าที่เสานั้นแทรกเข้าไปอย่างเพียงพอเพื่อให้แน่ใจว่าองค์ประกอบของโครงสร้างที่ถูกทำด้วยการทำ Jet Grouting ที่มีความหนาเท่าๆกันนี้มีความต่อเนื่องกัน และการแนวระนาบของสามารถสร้างกำลังอัดในปริมาณที่ถูกเกร๊าท์ทั้งหมดได้ เพราะว่า 2 เงื่อนไขอาจมีผลกระทบที่ไม่ดีจากการเบี่ยงเบนของเสาจากแนวที่กำหนดไว้ ในการทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีนี้ควรให้ความสนใจกับการควบคุมการตั้งตรงของเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งในโครงสร้างป้องกันดินที่ถูกทำด้วยวิธี Jet Grouting ที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกนี้ถูกรายงานไว้โดย Balossi Restelli (1986) การปรับปรุงคุณภาพดินตัวเสริมกำลังชั่วคราวเพื่อสร้างปล่องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.4 เมตรและความลึก 22 เมตร (รูป 4.36) ซึ่งใช้เป็นทางเข้าอุโมงค์รถไฟของทางรถไฟใต้ดิน ในมิลาน งานนี้ดำเนินการในสภาพแวดล้อมที่ยากลำบาก ซึ่งก็คือมีอาคารตั้งอยู่ใกล้มากกับปล่องเจาะ เพื่อทำการขุดเจาะต้อคำนึงถึงการทรุดตัวของอาคารรอบๆ จะต้องสร้างเปลือกทรงกระบอกก่อนการขุดเจาะด้วยการแทรกเสาดิน-ซีเมนต์เข้าไป เสาดิน-ซีเมนต์ที่ทำจากการ Jet Grouting มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ถูกใส่เข้าไปโดยที่ระยะห่างจากศูนย์กลางหนึ่งไปอีกศูนย์กลางหนึ่ง เท่ากับ 50 เซนติเมตร หลังจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยการ Jet-Grouting เสร็จสิ้น ปล่องที่ใช้เจาะและชิ้นส่วนเสริมกำลังทรงกระบอกที่หุ้มด้วยตาข่ายเหล็กและซอตกรีต (shotcrete) หนา 20 เซนติเมตร และถูกเสริมกำลังด้วยโครงเหล็กระยะห่าง 1 เมตรใน 2-3 เมตร สุดท้ายจะเจาะใต้ระดับน้ำใต้ดินหลังจากป้องกันการซึมของน้ำด้วยวิธีการเกร๊าท์ที่ความดันต่ำ อย่างไรก็ตามการเบี่ยงเบนของแกนการเจาะเมื่อเทียบกับแนวตั้งจะเป็นผลทำให้การเจาะไม่สมบูรณ์ในความลึกที่มากๆ และเป็นที่จะต้องอุดช่องว่างระหว่างเสาดินซีเมนต์ด้วยการเกร๊าท์ที่ความดันต่ำ โครงการนี้สามารถจำกัดการทรุดตัวของอาคารในโครงการนี้ให้ต่ำกว่า 1.5 มิลลิเมตรได้สำเร็จ



รูป 4.36 ตัวอย่างโครงสร้างรองรับการขุดเจาะปล่องวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการทำ Jet Grouting
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างของการใช้ประโยชน์ที่ถูกรายงานโดย Burke และ Yoshida (2013) ในการสร้างปล่องลักษณะวงกลมสำหรับการตรวจสอบและซ่อมแซมท่อน้ำทิ้งในเมือง Providence (สหรัฐอเมริกา)

ในกรณีของการขุดเจาะผนังด้านข้างที่เป็นแนวตรง กำแพงที่ถูกสร้างด้วยวิธี Jet Grouting ขึ้นอยู่กับสถานะความเค้นที่ถูกเปรียบเทียบกับแรงกระทำบนผนังยื่นซึ่งมาจากการดัด ความเค้นแรงดึงที่สูงสามารถทำให้กลไกความมั่นคงของโครงสร้างพังได้ ดังในที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ ปัญหานี้สามารถจัดการได้ด้วยการใส่แท่งเหล็กหรือท่อเข้าไปในเสาดิน-ซีเมนต์ (รูป 4.37a) เพื่อต้านความเค้นแรงดึงและด้วยการวางเสาเป็นแถวในแนวลาดเอียง (รูปที่ 4.37b) หรือเสริมกำลังกำแพงด้วยการใช้แท่งเหล็กและสลิงในด้านหลังของกำแพง (รูป 4.37c) สมอ(เส้นลวดหรือแท่ง) อาจจะถูกพบในชิ้นส่วนที่ผ่านการ Jet Grouting ที่ทำมาก่อนหน้านี้สำหรับการส่งถ่ายความเค้นเฉือนทีละน้อยจากชิ้นส่วนเหล็กไปสู่ดินธรรมชาติ

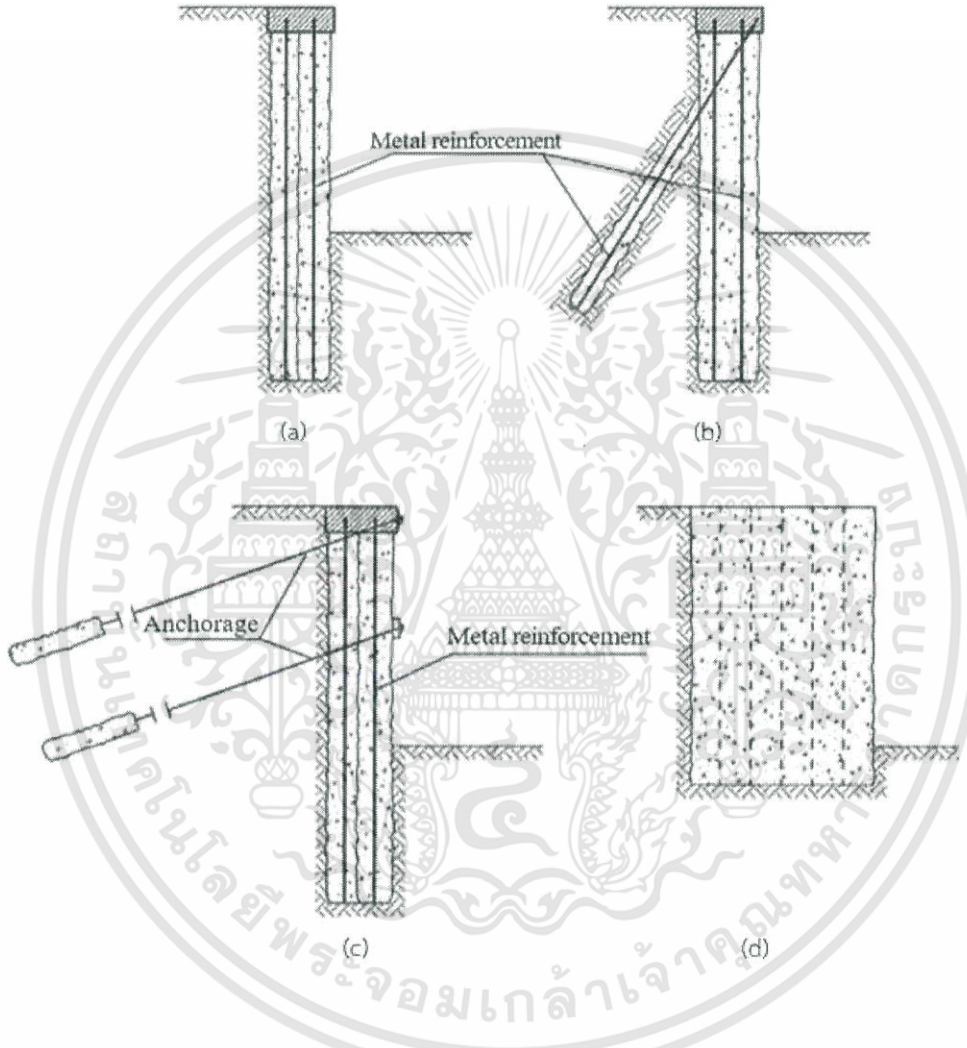
ตัวอย่างของ ผนังที่ถูกเกร๊าท์แบบ "Inverted V" ใช้การปรับปรุงคุณภาพในแนวตั้งกับในแนวลาดเอียงร่วมกัน Santoro และ Bianco รายงานไว้ในปี 1995 เกี่ยวกับการก่อนสร้างที่จอดรถใต้ดินใกล้กับกรุงโรม ในประเทศอิตาลี มีการเจาะผ่านดินภูเขาไฟ (pyroclastic soil) ลึกจากระดับพื้นดิน 8 เมตร และผนังถูกค้ำไว้ด้วยเสาที่ซ้อนทับกัน 2 แถวในแนวตั้ง โดยใช้ระบบ single-fluid system (รูป 4.38) ในแต่ละแถวประกอบไปด้วย เสายาว 16 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ถูกเสริมกำลังไว้ด้วยเหล็กแท่งและตั้งไว้ด้วยระยะห่าง 0.6 เมตรจากจุดศูนย์กลางอันหนึ่งไปยังอีกจุดศูนย์กลางหนึ่ง มีความหนา 1.9 เมตรชิ้นส่วนถูกเชื่อมกันด้วยแถวของเสาที่ถูกเสริมกำลังด้วยเหล็กที่มีความยาวเท่าๆกัน มีทำมุม 25 องศากับแนวตั้ง ในท้ายที่สุดเสาถูกเชื่อมกันด้านบนด้วยคานที่เสริมกำลังด้วยคอนกรีต

Sondermann และ Toth นำเสนอโครงสร้างที่ทำจากการ Jet Grouting ไว้ในปี 2001 การเจาะที่ทำขึ้นใน the vicinity of Bonn (เยอรมนี) ทำขึ้นในดินลุ่มน้ำที่ประกอบด้วย 2 ชั้นของทรายและกรวดทรายตามลำดับ มีการเจาะลงไปลึก 13.30 เมตรจากระดับพื้นดิน ซึ่งทำอยู่ใกล้กับ อาคาร 4 และ 5 ชั้น (รูป4.39) องค์ประกอบของโครงสร้างที่ถูกทำเพื่อรองรับนี้ทำขึ้นจากการสร้างเสาลาดเอียงและจากนั้นใช้หลัก 4 แถวเพื่อลดแรงจากการดัด ใช้ระบบ triple-fluid system ในการปรับปรุงคุณภาพดิน เสานี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 1.2 เมตร ระดับน้ำสูงกว่าระดับต่ำสุดของการเจาะ 5.2 เมตร ดังนั้นทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการ Jet Grouting ลึก 18 เมตรจากระดับพื้นดินเพื่อให้ถึงระดับพื้นที่เป็นดินเหนียว เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้น้ำไหลเข้ามาในการเจาะ การใช้ประโยชน์ที่เหมือนกันอีกอย่างถูกรายงานไว้โดย Garassino (1983) นำเสนอการเจาะประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.50 เมตร ใต้พื้นดิน ที่มีการค้ำด้วยเสาดิน-ซีเมนต์ 2 แถวขนาดนั้นโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตรซ้อนกันและเสริมกำลังด้วยท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร และหนา 4 มิลลิเมตร

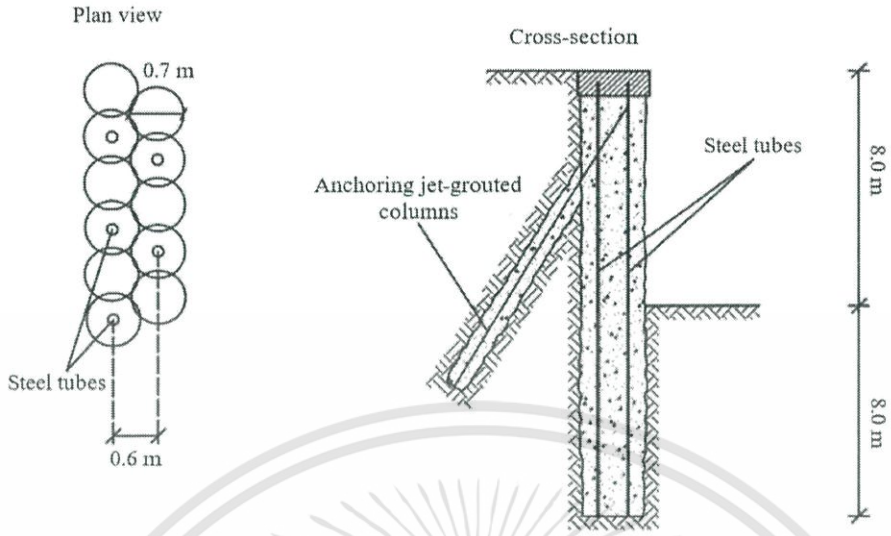
โครงสร้างกันดินในกรณีนี้ถูกเสริมกำลังด้วยหลักที่ถูก Jet Grouting 2 ครั้งและพื้นคอนกรีตที่มีจุดประสงค์เพื่อลดโมเมนต์การดัดในเสาดิน-ซีเมนต์



รูป 4.37 โครงสร้างกันดินทีทำจากการ Jet Grouting : (a) กำแพงยื่นขึ้นมาในแนวดิ่ง, (b) แบบ "Inverted V", (c) แบบยึดสมอ และ(d) แบบเป็นก้อนขนาดใหญ่

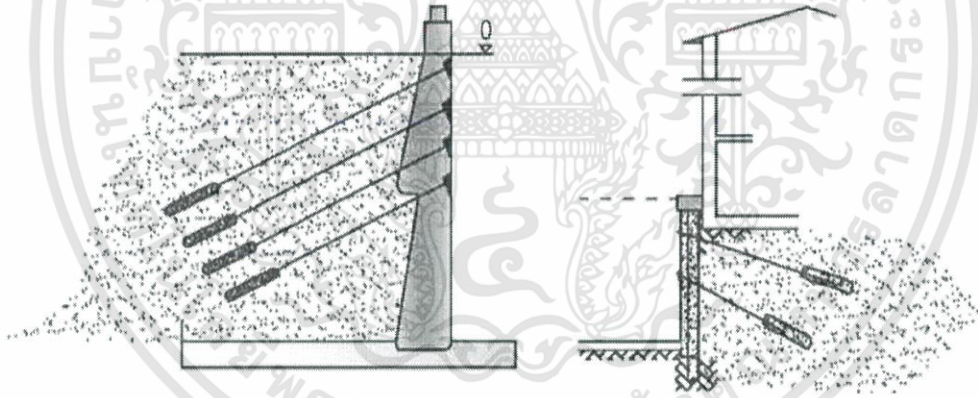
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.38 ตัวอย่างโครงสร้างกำแพงกันดินแบบ “Inverted V”

(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)



รูป 4.39 ตัวอย่างโครงสร้างกำแพงกันดินแบบมีสมอยึดรั้ง

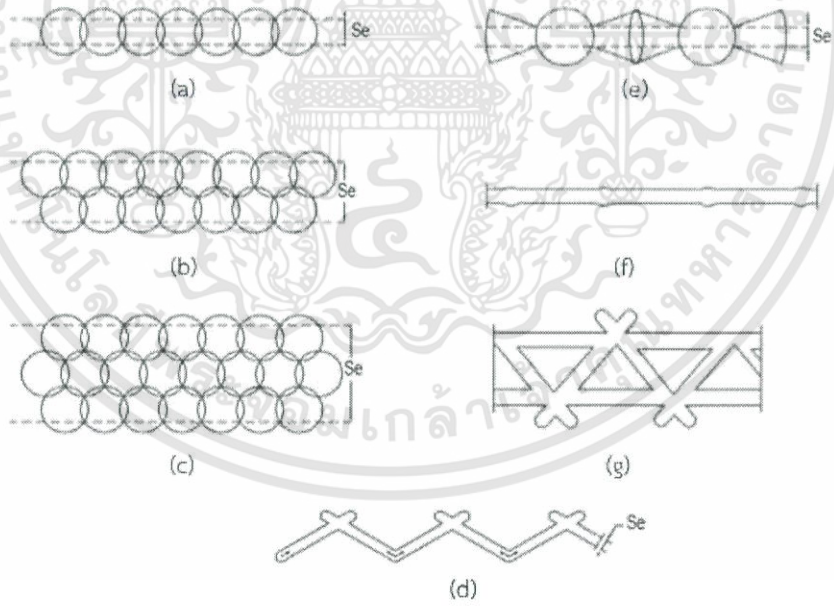
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 กำแพงกันน้ำ

การ Jet Grouting ถูกใช้บ่อยในการทำกำแพงกันน้ำชั่วคราวในใต้ดิน (Burke 2007; Burke and Yoshida 2013) ในความเป็นจริงแล้วการกันน้ำแบบชั่วคราวใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการซึมของน้ำใต้โครงสร้างทางชลศาสตร์เช่น เขื่อนและฝาย หรือเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของพื้นดินที่ทำงานการกั้นน้ำชั่วคราวนั้นถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันกระแสน้ำไหลเข้าในกระบวนการเจาะผ่านชั้นดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน กำแพงกันน้ำที่มีประสิทธิภาพสามารถสร้างได้ด้วยการสร้างกำแพงที่ผ่าน Jet Grouting หรือ คานแนวนอนที่ที่ผ่าน Jet Grouting แล้ว (bottom plug)

แนวระนาบของกำแพงที่ได้มาจากการ Jet Grouting แนวตั้งถูกนำไปใช้ได้หลายแบบ ราบของกำแพงที่ถูกออกแบบไว้ในรูป 4.40ชนิด a, b, และc เป็นแบบ cut-off ด้วยการเชื่อมเสาทรงกระบอกที่ซ้อนกัน 1 แถว หรือมากกว่าเข้าด้วยกัน ในขณะที่ ชนิด d เป็นการเชื่อมกันเป็นรูปตัว V โดยที่ในแต่ละแบบถูกสร้างโดยการปรับปรุงคุณภาพดินที่ไม่มีการหมุนก้นเจาะ ซึ่งแผ่นนั้นสามารถรวมกันได้หลายรูปแบบ (เส้นตรง ลิ่ม โพรง) ดังที่แสดงในรูป 4.40 (f, g, และh) ชิ้นส่วนที่ซ้อนกันเป็นแบบ candy-shape (ชนิด e) ซึ่งรูปทรงแบบนี้มีการหมุนก้านเจาะบางส่วนในระหว่างการเกร๊าท์



รูป 4.40 การวางตัวของเสาดิน-ซีมนต์ หรือแผ่นดิน-ซีเมนต์ (Jet-grouted panels) ในโครงสร้างกำแพงกันน้ำ

(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวระนาบกำแพงที่เหมาะสมที่สุดได้จากระดับความมั่นใจในประสิทธิภาพของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินจากนักออกแบบซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการเฉพาะในแต่ละโครงการ อย่างไรก็ตาม แผ่นดิน-ซีเมนต์ (Jet-grouted panels) ถูกใช้ในกรณีพิเศษเท่านั้น ส่วนมากจะใช้มากที่สุดคือเสารูปทรงกระบอก และโดยการเลือกระยะห่างระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดินน้อยเท่าที่ต้องการเพื่อให้แน่ใจว่ากำแพงจะมีความต่อเนื่องกัน การควบคุมลำดับการสร้างต้องได้รับการใส่ใจเป็นพิเศษ

"Jet grouting cutoffs" ถูกใช้ในทำนบกั้นน้ำหลายชนิด เช่น เขื่อนดิน (Earth dam) และทำนบกั้นน้ำชั่วคราว(Cofferdam) เขื่อนคอนกรีต (Concrete gravity dam) และฝายระบายน้ำคอนกรีต (Concrete diversion weirs) (Croce and Modoni 2005, 2008) ในบางกรณี คลองลัด (cutoff) เห็นได้ก่อนในขั้นตอนการออกแบบและถูกใช้ก่อนการก่อนสร้างเขื่อน (Attewill , 1992; Sembenelli และ Sembenelli 1999; Guatteri , 2012) ในกรณีอื่นๆ การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการ Jet Grouting จะถูกทำในเขื่อนที่มีอยู่แล้วเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการกันน้ำของกำแพงกันน้ำที่มีอยู่เดิมแล้ว(Bell 1993; Croce และ Modoni, 2006)

ในรูปที่ 4.41 แสดงพื้นที่หน้าตัดหลายแบบของ jet grouting cutoffs สำหรับเขื่อนดินใหม่ (a, b, c) และสำหรับเขื่อนที่มีอยู่ก่อนหน้านี้ (d, e, f) ในเขื่อนใหม่นั้น แนวกันน้ำ (cutoff) เริ่มจากส่วนตรงกลางของแกนที่ทึบ การปรับปรุงคุณภาพดินนี้ถูกทำที่ระดับโครงสร้างฐานรากก่อนการสร้างเขื่อน เขื่อนที่มีอยู่ก่อนหน้านี้แล้ว แนวกันน้ำ (cutoff) จะถูกตั้งอยู่ในหลายๆตำแหน่งซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของเขื่อน ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่หลากหลาย ในความเป็นจริงนั้นในกรณีนี้การปรับปรุงคุณภาพต้องทำให้สอดคล้องกับชนิดของเขื่อนและระบบกันน้ำที่แตกต่างกัน สำหรับ เขื่อน Bronbach (รูป 4.41d) การ Jet Grouting ถูกทำจากส่วนบนสุดของเขื่อนผ่านส่วนบนของที่ลุ่มน้ำและส่วนล่างของหินทราย เพื่อเข้าถึงส่วนที่เป็นดินเหนียวทึบน้ำที่ก้น ในกรณีนี้ ขนาดของแนวกันน้ำ (cutoff)ถูกกำหนดมาเพื่ออุดโครงสร้างพื้นฐานและตลิ่งโดยการสร้างกำแพงกั้นน้ำ 2 ชั้นกับกำแพงเดิม ใน the Forcoletta Dam (รูป 4.41f) cutoffถูกสร้างโดยเริ่มจากส่วนตีนลาดทึบน้ำในทางเข้าของต้นน้ำด้วยจุดประสงค์เพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของแนวเกร๊าท์เดิม จากนั้นแนวกันน้ำ (cutoff)ถูกเชื่อมกับการดาดทึบน้ำใหม่ของผิวต้นน้ำเพื่อให้มั่นใจว่าทั้งหมดจะไม่มีน้ำซึมเข้า

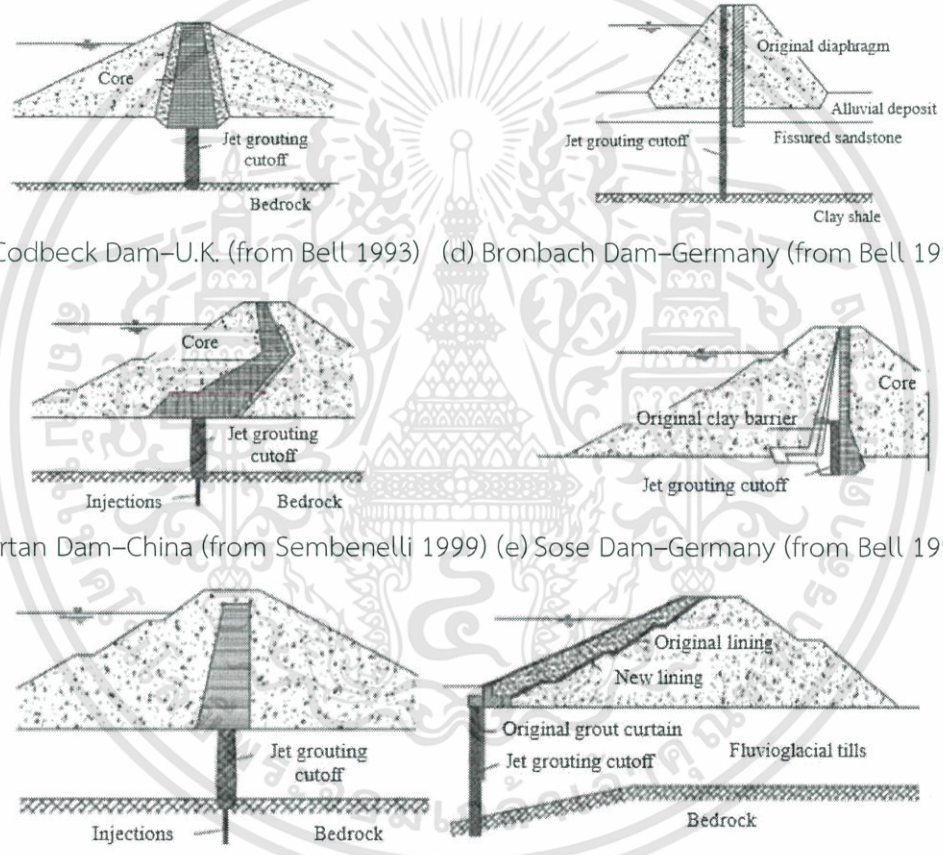
แนวกันน้ำ (cutoff) ที่สร้างจากการทำ Jet Grouting ใช้เป็นวิธีการในการซ่อมเขื่อนที่มีอยู่แล้ว แนวความคิดนี้เป็นเหตุมาจากมาจากความยืดหยุ่นโดยธรรมชมชาติของการอัดฉีดโดยการพ่น ในความจริงนั้น โดยการรวมกันของเสาดิน-ซีเมนต์ด้วยการจัดที่เหมาะสม แนวกันน้ำสามารถออกแบบได้ตามชนิดของเขื่อนและการตั้งทางธรณีวิทยา การพิจารณาที่เกี่ยวข้องอีกอย่างคือการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงคุณภาพโดยการเกร๊าท์สามารถทำภายใต้สภาวะที่การขนส่งที่ไม่เอื้ออำนวย เพราะไม่ต้องใช้อุปกรณ์หนักในการทำงาน

ข้อบกพร่องในกำแพงที่ถูก Jet Grouting สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องมาจากสาเหตุ ดังต่อไปนี้

- ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นซ้อนทับกันไม่เพียงพอ
- สิ่งที่ไม่พึงประสงค์ในการทำงานเนื่องมาจากธรรมชาติหรือสิ่งกีดขวางที่เกิดจากมนุษย์ หรือโดยเสาที่สร้างขึ้นก่อนหน้า
- สภาวะพื้นดินที่ไม่เหมือนกัน



(a) Codbeck Dam–U.K. (from Bell 1993) (d) Bronbach Dam–Germany (from Bell 1993)

(b) Ertan Dam–China (from Sembenelli 1999) (e) Sose Dam–Germany (from Bell 1993)

(c) Thika Dam–Kenia (from Attewill, 1992) (f) Forcoletta Dam–Italy (from ENEL 2000)

รูป 4.41 รูปตัดกำแพงกันน้ำที่ทำจากการ Jet Grouting

(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

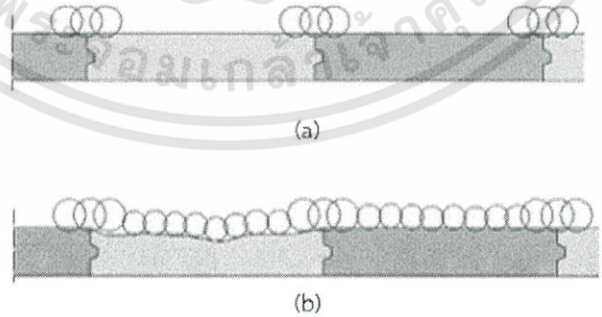
การ Jet Grouting สามารถใช้สำหรับการปิดการรั่วของข้อต่อหรือซ่อมแซมส่วนที่บกพร่องของกำแพงคอนกรีต ตัวอย่างรูปที่ 4.42 ถูกรายงานไว้โดย Ryjevski, (2009) ในแต่ละการใช้งานจำเป็นต้องมีตำแหน่งของเสาที่แม่นยำ

กำแพงที่ถูก Jet Grouting ถูกใช้อย่างแพร่หลายในด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับการสร้างแนวกั้นสิ่งปนเปื้อนที่จะเข้ามา Burke and Yoshida (2013) รายงานกรณีเกี่ยวกับการหุ้มท่อที่รั่ว (รูป 4.43) ในกรณีนี้ เสาดิน-ซีเมนต์เอียงถูกสร้างใกล้กับส่วนที่รั่วของท่อเพื่อป้องกันการแพร่ของสารปนเปื้อน

ในตัวอย่างอื่นๆที่รายงานไว้โดย Bruke (2007) เสาดิน-ซีเมนต์จากการทำ Jet Grouting ถูกใช้เพื่อสร้างแนวป้องกันด้านข้างของพื้นที่จำกัดที่ Dundee (Michigan, USA) เสาถูกใช้แทนที่ดินที่น้ำปูนผ่านเข้าไม่ได้ที่ความลึกที่กำหนดไว้ซึ่งเป็นชั้นทราย ในกรณีนี้การทำ Jet Grouting ให้ผลลัพธ์ที่ดี

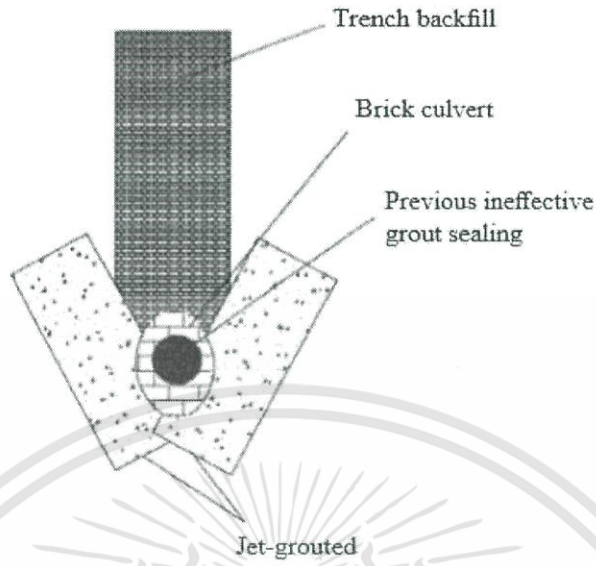
คานแนวนอนที่ถูก Jet Grouting บ่อยครั้งถูกเรียกว่า "Bottom plug"ถูกใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการซึมของน้ำจากก้นของการเจาะใต้ระดับน้ำใต้ดิน ในการใช้ประโยชน์ประเภทนี้ การเจาะจะถูกทำในระดับพื้นดินแต่การอัดฉีดถูกใช้จากก้นของหลุมไปยังผิวด้านบนของที่อุดเท่านั้น

Bottom plug ต้องมีรูปร่างที่ต้านความดันขึ้นของน้ำในรูปที่ 4.44 คือ แบบ Bottom plug 3 แบบที่เป็นไปได้ โดยคานปกติในรูป 4.45a เป็นคานที่มีน้ำหนักเพียงพอในการถ่วงความดันขึ้นของน้ำ อีกทางเลือกหนึ่ง คานอาจจะมีรูปร่างเหมือนโค้งหงาย (รูป 4.45b) เพื่อเพิ่มแรงยกผ่านความเค้นแรงกดที่ส่งผ่านไปยังผนังด้านข้าง ถ้าความดันขึ้นของน้ำสูงมากให้ใช้สมอเพื่อเพิ่มความต้านทาน (รูป 4.45c) ในทุกๆกรณีต้องออกแบบแบบแผนการปรับปรุงเพื่อให้แน่ใจว่าคานจะวางตัวต่อเนื่องกัน (van Tol, 2001; Eramo , 2012)

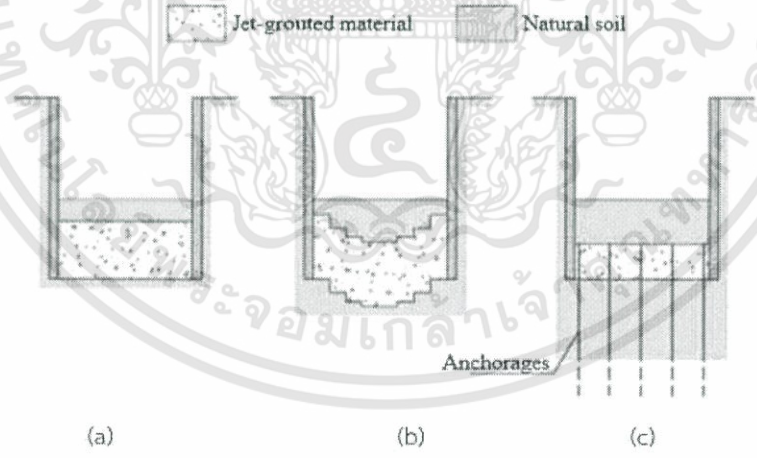


รูป 4.42 ตัวอย่างการแก้ปัญหาการรั่วไหลและการแก้ปัญหาชิ้นส่วนคอนกรีตที่มีความบกพร่อง: (a) การซ่อมรอยต่อ และ(b) การซ่อมชิ้นส่วนคอนกรีตที่มีความบกพร่อง
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.43 ตัวอย่างงาน Jet Grouting ที่ใช้แก้ปัญหาการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)



รูป 4.44 Bottom plug ที่ทำจากการ Jet Grouting : (a) แบบพื้นเรียบ, (b) แบบโค้งหงาย และ(c) แบบมีสมอยึด
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

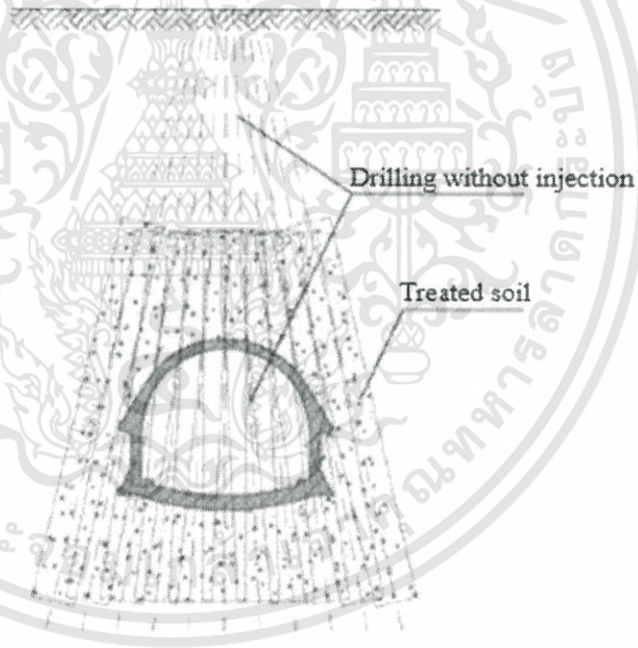
4.3.5 อุโมงค์

การ Jet Grouting พ่นถูกใช้บ่อยครั้งในการทำอุโมงค์ดินเพื่อค้ำยันขณะทำการขุดเจาะ หรือสร้างกำแพงกั้นน้ำ การปรับปรุงคุณภาพดินสามารถทำได้ 2 ทาง

1. โดยการทำจากพื้นผิวดินก่อนการขุดเจาะ

2. โดยการทำจากข้างในอุโมงค์ระหว่างการขุดเจาะ

วิธีการดำเนินการก่อสร้างแรกในรูป 4.45 แยกการปรับปรุงคุณภาพดินออกจากขั้นตอนการขุดเจาะ ซึ่งมีประโยชน์ในการลดเวลาการก่อนสร้างทั้งหมดลงโดยการวางแผนที่เหมาะสม (Arroyo, 2012) แม้ว่าแบบแผนนี้จะให้แยกการทำ Jet Grouting ออกจากลำดับการก่อสร้างอุโมงค์ การปรับปรุงคุณภาพยังสามารถทำได้จากระดับพื้นดินเท่านั้นถ้าชั้นดินที่ปกคลุมมีความบางและถ้าพื้นผิวดินสามารถเข้าถึงได้ง่าย ดังนั้นในส่วนใหญ่จำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุงคุณภาพโดยการทำงานจากด้านในอุโมงค์

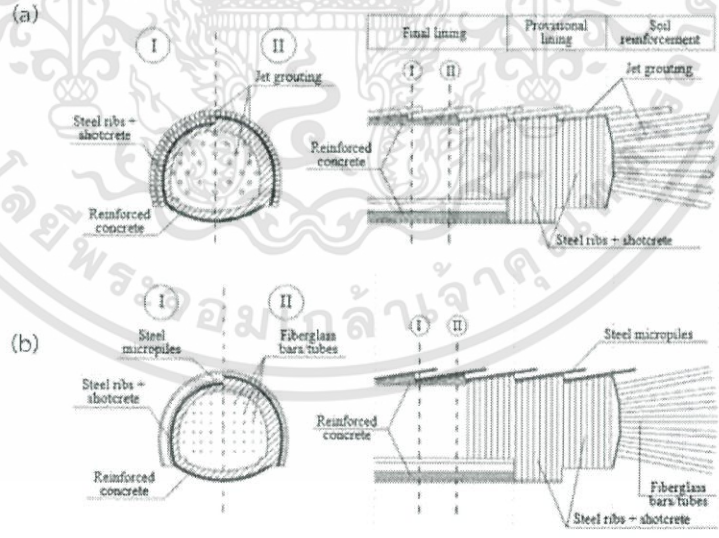


รูป 4.45 ระบบค้ำยันอุโมงค์ที่สร้างจากการทำ Jet Grouting
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานในกระบวนการอักฉีดโดยการพ่นหรือการทำ Jet Grouting จากด้านในอุโมงค์เรียกว่า “Canopy Technique” (รูป 4.46) เทคนิคนี้ใช้วิธีการเสริมกำลังของดินที่หลากหลายเป็นพื้นฐานซึ่งถูกจัดไว้สำหรับแต่ละรูปแบบเฉพาะทางเรขาคณิตและลักษณะเพื่อหาความเสถียรของอุโมงค์และพื้นผิวขณะทำการขุดเจาะ ประทุนสามารถใช้เสาดิน-ซีเมนต์ หรือเสาเข็มเหล็กไมโคลไพล์ซึ่งถูกติดตั้งไว้สำหรับการเจาะ สำหรับดินที่อ่อนแอมากๆความมั่นคงของผิวอุโมงค์อาจจะได้รับการเสริมแรงแบบกระจายของดินด้านหลังของผิวหน้า ที่สามารถทำได้โดยการอัดฉีดโดยการพ่นหรือใช้ชิ้นส่วนแก้วไฟเบอร์ ในความเป็นจริงแล้ว การปรับปรุงผิวหน้าแพงและต้องการเวลาแต่มีประสิทธิภาพดีในการเสริมกำลังสำหรับการเจาะที่ไม่มั่นคงและการทรุดตัวจะเกิดขึ้นน้อยที่สุดด้วยในระหว่างการเจาะ ส่วนประกอบเสริมกำลังผิวหน้าถูกเคลื่อนย้ายไปพร้อมกับดินที่ชิ้นส่วนถูกเสริมกำลังด้วยการใช้โครงเหล็กและ Shotcrete เพื่อทำกำแพงชั่วคราวของอุโมงค์ให้เสร็จ กำแพงสุดท้ายทำจากคอนกรีตเสริมแรงโดยอาจจะถูกติดตั้งภายหลังและอาจจะสะดวกมากกว่า

ในการขุดเจาะอุโมงค์ การทำ Jet Grouting สร้างโดยวิธีการแบบ single fluid system เป็นประจำเพราะว่าไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่หนักและมีความน่าเชื่อถือมากกว่าในการทำงานใต้ดิน การใช้การอักฉีดโดยการพ่นแบบ single fluid systemเนื่องมาจากเหตุผลด้านความปลอดภัยเพราะว่าวิธี single fluid system ไม่ต้องการใช้การอัดอากาศระหว่างการเกร๊าท์ ซึ่งมีความเสี่ยงในพื้นที่ใต้ดินที่แคบ



รูป 4.46 รูปแบบแปลน Canopy Technique : (a) เสริมกำลังด้วยเสาดิน-ซีเมนต์ และ(b) เสริมกำลังด้วยเสาเข็มเหล็กไมโคลไพล์ และแท่งไฟเบอร์กลาส

(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามหลักการแต่ละเทคนิคเสริมกำลังเหมาะสมสำหรับดินแต่ละชนิดโดยเฉพาะและสภาวะการซึมของน้ำ การปรับปรุงคุณภาพด้วยการ Jet Grouting โดยปกติแล้วเหมาะกับการทำในดินทราย ใช้เสาขนาดใหญ่ การสร้างส่วนโค้งเสริมกำลัง (รูป 4.46a) ส่วนโค้งนั้นสามารถเป็นที่กันน้ำได้ถ้าความดันน้ำไม่สูงจนเกินไป สำหรับวัสดุเม็ดละเอียดการ Jet Grouting แบบ single fluid system ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้เสาเข็มไม-โครไพล์มากกว่า (รูป 4.46b) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เสาเข็มไมโครไพล์ที่เป็นเหล็กถูกใช้ในเส้นแสดงรูปร่างอุโมงค์ในขณะที่แท่งหรือท่อแก้วไฟเบอร์ถูกใช้ในการเสริมกำลังผิวหน้าเพราะสามารถตัดได้ง่ายในระหว่างการเจาะ ในกรณีที่ยากขึ้นหรือในสภาวะดินที่เดาไม่ได้ การใช้การอัดฉีดโดยการพ่นร่วมกับเสาเข็มมีประโยชน์มากในการสร้างเสาเทเสริมกำลัง

ไม่ว่าจะเลือกวิธีไหนในการเสริมกำลังดิน Canopy Technique ถูกกำหนดลักษณะพิเศษโดยลำดับกรก่อสร้างซึ่งดำเนินการตามแผน ในรูป 4.47 ระยะห่างส่วนมากอยู่ระหว่าง 6 และ 12 m. สำหรับแต่ละระยะ มี 2 ช่วงการก่อสร้างหลัก คือ การปรับปรุงคุณภาพดินตลอดเส้นแสดงรูปร่างอุโมงค์ (รูป 4.47a) และ การขุดดิน (รูป 4.47b) หลังจากช่วงการเจาะสำเร็จ (รูป 4.47c) สามารถเสริมกำลังผิวหน้าอุโมงค์ได้ ถ้าจำเป็น (รูป 4.47d)

ความรู้ในการใช้ Canopy Technique ได้มาจากการะบวนการ Trial-and-Error ปัญหาต่างๆที่พบในการใช้วิธีการทำอุโมงค์ถูกอธิบายไว้โดย van Tol (2004) และ Croce et al. (2004) ซึ่งได้นำเสนอข้อมูลการสังเกตการณ์และการทดลองไว้หลายอย่าง

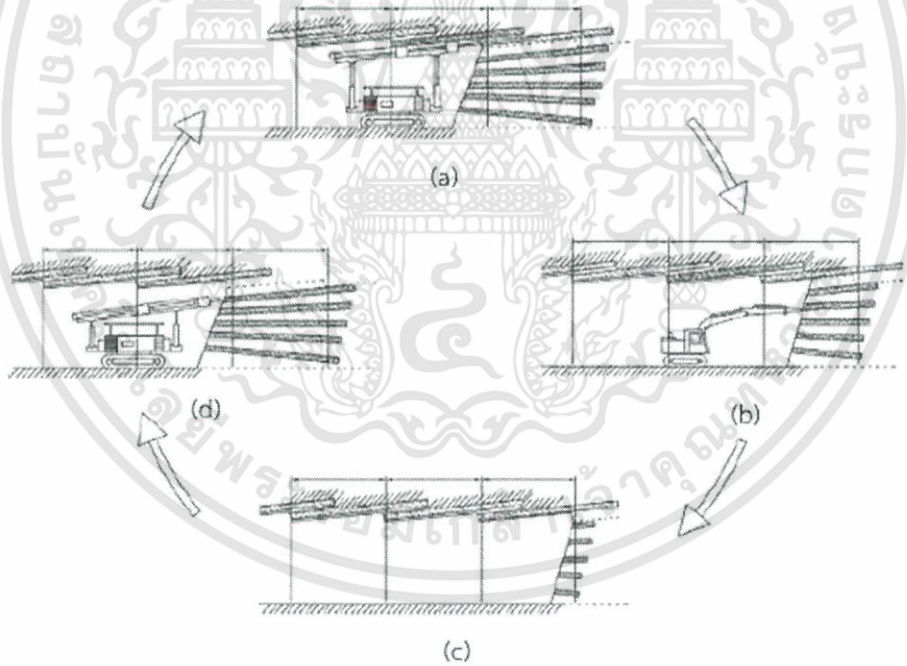
ตัวอย่างที่โดดเด่นในประวัติศาสตร์ถูกรายงานไว้โดย Croce et al. (2004) เกี่ยวกับอุโมงค์ทางหลวง ชื่อว่า “Les Cretes” ซึ่งถูกสร้างเมื่อหลายปีที่แล้วในทางตะวันตกเฉียงเหนือของอิตาลีระหว่างเมือง Aosta และ Mont Blanc อุโมงค์นี้ถูกเจาะผ่านตะกอนดินของต้นกำเนิดน้ำแข็งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักของกรวดทรายและทรายแป้งที่มีก่อนหินรูปร่างไม่แน่นอน การเจาะใช้ Canopy Technique, เสาเข็ม และการ Jet Grouting ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะของดิน หลายๆอย่างการวิบัติในการทำอุโมงค์นี้ และการวิบัติทางกลที่ถูกสังเกตถูกแบ่งตามความแตกต่าง 3 แบบในรูปที่ 4.48

แบบแรกประกอบไปด้วยดินที่พังทลายลงมาที่ผิวหน้าการเจาะและไม่เกี่ยวกับประทุนหรือกำแพงชั่วคราว (รูป 4.48a) แบบการวิบัตินี้สามารถอ้างได้ว่าเกิดจากความอ่อนแอของดินหรือท่อที่มีการซึมของน้ำ เพื่อป้องกันการวิบัติทางกลสามารถทำได้โดยการเสริมกำลังผิวหน้าเพื่อให้กำลังดึงกับดินด้านหลังผิวของการเจาะ อย่างไรก็ตาม การรักษาเสถียรภาพที่เหมาtสมที่สุดทำได้โดยการเพิ่มระยะห่างจากผิวหน้าอุโมงค์ถึงปลายประทุน ด้วยการทำเสาที่ยาวขึ้นหรือลดช่วงของการเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิบัติทางกลประการที่สอง คือ การพังทลายของปลายประทุน ด้านหลังของผิวหน้าอุโมงค์ (รูป 4.48b) การวิบัติที่เกี่ยวกับผิวหน้าการเจาะเป็นเหตุมาจากการเสริมกำลังที่ไม่เพียงพอ (เช่น ระยะห่างระหว่างเสาเข็มไมโครไพล์มากเกินไป) หรือชิ้นส่วนเสริมกำลังบกพร่อง ในความเป็นจริงแล้ว เส้นผ่านศูนย์กลางและคุณสมบัติทางกลของเสาดิน-ซีเมนต์มีความหลากหลายเนื่องมาจากความไม่เหมือนกันของดิน ซึ่งสรุปได้ว่า ความต้านทานโดยรวมของประทุน อาจจะถูกลดลงเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องกัน การวิบัติชนิดนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการควบคุมการก่อสร้างอย่างระมัดระวัง เพิ่มขนาดประทุน และใช้เสาเข็มและเสาดิน-ซีเมนต์เป็นคู่ และการควบคุมทิศทางการเจาะยังคงสำคัญมากสำหรับทั้งเสาเข็มไมโครและการอักฉีดโดยการพ่นเพื่อให้ได้ประทุนที่ต่อเนื่องกัน

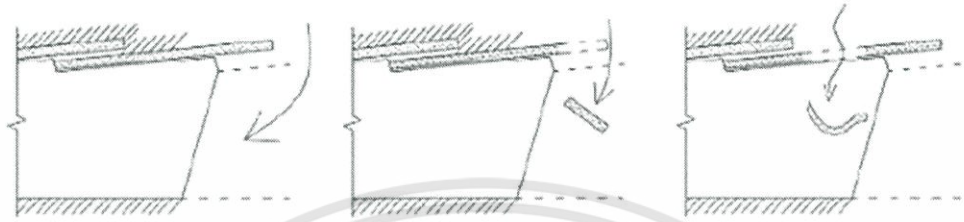
การวิบัติทางกลประการที่สาม การแตกหักขององุโมงค์ที่บางระยะจากผิวหน้าอุโมงค์ (รูป 4.48c) ซึ่งอาจเกิดจากข้อบกพร่องเฉพาะจุดของกำแพงชั่วคราวรวมไปถึงประทุน โครงเหล็กและชั้น Shortcrete อย่างไรก็ตามการวิบัติประเภทนี้เกิดขึ้นไม่บ่อยนักและสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการนักและสามารถควบคุมการก่อสร้างอย่างระมัดระวัง



รูป 4.47 ลำดับการทำอุโมงค์ด้วยวิธี Canopy Technique
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทำอุโมงค์ในเมือง สำคัญมากที่จะต้องหลีกเลี่ยงการทรุดตัวที่มากเกินไปที่เป็นเหตุให้เกิดปัญหาร้ายแรงขึ้นได้กับโครงสร้างอื่นๆ นี่เป็นปัญหาที่ท้าทายมากแต่สามารถทำให้สำเร็จได้ด้วยการออกแบบและควบคุมให้เหมาะสม เหมือนกับที่หลายๆเอกสารในประวัติศาสตร์ได้พิสูจน์ไว้ (Russo and Modoni, 2005; Arroyo, 2012; Croce, 2012)



รูป 4.48รูปแบบการวิบัติทางกล: (a) ด้วยดินที่พังทลายลงมาที่ผิวหน้าการเจาะ, (b) การพังทลายของปลายประทุน และ(c) การแตกหักขององุโมงค์ที่บางระยะจากผิวหน้าอุโมงค์
(Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

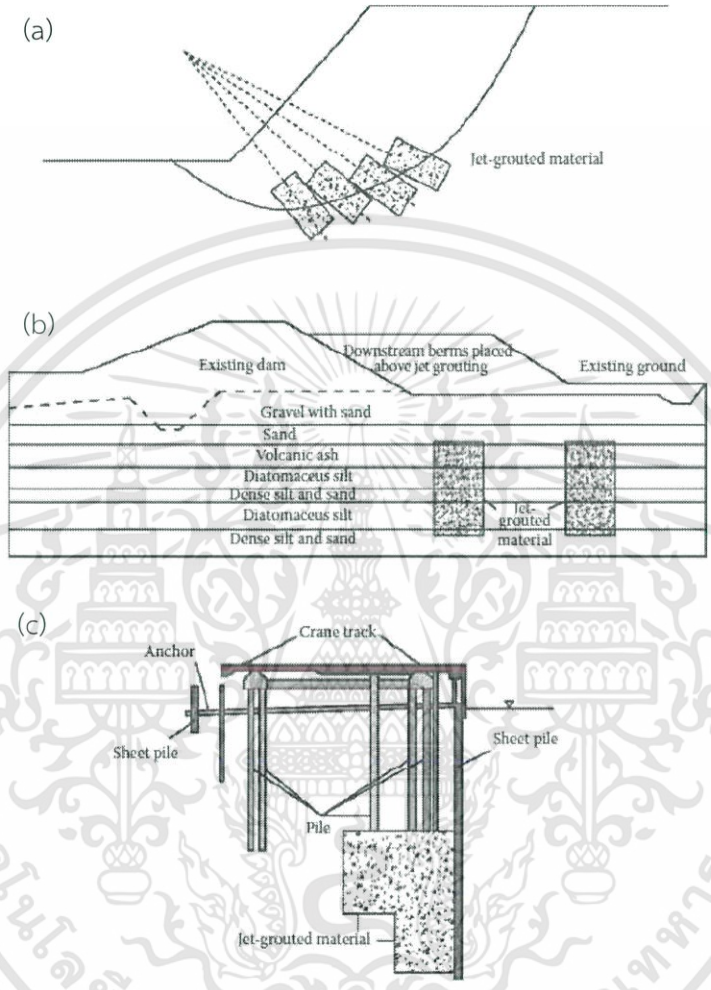
4.3.6 การใช้งานอื่นๆ

ตัวอย่างอื่นๆที่พบได้บ่อยของการใช้งานการ Jet Grouting ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ตัวอย่างเช่น การ Jet Grouting สามารถใช้สำหรับการรักษาเสถียรภาพของทางลาดชัน (Langbehn 1986; Sopeňa Maňas , 2001; Pinto, 2012) ในกรณีนี้ เสาดิน-ซีเมนต์ถูกสร้างขวางผิวที่อาจเกิดการลื่นเพื่อเพิ่มความต้านทานนที่ต้านการไถลและความมั่นคงของทางลาดชัน(รูป 4.49a)

การใช้งานที่น่าสนใจอื่นๆ เช่นการลดความอ่อนแอของดินที่เป็นน้ำที่เกิดจากแผ่นดินไหว (Andrus และChung, 1995; Durgunoğlu , 2003) ในกรณีนี้ เสาดิน-ซีเมนต์ถูกสร้างในระดับความลึกที่ดินอ่อนแอเป็นที่เป็นของเหลวเพื่อลดการความผิดปกติของดินและเพื่อปรับความดันในรูซึ่งเกิดจากแผ่นดินไหว ปรากฏการณ์ที่เกิดเป็นปกติในดินทรายที่หลวมๆซึ่งเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยการ Jet- Grouting Burkeและ Yoshida (2013) กล่าวไว้เกี่ยวกับการฟื้นฟูแผ่นดินไหวของ The Wickiup Dam (Oregon, USA) ในกรณีนี้ เสาดิน-ซีเมนต์ถูกสร้างบนตัวค้ำทางด้านซ้ายของเขื่อน ซึ่งวางบน 2 ชั้นของตะกอนเบาและเถ้าภูเขาไฟที่คลายของเหลว (รูป 4.49b) การ Jet Grouting ในกรณีนี้ ลดความเสียงโดยธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับทางเลือกการเจาะและการแทนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบัน การอัดฉีดโดยการพ่นเป็นที่นิยมในโครงสร้างในทะเล ดังตัวอย่างที่อยู่ในรูป 4.49c การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการ Jet Grouting ถูกสร้างเพื่อเสริมกำลังฐานของท่าเรือและให้การเจาะที่ก้นทะเลเป็นไปได้ง่ายขึ้น



รูป 4.49 ตัวอย่างงานประยุกต์ประเภทอื่นๆ: (a) การประยุกต์ใช้งานในการเพิ่มความมั่นคงของลาดคันดิน, (b) การลดปรากฏการณ์ทรายเหลว และ (c) เสริมกำลังฐานของท่าเรือ (Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni, 2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในชั้นดินกรุงเทพฯ เป็นหนึ่งในกระบวนขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกนำมาใช้ในโครงสร้างป้องการพังทลายของดินที่มีความชื้นสูงและมีกำลังรับน้ำหนักที่ต่ำ และการไหลเข้าของน้ำใต้ดินในระหว่างการเจาะทะลุผ่านกำแพงกันดิน (TBM Break- in และ TBM Break out) และการสร้างกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์เพื่อใช้ในการเปลี่ยนฟันหัวเจาะ (TBM Maintenance Cutter bits) ซึ่งในหน่วยงานมีนโยบายเพิ่มศักยภาพให้แก่วิศวกรให้มีความรู้ ความเข้าใจ และสามารถควบคุมการทำงานได้ดีขึ้น รวดเร็วขึ้น และแก้ไขปัญหาได้ตรงจุด จึงทำให้เกิดโครงงานสหกิจที่มีชื่อว่า “คู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม”

จากผลการวิจัยในเรื่อง คู่มือการปฏิบัติงานการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีส้ม ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินในชั้นดินกรุงเพสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting สามารแยกได้ 3 ระบบได้แก่ single fluid, double fluid และ triple fluid ซึ่งระบบจะขึ้นกับจำนวนของไหลที่ใช้ในระหว่างการเกร๊าท์ ซึ่งผลที่ได้มีความแตกต่างในเรื่องขนาดเสา กระบวนการทำงานในสภาวะต่างๆ และความสามารถในการรับกำลัง
2. ในการออกแบบจะใช้การออกแบบพลังงานสำหรับทำเสาตามขนาดที่ต้องการ ซึ่งไม่ได้ใช้ค่ากำลังมาออกแบบ
3. ในทางทฤษฎีในหนังสือ หรือบทวิจัยในต่างประเทศจะมีขั้นตอนหลักๆในการทำงานคือ การเจาะ และการเกร๊าท์ และยังมีกระบวนการที่สามารถเลือกนำมาใช้ได้ในระกว่างการเจาะและการเกร๊าท์คือ Pre-cutting ในทางปฏิบัติแล้วเป็นขั้นตอนที่จำเป็นมาก ตามหลักสากลและทฤษฎีแล้วจะทำจากล่างขึ้นบน แต่สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯไม่สามารถทำจากล่างขึ้นบนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ในการทำงานจริงจะมีค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการทำงานได้แก่ Uplift rate, Rotation speed, Water flow, Air pressure, Air flow, Grout pressure และ Grout flow
5. ค่าพารามิเตอร์บางค่าเช่น ค่าความดัน (fluid pressures), ค่าขนาดหัวฉีด (nozzle diameter) และ อัตราการไหล (flow rates) ไม่สามารถกำหนดค่าแต่ละค่าได้ตรงๆเพราะค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์กัน
6. การได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ในการทำงานจริงมาจากในขั้นตอนการทดลองภาคสนาม (Field-Trials) ซึ่งเป็นการทำเสาดิน-ซีเมนต์ต้นแบบ ซึ่งจะต้องมีการแบ่งกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์ แต่ต้องมีอย่างน้อย 1กลุ่มที่ต้องมีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบว่าสามารถทำได้หรือไม่ ทำตามทฤษฎีและหลักสากลได้หรือไม่ เมื่อได้ผลขั้นตอนการทำงานสามารถนำไปใช้กับกลุ่มอื่นๆได้ ในส่วนของกลุ่มที่ใช้ในการทดลองภาคสนามจะมีจุดประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ และพลังงานที่ใช้ในการทำเสาดิน-ซีเมนต์ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ภายใต้ความลึกที่ได้กำหนดไว้ และข้อสำคัญคือสภาพดินที่ทำการทดลองจะต้องมีสภาพที่เหมือนกับที่ทำงานจริง
7. เมื่อทำกลุ่มเสาดิน-ซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองภาคสนามเสร็จสิ้น ต้องทำการขุดเปิดหน้าดินเพื่อทราบถึงขนาดที่เกิดขึ้นจริงว่าได้หรือไม่ เพื่อได้ทราบถึงค่าพลังงานที่ออกแบบไว้ ควรนำค่าพลังงานมาบันทึกและสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานและขนาดของเสาเพื่อให้ง่ายต่อการทำงานในอนาคต
8. ขนาดเสาที่ได้จริงในกลุ่ม B และC มีขนาดใหญ่กว่าที่ออกแบบไว้ 50-70% และกลุ่มD อยู่ที่ 25-75% เนื่องจากผลจากการทำ Pre-cutting
9. ค่าพารามิเตอร์จะต้องถูกคัดเลือกอย่างละเอียดเพื่อให้มั่นใจได้ว่าเสาดิน-ซีเมนต์จะต้องมีคุณภาพเพื่อให้ผ่านและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบ (Prove test) อาทิเช่น TCR, UCS, SPT และค่าอัตราการซึม เมื่อผ่านการทดสอบทั้งหมดสามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทำเสาต้นแบบไปใช้ในการทำงานจริงได้
10. ผลจากการทดสอบหาค่า TCR มีค่าอยู่ที่ 93 - 100% ทำให้ทราบได้ว่าค่าพลังงานที่ได้จากค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบมาเพียงพอต่อความต้องการ
11. ในการทำงานจริงจะมีขั้นตอนที่สำคัญได้แก่ การเจาะ การPre-cutting และการเกร๊าท์ สำหรับการ Pre-cutting ในดินชั้นดินกรุงเทพฯจากผลการทดลองภาคสนาม จะต้องทำจากบนลงล่างซึ่งในชั้นดินเหนียวหากทำจากล่างขึ้นบนจะทำให้มี spoil ไปอุดตันช่องว่างระหว่างก้านเจาะและผนังหลุมเจาะทำให้แรงดันลมที่ให้ไปไม่มีทางออกทำให้เกิดการยกตัวของดิน และมีการรั่วไหลของ spoil รอบๆหลุมเจาะ ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้างเคียงได้ และที่สำคัญกระบวนการ Pre-cutting มีความสำคัญมากสำหรับการทำงาน ทั้งนี้ทั้งนั้นไม่ใช่เพียงแค่ให้ spoil ไหลออกมาได้อย่างอิสระ แต่เป็นการทำให้ขนาดเสามีขนาดที่ตามความสัมพันธ์กับค่า Uplift rate และสามารถได้เสาดิน-ซีเมนต์ที่สมบูรณ์ได้

12. ค่าความคาดเคลื่อนของตำแหน่งในการเจาะจากแนวแกนของหลุมเจาะนั้นโดยทางทฤษีแล้วสามารถคาดเคลื่อนจากตำแหง่สูงสุดได้ 50 มิลลิเมตร จากเส้นรอบวงภายใน
13. ค่าความเบี่ยงเบนของการขุดเจาะจากแนวแกนหลุมเจาะจากทางทฤษฎีควรเป็น 2% สำหรับระดับความลึกได้ถึง 20 เมตร
14. เมื่อมีความต้องการรักษาระดับพลังงานที่ใช้ในการเกร๊าท์ เมื่อค่าความดันในการเกร๊าท์จำเป็นที่จะต้องลดลง จะต้องทำการเปลี่ยนค่าอัตราการยกก้านเจาะ (Uplift rate) เพื่อรักษาระดับพลังงานในการเกร๊าท์
15. การจัดการ spoil รวมไปถึงถังที่ใช้รองรับและรถที่ใช้ในการขนถ่ายเพื่อนำไปกำจัดจะต้องมีการทำงานที่ต่อเนื่องตลอดการทำงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาการปฏิบัติงานกาปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งในเนื้อหาวิจัยยังไม่มีเนื้อหาในส่วนของการออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพลังงานที่ใช้ทำเสาดิน-ซีเมนต์ในสภาพชั้นดินต่างๆในชั้นดินกรุงเทพฯซึ่งจะเป็นผลดีต่อการทำงานในหน่วยงานในอนาคต รวมไปถึงการทดสอบทางด้านในการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ อาทิเช่น ค่าW/C ratio ที่แตกต่างกันไป และค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดสำหรับชั้นดินในชั้นดินกรุงเทพฯ และที่อื่นๆในประเทศไทย

และสุดท้ายนี้หากมีผู้สนใจเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี Jet Grouting ในชั้นดินกรุงเทพฯ สามารถนำผลงานวิจัยเล่มนี้ทำการพัฒนาและต่อยอดเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อบริษัท อิตา-เลียนไทย ดีเวล๊อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) หน่วยงานธุรกิจการก่อสร้างระบบขนส่งมวลชน หรือ MRT ฝ่ายงานขุดเจาะอุโมงค์ และเพื่อการศึกษาต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

วรากร ไม้เรียง และสมพงศ์โรจน์ กังสดาล. (2553). **คู่มือการก่อสร้างและแนวทางแก้ไขปัญหา การก่อสร้าง เสาเข็ม ดิน-ซีเมนต์: กรณีศึกษาในโครงการระบายฐ้าบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ**. ศูนย์วิจัย และพัฒนาวิศวกรรม ปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

BSI British standards – BS EN 12716-2001. (2001). **Execution of special geotechnical works —Jet grouting**.

Paolo Croce, Alessandro Flora and Giuseppe Modoni. (2014). **Jet Grouting Technology, Design and Control**. New York: Taylor & Francis Group.

P.LUNARDI. (1997). Ground improvement by means of jet-grouting. In University of Parmar. **Ground Improvement**. (P 65-85). Milan: Thomas Telford services Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายกฤษฎา เทพบุตร

วัน เดือน ปีเกิด 29 พฤศจิกายน พ.ศ.2539

ที่อยู่ บ้านเลขที่ 64 หมู่1 ซอยศาลเจ้ากวนอู ถนนเจ้าฟ้า ตำบลฉลอง อำเภอเมืองภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต 83130

ประวัติกาศึกษา จบการศึกษาประถมทั้งต้นและปลายที่ โรงเรียนเทศบาลเมือง

จบการศึกษามัธยมต้นและปลายที่ โรงเรียนภูเก็ตวิทยาลัย

ปัจจุบันเป็นนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ชั้นปีที่4 สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติกิจกรรมและความรับผิดชอบที่ร่วมทำกับทางสถาบัน

เข้าร่วมชมรมฟุตบอลพระจอมเกล้าลาดกระบังเคยดำรงตำแหน่งคณะกรรมการบริหาร ชมรม ฟุตบอลพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีการศึกษา 2560 ถึง 2561

ประวัติการฝึกงานและการทำงาน

นักศึกษาฝึกงานกับ บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล็อปเม้นท์ จำกัด (มหาชน) หน่วยงานโครงการสร้างอาคารรองรับผู้โดยสารที่สนามบินสุวรรณภูมิเฟส 2

นักศึกษาฝึกงานกับ บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล็อปเม้นท์ จำกัด (มหาชน) หน่วยงานโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีส้ม ฝ่ายงานขุดเจาะอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้