



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง คุณสมบัติดินที่มีผลต่อการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์: กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ

Soil Properties Effect on Construction of Soil-Cement Column: Case Study on Drainage System Suvarnabhumi International Airport Project

نامผู้วิจัย นายสมพงศ์ ไรจน์กั้งสาดล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิสักดิ์ ศรีลัมพ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สุธาริน สถาปิตานนท์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

คุณสมบัติดินที่มีผลต่อการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์: กรณีศึกษา
ในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ

Soil Properties Effect on Construction of Soil-Cement Column: Case Study on
Drainage System Suvarnabhumi International Airport Project

โดย

นายสมพงษ์ ไรจน์กั้งสดาล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2552

สมพงศ์ โรจน์กังสดาล 2552: คุณสมบัติดินที่มีผลต่อการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์:
กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D. 141 หน้า

โครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ มีส่วนของคันคลองที่เป็นงานปรับปรุง
คุณภาพดินฐานรากโดยใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์จำนวน 246,300 ต้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงบริเวณ
ลาดคันคลองและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของชั้นฐานรากถนน ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลผลการ
ทดสอบจำนวนมาก จึงต้องมีการเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ เพื่อให้การเข้าถึงข้อมูล การแปรผลใน
ข้อมูล และการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ซึ่งการวิจัย
ครั้งนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะสภาพชั้นดิน ความสัมพันธ์เชิงสถิติของคุณสมบัติดิน และ
เปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างจากผลการทดสอบของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ซึ่งได้ผลการวิจัยดังนี้

ผลการจำแนกชั้นดินโดยอาศัยคุณสมบัติของดินและคุณลักษณะทางกำลังรับแรงเฉือน
แบบไม่ระบายน้ำ เรียงลำดับจากผิวดินได้ดังนี้คือ ชั้นดินเหนียวอ่อน อยู่ในช่วงระดับ 0.00 -15.00
เมตร (ร.ท.ก.) ถัดไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ช่วงระดับ 15.00 -20.00 เมตร (ร.ท.ก.) และชั้นทราย
ปนดินเหนียว อยู่เหนือชั้นทรายชั้นแรก ในช่วงระดับ 20.00 เมตร (ร.ท.ก.) เมื่อวิเคราะห์ถึงความ
แข็งแรงของชั้นดินจากกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกของ
ชั้นดินนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ Soil Strength Line Pattern “C” (SSL“C”) เป็นกราฟที่มี
ไม่มีชั้น Weathered Crust และ Soil Strength Line Pattern “CC” (SSL“CC”) เป็นกราฟที่มี
ชั้น Weathered Crust ซึ่งดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ เป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง
ซึ่งมีค่าเฉลี่ยดัชนีสภาพพลาสติก (PI) เท่ากับ 55% ทำให้มีค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ
(W_n) ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยพิกัดเหลว (LL) เท่ากับ 83% และ 93% ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยกำลัง
รับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบ Unconfined Compression Test (S_{uc}) เท่ากับ 1.18 ตันต่อตาราง
เมตร ส่วนการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ พบว่า
วิธี High Pressure Mechanical Mixing และ Low pressure Mechanical Mixing มีคุณสมบัติ
ใกล้เคียงกันทางด้านกำลังที่ดีและมีแรงยึดหยุ่น ส่วนวิธี Modified Dry Mixing และ Jet Grouting
มีคุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูงซึ่งเนื้อวัสดุมีความแข็งแรงแต่เปราะ

Sompong Rojkansadarn 2009: Soil Properties Effect on Construction of Soil-Cement Column: Case Study on Drainage System Suvarnabhumi International Airport Project. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Warakorn Mairaing, Ph.D. 141 pages.

The signification of soil improvement on foundation of the road embankment is considerably important and acting as one major part of the drainage system of Suvarnabhumi International Airport. The construction of 246,300 soil-cement columns has strengthened soil body and much more able to support the heavy traffic load on the road embankment, since they have been constructed parallel to the main drainage canal. The test performance of soil-cement and the data collection have been treated and interpreted efficiently. By using the Geographic Information System (GIS), this research evidently presents the soil profile characteristic and statistical relationship among the soil properties. Finally the key procedure is zoning area of soil layer and has compared the construction method of soil-cement column from the whole test performance.

From the research result, Bangkok Clay can be divided into different layers according to the soil properties and strength characteristics. Upper layers from 0.00 to 15.00 meters (M.S.L.), the next consisting of stiff clay from 15.00 to 20.00 meters (M.S.L.) and layers of clayey sand above the layer of first sand which is located at the depth of 20.00 meters (M.S.L.). The analysis of soil strength versus depth characteristic within the multi layer soil stratum was then interpreted and classified into two typical patterns. The first is called soil strength line pattern "C" (SSL"C") and the second is called soil strength line pattern "CC" (SSL"CC"). Soft Clay in considerable project area is high plasticity clay with has the mean of Plasticity Index (PI) about 55%, and the mean of natural water content (W_n) is very close to the Liquid Limit (LL) that is between 83% and 93%. The mean of Undrained Shear Strength from Unconfined Compression Test (S_{uc}) is 1.18 t/m^2 . Also when compare the physical properties and engineering properties of soil-cement column, it shows that the High Pressure Mechanical Mixing Method and Low pressure Mechanical Mixing represent the properties nearly equal in strength and elasticity. A part of Modified Dry Mixing Method and Jet Grouting Method represent the properties of high strength and consider a hard material but more brittle.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณประธานกรรมการที่ปรึกษา รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานและแก้ไขปัญหาในการทำวิจัย พร้อมทั้งคอยให้กำลังใจดูแลเอาใจใส่ด้วยดีมาตลอด รวมถึงประธานกรรมการสอบ รศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร กรรมการร่วม 2 ท่าน คือ ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ รศ.ดร.สุธาริน สถาปัตตานนท์ และผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย รศ.จิรพัฒน์ โชติไกร ในการให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นในการปรับปรุงแก้ไข จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ โครงการระบายนํ้าบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลเพื่อการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ สนับสนุน อำนวยความสะดวก และเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับดำเนินการวิจัยด้วยดีตลอดมา

ที่สำคัญที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา คุณโกศล โรจน์กั้งสดาล และมารดา คุณกาญจนา โรจน์กั้งสดาล ที่ให้ความสนับสนุน ดูแล เป็นห่วงเป็นใย และเป็นกำลังใจเสมอมา จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่พึงได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอบอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

สมพงศ์ โรจน์กั้งสดาล

มกราคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	52
อุปกรณ์	52
วิธีการ	52
ผลการวิเคราะห์	61
สรุปและข้อเสนอแนะ	105
สรุป	105
ข้อเสนอแนะ	107
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	109
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์	115
ภาคผนวก ข การสร้างข้อมูลด้วยโปรแกรม ArcView GIS Version 3.1	130
ภาคผนวก ค วิธีการใช้กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือน ของดินและความลึก	136
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	141

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สรุปคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวกรุงเทพฯ	29
2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay Layer)	31
3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Stiff Clay Layer)	32
4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวแข็ง (Very Stiff Clay Layer)	32
5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Poisson's Ratio สำหรับดินเหนียวชนิดต่างๆ	33
6	สรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ	34
7	ตัวอย่างแผนการทดสอบปริมาณตัวอย่างที่จะทำการผสมทดลอง	42
8	ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติดินที่จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยวิธีเสาเข็มดิน-ซีเมนต์	44
9	ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางที่ออกแบบตามลักษณะของดิน	46
10	ค่า Unconfined Compressive Strength ที่ออกแบบตามลักษณะของดิน	46
11	จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย	53
12	จำนวนข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินของการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์	56
13	สรุปความสัมพันธ์ของข้อมูลทางสถิติทั้ง 2 โครงการ	68
14	ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ในช่วงความลึก 1.00-3.00 เมตรโดยประมาณ	73
15	ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ในช่วงความลึก 3.00-14.00 เมตรโดยประมาณ	75
16	ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	สรุปความสัมพันธ์ต่างๆ ของดินเหนียวอ่อนที่วิเคราะห์ได้จากการวิจัยครั้งนี้	88
18	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ต่างๆ ของดินเหนียวอ่อนที่วิเคราะห์ได้จากการวิจัยครั้งนี้กับผลการวิจัยอื่น	88
19	การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แต่ละวิธีด้วยค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์	90
20	การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แต่ละวิธีด้วยค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ	92
21	การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แต่ละวิธีด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น	93
22	การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แต่ละวิธีด้วยค่า Strain ที่กำลังแรงต้านทานสูงสุด	94
23	สรุปความสัมพันธ์ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่วิเคราะห์ได้จากการวิจัยครั้งนี้	101
24	สรุปการเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)	102
25	สรุปการเปรียบเทียบค่าดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index)	103

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงทิศทางการไหลของน้ำที่ไหลจากตอนบนลงสู่ทะเล	4
2	การแบ่งสัญญาของงานก่อสร้างโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ	6
3	คลองระบายน้ำ	7
4	สถานีสูบน้ำ	8
5	ภาพตัดชั้นดินตะกอนของพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง	10
6	แผนที่เขตจังหวัดและเขตดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	11
7	วิธีการทำงานของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์	17
8	แสดง Contour ความลึกของชั้น Dense Sand	19
9	แสดงภาพการกระจายของดินใน Mexico City	20
10	แสดง Soil Profile ที่ได้จากวิธี Cluster Analysis	21
11	แสดงค่า Correlation Factor (μ)	26
12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและความลึกของชั้นดินเหนียว กรุงเทพฯ	30
13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกของ ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ	30
14	การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	40
15	แผนผังกระบวนการทดสอบหาสัดส่วนปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ	41
16	ผลกระทบที่เกิดจากการเก็บตัวอย่าง	49
17	การทดสอบดึง-ถอนเสาเข็มดิน-ซีเมนต์	50
18	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	54
19	ตำแหน่งข้อมูลดินที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้	55
20	แสดงตำแหน่งของหลุมเจาะที่ได้บันทึกลงในระบบฐานข้อมูลโครงการ ระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ	62
21	แสดงหลุมเจาะสำรวจชั้นดินรวมถึงผลการทดสอบที่ได้จากภาคสนาม และจากการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ของโครงการฯ ส่วนที่ 1 – 3	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	แสดงรายละเอียดข้อมูลหลุมเจาะ แบบข้อมูลทั่วไป	64
23	แสดงรายละเอียดข้อมูลหลุมเจาะ แบบข้อมูลทางวิศวกรรม	65
24	ตัวอย่างแสดงผังเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์	66
25	รูปตัดของชั้นดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการระบายน้ำ บริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ	68
26	กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก เรียกว่า Soil Strength Line	70
27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก จากข้อมูลผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนามที่ปรับแก้ค่า Vane Shear Strength	70
28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก ที่ปรับความลาดเอียงและความลึกของชั้นดิน	71
29	กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก ตาม Pattern “C” (SSL “C”)	71
30	กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกที่พิจารณา ดินแข็งเปลือกบนร่วมด้วย (SSL “CC”)	72
31	(a). กราฟการแจกแจงแบบปกติมาตรฐานของ W_n (b). กราฟการแจกแจง แบบปกติมาตรฐานของ LL	74
32	กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้นตามธรรมชาติระหว่าง ผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	75
33	กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพิกัดเหลวระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	76
34	กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพิกัดพลาสติกระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	77
35	กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดัชนีสภาพพลาสติกระหว่างผลจากการวิจัย ครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของหน่วยน้ำหนักรวมระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	79
37	กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ UC-Test ระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	79
38	กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ FV-Test ระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	80
39	กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความไวดัของดิน ระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	81
40	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index กับ Liquid Limit ที่ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น	83
41	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index กับ Natural Water Content ที่ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น	84
42	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Recompression Index กับ Liquid Limit ที่ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น	85
43	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Void Ratio กับ Natural Water Content ที่ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น	86
44	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Void Ratio กับ Liquid Limit ที่ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น	87
45	ค่า Natural Water Content, (%) ของดินเดิม	95
46	ค่า Natural Water Content, (%) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยวิธี LP, JG, MDM และ HP	96
47	ค่า Undrained Shear Strength, (t/m ²) ของดินเดิม	97
48	ค่า Undrained Shear Strength, (t/m ²) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยวิธี LP, JG, MDM และ HP	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
49	ค่า Modulus of Elasticity, (t/m^2) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยวิธี LP, JG, MDM และ HP	99
50	ค่า Strain at Failure, (t/m^2) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยวิธี LP, JG, MDM และ HP	100
ภาพผนวกที่		
ก1	แสดงลักษณะการจัดวางอุปกรณ์วิธี Low Pressure Mechanical Pressure ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์	116
ก2	ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องเจาะ โดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure	117
ก3	ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดแผ่นผสมน้ำปูน โดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure	118
ก4	สรุปแผนการทำงานและการปรับเทียบเครื่องมือ โดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure เพื่อก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์	119
ก5	ภาพตัดขวางแสดงการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure	120
ก6	แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure	120
ก7	แสดงผลการบันทึกข้อมูลด้วยระบบคอมพิวเตอร์	122
ก8	แสดงลักษณะการจัดวางอุปกรณ์วิธี Jet Grouting ที่ใช้ในการก่อสร้าง เสาเข็มดิน-ซีเมนต์	123
ก9	ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือวิธี Jet Grouting	124
ก10	แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Jet Grouting	125
ก11	ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือวิธี Modified Dry Mixing	126
ก12	แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์วิธี Modified Dry Mixing	127

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก13	ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือวิธี High Pressure Mechanical Mixing	128
ข1	การเข้าสู่โปรแกรม ArcView	131
ข2	หน้าต่างหลักของโปรแกรม	132
ข3	ข้อมูลตารางที่ถูกนำมาเปิดด้วยโปรแกรม ArcView	132
ข4	หน้าต่าง Field ที่จะใช้ทำการ Generate	133
ข5	ข้อมูลที่ถูก Generate เป็นตำแหน่ง	134
ข6	หน้าต่างตอบรับการนำข้อมูลมาแสดง	134
ข7	หน้าต่าง Layer ที่ถูกสร้างให้เป็น Format ของโปรแกรม	135
ค1	แสดงค่า Correlation Factor (μ)	137
ค2	กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึก ตัวอย่างที่ 1	138
ค3	กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึก ตัวอย่างที่ 2	139
ค4	กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึก ตัวอย่างที่ 3	140

คุณสมบัติดินที่มีผลต่อการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์: กรณีศึกษา ในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ

Soil Properties Effect on Construction of Soil-Cement Column: Case Study on Drainage System Suvarnabhumi International Airport Project

คำนำ

โครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ เป็นเป้าหมายสำคัญที่เกี่ยวกับระบบการบริหารจัดการการระบายน้ำและบรรเทาอุทกภัย ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างฝั่งตะวันออก ในเขตอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการและพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งมีสภาพพื้นที่เป็นที่ลุ่มแอ่งกระทะ และเป็นทางผ่านของน้ำที่ไหลจากตอนบนลงสู่ทะเล จึงทำให้มีน้ำท่วมขังอยู่เสมอในช่วงฤดูฝน อันเป็นปัญหาอุปสรรคที่จะส่งผลกระทบต่อสนามบินสุวรรณภูมิและพื้นที่ใกล้เคียง จึงจำเป็นต้องดำเนินการศึกษาและออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหาการระบายน้ำและจัดการน้ำหลากเป็นพื้นที่เร่งด่วน

การดำเนินการก่อสร้างโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ประกอบด้วย ส่วนการก่อสร้าง 3 ส่วน ซึ่งเป็นงานขุดคลองระบายน้ำรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาดท้องคลองกว้าง 48 เมตร ความลึกของน้ำในคลอง 3.36 เมตร รวมความยาวประมาณ 12.65 กิโลเมตร มีอัตราสูบน้ำ สูงสุด 100 ลูกบาศก์เมตร/วินาที และเนื่องจากโครงการนี้เป็นงานในชั้นดินอ่อนมาก จึงมีการปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากโดยใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงบริเวณลาดคันคลองและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของชั้นฐานรากถนน โดยใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6 เมตร ลึกประมาณ 8-15 เมตร รวมเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมด 246,300 ต้น

การปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากโดยใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ในโครงการนี้มีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมด 4 วิธี คือ Low Pressure Mechanical Mixing, Jet Grouting, Modified Dry Mixing, High Pressure Mechanical Mixing การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในโครงการนี้มีความหลากหลายจึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการวิจัยโดยการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องเชื่อมต่อกับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ เพื่อใช้หาความสัมพันธ์ต่างๆ และวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะรวมถึงผลการทดสอบที่ได้จากภาคสนามและห้องปฏิบัติการในระหว่างการก่อสร้างโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์
2. ศึกษาสหสัมพันธ์ (Correlate) ต่างๆ ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมเชิงสถิติของคุณสมบัติดินของชั้นดินธรรมชาติจากข้อมูลโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ
3. ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จากผลการทดสอบในระหว่างการก่อสร้างโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ

ขอบเขตการวิจัย

1. ชั้นดินที่ทำการศึกษาและวิจัยอยู่ในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ตั้งอยู่ในเขตตำบลบางปลา อำเภอบางพลี และตำบลบางปู อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ
2. การรวบรวมข้อมูลจากหลุมเจาะของโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิและโครงการข้างเคียง รวมทั้งข้อมูลผลการทดสอบที่ได้จากภาคสนาม และรายละเอียดของตัวแปรการทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างจริง โดยใช้ระบบ GIS
3. การวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการจัดเก็บข้อมูล ควบคู่กับโปรแกรม ArcView GIS Version 3.1 เพื่อจัดสร้างระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์
4. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในแต่ละวิธีดังนี้

- Low Pressure Mechanical Mixing: កម្រិត.0+000 ទៅ កម្រិត.10+000
- Jet Grouting: កម្រិត.5+000 ទៅ កម្រិត.10+000
- Modified Dry Mixing: កម្រិត.5+000 ទៅ កម្រិត.10+000
- High Pressure Mechanical Mixing: កម្រិត.10+000 ទៅ កម្រិត.12+650

การตรวจเอกสาร

ลักษณะโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ

ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิถูกจัดให้เป็นเป้าหมายที่สำคัญของรัฐบาลและประชาชนชาวไทย ที่ต้องการให้เป็นศูนย์กลางการบินนานาชาติของเอเชียอาคเนย์จึงต้องมีการเตรียมการจัดการระบบต่างๆ ที่มารองรับการดำเนินการให้สมบูรณ์ ซึ่งหนึ่งในปัจจัยสำคัญ คือ ระบบการบริหารจัดการระบายน้ำ เนื่องจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างฝั่งตะวันออก ในเขตอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งมีสภาพพื้นที่เป็นที่ลุ่มแอ่งกระทะ และเป็นทางผ่านของน้ำที่ไหลจากตอนบนลงสู่ทะเลดังภาพที่ 1 จึงทำให้น้ำท่วมขังอยู่เสมอในช่วงฤดูฝน อันเป็นปัญหาอุปสรรคที่สำคัญของสนามบินสุวรรณภูมิ และเพื่อมิให้การสร้างสนามบินสุวรรณภูมิสร้างผลกระทบต่อสาธารณชน จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องดำเนินการบริหารจัดการน้ำเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างเร่งด่วน



ภาพที่ 1 แสดงทิศทางผ่านของน้ำที่ไหลจากตอนบนลงสู่ทะเล

กรมชลประทานเป็นหน่วยงานสำคัญที่มีพันธกิจในการดำเนินการบรรเทาภัยทางน้ำ โดยการป้องกันและแก้ไขความเสียหายอันเกิดจากน้ำ และเป็นหน่วยงานหลักที่รับผิดชอบการดำเนินการบริหารจัดการน้ำท่วมในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างฝั่งตะวันออก ซึ่งได้ดำเนินการแก้ไขปัญหการระบายน้ำและบรรเทาอุทกภัยตามแนวพระราชดำริอย่างต่อเนื่องเสมอมา และเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน 2546

กรมชลประทานได้ทำการว่าจ้างสถาบันที่ปรึกษา ประกอบด้วย สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ดำเนินงานศึกษาสำรวจและออกแบบระดับ Tender Design โครงการศึกษาทบทวนโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ โดยเน้นที่จะแก้ไขปัญหาการระบายน้ำและการจัดการน้ำหลากในพื้นที่บริเวณโดยรอบสนามบิน เป็นพื้นที่เร่งด่วน

จากผลการศึกษาจำเป็นต้องดำเนินการมาตรการเร่งด่วนเพื่อแก้ไขปัญหาที่ท่วมในพื้นที่ โดยการก่อสร้างคลองระบายน้ำสายใหม่ เพื่อเร่งระบายน้ำหลากบริเวณเหนือคลองสำโรงไปยังชายทะเล และสูบน้ำออกสู่ทะเลโดยตรง โดยมีอัตราสูบน้ำสูงสุด 100 ลูกบาศก์เมตร/วินาที พร้อมทั้งติดตั้งระบบโทรมาตรอุทกวิทยา เพื่อติดตามสถานการณ์น้ำหลากและการทำงานของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งจะช่วยให้มีประสิทธิภาพในการช่วยตัดสินใจในการบริหารจัดการน้ำหลาก

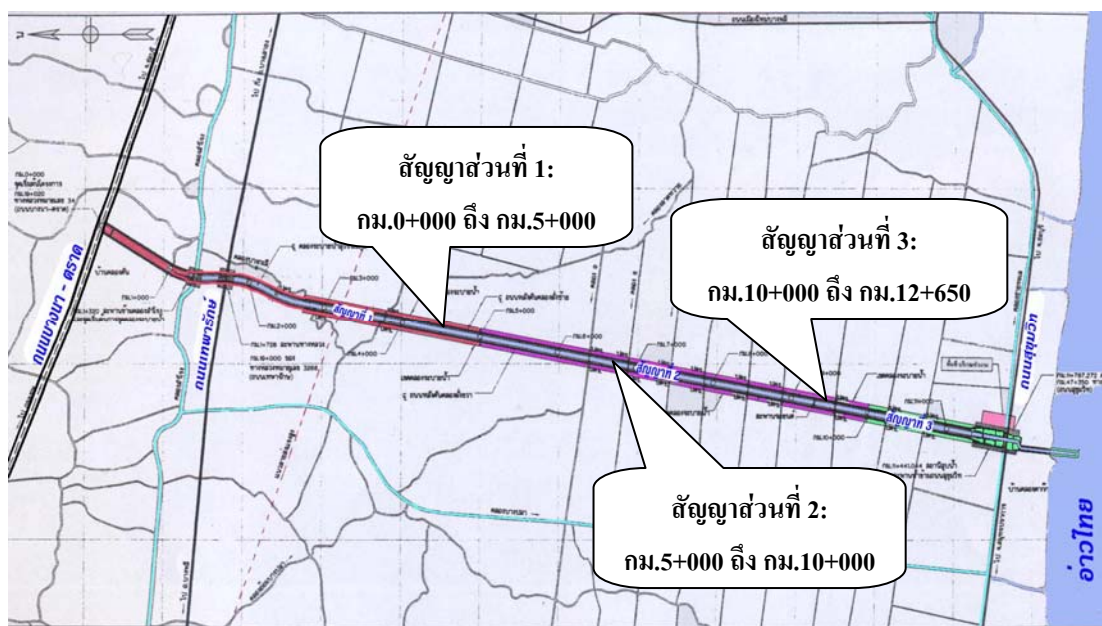
เนื่องจากสนามบินสุวรรณภูมิจะก่อสร้างแล้วเสร็จ และมีกำหนดที่จะเปิดดำเนินการในปี พ.ศ. 2549 ดังนั้นปัญหาด้านการระบายน้ำและน้ำท่วมบริเวณพื้นที่โดยรอบสนามบินจะต้องดำเนินการแก้ไขและบรรเทาโดยรีบด่วน รวมถึงปัญหาการจราจรบริเวณพื้นที่ด้านใต้ของสนามบินด้วย กรมชลประทานจึงได้ดำเนินการที่จะว่าจ้างการก่อสร้างโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ โดยแบ่งงานก่อสร้างออกเป็น 3 ส่วน ดังภาพที่ 2 ได้แก่

ส่วนที่ 1: คลองระบายน้ำและถนน พร้อมอาคารประกอบระหว่าง กม.0+000 ถึง กม.5+000

ส่วนที่ 2: คลองระบายน้ำและถนน พร้อมอาคารประกอบระหว่าง กม.5+000 ถึง กม.10+000

ส่วนที่ 3: คลองระบายน้ำ สถานีสูบน้ำ สะพานน้ำยกระดับ พร้อมอาคารประกอบระหว่าง กม.10+000 ถึง กม.12+650

ในการดำเนินการก่อสร้างโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ แบ่งเป็น 3 สัญญา โดยที่ปรึกษาควบคุมงานก่อสร้างจะดำเนินงานควบคุมการก่อสร้างเองทั้งหมด และจะต้องดำเนินงานต่างๆ เพื่อให้งานก่อสร้างของโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิให้สำเร็จ ลุล่วงตามวัตถุประสงค์ของกรมชลประทาน

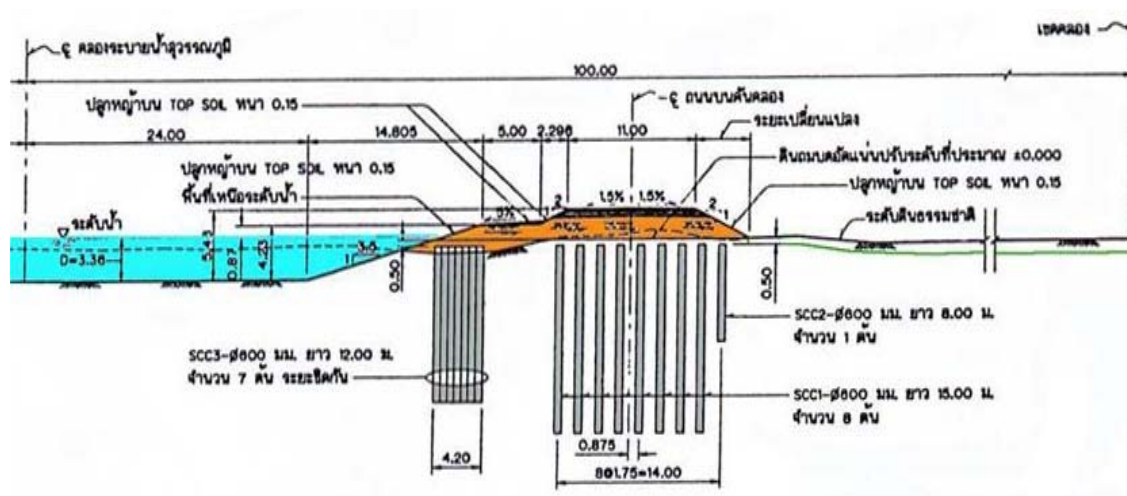


ภาพที่ 2 การแบ่งสัญญาของงานก่อสร้างโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ

โครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ตั้งอยู่ในเขตตำบลบางปลา อำเภอบางพลี และตำบลบางปู อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ โดยมีต้นคลองอยู่ที่คลองสำโรง วางแนวในทิศทางเหนือ-ใต้ ผ่านถนนเทพารักษ์ ไปถึงบริเวณใกล้กับคลองชายทะเล จะมีสถานีสูบน้ำเพื่อสูบน้ำขึ้นสะพานน้ำ ลอยข้ามคลองชายทะเลและถนนสุขุมวิท และระบายด้วยแรงโน้มถ่วงลงสู่ทะเล ตามแนวคลองมีถนนขนาด 2 ช่องจราจรทั้งสองด้านเชื่อมต่อถนนสุขุมวิท ถนนเทพารักษ์ และต่อเลยไปถึงถนนบางนา-ตราด อย่างไรก็ดีได้กันเขตคลองไว้ 200 เมตร เพื่อขยายถนนเป็น 4 ช่องจราจรได้ในอนาคต

องค์ประกอบของโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ประกอบด้วยคลองระบายน้ำสายใหม่ (คลองสำโรง-ชายทะเล) พร้อมถนนบนคันคลอง และระบบโทรมาตรเพื่อติดตามสภาพน้ำหลากและการทำงานของเครื่องสูบน้ำและระบบควบคุมระยะไกล โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. คลองระบายน้ำเป็นคลองดินรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาดท้องคลองกว้าง 48 เมตร ความลึกของน้ำในคลอง 3.36 เมตร อัตราการไหลของน้ำสูงสุด 100 ลูกบาศก์เมตร/วินาที ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 คลองระบายน้ำ

2. ถนนบนคันคลองขนาด 11.0 เมตร ทั้งสองด้าน เชื่อมจากถนนสุขุมวิทไปจนถึงถนนบางนา-ตราด จำนวน 2 ช่องจราจร ใหญ่ทาง 2 ข้าง กว้างข้างละ 2.0 เมตร

3. อาคารสะพานน้ำยกระดับและอาคารทิ้งน้ำ เป็นอาคารรับน้ำจากสถานีสูบน้ำโดยการยกระดับให้ไหลไปตามสะพานน้ำ ด้วยอัตราการไหล 100 ลูกบาศก์เมตร/วินาที ลอยข้ามคลองชายทะเลและถนนสุขุมวิทไปทิ้งชายทะเล โดยโครงสร้างของอาคารยกระดับเป็น ค.ส.ล. รูปตัดด้วยท้องคลองกว้าง 25.00 เมตร กำแพงด้านข้างสูง 3.15 เมตร ยกสูงจากถนนสุขุมวิทอย่างน้อย 5.0 เมตร

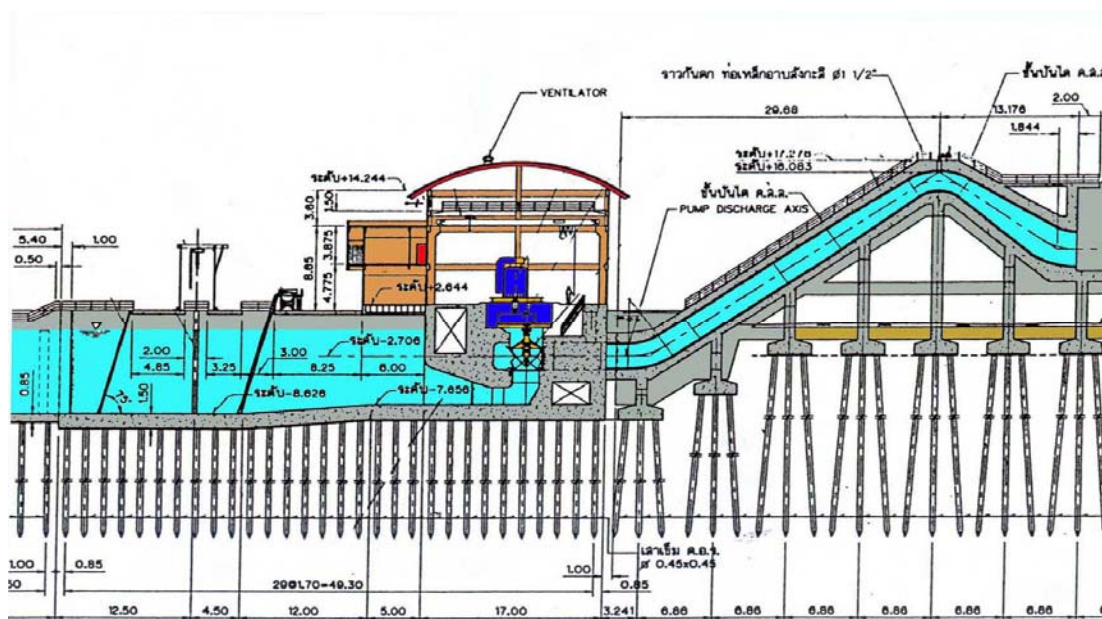
4. สะพานรถยนต์ ประกอบด้วย สะพานทางหลวง (ถนนเทพารักษ์), สะพานรถยนต์คลองระบายน้ำสายใหม่ (กม. 9+300), สะพานข้ามคลองชายทะเล และสะพานข้ามคลองลำโรง

5. อาคารรับน้ำคลองลำโรงเป็นอาคารเชื่อมทางน้ำจากคลองลำโรงไหลเข้าคลองระบายน้ำสายใหม่

6. อาคารประตูประบายน้ำด้านข้างคลองระบายน้ำ จำนวน 22 แห่ง (ข้างละ 11 แห่ง)

7. สถานีสูบน้ำและเครื่องสูบน้ำพร้อมอาคารประกอบ ดังภาพที่ 4

8. องค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ท่อลอดถนน ทางเชื่อม ท่อส่งน้ำเข้านา ที่ทำการ และระบบสาธารณูปโภค



ภาพที่ 4 สถานีสูบน้ำ

สภาพภูมิประเทศบริเวณแนวคลองระบายน้ำสายใหม่ ตั้งแต่คลองสำโรงไปจนจรดชายทะเลเป็นพื้นที่ลุ่มต่ำ ซึ่งเกิดจากการทับถมของตะกอนดินจากการพัดพาของแม่น้ำ มีความลาดเทจากทิศเหนือลงมาทางด้านทิศใต้ พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่บ่อปลา มีระดับความสูงจากพื้นดินเฉลี่ยประมาณ +0.50 เมตร (รทก.) ขึ้นไปจนถึง +0.90 เมตร (รทก.) มีคลองและทางระบายน้ำขนาดเล็กเชื่อมต่อกันระหว่างคลองในแนวทิศตะวันออกกับทิศตะวันตก ได้แก่ คลองหนึ่งถึงคลองเก้า คลองอ้อมบางปลา เป็นต้น บริเวณตอนล่างของพื้นที่ติดกับอ่าวไทยเป็นพื้นที่ที่มีน้ำทะเลท่วมถึง และดินมีความเค็มในช่วงฤดูแล้ง

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

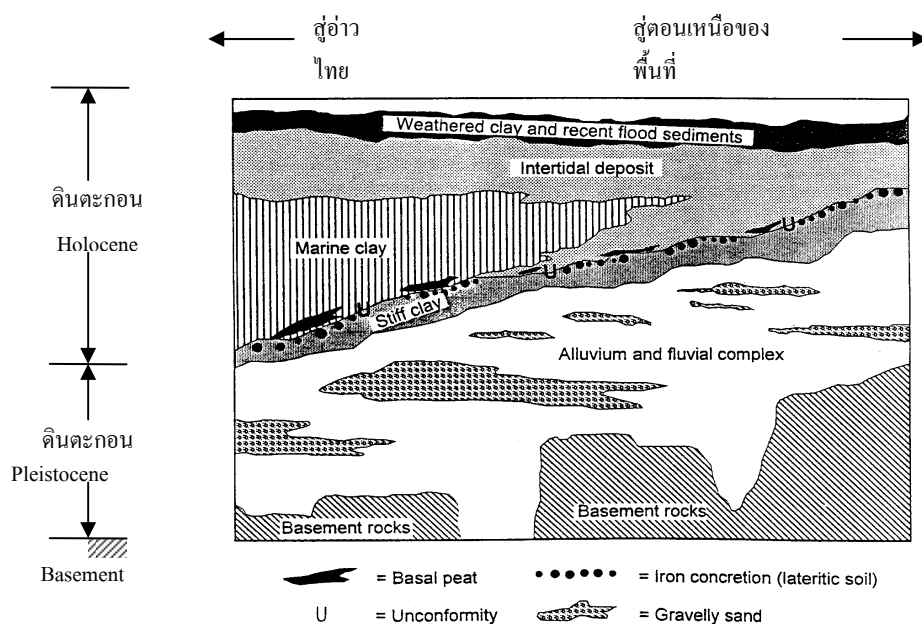
การเกิดชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

จากข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างพบว่า การกำเนิดชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จะอยู่ในการสะสมตัวของตะกอนในช่วงของ Late Quaternary Period ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (วิชาญ, 2545)

การสะสมของตะกอนในช่วง Late Quaternary Period เป็นการสะสมของตะกอนส่วนใหญ่เป็นตะกอนของดินเนื่องจากอิทธิพลของธารน้ำ ที่นำดินตะกอนจากตอนเหนือของประเทศมาตกตอนกลางของแอ่ง โดยมีดินตะกอนจากภูเขาที่โอบอยู่สองด้านของพื้นที่ ตกสะสมตัวอยู่บริเวณขอบของแอ่ง ทำให้ตอนปลายของช่วง Late Quaternary Period มีชั้นดินที่สำคัญเกิดขึ้น คือ ชั้นดินในช่วง Late Pleistocene Epoch และชั้นดินในช่วง Holocene Epoch

ชั้นดินในช่วง Late Pleistocene Epoch มีการตกตะกอนของดินทรายเป็นส่วนใหญ่โดยมีดินเหนียวและกรวดแทรกอยู่ด้วย ตะกอนเหล่านี้มีลักษณะเฉพาะตัวชัดเจน ตอนบนสุดของดินตะกอนชุดนี้เป็นชั้นดิน Stiff Clay พบแร่เหล็กและแมงกานีสเป็นจุดสีเหลืองและสีแดงเคลือบปิดทับอยู่บริเวณผิวบน หลักฐานทางธรณีวิทยาระบุว่าชั้นดินนี้เป็นดินตะกอนประเภท Fluvium ซึ่งตกอยู่บนที่ราบน้ำท่วมถึงเป็นส่วนใหญ่ และมี Alluvial Fan และ Terrace เกิดอยู่บริเวณขอบของพื้นที่นี้ ดังภาพที่ 5

สำหรับชั้นดินในช่วง Holocene Epoch ผลจากการละลายตัวของภูเขาน้ำแข็งในช่วง 5,000-20,000 ปีที่ผ่านมา ทำให้อัตราการละลายสูงชัน พร้อมกับที่มีการยกตัวของเปลือกโลกทำให้พื้นดินมีความสูงต่ำ เหมาะที่จะเป็นแหล่งสะสมตะกอนดิน ประกอบกับช่วงตั้งแต่ตอนต้นของ Holocene Epoch ได้เกิดการแกว่งตัวขึ้นลงของระดับน้ำทะเลอย่างรวดเร็วติดต่อกันอยู่ช่วงระยะเวลาหนึ่งทำให้เกิดการตกตะกอนของดินเหนียวตามชายฝั่งทะเลโดยทั่วไป ในช่วงระยะเวลานี้ คาดว่าชั้นดินเหนียวอ่อนสำคัญๆ ของโลกได้กำเนิดขึ้น ซึ่งรวมถึงชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำ (Soft Deltaic Clay) แห่งลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างแห่งนี้ด้วย

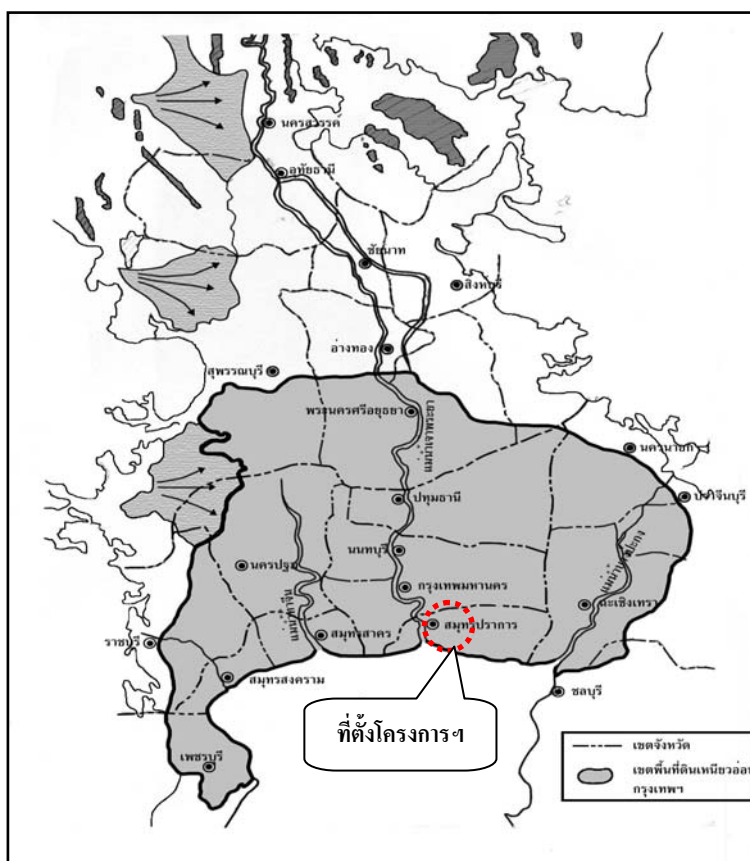


ภาพที่ 5 ภาพตัดชั้นดินตะกอนของพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง

ที่มา: คัดแปลงจาก สีน (2543) อ้างโดย วิชาญ (2545)

ลักษณะทั่วไปของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เป็นดินตะกอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำที่เกิดใน Holocene epoch ที่ได้รับอิทธิพลจากแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำท่าจีนเป็นส่วนใหญ่ มีแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำบางปะกงเสริมอยู่ทางทิศตะวันตกและตะวันออกตามลำดับ ดินตะกอนพื้นนี้ปกคลุมเต็มพื้นที่และบางส่วนของ 14 จังหวัด ดังภาพที่ 6 (ราชบุรี สมุทรสาคร สมุทรสงคราม กรุงเทพฯ สมุทรปราการ ชลบุรี นครปฐม นนทบุรี ปทุมธานี ฉะเชิงเทรา สุพรรณบุรี พระนครศรีอยุธยา นครนายก และปราจีนบุรี) รวมพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 14,000 ตารางกิโลเมตร วัดความกว้างบริเวณปากอ่าวไทย (จากราชบุรีไปชลบุรี) ได้ระยะทางประมาณ 140 กิโลเมตร และวัดขึ้นไปทางเหนือสิ้นสุดที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ได้ระยะทางประมาณ 100 กิโลเมตร



ภาพที่ 6 แผนที่เขตจังหวัดและเขตดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ที่มา: วิชาญ (2545)

Moh *et al.* (1969) เป็นผู้ขนานนามเฉพาะชั้นดินส่วนที่เป็นดินเหนียวอ่อนที่วางตัวอยู่ตอนบนสุดของดินตะกอนในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างว่า “Bangkok Clay” รูปลักษณะของชั้นดินนี้ตามที่แสดงโดย Isopach Map เป็นรูปคล้ายแอ่งกระทะค่อนข้างลึก ท้องของแอ่งจะค่อนข้างมาทางปากอ่าวไทย ความหนาของชั้นดินส่วนใหญ่ประมาณ 10-18 เมตร ยกเว้นพื้นที่ทางตอนเหนือตั้งแต่จังหวัดปทุมธานีขึ้นไปจนถึงที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ความหนาค่อยๆ ลดลงจาก 10 เมตร ไปเป็น 0 เมตร ที่ปลายด้านบนสุด สำหรับขอบของแอ่งด้านตะวันออกและตะวันตกมีความชันและความหนาลดลงรวดเร็วมากกว่าด้านทิศเหนือ

ลักษณะสภาพชั้นดินของโครงการ

1. โครงการระบายน้ำบริเวณสุวรรณภูมิส่วนที่ 1 มีงานเจาะสำรวจชั้นดินเป็นจำนวน 3 หลุม (BH 1-1 ถึง BH 1-3) ความลึกหลุมเจาะ 30-35 เมตร ในชั้นดินช่วง 1-2 เมตรแรก ใช้วิธีการเจาะโดยใช้ Auger และที่ระดับลึกลงไปใช้วิธีเจาะแบบ Wash Boring จนกระทั่งสิ้นสุดการเจาะสำรวจจะทำการเจาะได้ใช้ปลอกเหล็ก (Casing) และน้ำโคลนหมุนเวียนเพื่อป้องกันหลุมพัง มีผลการสำรวจดังนี้ (บริษัท เอส ที เอส อินสตรูमेंท์ จำกัด, 2549)

ชั้นดินเหนียวอ่อน (Very Soft to Soft Clay) มีความหนาประมาณ 14.0-16.0 เมตร ดินเหนียวสีเทาอ่อน ปริมาณน้ำมวลดินตามธรรมชาติสูงกว่าค่าพิกัดเหลวหรือใกล้เคียง พบอินทรีย์วัตถุและเศษเปลือกหอยแทรกอยู่ในเนื้อดิน

ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Stiff Clay) มีความหนาประมาณ 3.0-5.0 เมตร ดินเหนียวสีเทาอ่อน พบอินทรีย์วัตถุและเศษเปลือกหอยแทรกอยู่ในเนื้อดิน

ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff to Very Stiff Clay) มีความหนาประมาณ 2.5-5 เมตร ดินเหนียวสีน้ำตาลอ่อนและสีเทาอมเขียว ค่าความเป็นพลาสติกชี้สูงถึงต่ำ

ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard Clay) มีความหนาประมาณ 3.0-9.0 เมตร ดินเหนียวสีเทาอมเหลือง และสีน้ำตาลอ่อน ปริมาณน้ำมวลดินตามธรรมชาติปานกลางถึงต่ำ

ชั้นทรายแน่นมาก (Very Dense Sand) พบที่ความลึกประมาณ 27.0-32.5 เมตร จากระดับผิวดินเดิม จนถึงสิ้นสุดความลึกของหลุมเจาะที่ 34.0 เมตร ขนาดเม็ดละเอียดมากถึงปานกลาง ค่าการตอกทดลอง (SPT-N) สูง

2. โครงการระบายน้ำบริเวณสุวรรณภูมิส่วนที่ 2 มีงานเจาะสำรวจชั้นดินเป็นจำนวน 3 หลุม (BH 2-1 ถึง BH 2-3) ความลึกหลุมเจาะ 30-35 เมตร และเพื่อป้องกันการพังของหลุมเจาะได้ใส่ท่อกรุกดินพัง (Steel Casing) ในชั้นดินช่วงบนหรือในช่วงความลึกที่จำเป็นขณะเจาะสำรวจ สำหรับกระบวนการเจาะที่ใช้เป็นการเจาะแบบฉีดล้าง (Wash Boring) มีผลการสำรวจดังนี้ (บริษัท จีไอ-เทคโนโลยี่ คอนซัลแต้นท์ จำกัด, 2549)

ชั้นดินเหนียวอ่อน (Very Soft to Soft Clay) มีความหนาประมาณ 12.0-14.0 เมตร ดินเหนียวสีเทาอ่อนและสีเทาอ่อนอมเขียว ปริมาณน้ำมวลดินตามธรรมชาติสูงกว่าค่าพิกัดเหลว หรือใกล้เคียง ค่าความเป็นพลาสติกที่ดีสูง พบอินทรีย์วัตถุและเศษเปลือกหอยแทรกอยู่ในเนื้อดิน

ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Stiff Clay) มีความหนาประมาณ 2.0-4.0 เมตร ดินเหนียวสีเทาอ่อนและสีเทาอมเหลือง ค่าความเป็นพลาสติกที่ดีสูง และพบอินทรีย์วัตถุและเศษเปลือกหอยแทรกอยู่ในเนื้อดิน

ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff to Very Stiff Clay) มีความหนาประมาณ 2.5-8.0 เมตร ดินเหนียวสีน้ำตาลอ่อนและสีเทาอมเหลือง ค่าความเป็นพลาสติกที่ดีสูงถึงต่ำ

ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard Clay) มีความหนาประมาณ 3.0-9.0 เมตร ดินเหนียวสีเทาอมเหลือง และสีน้ำตาลอ่อน ปริมาณน้ำมวลดินตามธรรมชาติปานกลางถึงต่ำ สำหรับ BH 2-3 พบชั้นทรายหนาประมาณ 7.0 เมตร แทรกตัวระหว่างชั้นดินเหนียวแข็ง และดินเหนียวแข็งที่สุดที่ความลึกประมาณ 18.0-25.0 เมตร

ชั้นทรายแน่นมาก (Very Dense Sand) พบที่ความลึกประมาณ 27.0-32.5 เมตร จากระดับผิวดินเดิม จนถึงสิ้นสุดความลึกของหลุมเจาะที่ 35.0 เมตร ยกเว้น BH 2-1 พบดินเหนียวแข็งที่สุดที่ก้นหลุมเจาะที่ความลึก 29.5-30.5 เมตร สีเทาอมเหลืองและสีน้ำตาลอ่อน ขนาดเม็ดละเอียดมากถึงปานกลาง ค่าการตอกทดลอง (SPT-N) สูง

จากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินที่ทำการสำรวจและทดสอบพบว่า ปริมาณน้ำในมวลดินตามธรรมชาติในชั้นดินเหนียวอ่อนมีแนวโน้มลดลงตามความลึกจนถึงชั้นดินเหนียวแข็ง จึงมีค่าต่ำและค่อนข้างคงที่จนถึงชั้นทราย

3. โครงการระบายน้ำบริเวณสุวรรณภูมิส่วนที่ 3 มีงานเจาะสำรวจชั้นดินเป็นจำนวน 3 หลุม (BH 3-1 ถึง BH 3-3) ความลึกหลุมเจาะ 35 เมตร ได้ใช้เครื่องเจาะแบบ Percussion ซึ่งหัวเจาะมีขนาด 100 มิลลิเมตร และเพื่อป้องกันการพังของหลุมเจาะได้ใส่ท่อกรงกันดินพัง (Steel Casing) ในชั้นดินช่วงบนหรือในช่วงความลึกที่จำเป็นขณะเจาะสำรวจ สำหรับกระบวนการเจาะที่ใช้เป็นการเจาะแบบฉีดล้าง (Wash Boring) มีผลการสำรวจดังนี้ (บริษัท จีโอ-เทคโนโลยี คอนซัลแตนท์ จำกัด, 2549)

ชั้นดินเหนียวอ่อน (Very Soft to Soft Clay) มีความหนาประมาณ 13.0-14.5 เมตร ดินเหนียวสีเทาถึงเทาเข้ม ปริมาณน้ำมวลดินตามธรรมชาติสูงกว่าค่าพิกัดเหลวหรือไกล์เคียง ค่าความเป็นพลาสติกต่ำ พบเศษเปลือกหอยแทรกอยู่ในเนื้อดิน

ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Stiff Clay) มีความหนาประมาณ 0.0-3.0 เมตร ดินเหนียวสีเขียว ค่าความเป็นพลาสติกต่ำ และพบเศษเปลือกหอยแทรกอยู่ในเนื้อดิน ไม่พบ ชั้นดินนี้ในหลุมเจาะ BH 3-1

ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff to Very Stiff Clay) มีความหนาประมาณ 3.0-10.5 เมตร ดินเหนียวสีน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาล ค่าความเป็นพลาสติกต่ำ และต่ำ พบกระเปาะทรายแทรกตัวที่ ความลึก 16.0-18.5 เมตร จากระดับผิวดินเดิมในหลุมเจาะ BH 3-1

ชั้นทราย (Medium Dense to Very Dense Sand) พบชั้นทรายแน่นปานกลางถึงแน่นมาก ที่ความลึกประมาณ 19.0-25.0 เมตร จากระดับผิวดินเดิม จนถึงสิ้นสุดความลึกของหลุมเจาะที่ 35.0 เมตร ยกเว้น และพบกระเปาะดินเหนียวแข็งที่สุดแทรกตัวที่ความลึก 25.0-26.5 เมตร จากระดับผิวดินเดิมในหลุมเจาะ BH 3-2 สีน้ำตาลอ่อนถึงสีน้ำตาลอ่อนอมเหลือง ขนาดเม็ดละเอียด มากถึงปานกลาง ค่าการตอกทดลอง (SPT-N) ปานกลางถึงสูง

จากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินที่ทำการสำรวจและทดสอบพบว่า ปริมาณน้ำ ในมวลดินตามธรรมชาติในชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าสูงและค่อนข้างคงที่จนถึงความลึกประมาณ 13 เมตร จึงเริ่มลดลงตามความลึกจนถึงชั้นดินเหนียวแข็งและค่อนข้างคงที่จนถึงชั้นทราย

ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS)

ความหมายของระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

ความหมายของระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์นั้น มีผู้ให้คำจำกัดความไว้หลายประการ ดังนี้

“GIS เป็นระบบของคอมพิวเตอร์ฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และวิธีการที่ออกแบบมา เพื่อการจัดเก็บ การจัดการ การจัดทำ การวิเคราะห์ การทำแบบจำลอง และการแสดงข้อมูลเชิงพื้นที่ เพื่อแก้ปัญหาการวางแผนที่ซับซ้อน และปัญหาในการจัดการ” เป็นคำจำกัดความที่ได้ให้ไว้ โดย Federal Interagency Coordinating Committee (1988) อ้างโดย จารุณี (2543)

“ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ หมายถึง “เครื่องมือที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการ นำเข้า จัดเก็บ จัดเตรียม คัดแปลง แก้ไข จัดการและวิเคราะห์ พร้อมทั้งแสดงผลข้อมูลเชิงพื้นที่ตาม วัตถุประสงค์ต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้” เป็นคำจำกัดความที่ได้ให้ไว้โดย สำนักงานกระทรวงมหาดไทย (2546) อ้างโดย จารุณี (2543)

อุทัย (2549) ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ หมายถึง “ระบบฐานข้อมูลสารสนเทศทาง ภูมิศาสตร์ที่ทำหน้าที่จัดการข้อมูลของสรรพสิ่งต่างๆ บนโลกให้อยู่ในระบบข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยข้อมูลแต่ละชนิดมีการอ้างอิงพิกัดตำแหน่งและอยู่ในรูปแบบข้อมูลดิจิทัล ซึ่งเป็นการผสมผสาน กระบวนการวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์กับระบบข้อมูลแผนที่และระบบ ฐานข้อมูล ดังนั้นระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์จึงเป็นฐานข้อมูลที่อ้างอิงพิกัดตำแหน่งบนแผนที่ แบบดิจิทัล”

สมบัติ (2542) ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ หมายถึง “กระบวนการทำงานเกี่ยวกับ ข้อมูลในเชิงพื้นที่ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ที่ใช้ในการกำหนดข้อมูลและสารสนเทศ ที่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งในเชิงพื้นที่ เช่น ที่อยู่ บ้านเลขที่ และสัมพันธ์กับตำแหน่งในแผนที่ (อ้างโดย ดารารัตน์, 2540)

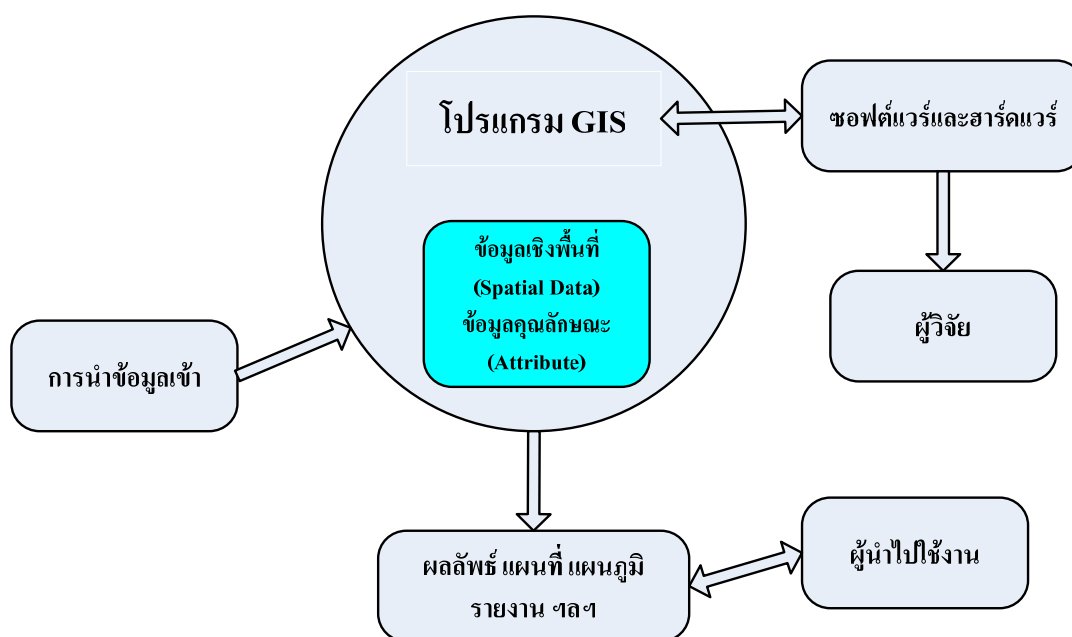
Smith *et al.* (1987) ได้ให้นิยามว่า ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ คือ ระบบฐานข้อมูล ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่มีลักษณะเชิงภาพ และยังรวมไปถึงวิธีการจัดการในการสั่งให้ตอบคำถาม เกี่ยวกับข้อมูลเชิงภาพในฐานข้อมูล (อ้างโดย อุทัย, 2549)

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เป็นระบบโปรแกรมที่สามารถนำไปใช้ในการสร้างและ วิเคราะห์ข้อมูลรูปทรงสัณฐานของวัตถุทุกอย่างบนพื้นผิวโลก (Spatial) เกี่ยวกับระบบแผนที่ ภาพถ่ายทางอากาศและแผนผังต่างๆ ของลักษณะภูมิประเทศทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และ มนุษย์สร้างขึ้น สิ่งเหล่านี้สามารถแปลความออกมาเป็นรหัสอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเรียกออกมาใช้งาน

แก้ไข และวิเคราะห์ข้อมูลได้” แต่จากการสำรวจอัตราส่วนในการนำไปใช้ประโยชน์ถือว่าประสบความสำเร็จน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีปัญหาทางด้านฮาร์ดแวร์เป็นส่วนใหญ่ และการแก้ไขข้อมูลให้ถูกต้อง เพราะข้อมูลที่บันทึกไว้อาจผิดพลาดได้ซึ่งเป็นเรื่องของคณิตศาสตร์และซอฟต์แวร์ (กรรชิต, 2529 อ้างโดย อุทัย, 2549)

วิธีการทำงานของระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

ลักษณะการทำงานของระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เป็นการนำเอาข้อมูลหลายประเภทมาผสมผสานกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาตามที่ต้องการ ซึ่งกระบวนการกระทำจะต้องเกี่ยวข้องกับส่วนต่างๆ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ใช้ประมวลผล ข้อมูลที่นำเข้า ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผล การนำข้อมูลไปใช้งาน ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 วิธีการทำงานของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ที่มา: ดัดแปลงจาก อุทัย (2549)

โครงสร้างของโปรแกรมจัดการระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

1. การกำหนดวัตถุประสงค์ เป็นขั้นตอนสำคัญขั้นตอนแรก ที่ผู้ใช้ GIS ต้องทราบ วัตถุประสงค์ที่ชัดเจน ก่อนกำหนดในขั้นตอนต่างๆ ว่าต้องการแก้ปัญหาอะไร และ GIS สามารถตอบคำถามนั้นได้หรือไม่แล้วผลที่คาดว่าจะได้รับ จากการวิเคราะห์ คืออะไร และใคร จะเป็นผู้นำ ผลจากการวิเคราะห์นั้นไปใช้ต่อไป ซึ่งวัตถุประสงค์ ในที่นี้ ก็คือ ความต้องการที่จะหาแหล่งที่เหมาะสมในการทิ้งขยะ ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาต่างๆ ที่จะตามมา ได้แก่ การปนเปื้อนของ น้ำจากขยะที่อาจปนเปื้อนลงไปในระดับน้ำบาดาล ที่ประชาชนจะนำไปบริโภค การส่งกลิ่น เน่าเหม็นรบกวนผู้ที่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้เคียง รวมทั้งอาจเป็นแหล่งรวมเชื้อโรคต่างๆ ที่จะเกิด จากแหล่งทิ้งขยะที่ไม่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลนี้ได้

2. การนำเข้าข้อมูล เป็นการนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) การนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่ เป็นการแปลงข้อมูลเชิงพื้นที่ให้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข (Digital Data) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ Digitizing Table, การพิมพ์ผ่านทางแป้นคีย์บอร์ดโดยใช้สแกนเนอร์, การนำเข้าข้อมูลจาก ไฟล์ที่เก็บข้อมูลจากเครื่อง GPS (Global Positioning System ; GPS) รวมทั้งข้อมูลที่นำเข้าจาก โปรแกรมอื่นๆ เช่น ArcInfo, ArcView, MapInfo, AutoCAD เป็นต้น และการนำเข้าข้อมูลตาราง (Attribute Data) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับข้อมูลเชิงพื้นที่ที่สามารถนำเข้าโดยโปรแกรม spreadsheet หรือโปรแกรมทั่วไป เช่น Excel, Lotus, FoxPro, Word หรือ โปรแกรมด้านGIS อื่นๆ

3. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) มีความสามารถในการนำเข้าข้อมูล เชิงพื้นที่หลายๆ ชั้นข้อมูล (Layers) มาซ้อนทับกัน (Overly) เพื่อทำการวิเคราะห์ และอาจมีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้คอมพิวเตอร์ตามวัตถุประสงค์เป็น ลักษณะการเรียกค้นข้อมูล (Query) อย่างง่ายหรือซับซ้อน

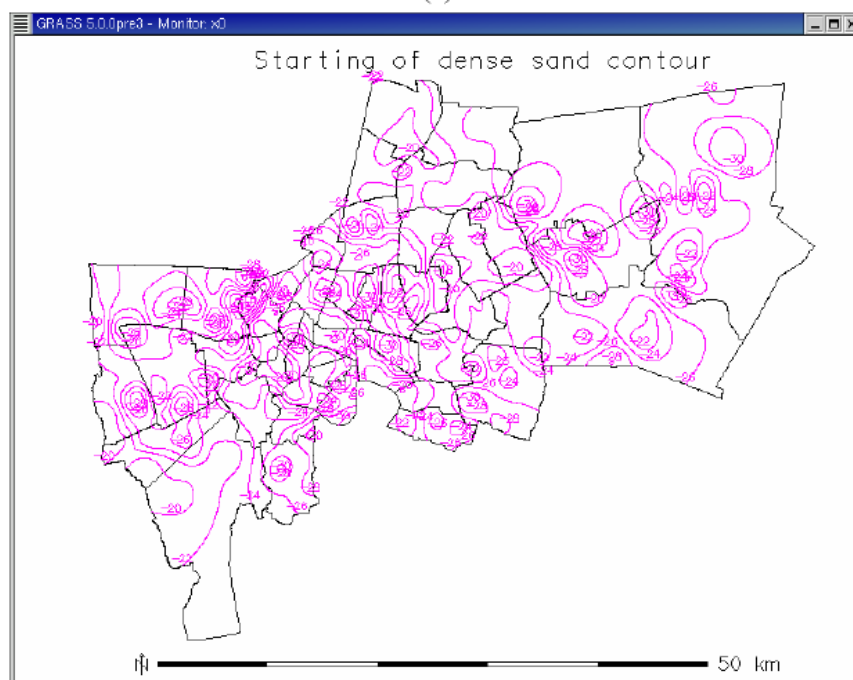
4. การแสดงผล (Data Display) สามารถนำเสนอหรือแสดงผล ได้ทั้งบนจอคอมพิวเตอร์ (Digital Format) หรือจัดพิมพ์ออกมาเป็นแผนที่ (Hard Copy) โดยใช้เครื่องพิมพ์ หรือสามารถ แปลงข้อมูลเหล่านั้นไปสู่ระบบการทำงานในโปรแกรมอื่นๆ ในรูปแบบของแผนที่ แผนภูมิ หรือตาราง

การประยุกต์ใช้งานระบบ GIS ในงานวิศวกรรมปฐพี

จากที่ทราบแล้วว่าระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ เป็นระบบจัดการข้อมูลที่มีประสิทธิภาพในการจัดเก็บ ค้นหา แสดง และวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งการนำระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์มาประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมปฐพี จะช่วยให้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจมีการจัดเก็บที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งมีผู้ทำการวิจัยไว้ดังนี้

กวีวงษ์ (2530) ได้รวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจทางวิศวกรรมจำนวน 408 หลุมเจาะจากสถานที่ 345 แห่งในกรุงเทพมหานคร เพื่อศึกษาลักษณะชั้นดิน และความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ โดยใช้ทฤษฎีทางสถิติในการวิเคราะห์ ในการวิจัยได้พัฒนาโปรแกรมภาษาเบสิกสำหรับการวิเคราะห์ ร่วมกับโปรแกรม Lotus 123 สำหรับเก็บข้อมูล

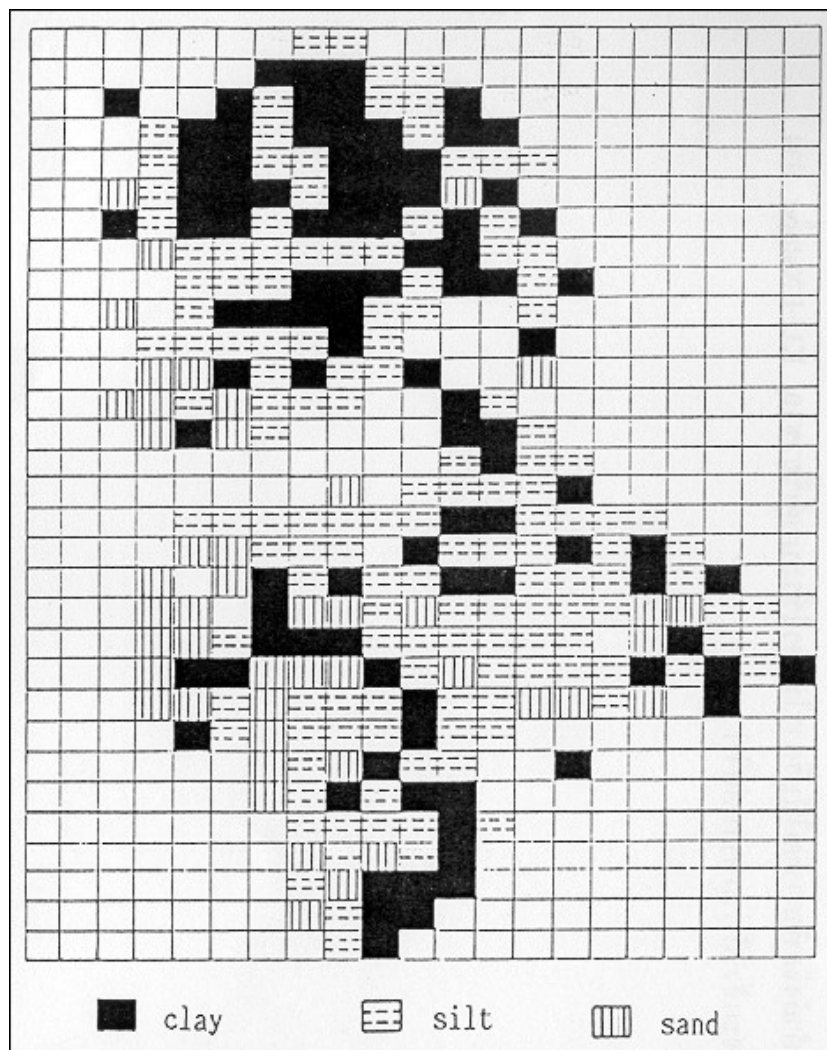
ปณูฑ (2545) ได้ศึกษาระบบฐานข้อมูลชั้นดินเพื่อทำการจัดเก็บข้อมูลจากการสำรวจดินทางวิศวกรรม และเชื่อมต่อเข้ากับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ โดยการรวบรวมหลุมเจาะสำรวจในเขตกรุงเทพมหานครเป็นจำนวนไม่ต่ำกว่า 200 หลุม พบว่าแบบจำลองของชั้นทรายแข็งบริเวณตอนกลางและฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครมีความลึกมาก เกิดจากการกัดเซาะของทางน้ำขนาดใหญ่เป็นแอ่งสะสมตัวของตะกอนขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับหลักฐานทางธรณีวิทยาและความสัมพันธ์ของข้อมูลต่อความลึกโดยทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพมหานครโดยเฉลี่ยดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดง Contour ความลึกของชั้น Dense Sand

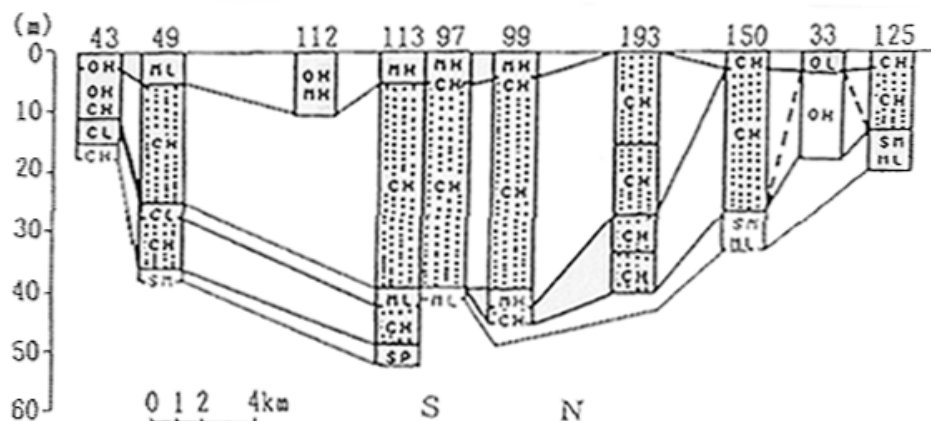
ที่มา: ปณฺฑ (2545)

Kawamura *et al.* (1992) ได้ประยุกต์ระบบ GIS และระบบฐานข้อมูล เพื่อใช้เก็บข้อมูล หลุมเจาะสำรวจในเมือง Mexico City จำนวน 217 หลุม เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ ชั้นดินที่ระดับ 5 เมตรในแนวราบดังภาพที่ 9 และสร้าง Profile ของชั้นดิน สำหรับการสร้าง Soil Profile ได้ใช้วิธี Cluster Analysis ในการหาความหนาของชั้นดินโดยใช้ค่า SPT เป็นพารามิเตอร์ ในการแบ่งชนิดดินดังภาพที่ 10



ภาพที่ 9 แสดงภาพการกระจายของดินใน Mexico City

ที่มา: Kawamura *et al.* (1992) อ้างโดย ปญฺฑ (2545)



ภาพที่ 10 แสดง Soil Profile ที่ได้จากวิธี Cluster Analysis

ที่มา: Kawamura *et al.* (1992) อ้างโดย ปณุต (2545)

สถิติที่ใช้ในการวิจัย

ลักษณะสถิติที่เกี่ยวข้อง

สถิติสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) คือ สถิติที่เกี่ยวข้องกับระเบียบวิธีที่ใช้ในการอธิบายหรือบรรยายถึงลักษณะของข้อมูลเฉพาะ ที่ได้มาจากการเก็บรวบรวม วิเคราะห์ จัดระบบ และนำเสนอข้อมูลชุดใดชุดหนึ่ง ซึ่งผลของการศึกษาจะบอกได้เฉพาะลักษณะของกลุ่มข้อมูลที่ศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำผลไปอ้างอิงหรือพยากรณ์ค่าของกลุ่มอื่นๆ ได้ สถิติประเภทนี้ส่วนใหญ่จะเป็นการคำนวณหาค่าการกระจายข้อมูล, การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง, การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เป็นต้น

2. สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) คือ สถิติที่เกี่ยวข้องกับการนำข้อมูลที่ได้จากตัวอย่าง ซึ่งเป็นการศึกษาจากข้อมูลเพียงบางกลุ่ม หรือบางส่วนของประชากรแล้วนำข้อเท็จจริงที่ได้นี้ไปอธิบายหรือสรุปผลลักษณะของประชากรทั้งกลุ่ม การสรุปผลดังกล่าวจะใช้หลักของความน่าจะเป็นมาทำการทดสอบสมมติฐาน ซึ่งการอนุมานทางสถิติจะถูกต้องเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับการสุ่ม

ตัวอย่าง ที่เป็นตัวแทนของประชากรได้อย่างถูกต้องเพียงใด ซึ่งจะนำไปสรุปผล และอธิบายลักษณะของประชากรได้ถูกต้อง

ค่าสถิติที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

1. การวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง เป็นวิธีทางสถิติที่จะหาค่า ซึ่งเป็นตัวแทนของข้อมูลมาใช้บรรยายถึงลักษณะข้อมูลชุดหนึ่งๆ โดยไม่จำเป็นต้องนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาทั้งหมด ค่าที่ใช้เป็นตัวแทนของข้อมูล แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1.1 ตัวกลางเลขคณิตหรือค่าเฉลี่ย (Arithmetic Mean or Average) เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลทุกจำนวนที่เก็บรวบรวมมาได้ เหมาะสมใช้เป็นตัวแทนข้อมูลที่มีลักษณะการแจกแจงความถี่แบบปกติ

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i / n$$

โดยที่ $\bar{X}$ คือ ค่าตัวกลางเลขคณิตของข้อมูลตัวแปร

X_i คือ ค่าของข้อมูลตัวอย่างที่ 1

N คือ จำนวนข้อมูล

1.2 มัธยฐาน (Median) เป็นค่าที่ได้จากค่าของข้อมูลซึ่งอยู่ตรงกลางของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งได้เรียงลำดับแล้วจากน้อยไปหามาก หรือจากมากไปหาน้อย ค่านี้อยู่ตรงกลาง วิธีนี้จะบอกแนวโน้มหาศูนย์กลางของข้อมูลได้ดี เมื่อข้อมูลมีความสมดุลทั้งค่ามากและค่าน้อย

1.3 ฐานนิยม (Mode) เป็นค่าที่ได้จากค่าของข้อมูลซึ่งเกิดขึ้นบ่อยที่สุด เป็นการวัดแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลางชนิดหนึ่ง

2. การวัดการกระจาย คือ ค่าแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลางอย่างเดียว เป็นตัวแทนขนาดของข้อมูลเป็นกลางๆ แต่ไม่ได้ให้ทราบลักษณะของข้อมูลเพียงพอ เพื่อให้ทราบลักษณะของข้อมูลชัดเจนขึ้น ควรมีการจัดการกระจายของข้อมูลจากแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลางควบคู่ไปด้วย โดยการหา

ค่าความแปรปรวน หรือรากที่สองของความแปรปรวน ที่เรียกว่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วัดการกระจายของข้อมูลควบคู่ไปด้วย

$$\text{ความแปรปรวน (S}^2\text{)} = \sum (X_i - \bar{X})^2 / n - 1$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(SD)} = [(X_i - \bar{X})^2 / n - 1]^{1/2}$$

โดยที่ $X_i - \bar{X}$ = ส่วนเบี่ยงเบน
N = จำนวนข้อมูล

3. การทดสอบสมมติฐาน เป็นการทดสอบว่าจะยอมรับ หรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ณ ค่าระดับนัยสำคัญ, α (Significance) ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นตัวกำหนดขอบเขตการยอมรับ (Acception Region) และขอบเขตการปฏิเสธ สมมติฐานหลัก โดยจะต้องคำนวณค่าสถิติ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจ ค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานมีหลายชนิด ซึ่งเหมาะสมกับกรณีต่างๆ ไม่เหมือนกันที่นิยมใช้กันบ่อยๆ ได้แก่

3.1 Z-Test (Standard Normal Distribution) ใช้ในการทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างที่มีการแจกแจงแบบปกติ

3.2 T-Test ใช้ในการทดสอบกับกลุ่มตัวอย่าง ที่มีการแจกแจงแบบปกติ และมีเงื่อนไขไม่เป็นไปตามข้อกำหนด Z-Test

3.3 F-Test ใช้ในการทดสอบเกี่ยวกับความแปรปรวน (σ^2) เป็นต้น

นอกจากการใช้ค่าสถิติในการตัดสินใจแล้ว อาจใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นในการตัดสินใจ โดยคำนวณในรูปของความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมติฐาน (ค่า P หรือ Significance) ซึ่งจะทำการตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธทำให้สะดวกและง่ายขึ้น โดยพิจารณาจากค่า P ดังนี้

- ถ้าค่า P ที่คำนวณได้มีค่าน้อยมาก (น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ, α ที่กำหนดไว้) ถือว่าโอกาสที่จะยอมรับสมมติฐานมีน้อยมาก นั่นคือควรที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0

- ถ้าค่า P ที่คำนวณได้มีค่ามาก (มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ, ∞ ที่กำหนดไว้) ถือว่าโอกาสที่จะยอมรับสมมติฐานมีมาก นั่นคือควรจะยอมรับสมมติฐาน H_0

โดยทฤษฎีความน่าจะเป็น โอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์เท่ากับ 1.00 เมื่อเขียนเป็นกราฟรูประฆังคว่ำแล้ว พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดจะเท่ากับ 1.00 ดังนั้นโอกาสที่จะยอมรับสมมติฐานหลัก, H_0 ก็ต่อเมื่อ ค่า $P > \infty$ นั่นเอง

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติที่จะให้ผลการทดสอบถูกต้องตามความเป็นจริงทุกครั้งไม่สามารถทำได้ กล่าวคือ ถ้าจริงๆ แล้ว H_0 เป็นความจริง ผลการทดสอบได้เป็นยอมรับ H_0 และถ้าจริงๆ แล้ว H_0 ไม่เป็นความจริง ผลการทดสอบได้เป็นปฏิเสธ H_0 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติจะต้องมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นเสมอ ข้อผิดพลาดดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานซึ่งมีหลายวิธี ข้อผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐานแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

- ข้อผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error) เป็นข้อผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐานเนื่องจากปฏิเสธ H_0 เมื่อ H_0 เป็นความจริง

- ข้อผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II Error) เป็นข้อผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐานเนื่องจากยอมรับ H_0 เมื่อ H_0 ไม่เป็นความจริง

กำลังรับแรงเฉือน

กำลังรับแรงเฉือนสามารถวัดได้โดยเครื่องมือและวิธีการที่แตกต่างกันออกไป ตามแต่ความต้องการของผู้ใช้ สภาพ และชนิดของดิน ถ้าผู้ใช้ต้องการผลวัดที่ละเอียดเพื่อไปประกอบกับงานของตน ก็จะเลือกวิธีการอย่างหนึ่ง แต่ถ้างานนั้นไม่ต้องการความละเอียดมากนัก ก็สามารถใช้วิธีการอื่นที่ได้สะดวก แต่ให้ผลแตกต่างกันไปบ้าง อย่างไรก็ตาม สภาพและชนิดของดินก็จะจำกัดวิธีการวัดกำลังของดินไว้ด้วย เช่น กรณีดินแห้งและดินชุ่มน้ำ วิธีการวัดกำลังก็แตกต่างกันออกไป หรือดินที่ต่างชนิดกัน เช่น ดินเหนียวและดินทราย ก็มีวิธีการที่แตกต่างกันออกไปเช่นกัน กำลังของดินที่ได้ผลออกมามักจะเรียกชื่อตามวิธีการที่ทดสอบ และเนื่องจากมวลดินแตกหลายได้จากกระบวนการใช้แรงเฉือน (Shearing Process) กำลังของมวลดินที่ได้จึงเป็นความสามารถในการต้านแรงเฉือนของดิน

ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1. Unconfined Compression Test เป็นการทดสอบหาความต้านทานแรงเฉือนโดยวิธีทดสอบแรงอัดแกนเดียว ที่ไม่มีความดันกระทำต่อผิวมวลดินด้านข้าง (Confining Pressure) ดังนั้นความต้านทานแรงเฉือนของมวลดินจะเกิดขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงในแกนตั้ง (Axial Stress) เท่านั้น ซึ่งวิธีการทดสอบตัวอย่างดินโดยไม่มีความดันกระทำต่อผิวมวลดินด้านข้าง ทำให้สภาพของดินตัวอย่างไม่เหมือนกับสภาพความเป็นจริงตามธรรมชาติของดิน ทำให้ผลการทดสอบจึงเป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น

2. Triaxial Test เป็นการทดสอบหาความแข็งแรงของดินที่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ทั้งนี้เพราะความดันโดยรอบตัวอย่างสามารถควบคุมให้เหมาะสมตามสภาพธรรมชาติได้ และในระหว่างทำการทดลอง ความดันน้ำในตัวอย่างดินหรือปริมาณน้ำที่ไหลเข้าหรือออกจากตัวอย่างดินสามารถทำได้โดยละเอียด ดังนั้นในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ หรืองานศึกษาวิเคราะห์ที่ต้องการความละเอียดของคุณสมบัติดินในด้านความแข็งแรง จึงมักจะทดสอบโดยวิธี Triaxial Test

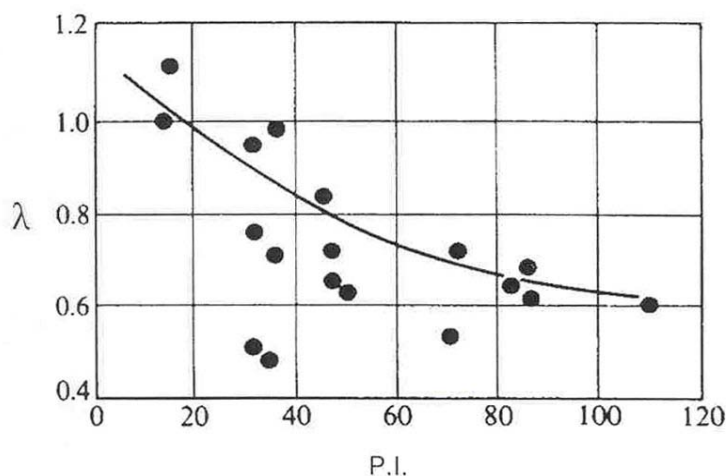
ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบในสนาม

1. Field Vane Shear Test คือการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) และวัดความไวต่อการสูญเสียกำลัง (Sensitivity) การทดสอบนี้มักจะใช้ทดสอบกับดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก เนื่องจากดินเหนียวอ่อนนั้นยากต่อการเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพ

Bjerrum (1972) ทำการศึกษาเพื่อปรับแก้ค่า Vane Shear Strength ที่ได้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test ผลจากการศึกษาค้นคว้าวิเคราะห์ย้อนหลัง (back analysis) หาค่า S_u จากตลาดดินที่เคยพิบัติ ปรากฏว่า ค่า S_u จาก field vane shear test มีค่าสูงเกินความเป็นจริง จึงแนะนำให้มีการปรับแก้ค่าดังต่อไปนี้

$$S_{u,Correct} = \mu \times S_{u,Field}$$

โดยที่ μ = Correction Factor โดยมีความสัมพันธ์กับ Plasticity Index ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงค่า Correlation Factor (μ)

ที่มา: Foundation Analysis and Design (1982)

2. Cone Penetration Test คือการทดสอบเพื่อพิจารณาชั้นดินและหาค่ากำลังของดิน เพื่อใช้ในการออกแบบฐานราก การทดสอบนี้สามารถใช้ได้กับดินทุกชนิด การทดสอบนี้สามารถแบ่งตามประเภทของหัวกดปลายกรวยได้เป็น 2 ชนิดคือ หัวกดชนิดกลไกและหัวกดชนิดไฟฟ้า

3. Standard Penetration Test คือการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์สำคัญ คือสามารถทราบความอ่อน-แข็งของดินได้ทันที, ในกรณีที่ไม่สามารถเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพได้ก็ต้องทำการทดสอบนี้เพื่อเก็บตัวอย่างแบบแปลงสภาพแทน และการทดสอบนี้จะได้ค่า SPT-N ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่ากำลังของดินเพื่อใช้ในการออกแบบได้

คุณสมบัติทางกายภาพ

เป็นคุณสมบัติที่สามารถมองเห็น แจกแจงได้ด้วยตาเปล่า และสามารถรู้สึกสัมผัสด้วยมือ หรืออาจใช้เครื่องมืออย่างง่ายในการทดสอบ โดยที่คุณสมบัติพื้นฐานที่จำเป็นสามารถสรุปได้ดังนี้

- ความชื้นตามธรรมชาติ (w_n) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักของส่วนที่เป็นเม็ดดินในมวลดินนั้นแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์

- Atterberg's Limits คือค่า Water Content ซึ่งเป็นขีดแบ่งระหว่างสถานะ Plastic และสถานะ Liquid ของดิน ได้แก่ Liquid Limit (LL) และ Plastic Limit (PL)
- Liquidity Index คืออัตราส่วนระหว่างผลต่าง Natural Water Content และ Plastic Limit กับผลต่างของ Liquid Limit และ Plastic Limit
- Total unit weight (γ) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรวมของเม็ดดินและน้ำในมวลดินต่อปริมาตรรวมของเม็ดดิน น้ำ และอากาศในมวลดินนั้น
- Specific Gravity (G) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของเม็ดดินต่อน้ำหนักของน้ำที่ 4 องศาเซลเซียสในปริมาตรเท่ากัน
- Grain Size Distribution คือการกระจายขนาดของเม็ดดินจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดในสเกลลอการิทึมและเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าที่ระบุ
- อื่นๆ เช่น สี กลิ่น อินทรีย์สาร เป็นต้น

มีผู้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพไว้เป็นจำนวนมาก สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ปณฺฑ (2545) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักของดินกับความลึกของชั้นดิน และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินกับความลึกของชั้นดินโดยใช้ข้อมูลการเจาะสำรวจดินในเขตพื้นที่กรุงเทพฯ และพื้นที่ข้างเคียงดังภาพที่ 12 และ 13

คุณสมบัติทางวิศวกรรม

คุณสมบัติทางวิศวกรรม เป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพี โดยที่คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่จำเป็นสามารถสรุปได้ดังนี้

- คุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งแรง ได้แก่ Undrained Shear Strength (S_u) อาจได้มาจาก Field Vane Shear Test หรือค่า N จาก SPT หรือ Unconfined Compression Test เป็นต้น และ C, ϕ จาก Direct Shear Test หรือ Triaxial Compression Test

- คุณสมบัติทางด้านการเคลื่อนตัวของมวลดิน เมื่อมวลดินถูกหน่วยแรงมากระทำจะทำให้เกิดขบวนการเคลื่อนตัวของมวลดินเกิดขึ้น การที่มวลดินมีการเคลื่อนตัวมากบางครั้งอาจกล่าวได้ว่าดินมีค่ากำลังในการรับน้ำหนักค่อนข้างต่ำซึ่งในทางวิศวกรรมปฐพีจะมีดัชนีที่จะบ่งบอกถึงคุณสมบัติในด้านนี้ ซึ่งได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น (E) และค่า Poisson's Ratio (ν) ซึ่งสามารถรวบรวมไว้ดังตารางที่ 2-5

- ค่า Compressibility ได้แก่ Coefficient of Consolidation (C_v), Compression Index (C_c) และ Initial Void Ratio (e_0)

- ค่า Permeability ได้แก่ Coefficient of Permeability (k)

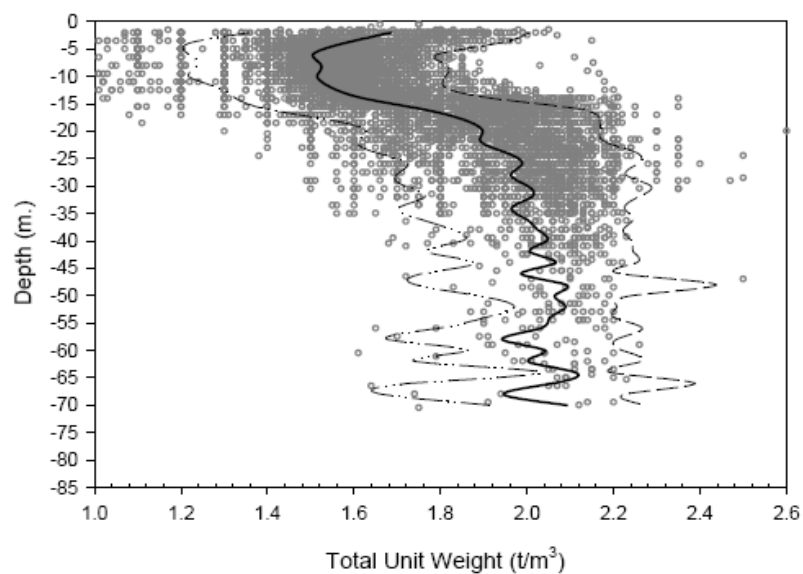
- อื่นๆ เช่น Q_u จาก Compaction Test, Degree of Dispersive จาก Double Hydrometer Test เป็นต้น

มีผู้ที่ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมไว้เป็นจำนวนมาก สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 1 สรุปคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวกรุงเทพฯ

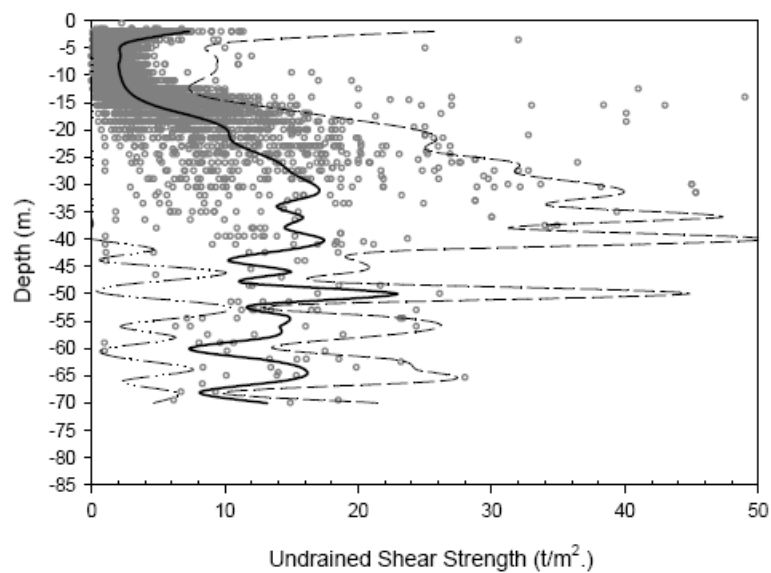
Reference		Sand,% (2-0.006 mm)	Silt,% (0.006-0.002 mm.)	Clay,% (<0.002 mm.)	W _n (%)	LL (%)	PL (%)	LI	γ_t (t/m ³)	G
Weathered Clay	Gulachol (1970) Weathered Clay				51.2-6.9	77.5-2.1	33.9-0.5	0.4		2.7-0.1
	Brand (1971) Weathered Clay				62.9-4.2	89.6-5.1	38.6-2.4			62.9-4.2
	Phuong (1973) Weathered Clay				50-90	80-100	30-45	0.60-1.00		2.6-2.7
	Tasneenart (1984) Weathered Clay				30-100	30-90	20-35	0.2-2.0	1.55-1.9	
Soft to Medium Clay	Moh et al. (1969) (AIT) 4.5-7.5 m.	1-3	40-45	50-60	0-110	0-110	35-45	0.8-1.10		2.6-2.7
	Phuong (1973) (AIT) 4.5-9.0 m.	1-4	35-65	55-90	50-120	80-120	25-65	0.60-1.00		2.6-2.7
	ศรีบุญฤทธิ์ (1977) 2-14 m.				61.1-11.5	63.5-12.8		1.17-0.58		2.6-0.4
	TSAI (1982) (AIT)				85-70	79-95	30-34	0.91-0.76		
	TSAI (1982) (Nong Ngoo Hao)				125-65	80-122	25-52	1.10-0.92		
	TSAI (1982) (Pathumwan)				65-48	58-72	26-33	0.68-0.78		
	TSAI (1982) (Pom Prachul)				62-82	75-110	26-40	0.67-0.88		
	Parentilla (1983)				26.1-7.6	49.9-9.7	22.5-3.9	0.15-0.30	2.0-0.18	
	Tasneenart (1984) Soft Clay				40-90	40-90	20-40	0.2-2.0	1.5-1.75	
	กำธร (2529) 0-14.2 m.				60.3-9.3	63.6-6.8	28.2-2.6	1.65-0.07		2.6-0.03
	กวีพงษ์ (2530)				57.63	62-68	28-30	0.8-1.0	1.6-1.7	2.6-2.7
	สุพัฒน์ (2530) บางเขน				68.2-7.9	66.9-10.4	37.9-8.4	1.58-0.06		2.7-0.05
	อาคม (2542)				94.36	93.9	31.7	1.5		2.57

ที่มา: ปณฺท (2545)



ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและความลึกของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

ที่มา: ปณูฯ (2545)



ภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

ที่มา: ปณูฯ (2545)

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay Layer)

Formular	Reference	Remark
$E_u = 500S_u$	Cox (1973)	จากการทดสอบการทรุดตัวของดินในถนนธนบุรีปากท่อโดย S_u คัดจากค่าเฉลี่ยของชั้นดินอ่อนที่สุด
$E_u = 131S_u$	Parnpoy (1985)	จากการทดสอบ C_{kou} - T_c ตัวอย่างของถนนบางนา-บางปะกง
$E_u = 125-300S_u$	NAVFAC.DM.71 (1982)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ PI=40-63% (Tonyagate,1978) โดยนำคุณสมบัติของดิน OCR<3 (Obchittikul,1989)
$E_u = 100-500S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ PI=40-63%, OCR<3 (Tonyagate,1978)
$E_u = 70-250S_u$ $E_u = 42-162S_u$	Balasubramaniam and Brenner (1987)	$S_{u(FV1)}$ =Uncorrected Field Vane Shear Strength เมื่อ $S_{u(FV2)}$ =Field Vane Correction ที่ปรับแก้ (Bejerum, 1972) เมื่อ PI=85%
$E_u = 100-500S_u$	Bowel (1996)	สำหรับ Normally Consolidated and Lightly Overconsolidate Clay เมื่อ PI>30% Organic
$E_u = 80-256S_u$	Das (1983)	
$E_u = 150S_u$	Bergado et al. (1990)	Bangkok Clay เมื่อ PI>50% จากการศึกษการทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางปะกงจากหน้าตัด 30 จุดสายทาง 55 กม.
$E_u = 250-500S_u$	Bjerrum (1964)	S_u =Undrained Shear Strength Unconfined Compression Test or Vane Shear Test

ที่มา: พงษ์ศิลป์ (2544)

ตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Stiff Clay Layer)

Formular	Reference	Remark
$E_u = 300-600S_u$	NAVFAC.DM.71 (1982)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ PI=40-63% (Tonyagate,1978)
$E_u = 240-1200S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ PI=40-63% , OCR<3 (Tonyagate,1978)

ที่มา: พงษ์ศิลป์ (2544)

ตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Elastic Modulus (E) และค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของชั้นดินเหนียวแข็ง (Very Stiff Clay Layer)

Formular	Reference	Remark
$E_u = 150-1250S_u$	Duncan and Buchighani (1976)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ PI=40-63%
$E_u = 200-600S_u$	NAVFAC.DM.71 (1982)	คุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนแข็งถึงแข็ง มาก จากการทดสอบ PI=10-50%
$E_u = 1500-2000S_u$	Bowel (1988)	สำหรับ Heavily Overconsolidation Clay

ที่มา: พงษ์ศิลป์ (2544)

ตารางที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Poisson's Ratio สำหรับดินเหนียวชนิดต่างๆ

Soil Type	Reference	Poisson's Ratio	Remark
Very Soft Clay	Das	0.20-0.40	-
Soft Clay	Parnploy (1984)	0.30-0.39	ข้อมูลถนนบางนา-บางปะกง
	Poulos (1975)	0.35-0.45	
	Bowl	0.35-0.45	
Medium Clay	Bowl	0.30-0.35	-

ที่มา: พงษ์ศิลป์ (2544)

SHANSEP Theory

SHANSEP ย่อมาจาก Stress History and Normalized Soil Engineering Properties ที่พัฒนาโดย Ladd and Foott (1974) ที่สถาบัน MIT ประเทศสหรัฐอเมริกา วิธีการของ SHANSEP เป็นวิธีที่ใช้หาค่ากำลังความแข็งแรงของดินเหนียว ในสภาพหน่วยแรงรวมหรือ Undrained Shear Strength (S_u) และใช้ได้สำหรับดินเหนียวอ่อน หลักการพื้นฐานของวิธีการนี้ได้จากการตั้งสมมติฐานว่าค่ากำลังของดินเหนียว (S_u) จะเป็นสัดส่วนกับค่า σ'_{vo} ด้วยคุณสมบัติเช่นนี้ ค่า S_u สามารถเขียนในรูปของสมการดังนี้

$$\frac{S_u}{\sigma'_{vo}} = S(O.C.R.)^m$$

โดยที่ S_u คือ Undrained Shear Strength ($\phi=0$)

σ'_{vo} คือ Effective Overburden Pressure

S คือ Strength Ratio

O.C.R. คือ Overconsolidation Ratio

M คือ 0.7-0.9 Ladd (1977)

ตารางที่ 6 สรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ

	Reference	Su (UC)	Sensitivity (UC)	Su (Vane)	Sensitivity (Vane)	SPT	e _o	C _c	C _r	C _v	RR	P _m
Soft to Medium Clay	ศรีบุญฤทธิ์ (1997) 2-14 m.	3.13-1.98	2.60-1.87	2.72-1.7	2.59-1.67		1.73-0.33	0.81-0.3	0.29-0.09			
	TSAI (1982) (AIT)						2.06-0.32	1.11-0.21	0.17-0.04	1.64-0.59		8.2-10.6
	TSAI (1982) (Nong Ngoo Hao)						2.99-0.51	1.42-0.49	0.2-0.07	1.47-0.5		3.5-11.8
	TSAI (1982) (Pathumwan)						1.68-0.38	0.78-0.2	0.14-0.07	1.86-0.44		10.1-15.3
	TSAI (1982) (Pom Prachul)						2.19-0.38	0.87-0.13	0.17-0.06	2.04-1.1		2.34-11.00
	Parentilla (1983)							0.21-0.14	0.16-0.18			63.0-0.6
	Tasneenart (1984) Soft Clay										0.03-0.011	
	กำธร (2529) 0-14.2 m.	2.85-1.22				7.8-5.75						
	กวีพงษ์ (2530) Soft-Medium clay	2.4-3.4		2.4-4.9			1.1-1.6	0.5-0.6	0.05-0.14		0.02-0.06	
Stiff to Very Stiff Clay	Vongthieres (1996)		1.3-1.5									
	Hengchaovanich (1969) 36 ft.	5-15	1.3									
	ศรีบุญฤทธิ์ (1977) 14-25 m.	15.6-9.15						0.30-0.22	0.15-0.08			
	Tasneenart (1984) 1 st Stiff Clay											
	Tasneenart (1984) 2 nd Stiff Clay											
	กำธร (2529)	6.93-2.4				23.4-6.7						
	กวีพงษ์ (2530) Stiff-Very Stiff Clay	10-12				23-25	0.74-0.84	0.74-0.84	0.03-0.08		0.03-0.04	

ที่มา: ปณฺท (2545)

จากการพิจารณาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่ามีสภาพเป็น Normally Consolidated Clay ที่มีค่า Overconsolidated Ratio ใกล้เคียง 1 และมีค่า S ประมาณ 0.25

Mesri (1975) พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่เกิดขึ้นจริงในสนามมีค่าดังนี้

$$S_{u,Correct} \approx 0.22\sigma'_p \text{ สำหรับดินเหนียวที่ไม่มีสารอินทรีย์}$$

$$S_{u,Correct} \approx 0.26\sigma'_p \text{ สำหรับดินเหนียวที่มีสารอินทรีย์ปน}$$

$$S_{u,Correct} \approx 0.50\sigma'_p \text{ สำหรับดินเหนียวที่มีซากพืชปนมาก}$$

บัณฑิต (2529) สรุปว่า $\frac{S_{u,Correct}}{\sigma'_p}$ ของดินในแต่ละบริเวณมีค่าประมาณคงที่ และเท่ากับ 0.30, 0.23 และ 0.15 สำหรับดินบริเวณหนองจอกเก่า, ถนนกรุงเทพ-ศรีราชา และถนนธนบุรี-ปากท่อ ตามลำดับ

เสาเข็มดิน-ซีเมนต์

เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ เป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยใช้เครื่องจักรและเครื่องมือพิเศษที่มีแกนเจาะและใบกววน เป็นการผสมในแนวตั้ง (Deep Stabilization) ลักษณะคล้ายคลึงกับเสาเข็ม ซึ่งอาจผสมเต็มทั้งพื้นที่หรือผสมเป็นจุดๆ เหมือนกับการเจาะเสาเข็มคอนกรีตปูพรม ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมกับดินอยู่ในช่วง 125-220 กก./ลบ.ม. ดิน ค่า Unconfined Compressive Strength ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะอยู่ในช่วง 5-10 กก./ตร.ซม. ซึ่งจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เป็นเสาเข็มซึ่งให้ค่า Unconfined Compressive Strength ในช่วง 240-350 กก./ตร.ซม. ในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ไม่ต้องใช้ทรายและหินผสม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้กำลังรับแรงสูง เช่น คอนกรีต จึงลดปัญหาการขนส่งวัสดุ ราคาค่าก่อสร้าง และหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจเกิดจากเสาเข็มคอนกรีตแทงทะลุดินถมขึ้นมาปูดที่ผิวดินในภายหลัง เนื่องจากเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ไม่แข็งตัวเท่าเสาเข็มคอนกรีต

วิวัฒนาการของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

ความเป็นมาทางด้านวิศวกรรมการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ได้ทำการแบ่งการพัฒนา รวมทั้งเทคโนโลยีของการก่อสร้างออกเป็น 3 ช่วง คือ

การพัฒนาในช่วงแรกๆ: ช่วงปี ค.ศ.1923 ในส่วนของงานก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนนั้น ได้ใช้ท่อนไม้รองเพื่อเสริมแรงให้กับฐานรากเป็นที่นิยมกันมาก ซึ่ง FLODIN และ BROMS ก็ได้กล่าวอ้างถึงประโยชน์ ก่อนที่การเริ่มต้นในช่วงของทศวรรษนี้ จะมีการใช้ขานทางมาเพิ่มเสถียรภาพของคันทางถนน หรือการที่ต้องแบ่งการก่อสร้างออกเป็นช่วงๆ หรือการใช้วัสดุ น้ำหนักเบามาเป็นวัสดุก่อสร้างเป็นคันทางถนนในประเทศไทย เป็นต้น ในประเทศสวีเดนจะใช้เสาเข็มไม้เพื่อรองรับน้ำหนักคันทาง เพื่อที่จะถ่วงน้ำหนักลงชั้นดินที่ดีกว่า รวมทั้งยังใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางถนนด้วย ขณะที่ MOREAU ได้แนะนำการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียว โดยการเร่งระบายน้ำออก ซึ่งการพัฒนาส่วนหนึ่งของวิธีก็คือการใช้ Sand Drain

ช่วงปี ค.ศ. 1948- 1970: ในช่วงนี้เป็นการพัฒนาเรื่อยๆ จะไม่ชัดเจนมากนักโดยใช้เป็น Lime Column Method ซึ่งจะอยู่ในปี ค.ศ.1960 แต่การพัฒนาการช่วงสำคัญจะเกี่ยวกับการใช้ระเบียบวิธีแบบ Finite Element ซึ่งใช้ในการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวระนาบภายใต้แรงกดคันทาง และใช้สถานะแบบ Plane Strain มาวิเคราะห์พฤติกรรมของดินภายใต้คันทาง

ช่วงปี ค.ศ.1970 – ปัจจุบัน: ในช่วงต้นปี ค.ศ.1970 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ Lime/Cement Column ได้ทำการศึกษาค้นคว้ากันแพร่หลายในประเทศสวีเดน และประเทศญี่ปุ่น ได้มุ่งมั่นและทำการวิจัยแล้วจึงนำเทคนิค Lime/Cement Column มาใช้ในงานฐานรากบนดินเหนียวอ่อน เช่น งานคันทาง งานขุดดิน เป็นต้น ในช่วงปลายปี ค.ศ.1970 ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการพัฒนาวิธีปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้การผสมลึกในที่ (Deep Mixing of In-Situ) โดยผู้ที่เริ่มพัฒนา ได้แก่ Terashi *et al.*(1979), Kawasaki *et al.*(1981), Suzuki (1982) เรื่อยมา ซึ่งเริ่มต้นของงาน Deep Mixing Method ถูกนำมาใช้ในงานอุโมงค์และโครงสร้างต่างๆ บริเวณอ่าวริมทะเล และในช่วงปี ค.ศ. 1975 ได้เริ่มทำการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แบบเปียกมาใช้ในการก่อสร้างและช่วงปี ค.ศ. 1980 ได้พัฒนาเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แบบแห้งมาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างอีกมากมาย

ปัจจุบันการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ถูกนำมาใช้ในงานโครงสร้างของฐานรากต่างๆ เช่น งานคันทางถนน งานตึกอาคาร และงานฐานรากของถังเก็บน้ำ โดยที่ประเทศไทยนิยมใช้การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แบบเปียกมาใช้งานก่อสร้างถนนบนดินอ่อน

ประโยชน์ของการใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์

การทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์รองรับคันทางถนน เพื่อลดปริมาณการทรุดตัวและป้องกันปัญหาเสถียรภาพของคันทางบริเวณบริเวณลาดด้านข้างเนื่องจากการเลื่อนตัว การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะทำให้ดินฐานรากแข็งตัวและมีกำลังสูงขึ้น การก่อสร้างคันทางและผิวถนนสามารถทำได้ทันทีหลังจากก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แล้วเสร็จ ไม่ต้องรอเวลาทำการ Preload ให้ดินเกิดการทรุดตัวเหมือนการก่อสร้างแบบเดิมหรือใช้ PVD ช่วยเร่งการทรุดตัว นอกจากนั้นเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ยังลดปัญหาการทรุดตัวต่อเนื่องเป็นเวลานานหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ เนื่องจากความหนาของชั้นดินที่เกิดการทรุดตัวลดลง

ในปัจจุบัน Deep Mixing Method ได้นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานปรับปรุงคุณภาพดินหลายลักษณะ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ลดการทรุดตัวของ Embankment, ฐานรากอาคาร และโครงสร้างอื่นๆ
2. ป้องกันการเกิด Slope Failure
3. เพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคันดินและทำหน้าที่เสมือนฐานรากได้อย่างดี
4. เพิ่ม Horizontal Resistance ของโครงสร้าง
5. ป้องกันการเกิด Heaving และลดความยาวของ Sheet Pile ในการขุดลึก
6. ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการก่อสร้างบริเวณข้างเคียงและที่เชื่อมต่อกัน

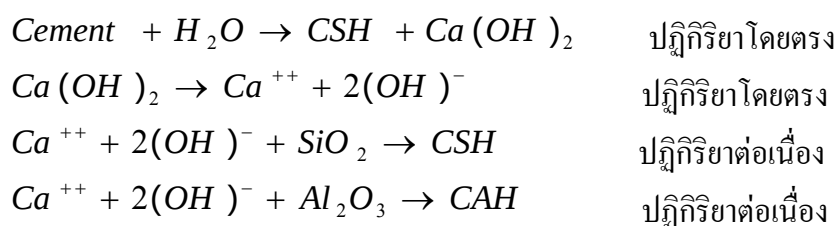
กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยผสมซีเมนต์

กลไกการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน (อนุวัตร, 2538) ได้กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับกลไกที่เกิดขึ้นดังนี้

1. ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วเกิดการแลกเปลี่ยนหรือรวมตัวกันของประจุไฟฟ้ารอบอนุภาคเม็ดดิน ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดินจึงจับตัวกันเป็นก้อน

2. การยึดประสานในการบดอัดดิน-ซีเมนต์ ส่วนประกอบต่างๆ ของซีเมนต์จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นในเวลาต่างกันไป เม็ดดินเกิดการยึดเกาะกันเป็นก้อน และสามารถรับแรงอัดได้ การยึดเกาะกันนี้เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดินกับซีเมนต์และซีเมนต์กับซีเมนต์เอง ซึ่งแยกประเภทตามขนาดของเม็ดดินได้ดังนี้

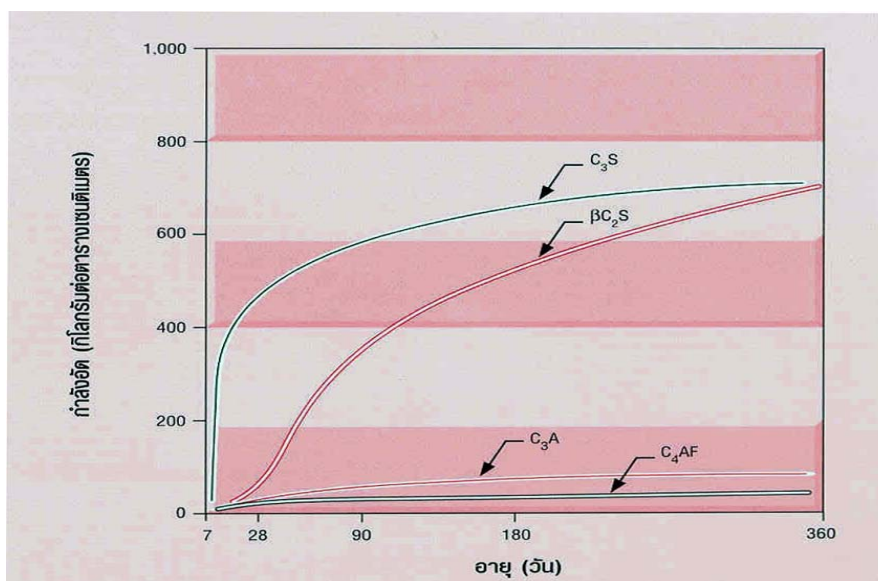
2.1 ดินเม็ดละเอียด การผสมซีเมนต์กับดินเม็ดละเอียดนั้น ทำได้ทั้งชนิด Clayey และ Silty Soil แต่ต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูงกว่าดินชนิดเม็ดหยาบ เนื่องจากดินชนิดเม็ดละเอียดมีพื้นที่ผิวและจุดสัมผัสมากกว่าชนิดเม็ดหยาบ ลักษณะการยึดเกาะกันจะประกอบด้วย Mechanical Interlock และ Chemical Cementation โดยซีเมนต์จะช่วยให้การเกาะตัวกันของเม็ดดินให้แข็งแรงขึ้น อันเนื่องมาจาก CSH และ CAH ทำให้ช่วยลดค่าความเหนียว (Plasticity) เพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนโดย Ca^{++} จาก Cement เข้าไปแทนที่ Na^{++} และ H^{+} รอบๆอนุภาคของดินเหนียว ทำให้มีขนาดเล็กลง เหมือนไล่ น้ำออกจากอนุภาคดินเหนียว จากนั้นจะจับตัวในรูป Flocculate ซึ่งเรียกขบวนการนี้ว่า Pozzolanic Reaction นอกจากนั้น Si^{-} และ Al^{2-} จะจับตัวกับ Ca^{++} ในขบวนการ Pozzolanic นี้ ทำให้ลดการบวมตัวและอ่อนตัวของดินเมื่อมีน้ำภายนอกซึมเข้าไป ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



2.2 ดินเม็ดหยาบ ในมวลดินที่มีขนาดเม็ดหยาบ เมื่อเกิดซีเมนต์ไฮดรชันการยึดเกาะกันของเม็ดดินคล้ายกับในคอนกรีต แต่ซีเมนต์เพสต์ไม่สามารถแทรกตัวให้เต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดินได้ แรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย Mechanical Interlock ของ CSH และ CAH ที่บริเวณผิวของอนุภาคดิน สำหรับเม็ดทรายการยึดเกาะจะเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัส เม็ดทรายที่มีการบดอัดแน่นช่องว่างระหว่างเม็ดทรายจะมีน้อยพื้นที่ผิวสัมผัสมีมากการยึดเกาะกันจะแข็งแรงขึ้น ถ้าทรายเป็นวัสดุชนิดเม็ดขนาดคละกันดี (Well Grade) พื้นที่ผิวสัมผัสจะมีมากปริมาณที่ใช้จึงน้อยกว่าทรายชนิดที่มีเม็ดขนาดเดียวกันตลอด (Uniform Grade)

ปริญญ และ ชัย (2549) อธิบายว่า สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ C_3S (ไตรแคลเซียมซิลิเกต), C_2S (ไดแคลเซียมซิลิเกต), C_3A (ไตรแคลเซียมอลูมินต), C_4AF (เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์-ไรต์) มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์โดย

- C_3S เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวและให้กำลังก่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก ดังภาพที่ 14
- C_2S เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้น และการพัฒนากำลังของ C_2S ก่อนข้างช้ากว่า C_3S ดังภาพที่ 14
- C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อนข้างรุนแรง สามารถพัฒนากำลังได้ภายในวันเดียวแต่กำลังประลัยมีค่าก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ C_3S หรือ C_2S ดังภาพที่ 14
- C_4AF สามารถพัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังประลัยค่าก่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ที่มา: Cement Pozzolan and Concrete (2006)

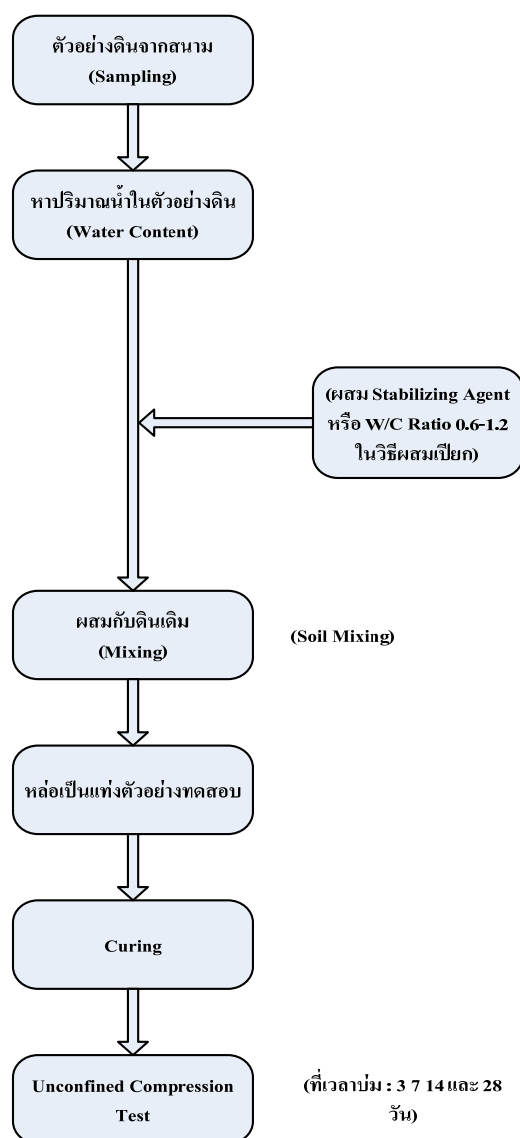
ชิดชัย และ วัฒนา (2545) สรุปว่าการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมปูนซีเมนต์สำหรับดินเหนียวแข็งและทรายปนดินเหนียว ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินผสมปูนซีเมนต์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการให้ค่าสูงกว่าค่าต่ำสุดจากในสนามประมาณ 3-4 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนหลังการปรับปรุงคุณภาพสำหรับทรายผสมดินเหนียว (SC, SM, SP-SM) ให้ค่าสูงกว่าดินเหนียว (CH, CL) ที่ปริมาณปูนและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เดียวกัน

Brom (1984) อธิบายว่า การใช้ปูนซีเมนต์ผสมในดินแถบ Southeast Asia จะมีความเหมาะสมมากกว่าใช้ปูนขาว เนื่องจากการเก็บ Unsoaked Lime ในที่ร้อนชื้นทำได้ยากและการใช้ปูนซีเมนต์จะให้ Strength ที่สูงกว่าปูนขาว ซึ่งปูนขาวมีข้อจำกัดในเรื่อง Maximum Strength

Saitoh *et al.* (1996) สรุปว่า ขนาดของตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางกับความสูงเท่ากับ 1:2 (60 mm * 120 mm, 150 mm * 300 mm and 400 mm * 800 mm) ขนาดของตัวอย่างทดสอบที่เส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 150 mm จะมีความแปรปรวนเกิดขึ้น

การทดสอบหาสัดส่วนปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบหาสัดส่วนปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวอย่างดินเดิมที่เจาะจากสนาม ตามขั้นตอนปฏิบัติดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แผนผังกระบวนการทดสอบหาสัดส่วนปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

ที่มา: คัดแปลงจาก Japan-Thailand Joint Study Project on Soft Clay Foundation (1998)

ตัวอย่างดินที่นำมาผสมเป็นดินเหนียวอ่อนที่ระดับความลึก 6-10 เมตร จะเป็นลักษณะตัวแทนของชั้นดินที่ความลึก 6 เมตร และที่ช่วงระดับความลึก 14-15 เมตร จะเป็นตัวแทนของชั้นดินที่ความลึก 15 เมตร การทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวผสมซีเมนต์เพื่อหาค่ารับแรงอัดโดยวิธีการทดสอบ Unconfined Compression Test ของดินเหนียวผสมซีเมนต์ตามอัตราส่วนของปริมาณปูนซีเมนต์ 220, 240, 260, 280 และ 300 กิโลกรัมต่อน้ำหนักของดินเปียก 1 ลูกบาศก์เมตร และอายุการบ่มที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งตัวอย่างในการทดสอบอย่างละ 3 แท่งตัวอย่าง มีรายละเอียดดังตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 7 ตัวอย่างแผนการทดสอบปริมาณตัวอย่างที่จะทำการผสมทดลอง

ความลึก (เมตร)	อายุ (วัน)	ปริมาณปูนซีเมนต์ผงที่ใช้ผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของดินเดิม)					จำนวน ตัวอย่าง
		220	240	260	280	300	
6.00	1	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
6.00	3	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
6.00	7	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
6.00	14	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
6.00	28	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
							75 ตัวอย่าง
15.00	1	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
15.00	3	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
15.00	7	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
15.00	14	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
15.00	28	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง	
							75 ตัวอย่าง
รวม							150 ตัวอย่าง

ที่มา: บริษัท เท็น คอนซัลแตนท์ จำกัด (2549)

การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

Gunther *et al.* (1979) พบว่า กระบวนการผสมของวัสดุที่มีคุณสมบัติของเนื้อวัสดุที่ต่างกัน โดยมีลักษณะที่มีความหนืดมากทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน มีสาเหตุมาจาก

1. กลไกการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคด้วยตัวเอง
2. แรงดึงดูดที่ผิวสัมผัสของอนุภาค
3. แรงดึงดูดที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของอนุภาคเม็ดละเอียด
4. ความชื้นระหว่างผิวของอนุภาค ทำให้เกิดเป็นแรงดึงผิวขึ้น

Gunther *et al.* (1983) พบว่า การแยกตัวของอนุภาคในกระบวนการผสมเกิดจากขนาด, ความหนาแน่น และรูปร่างของอนุภาค มีรายละเอียดดังนี้

1. วิธีการเคลื่อนตัวของอนุภาค เมื่อขนาดของอนุภาคต่างกันจะส่งผลถึงความเร็วที่แตกต่างกัน
2. การไหลซึมของของเหลวระหว่างอนุภาคเม็ดละเอียดเมื่อเกิดการเคลื่อนตัว
3. การเพิ่มขึ้นของอนุภาคเม็ดหยาบเมื่อเกิดการสั่นขึ้น

Porbaha (2002) อธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติดินที่จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติดิน ด้วยวิธีเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติดินที่จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยวิธีเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

ประเภท	ที่มา	รายละเอียด
1. วัสดุ	- ความแปรปรวนของสภาพชั้นดิน	- คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เช่น ลักษณะเม็ดดิน, ความหนาแน่นของดิน, ปริมาณความชื้นภายในดิน เป็นต้น - ลักษณะที่ตั้งของพื้นที่ เช่น ระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น
	- คุณสมบัติของสารผสมเพิ่มและการเพิ่มปริมาณน้ำ	- ชนิดของปูนซีเมนต์ - คุณภาพและสัดส่วนของสารผสมเพิ่ม - คุณภาพของน้ำ
2. การก่อสร้าง	- พารามิเตอร์ที่ใช้ผสม	- ความเร็วในการผสม - อัตราส่วนระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์
	- เทคนิคการก่อสร้าง	- ขนาดและรูปร่างของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ - ขั้นตอนการก่อสร้าง - ตำแหน่งของการฉีดปูนซีเมนต์ - ระยะเวลาที่เหมาะสมของการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่ชิดกัน
3. การควบคุมงาน	- การบ่มตัวอย่าง	- ลักษณะการเก็บตัวอย่าง เช่น แบบเปิด, แบบแห้ง - ขนาดของตัวอย่าง - ชนิดของหัวที่ใช้เก็บตัวอย่าง - เวลา, อุณหภูมิ และความชื้นที่ใช้ในการบ่มตัวอย่าง
	- วิธีการทดสอบ	- วิธทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น Unconfined Compression Test, Triaxial Test, Direct Shear Test - วิธีการทดสอบในสนาม เช่น Pull Out Test, Pile Load Test

Porbaha (2002) พบว่า ความเร็วรอบของหัวเจาะที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ มีผลต่อค่า Unconfined Compressive Strength ที่อายุของตัวอย่าง 7 วัน ความเร็วรอบในการหมุน 31 รอบต่อนาที ให้ค่า Unconfined Compressive Strength น้อยกว่าความเร็วรอบในการหมุน 40 รอบต่อนาที

โครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิมีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ 4 วิธีดังนี้

1. Low Pressure Mechanical Mixing เป็นการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Low Pressure Mechanical Mixing เป็นการก่อสร้างในโครงการระบายน้ำบริเวณสุวรรณภูมิ ส่วนที่ 1 มีบริษัท ไทยเทนน็อกซ์ จำกัด เป็นผู้ดำเนินการก่อสร้าง มีระยะทาง 5 กิโลเมตรและเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมด 101,000 ต้น

การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์วิธีนี้ จะฉีดสารเคมีซึ่งเป็นน้ำปูนซีเมนต์ลงไปผสมกับดิน และทำการตีความผสมเพื่อให้ดินและปูนซีเมนต์เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ใบมีดที่ใช้จะมีลักษณะเฉพาะ และขนาดช่องฉีดน้ำปูนที่เหมาะสม จะผสมตีความอยู่กับที่หลุมเจาะจึงไม่มีปัญหาการพังทลายหรือเสาเข็มดิน-ซีเมนต์มีรูปร่างผิดปกติ ขนาดของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะเท่ากับความกว้างของใบมีดตีความ การผสมซีเมนต์กับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้ความเข้มข้นเหมาะสมกับการทำงาน หากเข้มข้นเกินไปจะเกิดปัญหาอุดตันง่ายหรือเหลวเกินไปทำให้ได้กำลังต่ำ

2. Jet Grouting เป็นการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Jet Grouting เป็นการก่อสร้างในโครงการระบายน้ำบริเวณสุวรรณภูมิ ส่วนที่ 2 มีบริษัท ไพรอน จำกัด (มหาชน) เป็นผู้ดำเนินการก่อสร้าง มีระยะทาง 5 กิโลเมตรและเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมด 85,300 ต้น

การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์วิธีนี้จะใช้สารผสมในรูป Slurry พ่นด้วยแรงดันสูง ประมาณ 200-400 บาร์ ผ่านรูเล็กๆที่ปลายหัวเจาะพร้อมกับหมุนก้านเจาะเพื่อให้การผสมในรูป Slurry ผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อสารผสมที่เป็น Slurry ทำปฏิกิริยากับดินโดยรอบแล้วจะกลายเป็นแท่งเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

Takeda *et al.* (1998) อธิบายว่า การกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Jet Grouting จะขึ้นกับความชื้นและความเหนียวในมวลดินตามธรรมชาติ ณ ที่นั้น ดังนั้น การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางอาจคาดการณ์ได้จากการทดลองที่ผ่านมามีดังสรุปได้ดังตารางที่ 9

และค่ากำลังของดินที่ปรับปรุงแล้ว ที่ได้จากการทดสอบ Unconfined Compression Test สามารถที่จะสรุปโดยแบ่งตามลักษณะของดินดังตารางที่ 10

ตารางที่ 9 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ออกแบบตามลักษณะของดิน

Soil Type	Characteristic of Soil	Standard Diameter,(m)	Standard Time for Stabilization,(min/m)
Sandy Soil	$N < 5$	1.2 ± 0.1	3.0
	$5 \leq N \leq 10$	1.2 ± 0.1	3.0
Cohesive Soil	$C \leq 1 \text{ t/m}^2$ ($W > 100\%$)	1.2 ± 0.1	3.0
	$W = 60-150\%$ $C \leq 3 \text{ t/m}^2$	1.2 ± 0.1	3.0
Organic Soil	$C \leq 1 \text{ t/m}^2$ ($W > 500\%$)	1.2 ± 0.1	8.0
	$W = 150-1000\%$ $C \leq 3 \text{ t/m}^2$	1.2 ± 0.1	5.0

ที่มา: Takeda *et al.* (1998)

ตารางที่ 10 ค่า Unconfined Compressive Strength ที่ออกแบบตามลักษณะของดิน

Soil Type	Range of Design Strength,(kg/cm ²)
Sandy Soil	3.0-15.0
Cohesive Soil	2.0-10.0

ที่มา: Takeda *et al.* (1998)

เกษม (2541) สรุปว่า การกระจายของแรงดันน้ำในโพรง โดยวิธี Jet Grouting ที่ระดับความลึกเดียวกันจะลดลงตามระยะเวลา ที่ระดับความลึก 3 เมตร จะลดลงเร็วกว่าที่ระดับความลึก 6 เมตร และ 8 เมตร ตามลำดับ และแรงดันน้ำส่วนเกินที่ระดับความลึก 3 เมตร จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป 66 วัน

3. Modified Dry Mixing เป็นการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Modified Dry Mixing เป็นการก่อสร้างในโครงการคลองระบายน้ำบริเวณสุวรรณภูมิ ส่วนที่ 2 มีบริษัท ฟาสต์ แทรค เทคโนโลยี จำกัด และบริษัท LCTechnology จำกัด เป็นผู้ดำเนินการก่อสร้าง มีระยะทาง 5 กิโลเมตร และเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมด 20,000 ต้น

การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์วิธีนี้ จะมีการเพิ่มน้ำเข้าไปในมวลดินเพื่อปรับเปลี่ยนความชื้นที่มีอยู่ในมวลดิน, การเจาะผ่านชั้นดินแข็งทำได้ง่าย และทำให้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์มีเนื้อเดียวกัน โดยใช้ผงซีเมนต์และน้ำลงไปผสมกับชั้นดินที่ต้องการปรับปรุง นวดพ่นด้วยความดันประมาณ 5-6 บาร์ ซึ่งรูที่ปล่อยผงซีเมนต์และน้ำจะแยกออกจากกันเป็นการป้องกันการอุดตัน และผสมดีกวนให้เข้ากัน

Gunther *et al.* (2004) อธิบายว่า วิธี MDM เป็นการพัฒนามาจากวิธีของ Dry Mixing โดยที่เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่ใช้วิธี MDM สามารถก่อสร้างได้ในชั้นดินแข็งและชั้นทราย ซึ่งสามารถก่อสร้างได้รวดเร็วและลดค่าใช้จ่ายของโครงการ

4. High Pressure Mechanical Mixing เป็นการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี High Pressure Mechanical Mixing เป็นการก่อสร้างในโครงการระบายน้ำบริเวณสุวรรณภูมิ ส่วนที่ 3 มีบริษัท อีเทลไทย เทอร์วิ จำกัด เป็นผู้ดำเนินการก่อสร้าง มีระยะทาง 2.65 กิโลเมตรและเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมด 40,000 ต้น

การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์วิธีนี้ เป็นการนำเทคนิคการเจาะและการอัดฉีดน้ำปูนมาประยุกต์ใช้ โดยจะฉีดน้ำปูนซีเมนต์ลงไปผสมกับดินด้วยแรงดันตั้งแต่ 50-400 บาร์ตลอดเวลา และทำการตีกวนผสมเพื่อให้ดินและปูนซีเมนต์เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ซึ่งขนาดของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะเท่ากับความกว้างของใบมีดตีกวน

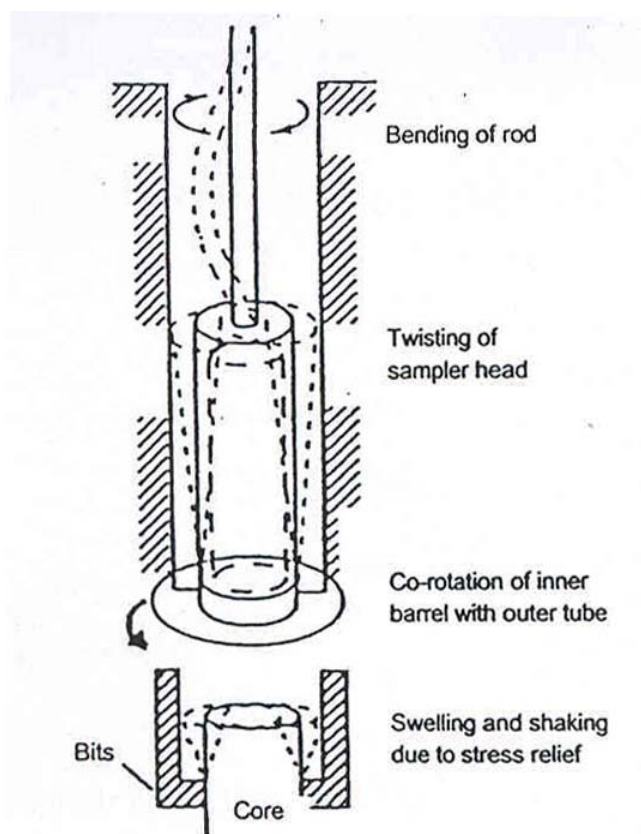
Field Trial Test

ก่อนจะเริ่มงานเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จำเป็นต้องมีการทดลองทำในแปลงทดสอบก่อน โดยทดลองทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ด้วยค่าตัวแปรที่แตกต่างกัน แล้วทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ออกแบบหรือไม่ ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำการก่อสร้างเสาเข็มใช้งานต่อไปมีรายละเอียดดังนี้

1. Coring & Unconfined Compression Test เป็นการเจาะเก็บแท่งตัวอย่างต่อเนื่องตลอดต้นของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ เมื่อเสาเข็มดิน-ซีเมนต์มีอายุประมาณ 7 วัน และจะต้องสามารถเจาะเก็บตัวอย่างได้ในลักษณะเป็นแท่งสมบูรณ์ โดยตัวอย่างที่สุ่มเลือกแต่ละท่อนจะต้องยาวไม่น้อยกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางในแต่ละช่วงของความลึก และไม่มีช่วงใดสูญหายไปตลอดความลึกของเสาเข็มเพื่อให้สามารถตรวจสอบความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุดิน-ซีเมนต์ได้ตลอดต้น ตัวอย่างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะถูกสุ่มเลือกจากทุกระยะ 1 เมตร ไปทดสอบหาค่า Unconfined Compressive Strength และ Unit Weight ที่ห้องทดสอบ และให้ห่อหุ้มแท่งตัวอย่างด้วย Plastic wrapping Sheet ทันทีที่เก็บตัวอย่างเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และให้เรียงแท่งตัวอย่างตามลำดับความลึกในกล่องเก็บตัวอย่าง

Porbaha (2002) อธิบายถึงลักษณะของตัวอย่างที่ได้จากการเก็บในสนาม (Core Sampling) ที่ส่งผลกระทบต่อกำลังของดินขึ้นกับรอยร้าวที่เกิดขึ้นในระหว่างเก็บตัวอย่าง, ความแข็งของตัวอย่าง และการหมุนของหัวเจาะเก็บตัวอย่าง ดังภาพที่ 16

ธีระชาติ (2541) สรุปว่าผลการทดสอบ Undrain Shear Strength โดยวิธี Unconfined Compression Test ที่อายุ 28 วัน ที่ระดับความลึกต่างๆ ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่ได้ทำการก่อสร้างของงานถนนสายบางนา-บางปะกง ตอน 1-4 โดยก่อสร้างแบบ Wet Mixing Process ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 150 กก./ม³ จะเห็นได้ว่าค่า Undrain Shear Strength ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะแปรเปลี่ยนในช่วง 30-60 ตัน/ม² โดยส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 30-40 ตัน/ม²



ภาพที่ 16 ผลกระทบที่เกิดจากการเก็บตัวอย่าง

ที่มา: Porbaha (2002)

จอม (2543) สรุปว่า โครงการก่อสร้างทางหลวงบางนา-ชลบุรี ตอน 3 กม.28+000 – กม. 34+500 ดำเนินการโดยบริษัท อุบลสหธรรม จำกัด ได้ทำการ Coring ตัวอย่างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จากต้นท่ดลอง ซึ่งก่อสร้างโดยใช้วิธีผสมเปียก ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 150 กก./ม³ แล้วทำการหาค่า Undrained Shear Strength (S_u) โดยวิธี Unconfined Compressive Strength ได้ผลที่อายุ 28 วัน พบว่า S_u มีค่ามากกว่า 300 กิโลปาสกาล ทุกความลึกเป็นเมตร ส่วนตอน 6 กม.50+200 – กม.56+855 บริษัท เพชรสยาม จำกัด ได้ทำการ Coring ตัวอย่างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จากต้นท่ดลอง ซึ่งก่อสร้างโดยใช้วิธีผสมแห้ง ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 175 กก./ม³ แล้วทำการหาค่า Undrained Shear Strength (S_u) โดยวิธี Unconfined Compressive Strength ได้ผลที่อายุ 28 วัน พบว่า S_u มีค่ามากกว่า 300 กิโลปาสกาล ทุกความลึกเป็นเมตร จะเห็นได้ว่าเสาเข็มดิน-ซีเมนต์วิธีผสมเปียกจะให้ค่า S_u สูงกว่าวิธีผสมแห้ง แม้ว่าจะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า หมายถึงสารผสมในวิธีผสมเปียก สามารถผสมกับดินเดิมทั่วถึงตลอดหน้าตัดได้ดีกว่าวิธีผสมแห้ง

2. Pull Out Test เป็นการทดสอบดึง-ถอนเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ จะกระทำเพื่อคุณลักษณะของเสาเข็มนั้นอยู่ในสภาพเรียบร้อยมีขนาดและเนื้อวัสดุสม่ำเสมอหรือไม่ การทดสอบนี้จะกระทำเมื่อเสาเข็มอายุไม่น้อยกว่า 14 วัน โดยใช้ปลอกเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 ซม. กดรอบเสาเข็มไว้ภายใน แล้วดึงปิดกลไกที่ปลายปลอกเหล็ก หลังจากนั้นจะสามารถยกถอนเสาเข็มขึ้นมาได้โดยง่ายด้วยรถเครน ในกรณีที่ดึง-ถอนเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แล้วพบว่าส่วนใดของลำต้นคอดเล็ก โดยมีความยาวของเส้นรอบรูปเมื่อเทียบกับความยาวของเส้นรอบรูปที่ออกแบบไว้แล้วสั้นเกินกว่า 15% หรือยาวเกินกว่า 20% จากแบบเป้าหมาย ให้ปรับปรุงกรรมวิธีในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ใหม่จนกว่าจะได้ขนาดเสาเข็มสม่ำเสมอตามที่กำหนด จึงจะอนุญาตให้นำวิธีการก่อสร้างไปใช้กับงานจริงได้ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การทดสอบดึง-ถอนเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

Seah (1998) ใช้วิธีการ Coring ในการตรวจสอบโครงการวงแหวนรอบนอก บริเวณถนนสุขาภิบาล 3 ซึ่งใช้หัวเจาะมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร โดยการเจาะทดสอบแนะนำให้ทำการเจาะที่บริเวณ 15 เซนติเมตร จากจุดศูนย์กลางของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ และในการเจาะควรระวังไม่ให้มีการหนีศูนย์กลางมากนัก เนื่องจากอาจทะลุออกไปด้านข้างของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ และไม่ควร Coring ตรงศูนย์กลางของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุที่กึ่งกลางเป็นตำแหน่ง

เดียวกันกับก้านเจาะปริมาณปูนซีเมนต์จะมีส่วนผสมน้อยกว่าตำแหน่งอื่น ซึ่งไม่สามารถใช้เป็นตัวอย่างของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมดได้

จอม (2543) สรุปว่า โครงการก่อสร้างทางหลวงบางนา-ชลบุรี กม.48+500 บริษัท ก่อสร้างสหพันธ์ จำกัด ได้ทำการทดสอบดัดโค้งตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.60 เมตร โดยการกด Casing ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.9 เมตร ที่ปลายมีบานเปิด-ปิดสำหรับเป็นบารองรับแท่งเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ผลการตรวจสอบเป็นไปตามข้อกำหนด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ หน่วยประมวลผลรุ่น Intel Core Duo processor T2300E พร้อมอุปกรณ์ต่อพ่วงที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Window XP
2. โปรแกรม MS Office XP ใช้สำหรับเก็บข้อมูล พล็อตกราฟ และพิมพ์งานต่างๆ
3. โปรแกรม ArcView GIS Version 3.1 ใช้สำหรับการจัดทำระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์
4. โปรแกรม Surfer 7.0 ใช้สำหรับสร้างเส้นชั้นความสูง (Contour)
5. โปรแกรม Minitab 14 เพื่อวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ (Regression and Correlation Analysis)

วิธีการ

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยจะเริ่มขึ้นจากการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่จะนำมาใช้ในการวิจัย จากนั้นจะนำข้อมูลมาจัดทำระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ใน ArcView GIS Version 3.1 ขั้นตอนต่อมาจะทำการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลจากระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ที่จัดทำขึ้น ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้ดังภาพที่ 18

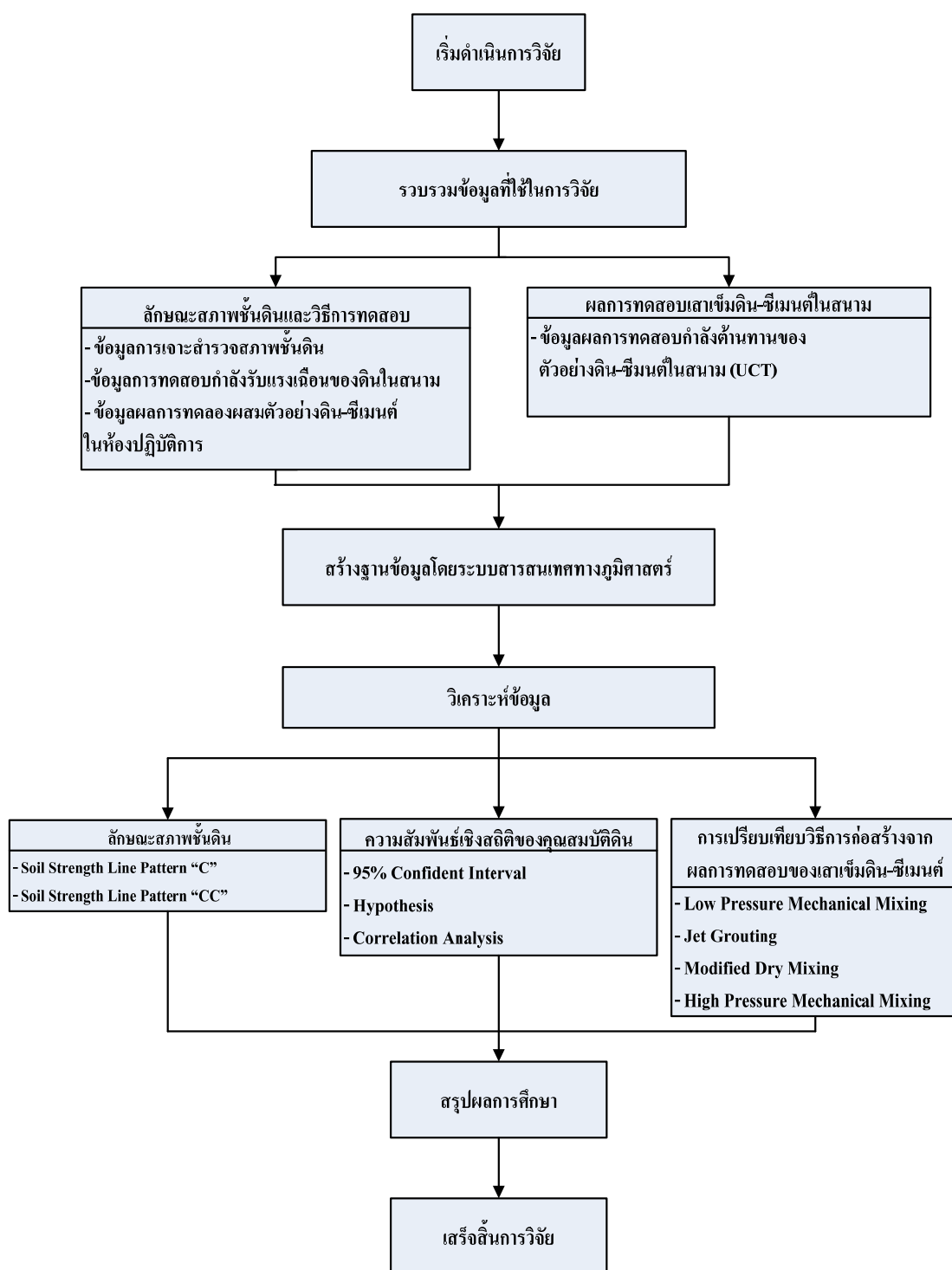
1. การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้เป็นข้อมูลที่อยู่ในพื้นที่โครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ส่วนที่ 1-3 และบริเวณข้างเคียง ซึ่งจำนวนข้อมูลและตำแหน่งข้อมูลแสดงได้แสดงดังตารางที่ 11 และภาพที่ 19

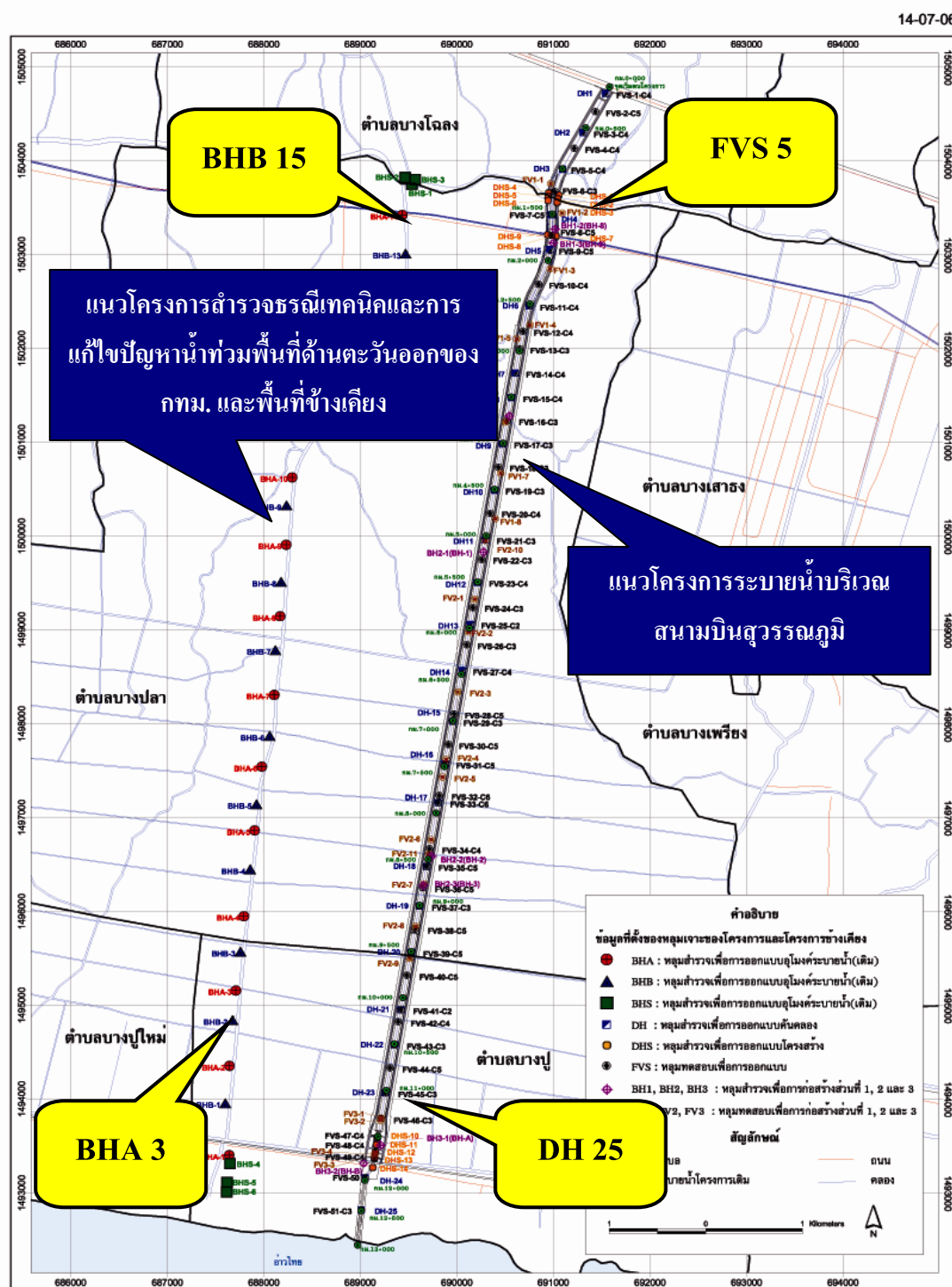
ตารางที่ 11 จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

โครงการ	จำนวนข้อมูล		
	การเจาะ	การทดสอบ	เสาเข็ม
	สำรวจ	แรงเฉือนของ	ดิน-ซีเมนต์
		ดินในสนาม	
ระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ส่วนที่ 1	3	8	51
ระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ส่วนที่ 2	3	11	58
ระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ส่วนที่ 3	2	4	58
สำรวจธรณีเทคนิคและการแก้ไขปัญหาทั่ว พื้นที่ด้านตะวันออกของ กทม.และพื้นที่ข้างเคียง	42	-	-
ปรับปรุงสภาพลำน้ำพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา ตอนล่างฝั่งตะวันออก (ส่วนการออกแบบ)	-	51	-
รวม	50	74	167

เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยได้มาจากหลายโครงการ และมีวัตถุประสงค์ของการเจาะสำรวจแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีข้อมูลที่เชื่อถือได้ และมีความผิดปกติจากความเป็นจริง ดังนั้นก่อนที่จะเก็บข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์จึงต้องเลือกข้อมูลและการตรวจสอบข้อมูลที่มีความถูกต้อง ซึ่งหลักเกณฑ์ในการคัดเลือกข้อมูลอาศัยความเป็นไปได้ของคุณสมบัติต่างๆ และค่าประมาณจากการวิจัยในอดีต จากวัตถุประสงค์ของการเจาะสำรวจดินที่แตกต่างกันทำให้การทดสอบหาคุณสมบัติของดินไม่ได้ทำทุกค่า ซึ่งแตกต่างกันตามสถานที่ที่ทำการสำรวจ ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงนำคุณสมบัติของดินบางตัวที่มีความสำคัญและมีจำนวนข้อมูลการเจาะสำรวจที่มากพอมาทำการวิเคราะห์



ภาพที่ 18 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 19 ตำแหน่งข้อมูลดินที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

2. การจัดทำระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

การวิจัยนี้ได้นำโปรแกรม ArcView GIS Version 3.1 มาประยุกต์ใช้ในการจัดทำระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ เพื่อเก็บข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน รวมถึงข้อมูลหลุมเจาะทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินในสนามจาก Field Vane Shear Test และข้อมูลหลุมเจาะการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ซึ่งโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิมีการปรับปรุงคุณภาพดินฐานราก โดยใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมด 4 วิธี สรุปดังตารางที่ 12 ซึ่งมีรายละเอียดของการวิจัยดังนี้

ตารางที่ 12 จำนวนข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินของการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

Section	Method	Total
1	Low Pressure Mechanical Mixing	51
2	Low Pressure Mechanical Mixing	33
2	Jet Grouting	15
2	Modified Dry Mixing	10
3	High Pressure Mechanical Mixing	58
Total		167

2.1 รวบรวมพารามิเตอร์ที่จะทำการป้อนลงในระบบฐานข้อมูล สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ ชั้นดินฐานราก และเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.1 ชั้นดินฐานราก ลักษณะข้อมูลที่ป้อนลงในระบบฐานข้อมูลแบ่งออกเป็น ลักษณะรูปแบบของชั้นดิน เป็นข้อมูลที่มีการรวบรวมจากการเจาะสำรวจชั้นดินจำนวน 82 หลุมเจาะในพื้นที่โครงการระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ และคุณสมบัติของชั้นดินที่ใช้ป้อนลงในระบบฐานข้อมูล จะใช้ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) และคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineer Properties) โดยที่คุณสมบัติที่สำคัญในการวิเคราะห์จะสรุปมาจากข้อมูลที่มีการรวบรวมจากการสำรวจชั้นดินและจากการทดสอบในสนามในพื้นที่โครงการคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือน (S_u) ค่า Modulus of Elasticity (E), ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (Unit Weight), ความชื้นในมวลดิน (Water Content) เป็นต้น

2.1.2 เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ลักษณะข้อมูลที่ป้อนลงในระบบฐานข้อมูลจะเป็นคุณสมบัติของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือน (S_u), Strain at Failure, ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (Unit Weight), ความชื้นในมวลดิน (Water Content) เป็นต้น โดยข้อมูลที่ใช้จะมาจากงานก่อสร้างจริงที่เกิดขึ้นในพื้นที่โครงการระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ

2.2 แปลงข้อมูลชั้นดินฐานรากและเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ จาก Microsoft Excel เข้าสู่ ArcView 3.1 จากนั้นจึงสร้างตำแหน่งของหลุมเจาะเป็น layer หนึ่งในแผนที่ เพื่อใช้ในการแสดงค้นหา และประมวลผลข้อมูล เสริมกับการใช้ SQL เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.3 นำเอาข้อมูลในระบบจัดการฐานข้อมูลที่ต้องการมาประมวลผล เพื่อนำมาสร้างเส้นชั้นความสูง (Contour) ของคุณสมบัติต่างๆของดินตามแนวของหลุมเจาะ โดยขั้นตอนนี้ต้องใช้โปรแกรม Surfer 7.0 มาช่วยในการทำเส้นชั้นความสูง

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำเอาข้อมูลที่ได้ประมวลผลแล้ว มาทำการวิเคราะห์ โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้จำแนกการวิเคราะห์ออกได้ดังนี้

3.1 ลักษณะสภาพชั้นดิน: เป็นการพิจารณาเพื่อให้ทราบถึงการจัดเรียงตัวของชั้นดินและเป็นข้อมูลประกอบการปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยการจำแนกชนิดของดินและการแบ่งชั้นดิน ซึ่งมีลักษณะการจำแนกชนิดของดินอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของดิน เป็นคุณสมบัติที่มองเห็น แจกแจงได้ด้วยตาเปล่า หรืออาจใช้เครื่องมืออย่างง่ายในการทดสอบ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน, หน่วยน้ำหนักรวมและลักษณะการกระจายของเม็ดดิน โดยข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์นี้ได้มีการจำแนกชนิดของดินในระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ส่วนการแบ่งชั้นดินอาศัยการพิจารณาจากชนิดของดิน และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ โดยเฉพาะสำหรับดินเหนียว ได้แก่ คุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) และ ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกของชั้นดินเป็นตัวกำหนดชั้นดิน และจากข้อมูลผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนาม (Field Vane Shear Test) เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก สามารถเห็นแนวโน้มคุณลักษณะดินเหนียวอ่อนในบริเวณ

โครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความแข็งแรงของชั้นดินตามแนวก่อสร้างของโครงการฯ เรียกว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก (Soil Strength line Pattern “C”) โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1.1 รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินในสนามจาก Field Vane Shear Test รวมข้อมูลทั้งสิ้น 74 หลุม โดยอยู่ในเขตอำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ (เป็นผลจากโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิจำนวน 23 หลุม และโครงการปรับปรุงสภาพลำนน้ำพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาดอนล่างฝั่งตะวันออกจำนวน 51 หลุม)

3.1.2 นำข้อมูลหลุมเจาะทั้งหมดที่ได้จากข้อ 1. มาปรับแก้ค่า Vane Shear Strength โดยวิธีของ Bjerrum, (1972) พร้อมทั้งสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก พร้อมทั้งสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนเฉลี่ยของดินและความลึก ของ Field Vane Shear Test ทำให้เห็นแนวโน้มคุณลักษณะของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ได้

3.1.3 นำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก มาปรับความลาดเอียง และความลึกของดินชั้น Weathered Crust, Soft Clay และ Medium Clay โดยทำการปรับความลาดเอียงของเส้นกราฟในชั้น Weathered Crust มีมุมเริ่มต้นเท่ากับ 18° กับผิวดิน พร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเส้น Soil Strength Line โดยแบ่งซอยออกเป็นช่วงเท่าๆ กัน คือ 0.3 t/m² ดินชั้น Soft Clay ลักษณะความลาดเอียงของเส้นกราฟขึ้นกับค่าของ Strength Ratio ส่วนดินชั้น Medium Clay ทำการปรับความลาดเอียงของเส้นกราฟมีมุมเริ่มต้นเท่ากับ 47° กับผิวดิน พร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเส้น Soil Strength Line โดยแบ่งซอยออกเป็นช่วงเท่าๆ กัน คือ 0.4 t/m²

3.1.4 ทำการทดสอบ Representative โดยการนำค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึกของดินแต่ละหลุมมา Plot ลงใน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก หากเข้าแนวของเส้น Soil Strength Line เส้นใดเส้นหนึ่งถือว่าใช้ได้

3.2 ความสัมพันธ์เชิงสถิติของคุณสมบัติดิน: เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) และคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties) โดยการบันทึกข้อมูลแยกตามโครงการและวิธีการทดสอบให้อยู่ในรูปของไฟล์ Excel ซึ่งระหว่างการบันทึกข้อมูลต้องพิจารณาข้อมูลที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้เพื่อให้ผลการวิเคราะห์

ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab โดยมีรายละเอียดของการวิจัยดังนี้ 14

3.2.1 รวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน และผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินในสนามจาก Field Vane Shear Test ทั้งหมด 124 หลุม โดยแยกตามโครงการต่างๆ ให้อยู่ในรูปของไฟล์ Excel เพื่อสะดวกในการนำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์และเชื่อมต่อกับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

3.2.2 วิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ โดยอาศัยหลักสถิติพื้นฐานซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ของดินมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดความลึกของชั้นดิน ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของชั้น Weathered Crust (1.00-3.00 เมตร โดยประมาณ) และชั้น Soft Clay (3.00-14.00 เมตร โดยประมาณ) ในบริเวณโครงการฯ เมื่อเทียบกับความลึก ตลอดจนวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่า 95% Confident Interval on Mean

3.2.3 วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ของชั้นดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ โดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร ทำได้โดยการพล็อตแผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram) แล้วพิจารณาลักษณะแนวโน้มของความสัมพันธ์ว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือไม่ ถ้าไม่ทราบลักษณะที่แน่นอนให้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆ แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, r^2) ถ้ารูปแบบความสัมพันธ์ใดมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายใกล้เคียงกับเส้นความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้มากกว่า

3.3 การเปรียบเทียบวิธีการทดสอบในสนามของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์: ในขั้นตอนนี้เป็น การเปรียบเทียบวิธีการทดสอบในสนามของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ภายในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ที่มีการปรับปรุงดินฐานรากโดยใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ทั้งหมด 4 วิธี คือ 1.Low Pressure Mechanical Mixing 2. Jet Grouting 3.Modified dry Mixing 4. High Pressure Mechanical Mixing รายละเอียดดังภาคผนวก ก โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม Surfer 7.0

เป็นหลักในการเปรียบเทียบในแต่ละวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ซึ่งมีรายละเอียดของการวิจัยดังนี้

3.3.1 รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบกำลังแรงต้านทานของตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ทั้งหมด 4 วิธีต่างๆ ให้อยู่ในรูปของไฟล์ Excel และเชื่อมต่อกับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

3.3.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่สำคัญ เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือน (S_u), ค่า Modulus of Elasticity (E), ค่า Strain at Failure, ความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Surfer 7.0 ในการสร้างเส้นชั้นความสูง (Contour)

3.3.3 เปรียบเทียบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) และดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index) ในแต่ละวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

ผลการวิเคราะห์

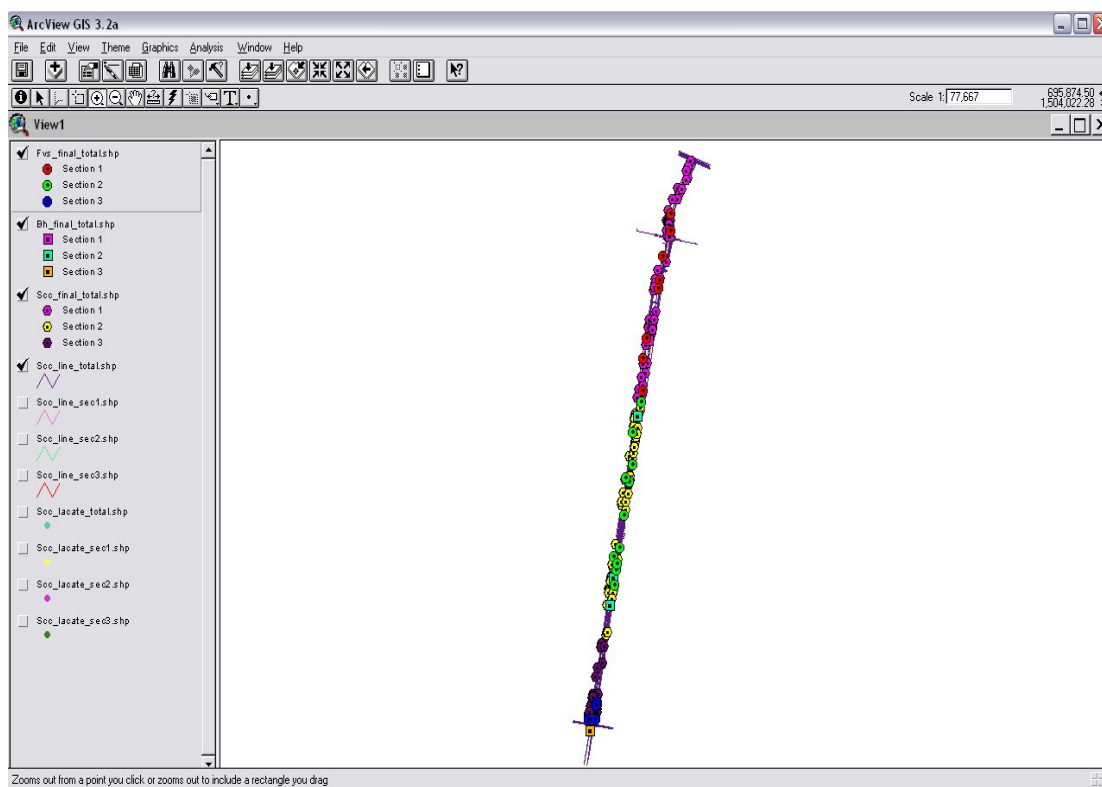
ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำข้อมูลผลการทดสอบจาก โครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ มาจัดทำระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการค้นหา แสดง และวิเคราะห์ข้อมูล โดยรายละเอียดของการสร้างข้อมูลด้วยโปรแกรม ArcView 3.1 จะแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลจะประกอบด้วย ลักษณะสภาพชั้นดิน ความสัมพันธ์เชิงสถิติของคุณสมบัติดิน และการเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างจากผลการทดสอบของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ซึ่งผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

1. ฐานข้อมูลโดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

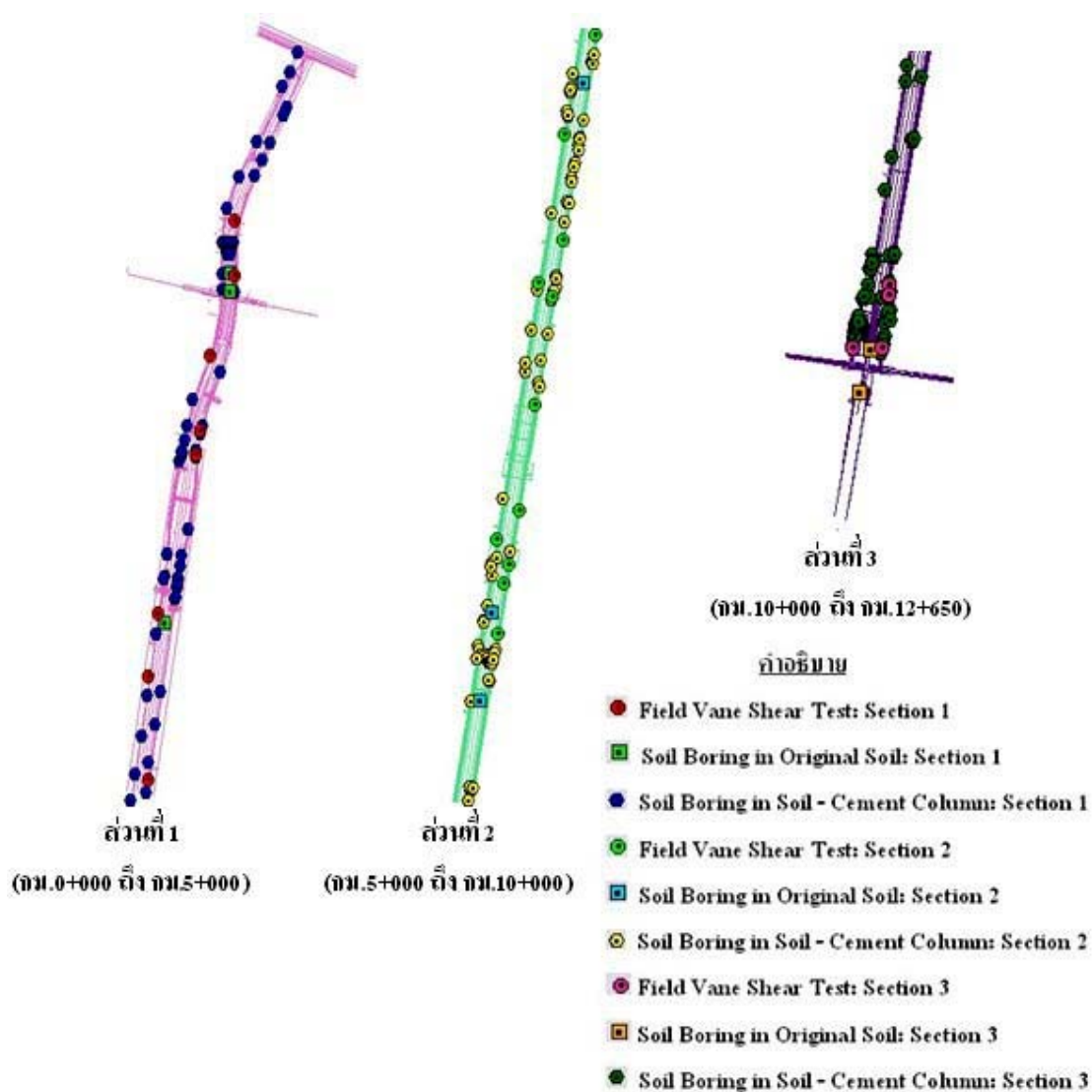
การประยุกต์ใช้ฐานข้อมูลร่วมกับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ เป็นการรวบรวมข้อมูลภายในระบบฐานข้อมูลของผลการทดสอบจากโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ แบ่งเป็นข้อมูลผลการเจาะสำรวจชั้นดิน จำนวน 8 หลุม ข้อมูลผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนาม จำนวน 23 หลุม และข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ จำนวน 167 หลุม โดยตำแหน่งของหลุมเจาะแสดงดังภาพที่ 20 และมีรายละเอียดแยกตามโครงการฯ ส่วนที่ 1-3 แสดงในภาพที่ 21 ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะของข้อมูลที่จัดเก็บในระบบฐานข้อมูลได้ 2 รูปแบบ ดังนี้

1.1 ข้อมูลทั่วไป: เป็นการนำเสนอข้อมูลที่อธิบายถึงคุณลักษณะเฉพาะของหลุมทดสอบแต่ละหลุม ดังภาพที่ 22 ซึ่งผลการวิเคราะห์ประกอบด้วยข้อมูลดังนี้

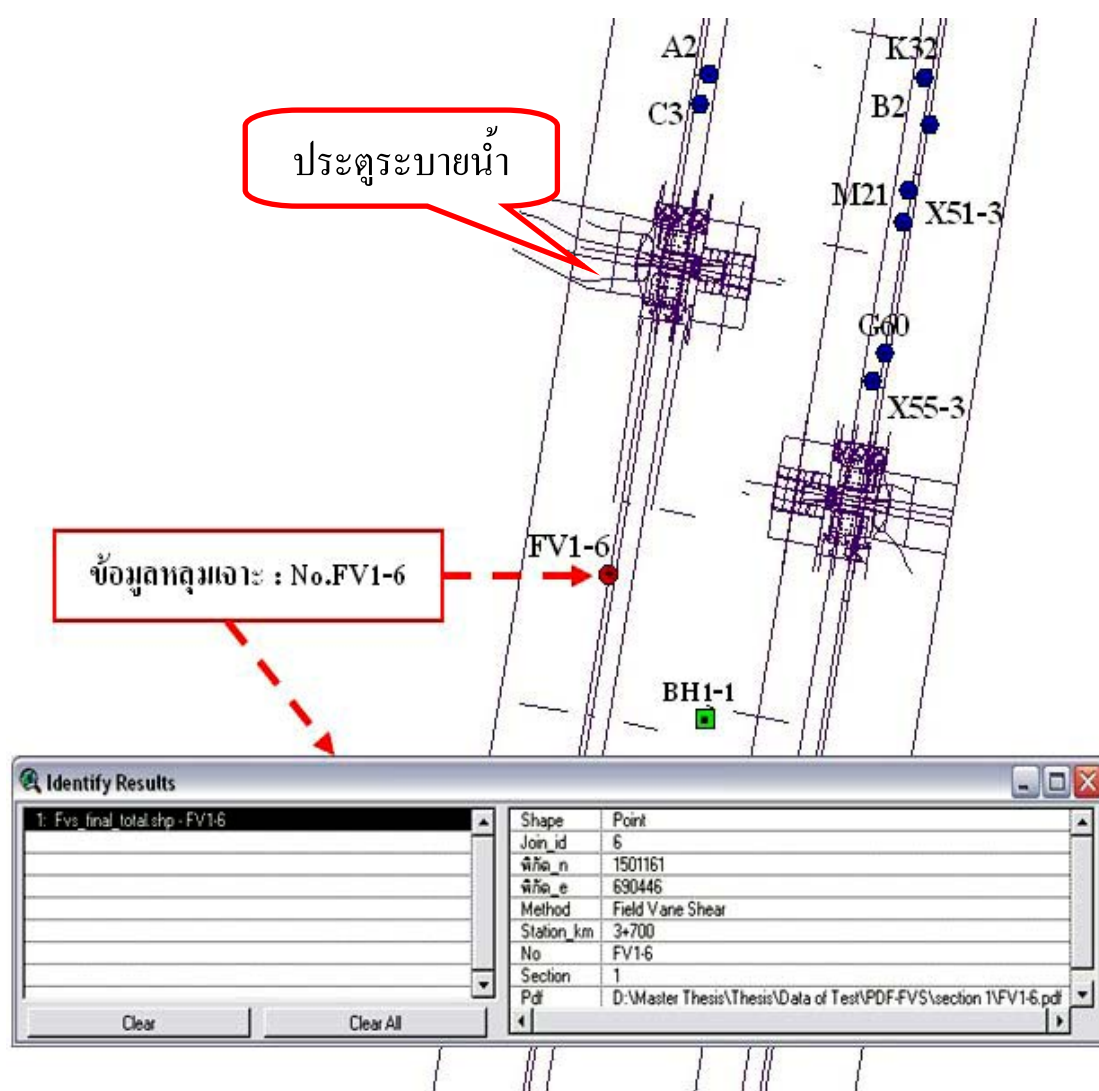
- Shape	การบอกลักษณะของการเก็บข้อมูล
- Join_id	ลำดับข้อมูลหลุมเจาะ
- พิกัด_n	พิกัดภูมิศาสตร์ของหลุมทดสอบ ในด้าน ละติจูด
- พิกัด_e	พิกัดภูมิศาสตร์ของหลุมทดสอบ ในด้าน ลองจิจูด
- Method	วิธีการก่อสร้าง
- Station_km	ระยะทางจากจุดเริ่มต้นถึงตำแหน่งหลุมทดสอบ
- No	ชื่อของหลุมทดสอบ
- Section	สัญญาของโครงการ
- Pdf	รายละเอียดของไฟล์ที่เก็บข้อมูลผลการทดสอบ



ภาพที่ 20 แสดงตำแหน่งของหลุมเจาะที่ได้บันทึกลงในระบบฐานข้อมูลโครงการระบายน้ำบริเวณ
สนามบินสุวรรณภูมิ



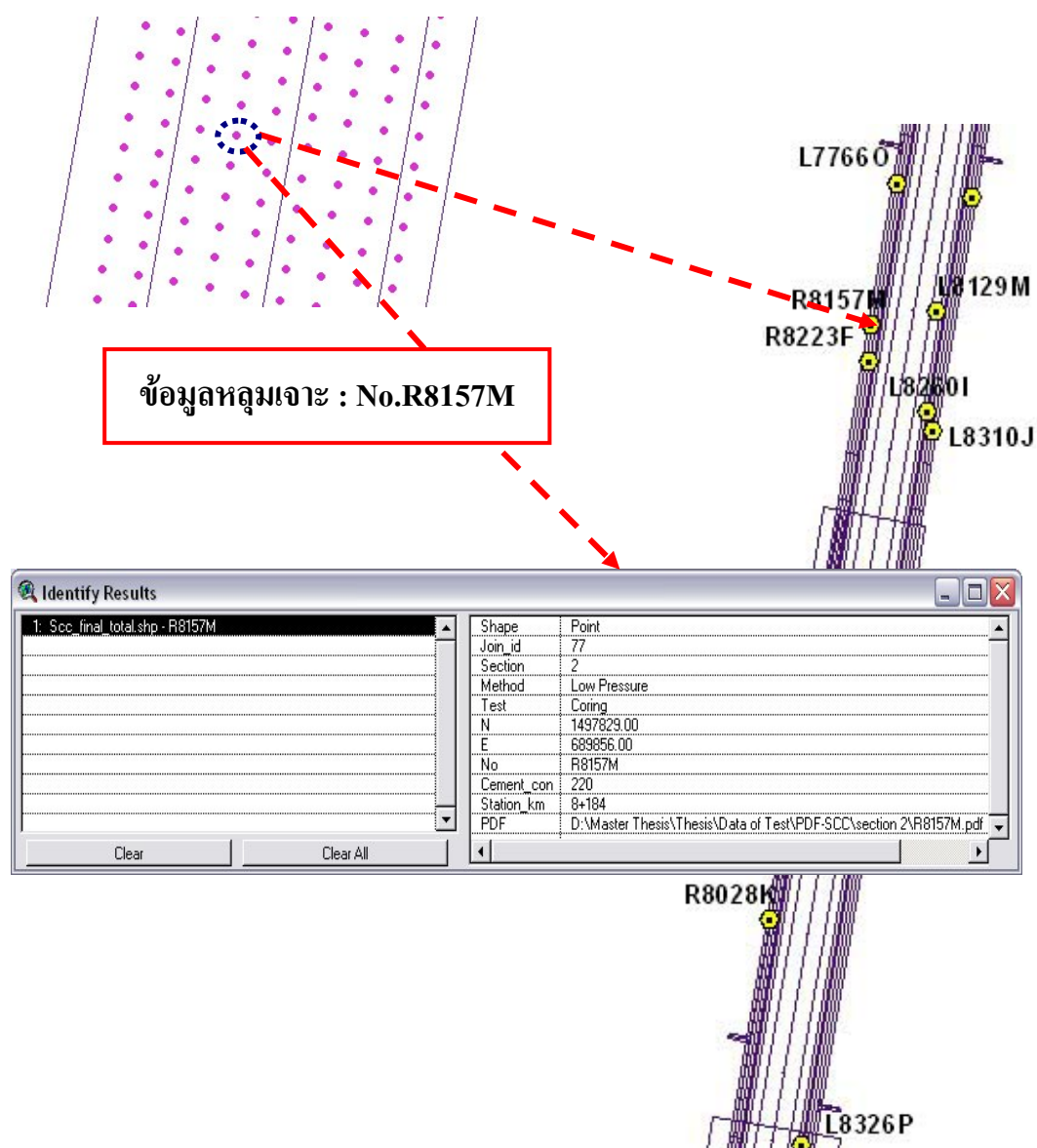
ภาพที่ 21 แสดงหลุมเจาะสำรวจชั้นดินรวมถึงผลการทดสอบที่ได้จากภาคสนามและจากการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ของโครงการฯ ส่วนที่ 1 - 3



ภาพที่ 22 แสดงรายละเอียดข้อมูลหลุมเจาะ แบบข้อมูลทั่วไป

1.2 ข้อมูลทางวิศวกรรม: เป็นการนำเสนอข้อมูลที่อธิบายถึงรายละเอียดผลการทดสอบของหลุมทดสอบแต่ละหลุม ดังภาพที่ 23 ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลจะแตกต่างกันในแต่ละวิธีการทดสอบ

การเก็บข้อมูลโดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) เป็นการรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบการก่อสร้างภายในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ที่มีจำนวนเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมดประมาณ 246,300 ต้น ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยใช้แผนที่และพิกัดมาประยุกต์รวมกับข้อมูลผลการทดสอบ ทำให้สามารถรวบรวมและนำเสนอข้อมูลทั้งหมดเกี่ยวกับการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ได้อย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ตัวอย่างแสดงผังเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

การสร้างฐานข้อมูลโดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบภายในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ประกอบด้วย ข้อมูลผลการเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน ข้อมูลผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนาม และข้อมูลผลการทดสอบตัวอย่างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนาม โดยนำข้อมูลเข้าไปใส่ในพื้นที่ที่ต้องการ ซึ่งจะสะดวกในการเก็บรวบรวม และจัดการข้อมูล สามารถสืบค้นและนำเสนอได้รวดเร็ว ช่วยในการตัดสินใจในการควบคุมงาน ทั้งยังแสดงภาพรวมของโครงการได้เป็นอย่างดี ซึ่งข้อมูลดังกล่าวยังนำไปสู่การวิจัยในลำดับต่อไป

2. ลักษณะสภาพชั้นดิน

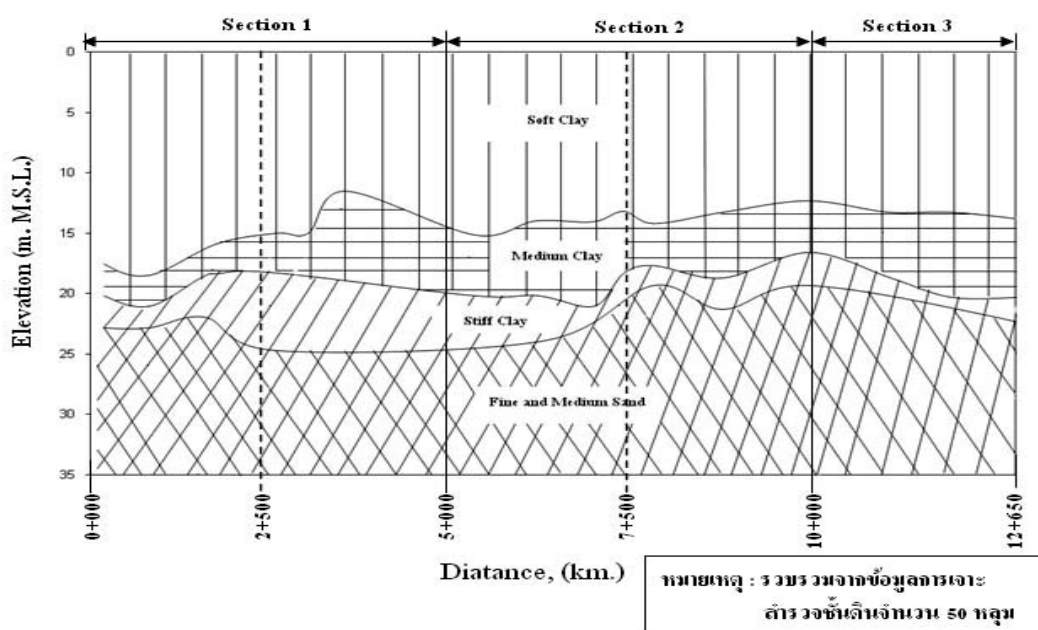
จากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจสามารถเขียนรูปตัดของชั้นดินภายในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิดังภาพที่ 25 ซึ่งมีความลึกหลุมเจาะสำรวจประมาณ 35 เมตร โดยกำหนดให้ระดับที่ผิวดินเท่ากับ 0.00 เมตร (ร.ท.ก.) รายละเอียดของชั้นดินเรียงลำดับจากผิวดินได้ดังนี้คือ

ชั้นแรก: ช่วงระดับ 0.00 เมตร (ร.ท.ก.) ลึกลงไปถึงระดับ -15.00 เมตร (ร.ท.ก.) เป็นชั้นดินเหนียวปนตะกอน ความเหนียวสูง (CH) ซึ่งบริเวณผิวดินส่วนใหญ่จะเป็นบ่อเลี้ยงปลา ส่งผลให้ชั้น Weathered Crust มีความแปรปรวนของความลึกในหลายระดับ

ชั้นที่ 2: ช่วงระดับ -15.00 เมตร (ร.ท.ก.) ลึกลงไปถึงระดับ -20.00 เมตร (ร.ท.ก.) เป็นชั้นดินเหนียวปนตะกอนความเหนียวต่ำ (CL) ลักษณะการวางตัวของชั้นดินจะตื้นขึ้นจากคันคลองระบายน้ำ (กม.1+000 ถึง กม.4+000) ไปยังปลายคลอง (กม.11+000 ถึง กม.12+650) สภาพปานกลางถึงแข็งมาก (Medium to Very Stiff)

ชั้นที่ 3: ช่วงระดับ -20.00 เมตร (ร.ท.ก.) ลึกลงไปถึงระดับ -25.00 เมตร (ร.ท.ก.) เป็นชั้นทรายปนดินเหนียว (SC) โดยบางแห่งวางตัวแทรกอยู่ในชั้นดินเหนียว สภาพปานกลางถึงแน่นมาก (Medium to Very Dense)

ชั้นที่ 4: ระดับ -25.00 เมตร (ร.ท.ก.) ลงไปโดยที่ช่วงเริ่มต้นคลองระบายน้ำชั้นดินนี้จะอยู่ลึกกว่าช่วงปลายคลอง (กม.9+000 ถึง กม.12+650) เป็นชั้นดินเหนียวปนตะกอน (CL) สภาพแข็งมากถึงแข็งที่สุด (Very Stiff to Hard)



ภาพที่ 25 รูปตัดของชั้นดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ

ข้อมูลผลการเจาะสำรวจชั้นดินและผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนาม ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ เป็นข้อมูลจากโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิและโครงการสำรวจธรณีเทคนิคและการแก้ไขปัญหาพื้นที่ด้านตะวันออกของกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นโครงการที่อยู่บริเวณข้างเคียง จึงทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลทางสถิติทั้ง 2 โครงการสรุปดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 สรุปความสัมพันธ์ของข้อมูลทางสถิติทั้ง 2 โครงการ

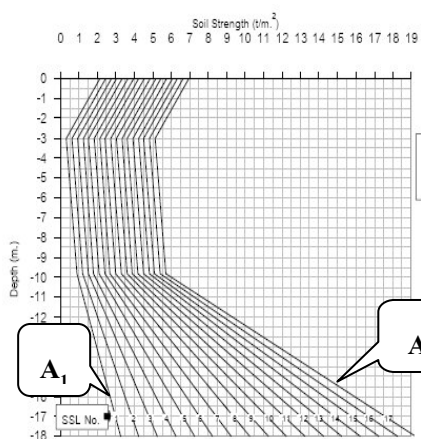
สถานที่	ค่าทางสถิติ	Natural Water Content, (%)	Undrained Shear Strength, (t/m ²)	Total Unit Weight, (t/m ³)
1. โครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ	Mean	59.80	2.10	1.69
	SD	34.14	2.21	0.22
2. โครงการสำรวจธรณีเทคนิค	Mean	54.27	2.27	1.65
	SD	26.33	1.90	0.19

จากความสัมพันธ์ของข้อมูลทางสถิติทั้ง 2 โครงการพบว่า ค่าทางสถิติ (Mean, SD) ของ Natural Water Content, Undrained Shear Strength และ Total Unit Weight มีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กัน จึงนำข้อมูลผลการทดสอบมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้ข้อมูลมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

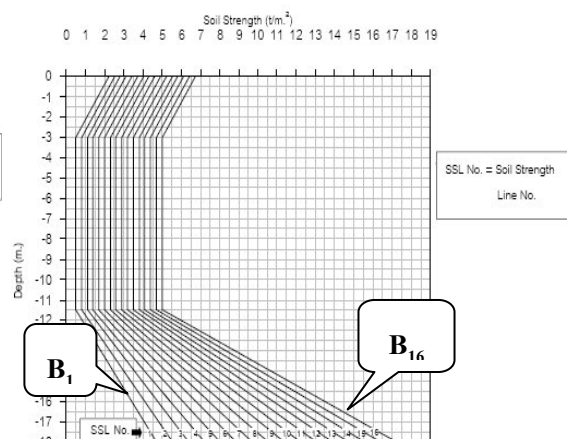
3. Soil Strength Lines

ความแข็งแรงของชั้นดินสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก พัฒนาจากวิทยานิพนธ์เรื่องแผนภูมิสำหรับการออกแบบความสูงคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร (มณฑา, 2546) โดยนำข้อมูลค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจาก Field Vane Shear Test มาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1. Pattern “A” แบ่งเส้น Soil Strength Line ได้ทั้งหมด 17 เส้น และมีระยะห่างของแต่ละเส้นเท่ากับ 0.30 t/m^2 ดังภาพที่ 26(a). รูปแบบที่ 2. Pattern “B” แบ่งเส้น Soil Strength Line ได้ทั้งหมด 16 เส้น และมีระยะห่างของแต่ละเส้นเท่ากับ 0.30 t/m^2 ดังภาพที่ 26(b).

แต่การวิเคราะห์ครั้งนี้ลักษณะข้อมูลดินที่นำมาใช้แตกต่างจาก 2 รูปแบบดังกล่าว จึงเสนอกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ โดยใช้ข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินในสนาม (Field Vane Shear Test) รวมข้อมูลทั้งสิ้น 74 หลุม ดังภาพที่ 27 แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกตลอดจนแสดงขอบเขตบนและขอบเขตล่างของข้อมูลพร้อมทั้งค่าเฉลี่ยในชั้นของ Soft Clay ทำให้สามารถเห็นแนวโน้มคุณลักษณะของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ได้ ซึ่งกราฟมีลักษณะเอียงโดยเริ่มจากศูนย์และค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกดังภาพที่ 28 ซึ่งตรงกับทฤษฎีของ SHANSEP (Ladd and Foott, 1974) ว่า ค่ากำลังของดินเหนียว (S_u) จะเป็นสัดส่วนกับค่า σ'_{vo} เมื่อดินเหนียวเกิดการตกตะกอนทับถมกันเป็นชั้นๆ ในระยะเวลานานและเกิดการทรุดตัวภายใต้น้ำหนักกดทับของตัวเอง ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเรียกกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก ว่า Soil Strength Line Pattern “C” (SSL“C”) เป็นกราฟที่ไม่มีชั้น Weathered Crust และ Soil Strength Line Pattern “CC” (SSL“CC”) เป็นกราฟที่มีชั้น Weathered Crust ดังภาพที่ 29 และ 30 ตามลำดับ



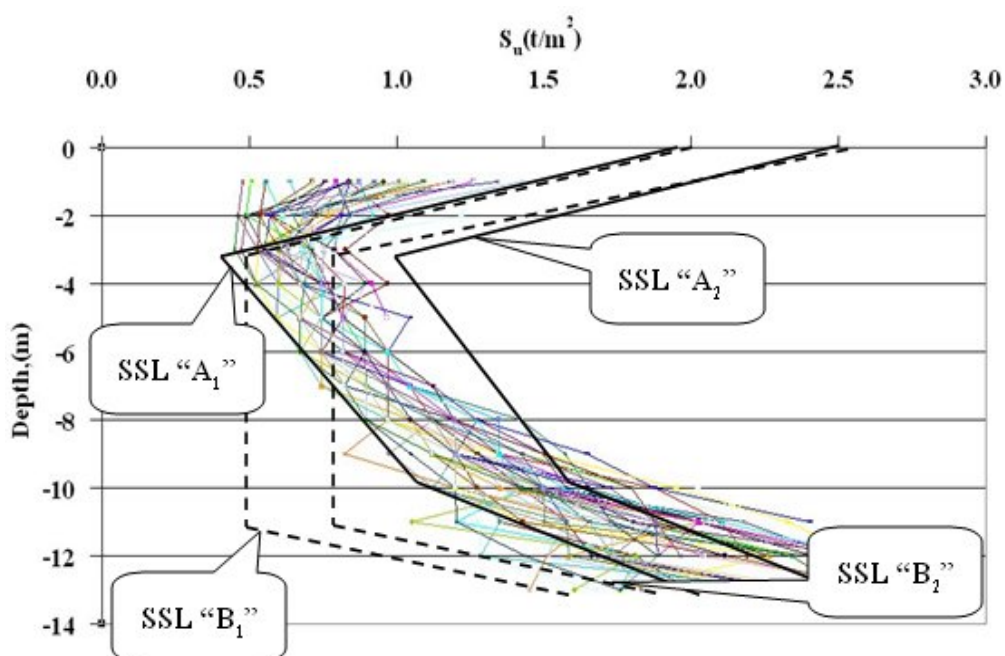
(a). Pattern "A"



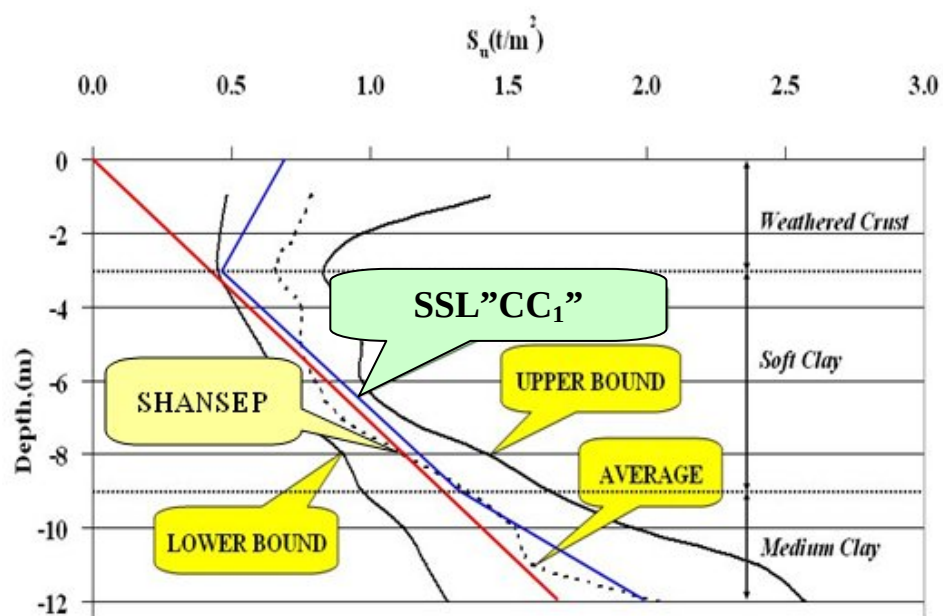
(b). Pattern "B"

ภาพที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก เรียกว่า Soil Strength Line

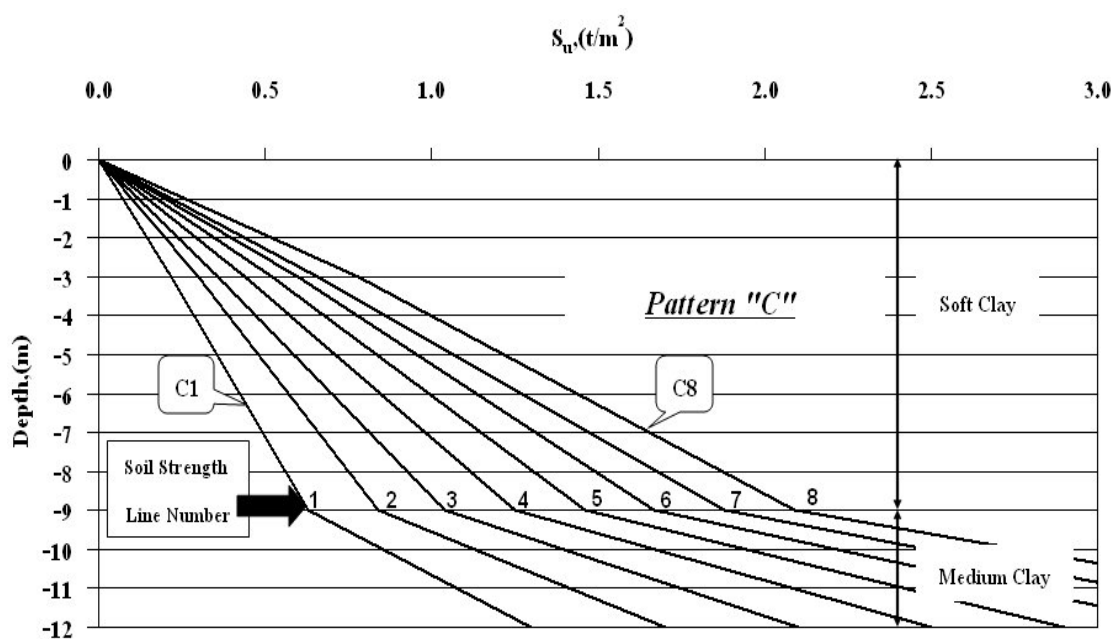
ที่มา: มณฑา (2546)



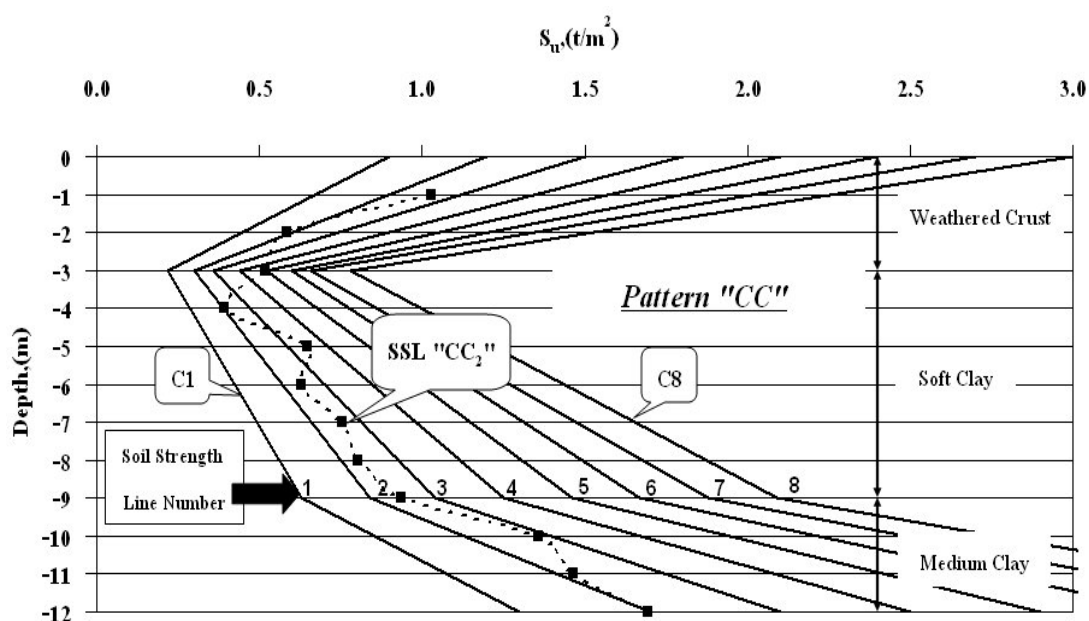
ภาพที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกจากข้อมูลผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนามที่ปรับแก้ค่า Vane Shear Strength



ภาพที่ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกที่ปรับความลาดเอียงและความลึกของชั้นดิน



ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก ตาม Pattern "C" (SSL"CC")



ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกที่พิจารณาดินแข็งเปลือกบนร่วด้วย (SSL“CC”)

Soil Strength Line Pattern “C” (SSL“C”) มีลักษณะค่ากำลังรับแรงเฉือนในชั้นดินเหนียวอ่อน (ช่วงความลึก 0.0 ถึง -9.0 เมตร) ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเลยชั้นดินเหนียวอ่อนลงไปค่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแตกต่างจาก Soil Strength Line Pattern “CC” (SSL“CC”) ที่มีการแบ่งชั้น Weathered Crust (ช่วงความลึก 0.0 ถึง -3.0 เมตร) เพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะค่ากำลังรับแรงเฉือนจะค่อยๆ ลดลงตามความลึก เมื่อนำผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนามที่ปรับแก้ค่า Vane Shear Strength มาพล็อตในกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกในแต่ละหลุมมีลักษณะแตกต่างกันแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ 1. กรณีไม่มีชั้น Weathered Crust สามารถพบได้ในลักษณะพื้นที่ที่มีการปรับแต่งผิวหน้าเพื่อทำบ่อเลี้ยงปลา ควรใช้ Soil Strength Line Pattern “C” (SSL“C”) ในการวิเคราะห์ 2. กรณีมีชั้น Weathered Crust สามารถพบได้ในลักษณะพื้นที่ทั่วไปภายในโครงการฯ เป็นส่วนใหญ่ ควรใช้ Soil Strength Line Pattern “CC” (SSL“CC”) ในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถแบ่งความลึกของชั้น Weathered Crust เป็น 3 รูปแบบคือ 1. ระดับความลึก 0-1 เมตร แสดงว่าความลึกน้อย 2. ระดับความลึก 0-2 เมตร แสดงว่า ความลึกปานกลาง 3. ระดับความลึก 0-3 เมตร แสดงว่า ความลึกมาก

จากผลการวิเคราะห์การแบ่งความลึกของชั้น Weathered Crust พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ในโครงการฯ ความลึกของชั้น Weathered Crust มีระดับความลึก 2-3 เมตร แสดงว่าความลึกมากแต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึกทั้ง 2 รูปแบบ ควรพิจารณาถึงข้อมูลผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนามว่ามีความผิดปกติของข้อมูลหรือไม่ เพื่อให้ผลการการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากขึ้น โดยมีวิธีการใช้ Soil Strength Line Pattern “C” พร้อมทั้งยกตัวอย่างในภาคผนวก ค

4. ความสัมพันธ์เชิงสถิติของคุณสมบัติดิน

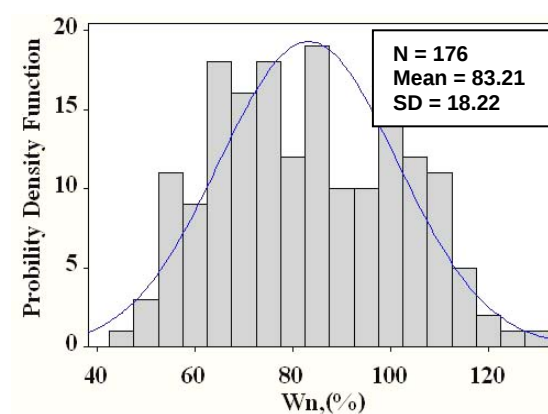
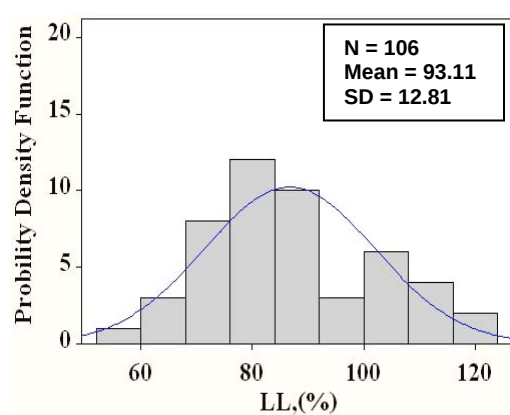
ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ในช่วงความลึก 1.00-3.00 เมตร โดยประมาณและช่วงความลึก 3.00-14.00 เมตรโดยประมาณ ซึ่งได้แสดงค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า 95% Confident Interval on Mean สรุปดังตารางที่ 14 และ 15 ตามลำดับ พร้อมทั้งยกตัวอย่างกราฟการแจกแจงแบบปกติมาตรฐานของพารามิเตอร์ LL และ w_n ดังภาพที่ 31

ตารางที่ 14 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ในช่วงความลึก 1.00-3.00 เมตร โดยประมาณ

พารามิเตอร์	หน่วย	จำนวนข้อมูล	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	95% CI on Mean
W_n	%	75	137.80	35.76	71.84	26.11	65.84-77.85
LL	%	49	123.40	52.38	86.70	15.29	82.30-91.90
PL	%	49	48.48	26.90	36.22	5.17	34.74-37.70
PI	%	50	81.40	27.85	51.26	11.76	43.98-62.40
γ_t	t/m ³	74	1.89	1.37	1.60	0.12	1.57-1.63
S_{uc}	t/m ²	46	3.45	0.37	1.37	0.81	1.13-1.61
S_{FV}	t/m ²	240	2.53	0.31	0.78	0.35	0.74-0.83
S_t	-	231	7.33	1.33	3.96	1.09	3.82-4.10

ตารางที่ 15 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ในช่วงความลึก 3.00-14.00 เมตร โดยประมาณ

พารามิเตอร์	หน่วย	จำนวนข้อมูล (N)	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย (Mean)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	95% CI on Mean
W_n	%	176	129.90	46.23	83.21	18.22	80.50-85.92
LL	%	106	122.70	57.44	93.11	12.81	90.65-95.58
PL	%	111	51.04	17.43	36.51	5.63	35.45-37.57
PI	%	107	79.70	27.79	55.47	10.05	53.54-57.40
γ_t	t/m ³	171	1.86	1.33	1.54	0.09	1.53-1.55
S_{uc}	t/m ²	141	2.80	0.29	1.18	0.59	1.08-1.27
S_{FV}	t/m ²	938	3.96	0.32	1.39	0.72	1.35-1.44
S_t	-	906	9.43	1.00	4.22	1.15	4.14-4.29
e_o	-	36	3.69	1.36	2.32	0.61	2.11-2.52
RR	-	36	0.07	0.02	0.05	0.01	0.04-0.05
CR	-	32	0.52	0.15	0.34	0.08	0.31-0.36
C_c	-	30	1.96	0.35	1.18	0.40	1.03-1.33
C_r	-	32	0.26	0.05	0.16	0.05	0.14-0.18



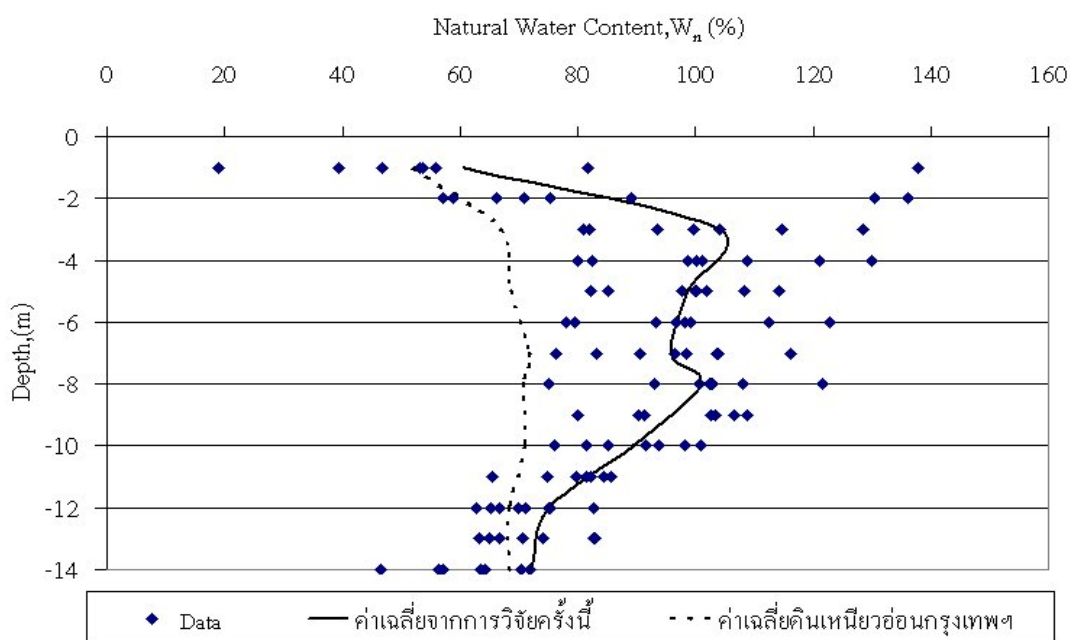
(a). กราฟการแจกแจงแบบปกติมาตรฐานของ W_n (b). กราฟการแจกแจงแบบปกติมาตรฐานของ LL

ภาพที่ 31 กราฟการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน

5. การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมกับระดับความลึกของชั้นดิน

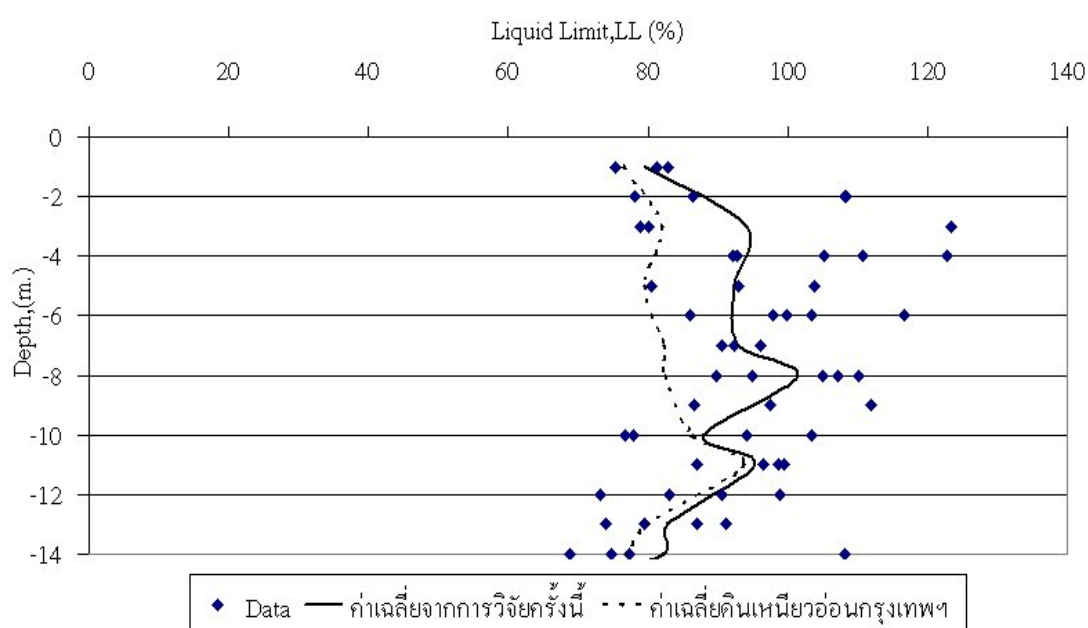
เมื่อพิจารณาค่าคุณสมบัติต่างๆ จากข้อมูลดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ ทั้งหมดที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เปรียบเทียบกับระดับความลึกของชั้นดิน โดยข้อมูลดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ใช้ข้อมูลจากรสตุคนซ์ (2546) มีผลการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Natural Water Content, W_n) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 71.84% และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 83.21% เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่า ในชั้น Crust (0.00-3.00 เมตร) มีค่าน้อยกว่าชั้นดินเหนียวอ่อน (3.00-14.00 เมตร) และค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้นตามธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงที่ระดับความลึกมากกว่า 10 เมตร แสดงว่าดินเริ่มเปลี่ยนจาก Soft Clay เป็น Medium Clay เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้นตามธรรมชาติระหว่างดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั่วไป ดังภาพที่ 32 พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ น้อยกว่าในในช่วงระดับความลึก 1.00-14.00 เมตร และมีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยทั้งสองใกล้เคียงกันที่ระดับความลึกมากกว่า 14 เมตร



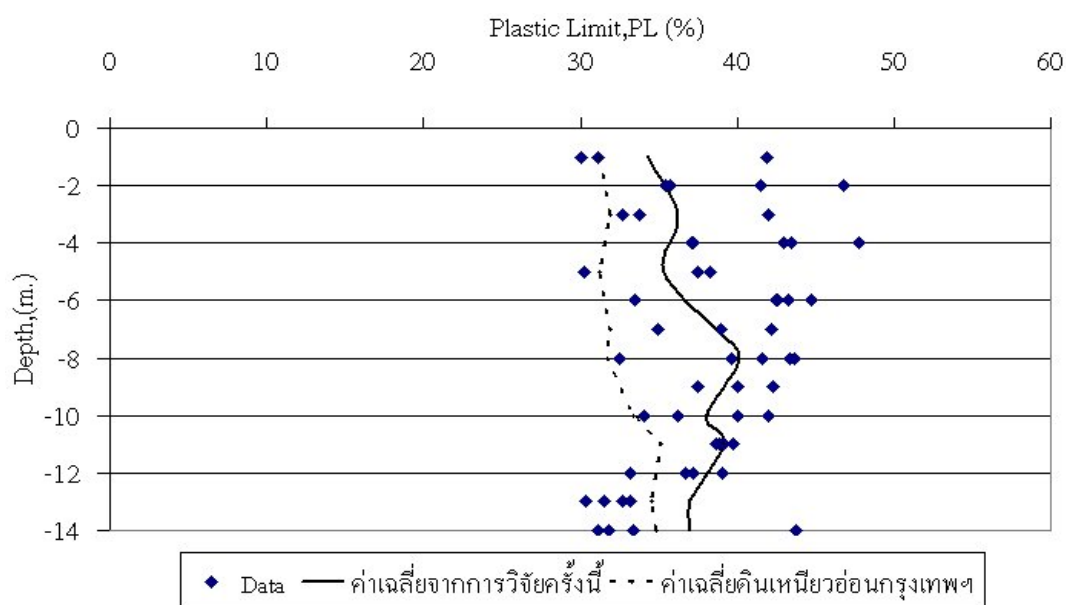
ภาพที่ 32 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้นตามธรรมชาติระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

พิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 86.70% และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 93.11% เมื่อพิจารณาค่าพิกัดเหลวเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่าค่าเฉลี่ยของพิกัดเหลวเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และมีแนวโน้มลดลงที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพิกัดเหลวระหว่างดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั่วไป ดังภาพที่ 33 พบว่า ค่าเฉลี่ยพิกัดเหลวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ น้อยกว่าในในช่วงระดับความลึก 1.00-14.00 เมตร และมีแนวโน้มลดลงที่ระดับความลึกมากกว่า 12 เมตร



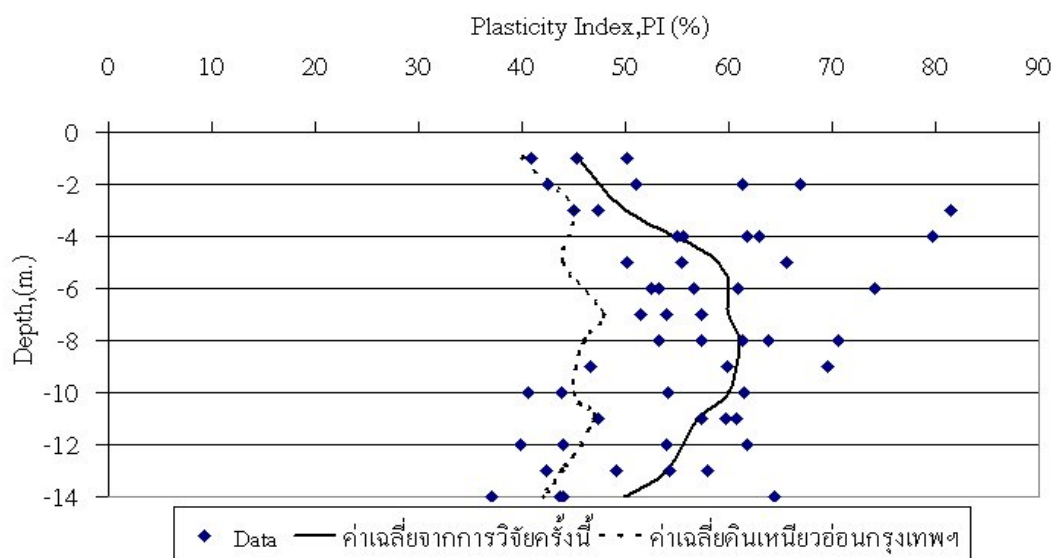
ภาพที่ 33 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพิกัดเหลวระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ

พิกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 36.22% และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 36.51% เมื่อพิจารณาค่าพิกัดพลาสติกเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่าค่าเฉลี่ยของพิกัดพลาสติกเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และมีแนวโน้มลดลงที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพิกัดพลาสติกระหว่างดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั่วไป ดังภาพที่ 34 พบว่า ค่าเฉลี่ยพิกัดพลาสติกของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ น้อยกว่าในในช่วงระดับความลึก 1.00-14.00 เมตร และเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในชั้นดินเหนียวอ่อน



ภาพที่ 34 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพิคตพลาสติกระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity Index, PI) เป็นค่าที่บอกถึงสภาพพลาสติกของดิน สำหรับในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51.26% และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.47% ซึ่งจะพบว่าดัชนีพลาสติกมีค่าสูงแสดงว่าดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เมื่อแห้งจะทนแรงบดอัดได้สูง นั่นคือดินจะเกิดการยุบตัวหรือหดตัวสูงเมื่อน้ำระเหยออกไปจากมวลดิน เมื่อพิจารณาดัชนีสภาพพลาสติกเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่า ค่าเฉลี่ยของดัชนีสภาพพลาสติก เปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และมีแนวโน้มลดลงที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยดัชนีสภาพพลาสติกระหว่างดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั่วไป ดังภาพที่ 35 พบว่า ค่าเฉลี่ยดัชนีสภาพพลาสติกของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ น้อยกว่าในในช่วงระดับความลึก 1.00-14.00 เมตร และเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งแนวโน้มค่าเฉลี่ยดัชนีสภาพพลาสติกของค่าเฉลี่ยทั้งสองจะลดลงเมื่อความลึกมากกว่า 14 เมตร แสดงว่าดินเริ่มเปลี่ยนสถานะจาก Soft Clay เป็น Medium Clay

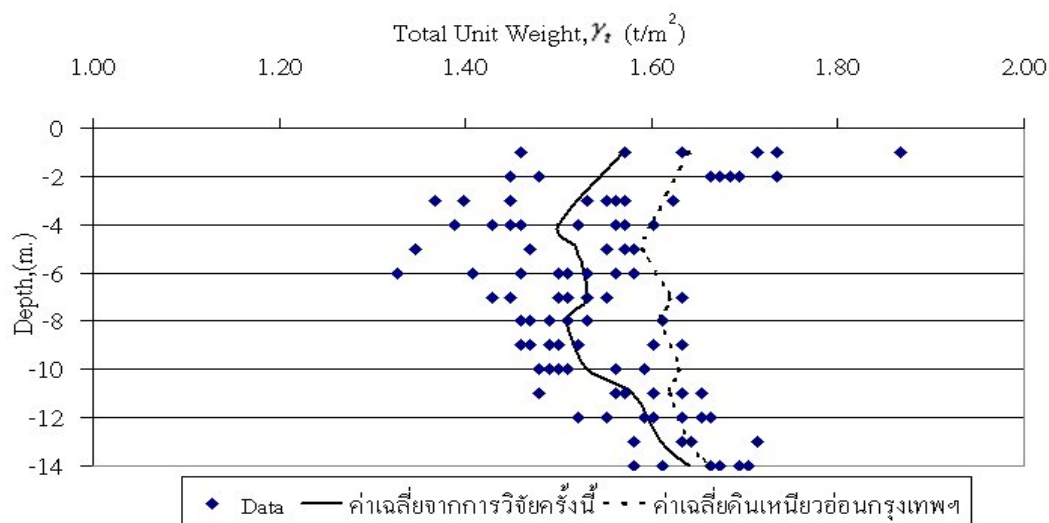


ภาพที่ 35 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดัชนีสภาพพลาสติกระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

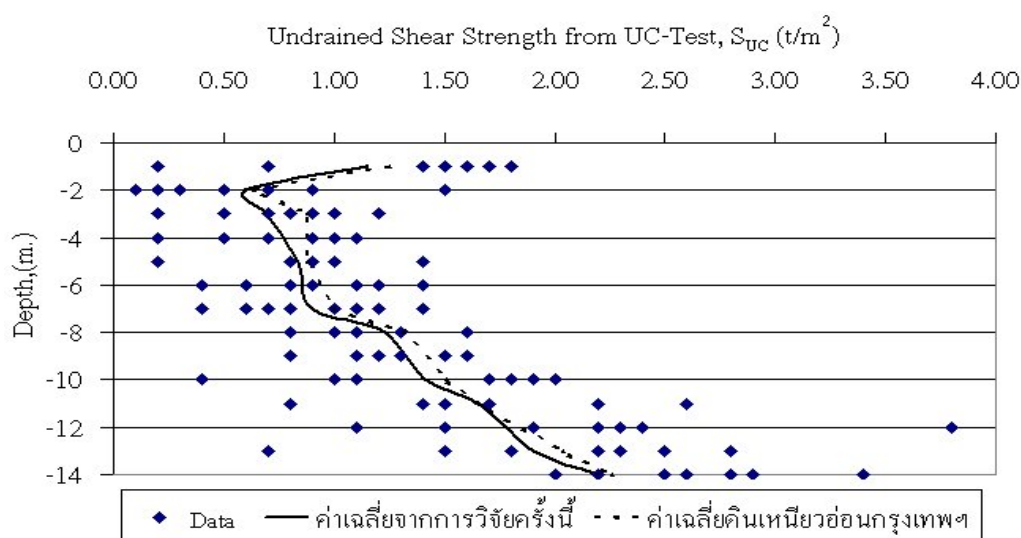
หน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight, γ_t) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.60% และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.54% เมื่อพิจารณา หน่วยน้ำหนักรวมของดินเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่า มีค่าค่อนข้างคงที่ในชั้นดินเหนียวอ่อนและมีแนวโน้มลดลงที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักรวมระหว่างดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั่วไป ดังภาพที่ 36 พบว่า ค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักรวมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ น้อยกว่าในในช่วงระดับความลึก 1.00-14.00 เมตร และมีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยทั้งสองใกล้เคียงกันที่ระดับความลึกมากกว่า 14 เมตร

กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Unconfined Compression Test (S_{uc}) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.37 ตันต่อตารางเมตร และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.18 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ UC-Test เมื่อเทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามความลึก สำหรับในช่วงระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ UC-Test มีค่าน้อยกว่า 1.25 ตันต่อตารางเมตร จัดได้ว่าเป็นดินเหนียวอ่อนมาก และเมื่อระดับความลึกเพิ่มขึ้นดินมีแนวโน้มมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ UC-Test ระหว่างดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั่วไป ดังภาพที่ 37 พบว่า

ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มากกว่าในช่วงระดับความลึก 1.00-14.00 เมตร ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ อยู่ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำต่ำมาก จึงให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

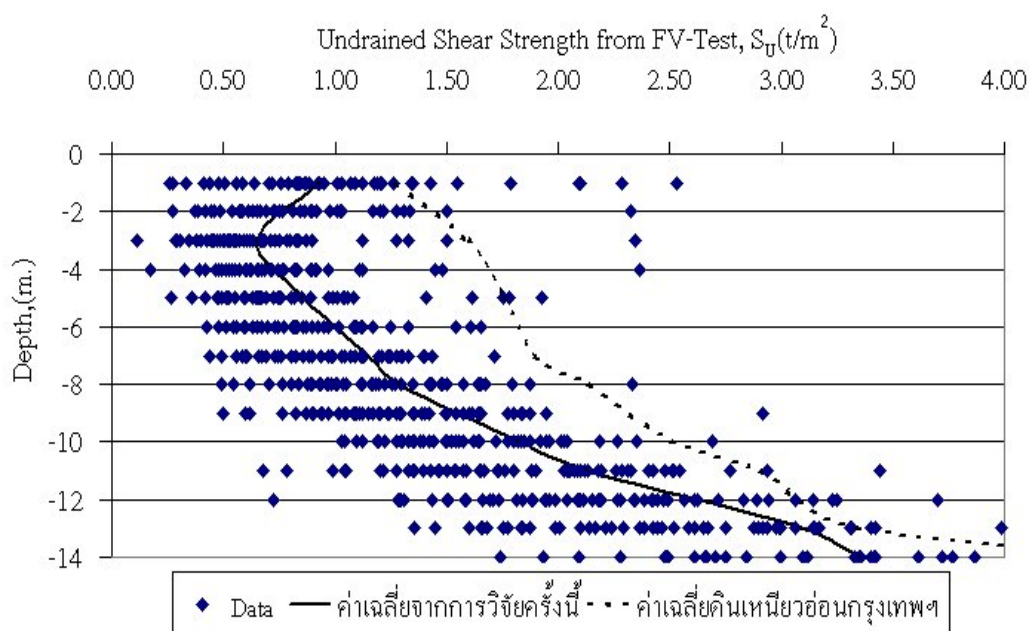


ภาพที่ 36 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของหน่วยน้ำหนักรวมระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



ภาพที่ 37 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ UC-Test ระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

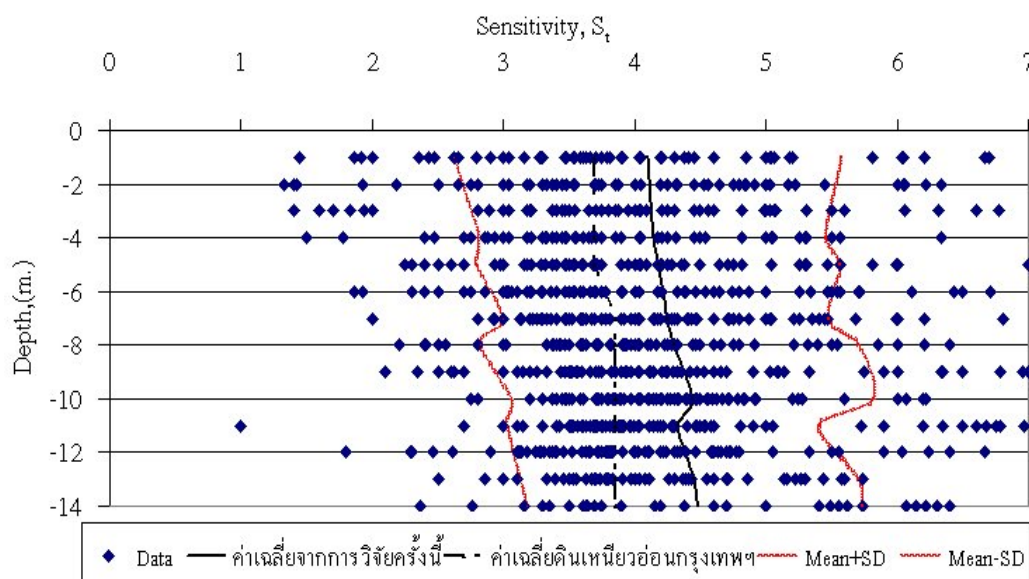
กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Field Vane Shear Test (S_{FV}) เป็นการทดสอบที่เหมาะสมกับดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.78 ตันต่อตารางเมตร และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.39 ตันต่อตารางเมตร เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ FV-Test เทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ FV-Test ระหว่างดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั่วไป ดังภาพที่ 38 พบว่า ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ สูงกว่ามากในช่วงระดับความลึก 1.00-14.00 เมตร และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก



ภาพที่ 38 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ FV-Test ระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ความไวตัวของดิน (Sensitivity, S_v) ในช่วงระดับความลึก 1.00-3.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.96 และระดับความลึก 3.00-14.00 เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.22 เมื่อพิจารณาความไวตัวของดิน เทียบกับระดับความลึกของชั้นดินพบว่าค่าเฉลี่ยความไวตัวของดินเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ตลอดความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความไวตัวของดินระหว่างดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั่วไป ดังภาพที่ 39 พบว่า ค่าเฉลี่ยความไวตัวของ

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ต่ำกว่าในช่วงระดับความลึก 1.00-14.00 เมตร ดังนั้นสรุปได้ว่าดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นดินเหนียวที่ค่อนข้างไวตัว (Medium Sensitivity) ซึ่งต้องระมัดระวังในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์บนพื้นที่ดินเหนียวอ่อนแห่งนี้



ภาพที่ 39 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความไวตัวของดิน ระหว่างผลจากการวิจัยครั้งนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

สำหรับผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation, COV) ของคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ ดังตารางที่ 16 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนหาได้จากอัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าเฉลี่ยเลขคณิต ใช้ในการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูล 2 ชุด ที่มีหน่วยแตกต่างกัน เป็นวิธีที่นิยมใช้อยู่ในรูปร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ จากตารางดังกล่าวพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 20% ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มพารามิเตอร์ออกเป็น 3 กลุ่มตามค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนดังนี้

- กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วย ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Total Unit Weight พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวอยู่ในระดับต่ำ

- กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วย ค่า Natural Water Content, Plasticity Index, Sensivity Index และ Initial Void Ratio พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวอยู่ในระดับปานกลาง

- กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วย ค่า Undrained Shear Strength from UC-Test, Undrained Shear Strength from FV-Test, Modulus of Elasticity, Recompression Index และ Compression Index พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวอยู่ในระดับสูง

ตารางที่ 16 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนในบริเวณโครงการฯ ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้

พารามิเตอร์	ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน	ระดับความแปรปรวน
Natural Water Content, W_n (%)	27.71%	ปานกลาง
Liquid Limit, LL (%)	16.81%	ต่ำ
Plastic Limit, PL (%)	14.63%	ต่ำ
Plasticity Index, PI (%)	20.45%	ปานกลาง
Total Unit Weight, γ_t (t/m^3)	6.49%	ต่ำ
Undrained Shear Strength from UC-Test, S_{uc} (t/m^2)	61.40%	สูง
Undrained Shear Strength from FV-Test, S_{FV} (t/m^2)	60.36%	สูง
Modulus of Elasticity, E_{50} (t/m^2)	71.96%	สูง
Sensitivity Index, S_t	32.17%	ปานกลาง
Initial Void Ratio, e_0	29.00%	ปานกลาง
Recompression Index, C_r	45.55%	สูง
Compression Index, C_c	39.73%	สูง

หมายเหตุ $COV = \frac{SD}{\bar{x}}$ โดยที่

COV คือ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation)

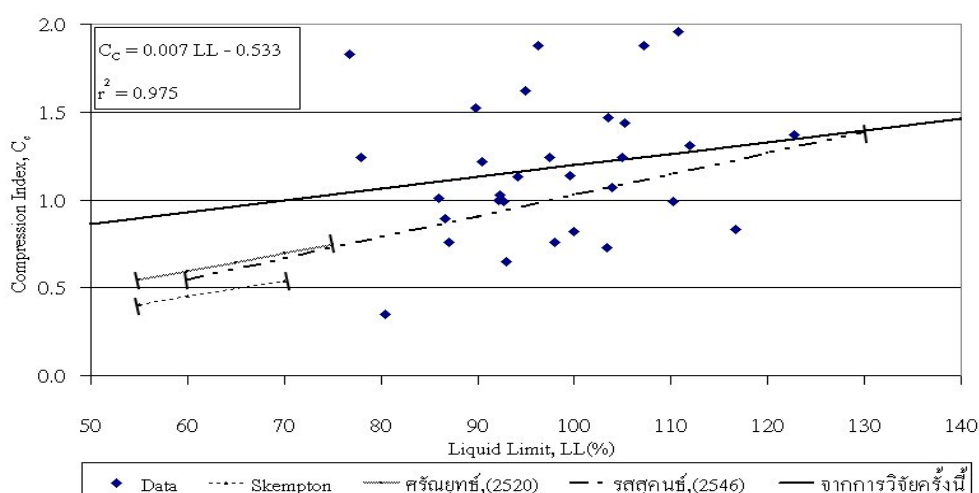
SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean)

6. การถดถอยเชิงเส้นระหว่างคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อน

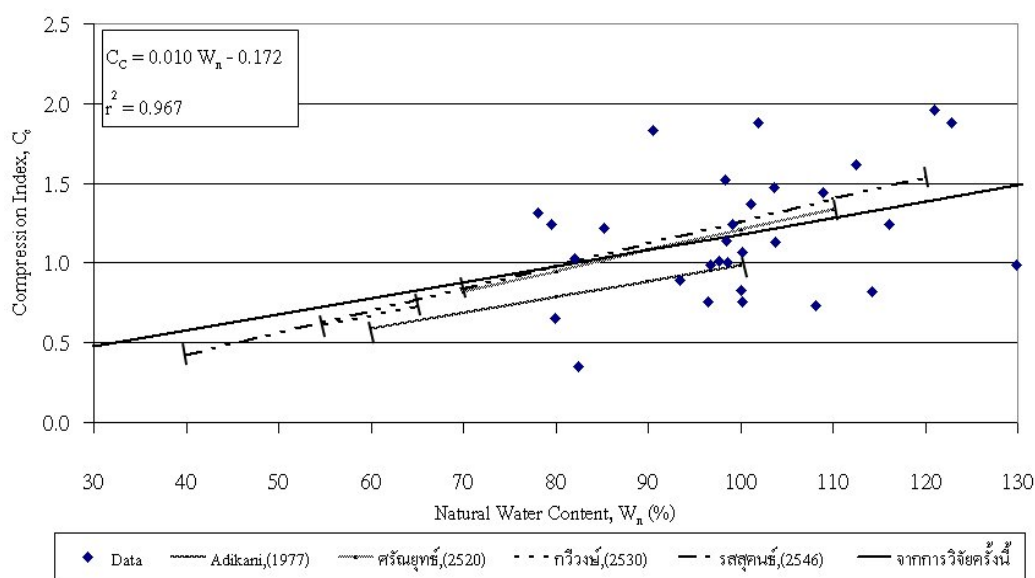
การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่างคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนภายในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินโดยใช้สถิติวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of Determination, r^2) ที่ให้ค่ามากกว่า 0.40 แล้วจึงวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ซึ่งผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ของดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ และการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้กับผลการวิจัยอื่น เป็นการเปรียบเทียบสมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน มีรายละเอียดของความสัมพันธ์ต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้ดังนี้

6.1 Compression Index กับ Liquid Limit: ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index กับ Liquid Limit เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากดินเหนียวอ่อนจำนวน 185 ข้อมูล ค่า C_c มีค่าอยู่ระหว่าง 0.35-1.96 และค่า LL มีค่าอยู่ระหว่าง 70-130% โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (r^2) เท่ากับ 0.975 ซึ่งได้แสดงสมการถดถอยดังตารางที่ 17 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index กับ Liquid Limit ที่ได้จากการวิจัยเทียบกับผลการวิจัยอื่นแสดงได้ดังตารางที่ 18 และภาพที่ 40 พบว่าเส้นการถดถอยมีแนวโน้มสูงกว่าผลการวิจัยอื่น เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นการถดถอยจากการวิจัยครั้งนี้กับผลการวิจัยอื่นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นการถดถอยจากการวิจัยครั้งนี้มีค่าน้อยกว่า แสดงว่าดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีการยุบอัดตัวหรือหดตัวได้ต่ำ



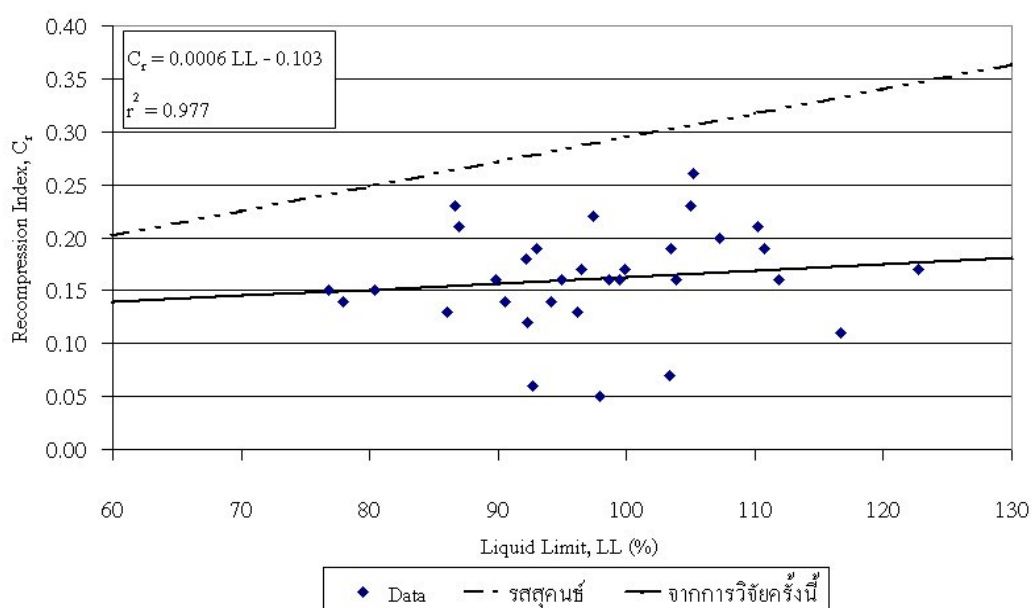
ภาพที่ 40 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index กับ Liquid Limit ที่ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น

6.2 Compression Index กับ Natural Water Content: ความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index กับ Natural Water Content เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากดินเหนียวอ่อนจำนวน 281 ข้อมูล ค่า C_c มีค่าอยู่ระหว่าง 0.35-1.96 และค่า W_n มีค่าอยู่ระหว่าง 80-130% โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (r^2) เท่ากับ 0.967 ซึ่งได้แสดงสมการถดถอยดังกล่าวดังตารางที่ 17 ส่วนการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index กับ Natural Water Content ที่ได้จากการวิจัยเทียบกับผลการวิจัยอื่นแสดงได้ดังตารางที่ 18 และภาพที่ 41 พบว่าเส้นการถดถอยที่ได้จากการวิจัยมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการวิจัยอื่น แต่เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นการถดถอยที่ได้จากการวิจัยมีค่าน้อยกว่าผลการวิจัยอื่น นั่นคือมีค่า Compression Index น้อยกว่าผลการวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีการยุบอัดตัวหรือการหดตัวได้ต่ำกว่าดินเหนียวดินเหนียวอ่อนที่ผู้วิจัยท่านอื่นใช้ในการวิเคราะห์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้อมูลดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่อนข้างน้อย และขึ้นกับลักษณะทางธรณีวิทยาในแต่ละพื้นที่ที่มีการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้



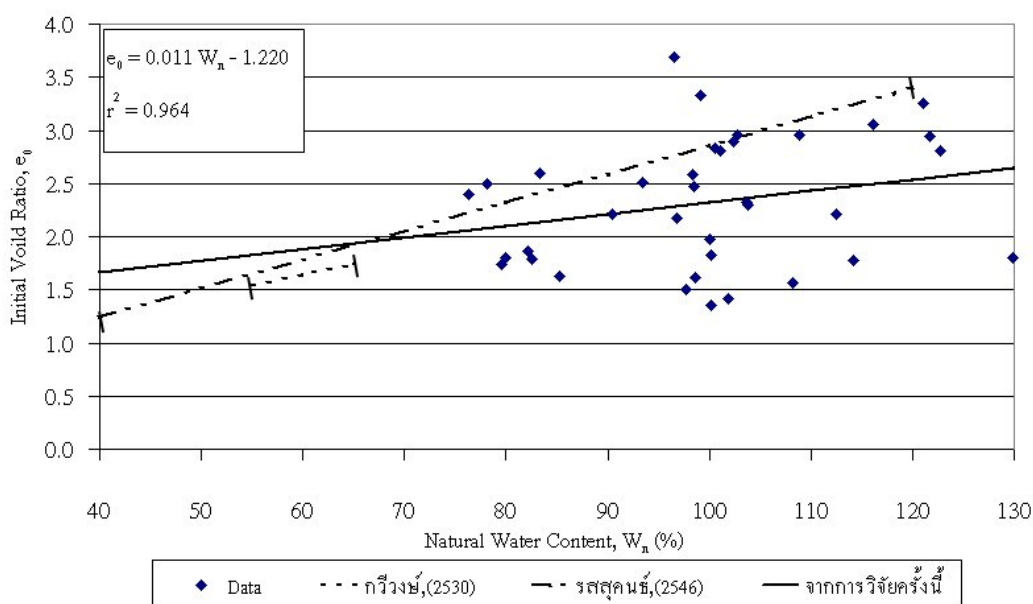
ภาพที่ 41 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Compression Index กับ Natural Water Content ที่ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น

6.3 Recompression Index กับ Liquid Limit: ความสัมพันธ์ระหว่าง Recompression Index กับ Liquid Limit เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากดินเหนียวอ่อนจำนวน 138 ข้อมูล ค่า C_r มีค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.25 และค่า LL มีค่าอยู่ระหว่าง 70-130% โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (r^2) เท่ากับ 0.977 ซึ่งได้แสดงสมการถดถอยดังกล่าวดังตารางที่ 17 ส่วนการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Recompression Index กับ Liquid Limit ที่ได้จากการวิจัยเทียบกับผลการวิจัยอื่นแสดงได้ดังตารางที่ 18 และภาพที่ 42 พบว่าเส้นการถดถอยที่ได้จากการวิจัยมีความแตกต่างกับผลการวิจัยอื่น แต่เมื่อพิจารณาเมื่อ LL มีค่ามากกว่า 80% ค่า Recompression Index จากการวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าผลการวิจัยของ รสสุคนธ์ (2546) แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการวิจัยมีความสามารถในการยุบอัดตัวได้น้อยกว่า Soft BKK Clay และลักษณะของเส้นการถดถอยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ รสสุคนธ์ (2546) พบว่ามีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากข้อมูลจากการวิจัยครั้งนี้ อยู่ในจังหวัดสมุทรปราการ แต่ข้อมูลผลการวิจัยของ รสสุคนธ์ (2546) ส่วนใหญ่อยู่ในกรุงเทพมหานคร



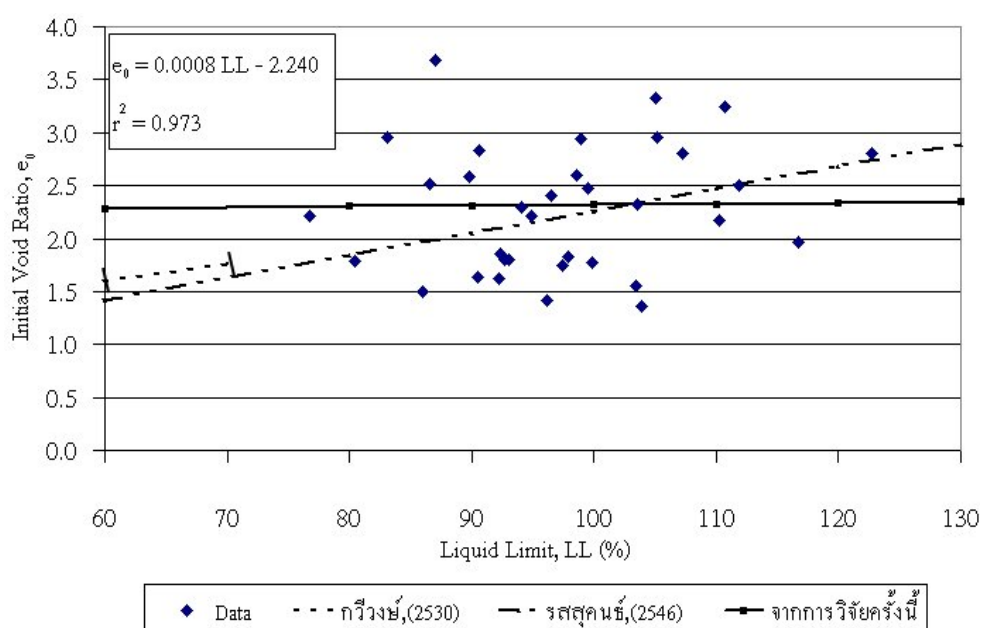
ภาพที่ 42 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Recompression Index กับ Liquid Limit ที่ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น

6.4 Initial Void Ratio กับ Natural Water Content: ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Void Ratio กับ Natural Water Content เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากดินเหนียวอ่อนจำนวน 287 ข้อมูล ค่า e_0 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.36-3.69 และค่า W_n มีค่าอยู่ระหว่าง 80-130% โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (r^2) เท่ากับ 0.964 ซึ่งได้แสดงสมการถดถอยดังกล่าวดังตารางที่ 17 ส่วนการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Void Ratio กับ Natural Water Content ที่ได้จากการวิจัยเทียบกับผลการวิจัยอื่นแสดงได้ดังตารางที่ 18 และภาพที่ 43 พบว่าเส้นการถดถอยที่ได้จากการวิจัยมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการวิจัยของกวีวงศ์ (2530) และรสสุคนธ์ (2546) ซึ่งตัดกับเส้นการถดถอยของรสสุคนธ์ (2546) ที่ W_n มีค่าเท่ากับ 70% และ e_0 มีค่าเท่ากับ 2.0 ดังนั้นเมื่อ W_n มีค่ามากกว่า 70% ค่า e_0 ที่ได้จากการวิจัยมีค่าน้อยกว่า e_0 ที่ได้จากการวิจัยของรสสุคนธ์ (2546) ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีค่า Natural Water Content มากกว่า 50% แสดงว่าเป็นดินเหนียวที่มีปริมาณความชื้นในมวลดินสูง กล่าวคือเมื่อน้ำไหลออกจากช่องว่างของมวลดิน ดินจะมีการยุบตัวสูง



ภาพที่ 43 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Void Ratio กับ Natural Water Content ที่ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น

6.5 Initial Void Ratio กับ Liquid Limit: ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Void Ratio กับ Liquid Limit เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากดินเหนียวอ่อนจำนวน 191 ข้อมูล ค่า e_0 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.36-3.69 และค่า LL มีค่าอยู่ระหว่าง 70-130% โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (r^2) เท่ากับ 0.973 ซึ่งได้แสดงสมการถดถอยดังกล่าวดังตารางที่ 17 ส่วนการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Void Ratio กับ Liquid Limit ที่ได้จากการวิจัยเทียบกับผลการวิจัยอื่นแสดงได้ดังตารางที่ 18 และภาพที่ 44 พบว่าเส้นการถดถอยที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ตัดกับเส้นการถดถอยของ รสสุคนธ์ (2546) ที่ Liquid Limit มีค่าเท่ากับ 100 % และ Initial Void Ratio มีค่าเท่ากับ 2.3 ดังนั้นเมื่อ Liquid Limit มีค่ามากกว่า 100% ค่า Initial Void Ratio ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้จะมีค่าน้อยกว่า Initial Void Ratio ที่ได้จากการวิจัยของ กวีวงศ์ (2530) และรสสุคนธ์ (2546) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าดินเหนียวที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นดินเหนียวที่มีความอ่อนน้อยกว่าดินเหนียวที่ กวีวงศ์(2530) และรสสุคนธ์ (2546) ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ 44 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Void Ratio กับ Liquid Limit ที่
ได้จากการวิจัยกับผลการวิจัยอื่น

ตารางที่ 17 สรุปความสัมพันธ์ต่างๆ ของดินเหนียวอ่อนที่วิเคราะห์ได้จากการวิจัยครั้งนี้

สมการถดถอย	r^2	Applicable Range	N
$C_c = 0.007 LL - 0.533$	0.975	70%- 130%	185
$C_c = 0.010 W_n + 0.172$	0.967	80% - 130%	281
$C_r = 0.0006 LL - 0.103$	0.977	70% - 130%	138
$e_0 = 0.0110 W_n + 1.220$	0.964	80% - 130%	287
$e_0 = 0.0008 LL + 2.240$	0.973	70%- 130%	191

ตารางที่ 18 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ต่างๆ ของดินเหนียวอ่อนที่วิเคราะห์ได้จากการวิจัยครั้งนี้
กับผลการวิจัยอื่น

สมการถดถอย	r^2	ชนิดของดิน	ผู้วิจัย
$C_c = 0.007 LL - 0.533$	0.975	Soft Clay	จากการวิจัยครั้งนี้
$C_c = 0.009 LL - 0.090$	-	ALL Clays	Skempton (1944)
$C_c = 0.010 LL - 0.005$	-	Bangkok Clay	ศรีณยุทธ (2520)
$C_c = 0.012 LL - 0.174$	0.726	Soft BKK Clay	รสสุคนธ์ (2546)
$C_c = 0.010 W_n + 0.172$	0.967	Soft Clay	จากการวิจัยครั้งนี้
$C_c = 0.010 W_n - 0.014$	0.757	ALL Clays	Adikari (1977)
$C_c = 0.013 W_n - 0.091$	0.590	BKK Clay	ศรีณยุทธ (2520)
$C_c = 0.011 W_n + 0.007$	0.493	Soft – Medium Clay	กวีวงษ์ (2530)
$C_c = 0.014 W_n - 0.141$	0.700	Soft BKK Clay	รสสุคนธ์ (2546)
$C_r = 0.0006 LL - 0.1030$	0.977	Soft Clay	จากการวิจัยครั้งนี้
$C_r = 0.0023 LL + 0.0644$	0.688	Soft BKK Clay	รสสุคนธ์ (2546)
$e_0 = 0.0110 W_n + 1.220$	0.964	Soft Clay	จากการวิจัยครั้งนี้
$e_0 = 0.0210 W_n + 0.380$	0.729	All Clays	กวีวงษ์ (2530)
$e_0 = 0.0270 W_n + 0.160$	0.852	Soft BKK Clay	รสสุคนธ์ (2546)
$e_0 = 0.0008 LL + 2.2400$	0.973	Soft Clay	จากการวิจัยครั้งนี้
$e_0 = 0.0160 LL + 0.6330$	-	All Clays	กวีวงษ์ (2530)
$e_0 = 0.0210 LL + 0.1600$	0.741	Soft BKK Clay	รสสุคนธ์ (2546)

ความสัมพันธ์ของสมการถดถอยที่วิเคราะห์ได้จากการวิจัยนี้ประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง C_c กับ LL , W_n ความสัมพันธ์ระหว่าง C_c กับ LL และความสัมพันธ์ระหว่าง e_0 กับ W_n , LL พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (r^2) ของสมการถดถอยทุกความสัมพันธ์สูงมาก คือมากกว่า 0.90 เมื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง C_c กับ LL และ C_c กับ W_n เห็นว่าค่า r^2 ของความสัมพันธ์ C_c กับ LL มีค่าสูงกว่า C_c กับ W_n แต่เมื่อพิจารณาถึงผลลัพธ์ที่จะได้มาของค่า C_c พบว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการระหว่าง LL กับ W_n นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งการทดลองของค่า W_n จะพบข้อผิดพลาดที่เกิดจากผู้ทำการทดลองน้อยกว่าค่า LL จึงมีผลต่อผลลัพธ์ที่จะได้มาของค่า C_c และในทำนองเดียวกันของความสัมพันธ์ e_0 กับ W_n และ e_0 กับ LL ก็มีลักษณะของความสัมพันธ์ดังเช่นที่กล่าวมา

7. การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จากผลการทดสอบ

การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในบริเวณโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ มีทั้งหมด 4 วิธี คือ 1.Low Pressure Mechanical Mixing (LP) 2. Jet Grouting (JG) 3.Modified Dry Mixing (MDM) 4. High Pressure Mechanical Mixing (HP) ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ได้รวบรวมผลการทดสอบกำลังแรงต้านทานของตัวอย่างดิน-ซีเมนต์และผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ทั้งหมด 4 วิธี และเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่สำคัญ โดยใช้โปรแกรม Surfer 7.0 รวมถึงการเปรียบเทียบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index), ดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index) ซึ่งมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังนี้

7.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรม เพื่อเปรียบเทียบในแต่ละวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ในบริเวณโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ ทั้งหมด 4 วิธี จากผลการทดสอบกำลังแรงต้านทานของตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ที่ทำการก่อสร้างในพื้นที่ก่อสร้างจริงของโครงการ โดยใช้โปรแกรม Surfer 7.0 ในการเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรม มีรายละเอียดดังนี้

7.1.1 ปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์: การเปรียบเทียบค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยนำข้อมูลผลการทดสอบปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ มาหาค่าสูงสุด (Max) ค่าต่ำสุด (Mean) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยแบ่งตามสัญญาก่อสร้างและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 19 พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ของวิธี Jet Grouting ให้ค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากปริมาณน้ำปูนที่ใช้ในการผสมมีอัตราการไหลของน้ำปูนค่อนข้างมากกว่าวิธีอื่น เมื่อนำข้อมูลผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์มาเปรียบเทียบตามความยาวแนวคลองระบายน้ำของโครงการฯ โดยใช้โปรแกรม Surfer 7.0 โดยแบ่งตามสัญญาก่อสร้างและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ รวมถึงค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติของดินเดิม แสดงดังภาพที่ 45 และ 46 ตามลำดับ พบว่าวิธี Low Pressure Mechanical Mixing, Modified Dry Mixing และ High Pressure Mechanical Mixing มีค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ลดลงจาก 80%-100% เป็น 60%-80% เมื่อเทียบกับดินเดิม แต่วิธี Jet Grouting มีค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ใกล้เคียงกับดินเดิม เนื่องจากวิธีนี้ใช้ปริมาณน้ำปูนมากในการผสม ทำให้ค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับดินเดิม ส่วนวิธี High Pressure Mechanical Mixing มีค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ประมาณ 50%-60% ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องมาจากค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ ของดินเดิมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือบริเวณ 1,000 เมตร – 10,000 เมตร มีค่าประมาณ 80%-100% และบริเวณ 10,000 เมตร – 12,650 เมตร มีค่าประมาณ 70-80% มีผลทำให้ค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์มีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แต่ละวิธีด้วยค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ : ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน

Section	Method	N	Natural Water Content, (%)			
			Max	Min	Mean	SD
1	Low Pressure	578	105.80	13.00	67.71	20.40
2	Low Pressure	463	106.50	14.40	67.86	14.53
2	Jet Grouting	183	244.14	26.90	101.34	19.71
2	Modified Dry Mixing	131	106.06	10.20	57.83	11.48
3	High Pressure	519	88.40	20.10	53.55	13.36

7.1.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ: การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ โดยนำข้อมูลผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ มาหาค่าสูงสุด(Max) ค่าต่ำสุด (Mean) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยแบ่งตามสัญญาก่อสร้างและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 20 พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำของวิธี Modified Dry Mixing ให้ค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากการเพิ่มน้ำเข้าไปในมวลดินเพื่อปรับเปลี่ยนค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติที่มีอยู่ในมวลดิน ทำให้การทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำมีความเหมาะสมกัน เมื่อนำข้อมูลผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำมาเปรียบเทียบตามความยาวแนวคลองระบายน้ำของโครงการฯ โดยใช้โปรแกรม Surfer 7.0 โดยแบ่งตามสัญญาก่อสร้างและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ รวมถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ ของดินเดิม แสดงดังภาพที่ 47 และ 48 ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามวิธีการก่อสร้างอย่างชัดเจนคือ กลุ่มที่ 1: วิธี Jet Grouting กับวิธี Modified Dry Mixing มีค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ ประมาณ 80 t/m^2 - 120 t/m^2 กลุ่มที่ 2 : วิธี Low Pressure Mechanical Mixing กับวิธี High Pressure Mechanical Mixing มีค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ ประมาณ 60 t/m^2 - 80 t/m^2 เนื่องมาจากอัตราการไหลของน้ำปูนและอัตราเร็วการเจาะขาคืบ-ขาลงในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบวิธี Low Pressure Mechanical Mixing ของสัญญาที่ 1 และสัญญาที่ 2 พบว่าสัญญาที่ 1 ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำต่ำกว่าสัญญาที่ 2 เพราะค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ ที่ตำแหน่ง 1,000 เมตร – 5,000 เมตร มีค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติสูงกว่าที่ตำแหน่ง 5,000 เมตร – 10,000 เมตร ทำให้ปริมาณความชื้นที่อยู่ในมวลดินมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำโดยตรง

ตารางที่ 20 การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แต่ละวิธีด้วยค่ากำลังรับแรงเฉือน
ของดินแบบไม่ระบายน้ำ : ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน

Section	Method	N	Undrained Shear Strength, (t/m ²)			
			Max	Min	Mean	SD
1	Low Pressure	524	147.00	27.00	63.22	23.79
2	Low Pressure	463	168.00	31.00	76.74	27.19
2	Jet Grouting	226	209.00	31.00	87.58	44.55
2	Modified Dry Mixing	116	229.00	18.00	104.73	32.82
3	High Pressure	492	147.00	13.00	71.95	25.35

7.1.3 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น: การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ Secant Modulus at 50% q_u โดยนำข้อมูลผลการทดสอบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น มาหาค่าสูงสุด(Max) ค่าต่ำสุด (Mean) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยแบ่งตามสัญญาก่อสร้างและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 21 พบว่าค่าเฉลี่ยโมดูลัสความยืดหยุ่นของวิธี Modified Dry Mixing ให้ค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น หากพิจารณาถึงค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำของวิธี Modified Dry Mixing พบว่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่ามีความสัมพันธ์กัน เมื่อค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์น้อย ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้เนื้อของวัสดุที่ได้จากการผสมโดยวิธีนี้มีความแข็งแรงแต่เปราะ แต่วิธี High Pressure Mechanical Mixing มีพารามิเตอร์ตรงกันข้าม ส่งผลให้เนื้อของวัสดุที่ได้จากการผสมโดยวิธีนี้มีความแข็งปานกลางและยืดหยุ่นได้ดีกว่า เมื่อนำข้อมูลผลการทดสอบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น มาเปรียบเทียบตามความยาวแนวคลองระบายน้ำของโครงการฯ โดยใช้โปรแกรม Surfer 7.0 โดยแบ่งตามสัญญาก่อสร้างและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แสดงดังภาพที่ 49 พบว่าค่าวิธี Low Pressure Mechanical Mixing มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นปานกลางเมื่อเทียบกับวิธีอื่น แต่การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ด้วยวิธี Low Pressure Mechanical Mixing ของสัญญาที่ 1 และสัญญาที่ 2 ให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นแตกต่างกัน โดยภาพรวมสัญญาที่ 1 บางบริเวณมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าสัญญาที่ 2 แม้เป็นการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ด้วยวิธีเดียวกัน ต่างกันที่บริเวณสถานที่ก่อสร้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติที่จะส่งผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่างกัน จากภาพที่ 49 พบว่าที่ตำแหน่ง 7,000 เมตร – 8,500 เมตรของวิธี Low Pressure Mechanical Mixing มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำกว่าบริเวณอื่น เมื่อเทียบกับภาพที่ 45 จะเห็นว่า ณ บริเวณดังกล่าวมีค่าปริมาณความชื้นในมวลดินสูงกว่าบริเวณอื่น

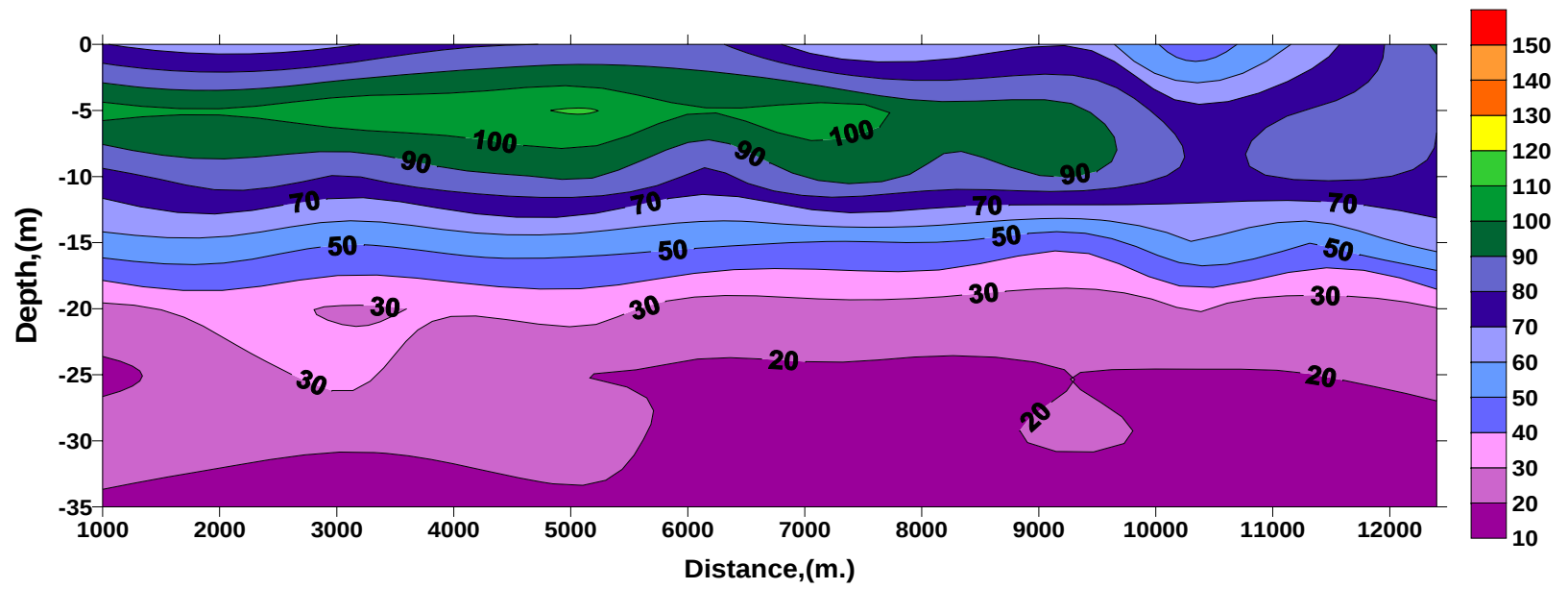
ตารางที่ 21 การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แต่ละวิธีด้วยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น:
ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน

Section	Method	N	Modulus of Elasticity, (t/m ²)			
			Max	Min	Mean	SD
1	Low Pressure	564	195755	2926	22979	14905
2	Low Pressure	463	78204	6094	26211	10860
2	Jet Grouting	226	75300	8571	30209	15312
2	Modified Dry Mixing	131	95666	10000	31401	12931
3	High Pressure	547	145100	2583	16194	14771

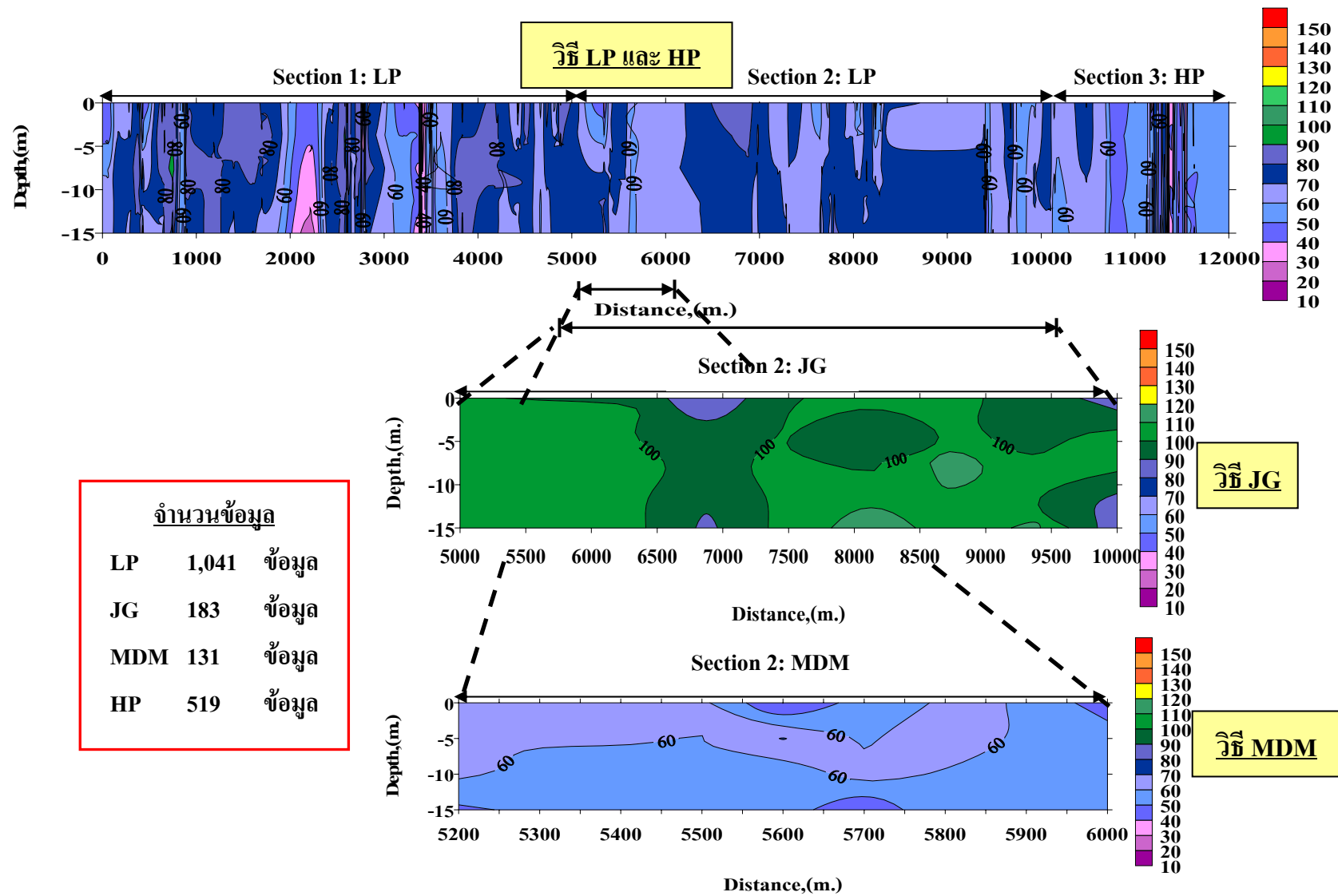
7.1.4 ค่า Strain ที่กำลังแรงด้านทานสูงสุด: การเปรียบเทียบค่า Strain ที่กำลังแรงด้านทานสูงสุด โดยนำข้อมูลผลการทดสอบค่า Strain ที่กำลังแรงด้านทานสูงสุด มาหาค่าสูงสุด (Max) ค่าต่ำสุด (Mean) ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยแบ่งตามสัญญาก่อสร้างและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 22 พบว่าค่าเฉลี่ยค่า Strain ที่กำลังแรงด้านทานสูงสุดของวิธี High Pressure Mechanical Mixing ให้ค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยค่า Strain ที่กำลังแรงด้านทานสูงสุด สามารถแบ่งกลุ่มของเนื้อวัสดุออกเป็น 2 กลุ่มอย่างชัดเจนคือ กลุ่มที่ 1 : วิธี Jet Grouting กับวิธี Modified Dry Mixing และกลุ่มที่ 2 : วิธี Low Pressure Mechanical Mixing กับวิธี High Pressure Mechanical Mixing ซึ่งสอดคล้องกับการแบ่งกลุ่มโดยพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ เมื่อนำข้อมูลผลการทดสอบค่า Strain ที่กำลังแรงด้านทานสูงสุด มาเปรียบเทียบตามความยาวแนวคลองระบายน้ำของโครงการฯ โดยใช้โปรแกรม Surfer 7.0 โดยแบ่งตามสัญญาก่อสร้างและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ แสดงดังภาพที่ 50 พบว่าวิธี Jet Grouting กับวิธี Modified Dry Mixing มีค่า Strain ที่กำลังแรงด้านทานสูงสุดประมาณ 0.3% - 0.9% และวิธี Low Pressure Mechanical Mixing กับวิธี High Pressure Mechanical Mixing มีค่า Strain ที่กำลังแรงด้านทานสูงสุดประมาณ 0.9% - 1.5% จะเห็นได้ว่าลักษณะของเนื้อวัสดุที่ได้จากวิธี Jet Grouting กับวิธี Modified Dry Mixing มีความแข็งแรงสูง แต่เปราะ ส่วนวิธี Low Pressure Mechanical Mixing กับวิธี High Pressure Mechanical Mixing มีความแข็งปานกลางและยืดหยุ่นได้ดี

ตารางที่ 22 การเปรียบเทียบวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แต่ละวิธีด้วยค่า Strain ที่กำลังแรง
 ด้านทานสูงสุด : ปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก. /ลบ.ม. ที่ 28 วัน

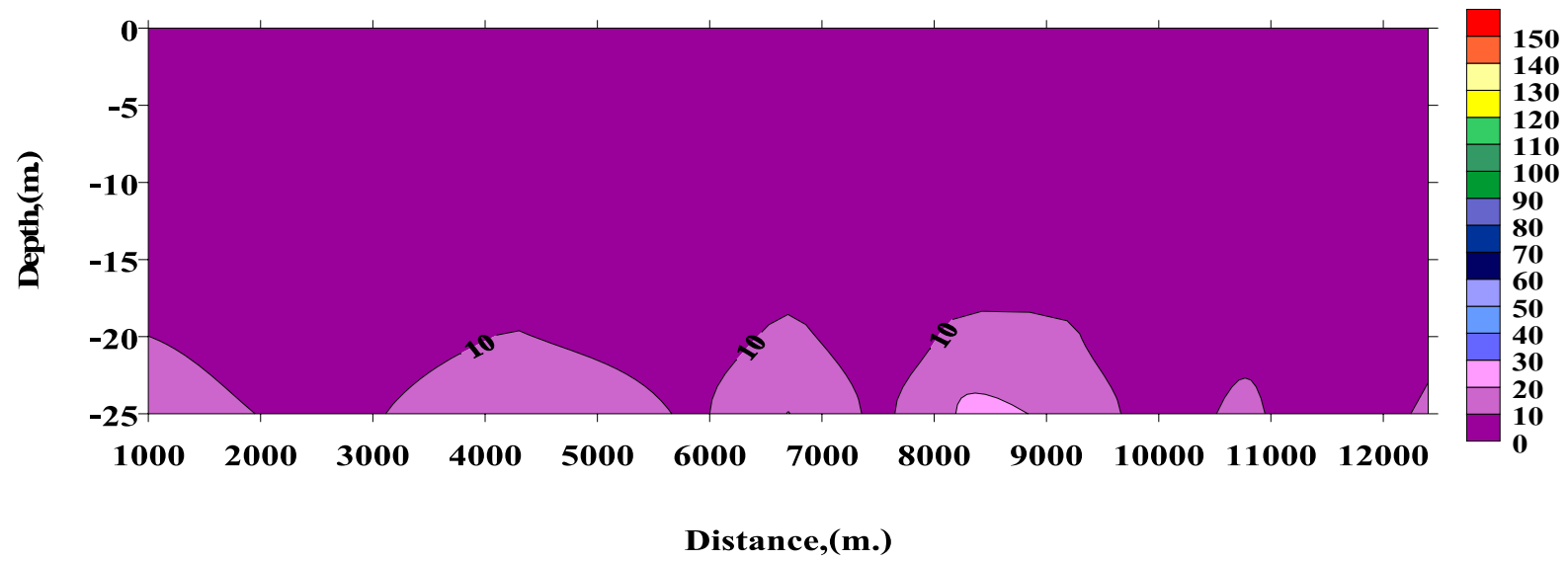
Section	Method	N	Strain at Failure,(%)			
			Max	Min	Mean	SD
1	Low Pressure	298	2.60	0.07	0.96	0.37
2	Low Pressure	417	2.00	0.30	0.83	0.30
2	Jet Grouting	226	1.60	0.30	0.62	0.20
2	Modified Dry Mixing	131	1.61	0.30	0.66	0.18
3	High Pressure	489	2.00	0.20	1.02	0.27



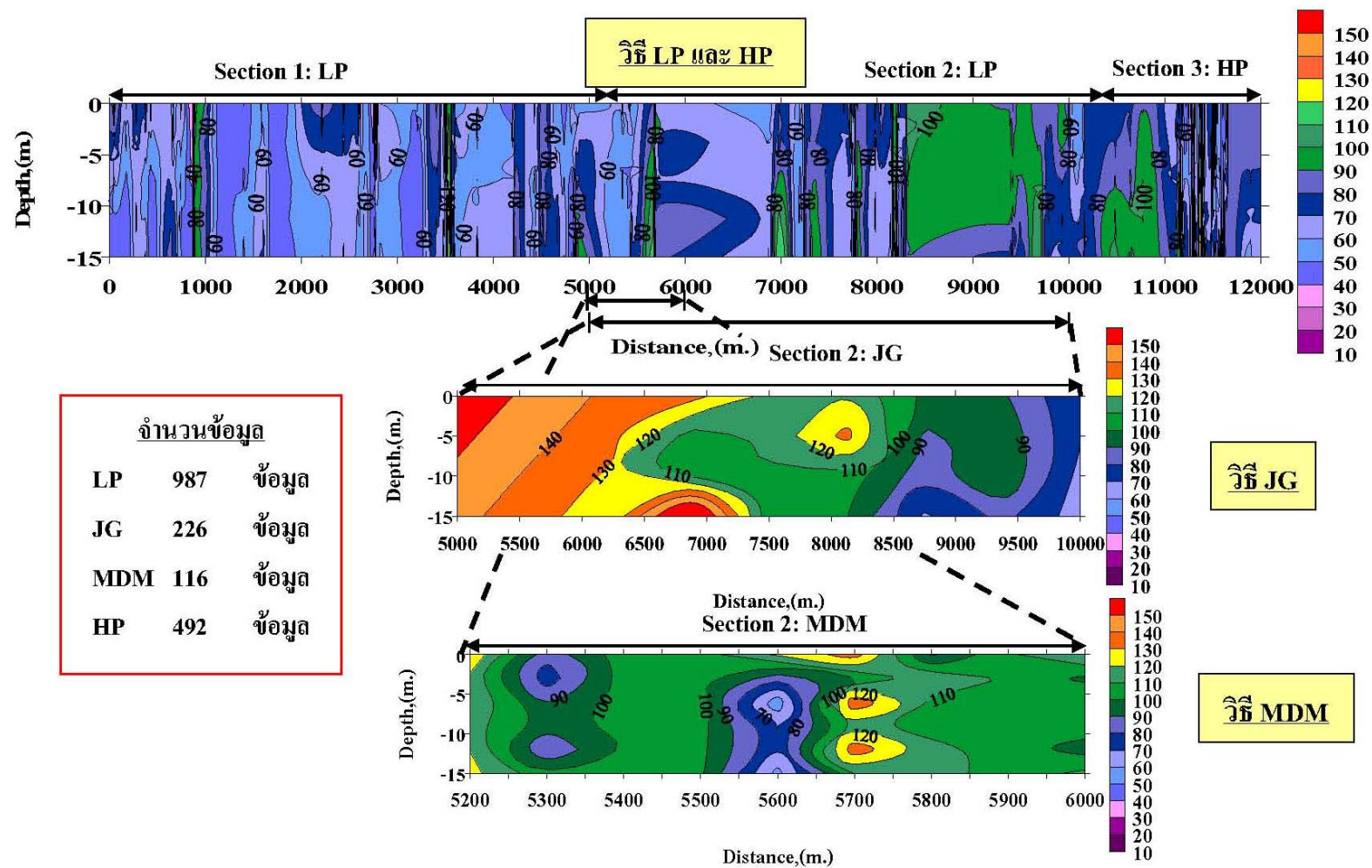
ภาพที่ 45 ค่า Natural Water Content, (%) ของดินเดิม



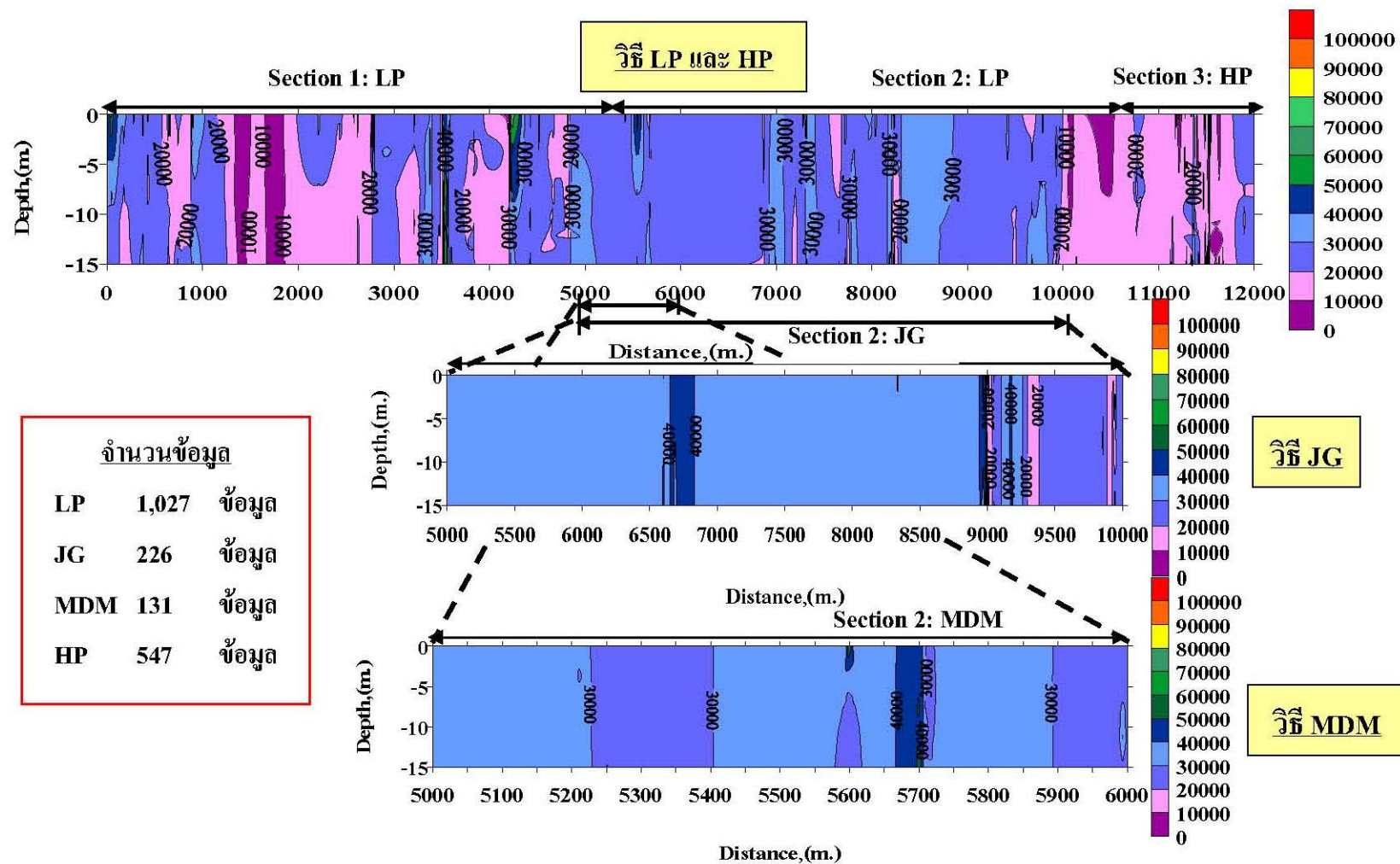
ภาพที่ 46 ค่า Natural Water Content, (%) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยวิธี LP, JG, MDM และ HP



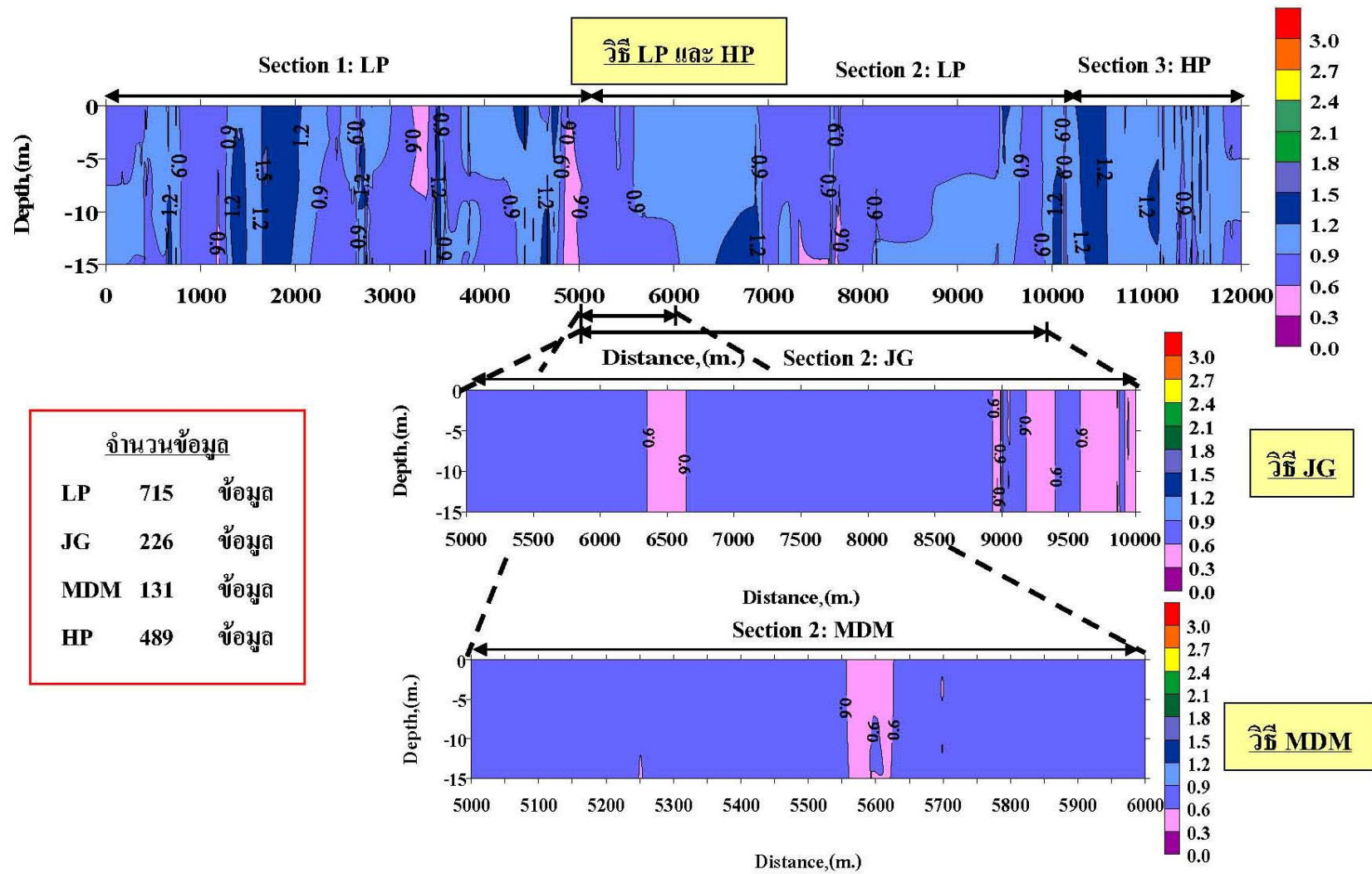
ภาพที่ 47 ค่า Undrained Shear Strength, (t/m²) ของดินเดิม



ภาพที่ 48 ค่า Undrained Shear Strength, (t/m^2) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยวิธี LP, JG, MDM และ HP



ภาพที่ 49 ค่า Modulus of Elasticity, (t/m^2) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยวิธี LP, JG, MDM และ HP



ภาพที่ 50 ค่า Strain at Failure, (t/m^2) ของเสาเข็มคิน-ซีเมนต์ โดยวิธี LP, JG, MDM และ HP

สำหรับผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ Secant Modulus at 50% q_u กับกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำของคุณสมบัติเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ เป็นผลการทดสอบปริมาณปูนซีเมนต์ 220 กก./ลบ.ม. ที่ 28 วัน ภายในโครงการระบายน้ำบริเวณ สนามบินสุวรรณภูมิ โดยใช้สถิติมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of Determination, r^2) ที่ให้ค่ามากกว่า 0.40 แล้วจึงวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ซึ่งผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จากการวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 สรุปความสัมพันธ์ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ที่วิเคราะห์ได้จากการวิจัยครั้งนี้

Method	สมการถดถอย	r^2	N
Low Pressure	$E_{50} = 319 S_u$	0.613	1974
Jet Grouting	$E_{50} = 320 S_u$	0.419	452
Modified Dry Mixing	$E_{50} = 281 S_u$	0.734	232

7.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรง (Strength Index) และความชื้นในมวลดิน (Water Content Index) ระหว่างดินเดิมกับเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ เป็นการเปรียบเทียบความแข็งแรงและความชื้นในมวลดิน เป็นการนำข้อมูลผลการทดสอบที่จัดเก็บในระบบฐานข้อมูล ได้แก่ ผลการทดสอบการเจาะสำรวจชั้นดิน ผลการทดลองผสมตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ และผลการทดสอบกำลังต้านทานของตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในสนาม ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบความแข็งแรงของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนาม, ดินเดิมรวมถึงตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ เรียกว่า ดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) และการเปรียบเทียบความชื้นในมวลดินของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม เรียกว่า ดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index) โดยมีรายละเอียดดังนี้

7.2.1 การเปรียบเทียบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index): เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำดังตารางที่ 24 เพื่อให้ทราบถึงการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงในแต่ละวิธีการทดสอบ โดยแบ่งการเปรียบเทียบดังนี้

- เสาค้ำดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลผลการทดสอบกำลังต้านทานของตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อข้อมูลผลการทดสอบการเจาะสำรวจชั้นดิน

- ตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการต่อดินเดิม เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลผลการทดลองผสมตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการต่อข้อมูลผลการทดสอบการเจาะสำรวจชั้นดิน

- เสาค้ำดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลผลการทดสอบกำลังต้านทานของตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อวิธีกับข้อมูลผลการทดลองผสมตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 24 สรุปการเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)

การเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)		
เสาค้ำดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม		
วิธี	สัญลักษณ์	จำนวนเท่า
Low Pressure Mechanical Mixing	$I_{S,LP}$	36
Jet Grouting	$I_{S,JG}$	43
Modified Dry Mixing	$I_{S,MDM}$	53
High Pressure Mechanical Mixing	$I_{S,HP}$	38
ตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการต่อดินเดิม		
วิธี	สัญลักษณ์	จำนวนเท่า
Wet Mixed	$I_{S,L}$	54
เสาค้ำดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ		
วิธี	สัญลักษณ์	จำนวนเท่า
Low Pressure Mechanical Mixing	$I_{S,F\&L,LP}$	0.7
Jet Grouting	$I_{S,F\&L,JG}$	0.8
Modified Dry Mixing	$I_{S,F\&L,MDM}$	0.9
High Pressure Mechanical Mixing	$I_{S,F\&L,HP}$	0.7

7.2.2 การเปรียบเทียบดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index): เป็นการเปรียบเทียบเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม โดยใช้ข้อมูลผลการทดสอบของตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อข้อมูลผลการทดสอบการเจาะสำรวจชั้นดิน เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในมวลดินในแต่ละวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ซึ่งค่าปริมาณความชื้นในมวลดิน แสดงดังตารางที่ 25

การเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม พบว่าวิธี Modified Dry Mixing มีค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) เพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 53 เท่าเมื่อเทียบกับดินเดิม และค่าดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index) ต่ำสุดคือ 0.6 เท่าเมื่อเทียบกับดินเดิม เนื่องจากวิธี Modified Dry Mixing ในระหว่างการผสมของปูนซีเมนต์กับมวลดิน จะมีการเพิ่มน้ำเพื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณความชื้นในมวลดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในมวลดินของดินเดิมเป็นหลัก ส่วนวิธี High Pressure Mechanical Mixing มีค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) เพิ่มขึ้นปานกลางคือ 38 เท่าเมื่อเทียบกับดินเดิม และค่าดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index) คือ 0.9 เท่าเมื่อเทียบกับดินเดิม แสดงว่าวิธี High Pressure Mechanical Mixing หลังจากการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แล้วเสร็จ จะให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง และค่าปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ลดลง ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดความสมดุลและส่งผลให้เนื้อของวัสดุมีความยืดหยุ่นและรับแรงกระทำด้านข้างได้มากกว่าวิธีอื่น

ตารางที่ 25 สรุปการเปรียบเทียบค่าดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index)

การเปรียบเทียบค่าดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index)		
เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม		
วิธี	สัญลักษณ์	จำนวนเท่า
Low Pressure Mechanical Mixing	$I_{W,LP}$	0.8
Jet Grouting	$I_{W,JG}$	1.2
Modified Dry Mixing	$I_{W,MDM}$	0.6
High Pressure Mechanical Mixing	$I_{W,HP}$	0.7

การเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) ของตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการต่อดินเดิม พบว่าวิธี Wet Mixed มีค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) เพิ่มขึ้น 54 เท่าเมื่อเทียบกับดินเดิม เนื่องจากการทดลองผสมตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการมีการควบคุมการผสมทดลองระหว่างดินเหนียวเดิมผสมซีเมนต์และน้ำ โดยทำการผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 220 กิโลกรัมต่อน้ำหนักของดินเปียก 1 ลูกบาศก์เมตรเท่ากับที่ใช้ก่อสร้างจริงในสนามที่ Water – Cement Ratio เท่ากับ 1: 1 ซึ่งแตกต่างจากการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามที่การควบคุมการผสมระหว่างดินเหนียวเดิมกับซีเมนต์และน้ำ ทำได้ยากกว่าในห้องปฏิบัติการ

การเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) และค่าดัชนีความชื้นในมวลดิน (Water Content Index) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่ตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ พบว่าวิธี Modified Dry Mixing มีค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) มากสุดคือ 0.9 เท่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ การเปรียบเทียบเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่ตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการจะมีความสัมพันธ์กับวิธี Low Pressure Mechanical Mixing, Jet Grouting และ High Pressure Mechanical Mixing เนื่องจากการทดสอบตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการเป็นการทดสอบแบบ Wet Mixed ซึ่งตรงกันข้ามกับวิธี Modified Dry Mixing ที่การทดสอบตัวอย่างดิน-ซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการเป็นการทดสอบแบบ Dry Mixed จึงทำให้ข้อมูลที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบเป็นการทดสอบที่แตกต่างกัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การนำเอาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการจัดเก็บ ประมวลผล และวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบในสนาม ทำให้สามารถสืบค้นและนำเสนอความก้าวหน้าของการก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งช่วยในการควบคุมงานก่อสร้าง ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการประเมินลักษณะต่างๆ โดยรวมของพื้นที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

2. จากการวิจัยครั้งนี้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินและความลึก มีความสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงไปตามทฤษฎีของ SHANSEP แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ

2.1 รูปแบบที่ 1: มีลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน เพิ่มขึ้นตามความลึกและมีสัดส่วนกับค่า Strength Ratio ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่มีชั้น Weathered Crust เรียกว่า Soil Strength Line Pattern “C” (SSL“C”) มีลักษณะค่ากำลังรับแรงเฉือนในชั้นดินเหนียวอ่อน (ช่วงความลึก 0.0 ถึง -9.0 เมตร) ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น

2.2 รูปแบบที่ 2: มีลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน เพิ่มขึ้นตามความลึกและมีสัดส่วนกับค่า Strength Ratio เฉพาะชั้น Soft Clay ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีชั้น Weathered Crust เรียกว่า Soil Strength Line Pattern “CC” (SSL“CC”) มีลักษณะของค่ากำลังรับแรงเฉือนค่อยๆ ลดลงตามความลึกในชั้น Weathered Crust (ช่วงความลึก 0.00 ถึง -3.00 เมตร) แล้วจากนั้นในชั้น Soft Clay (ช่วงความลึก -3.00 ถึง -9.00 เมตร) ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น

3. จากผลการจำแนกลักษณะชั้นดิน พบว่าที่ตำแหน่ง 3,000 เมตร ถึง 5,000 เมตร และตำแหน่ง 7,000 เมตร ถึง 8,000 เมตร ชั้นดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนมากกว่าตำแหน่งอื่น เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติดิน แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพจากการวิจัยครั้งนี้มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แต่ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางวิศวกรรมจากการวิจัยครั้งนี้มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

4. จากผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นระหว่างคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการวิจัยในเชิงสถิติ พบว่าทุกความสัมพันธ์มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (r^2) มากกว่า 0.9 และความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$C_c = 0.007 LL - 0.533 \quad , \quad C_c = 0.010 W_n + 0.172$$

$$C_r = 0.0006 LL - 0.103 \quad , \quad e_0 = 0.0110 W_n + 1.220$$

$$e_0 = 0.0008 LL + 2.240$$

5. จากผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ทั้งหมด 4 วิธี สรุปได้ดังนี้

- ปริมาณความชื้นในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ของวิธี Jet Grouting มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือวิธี Low Pressure Mechanical Mixing, Modified Dry Mixing และ High Pressure Mechanical Mixing ตามลำดับ

- กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำของวิธี Modified Dry Mixing มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือวิธี Jet Grouting, Low Pressure Mechanical Mixing และ High Pressure Mechanical Mixing ตามลำดับ

- ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวิธี Modified Dry Mixing มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือวิธี Jet Grouting, Low Pressure Mechanical Mixing และ High Pressure Mechanical Mixing ตามลำดับ

- ค่า Strain ที่กำลังแรงต้านทานสูงสุดของวิธี High Pressure Mechanical Mixing มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือวิธี Low Pressure Mechanical Mixing, Modified Dry Mixing และ Jet Grouting ตามลำดับ

6. จากการเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรง (I_s) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม พบว่าวิธี Modified Dry Mixing ($I_{s,MDM}$) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 53 เท่าต่อนดินเดิม รองลงมาคือวิธี Jet Grouting ($I_{s,JG}$) มีค่าเท่ากับ 43 เท่าต่อนดินเดิม, High Pressure Mechanical Mixing ($I_{s,HP}$) มีค่าเท่ากับ 38 เท่าต่อนดินเดิม และ Low Pressure Mechanical Mixing ($I_{s,LP}$) มีค่าเท่ากับ 36 เท่าต่อนดินเดิม

7. จากการเปรียบเทียบค่าดัชนีความชื้นในมวลดิน (I_w) ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในสนามต่อดินเดิม พบว่าวิธี Jet Grouting ($I_{w,JG}$) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.2 เท่าต่อนดินเดิม รองลงมาคือวิธี Low Pressure Mechanical Mixing ($I_{w,LP}$) มีค่าเท่ากับ 0.8 เท่าต่อนดินเดิม, High Pressure Mechanical Mixing ($I_{w,HP}$) มีค่าเท่ากับ 0.7 เท่าต่อนดินเดิม และ Modified Dry Mixing ($I_{w,MDM}$) มีค่าเท่ากับ 0.6 เท่าต่อนดินเดิม

8. เมื่อพิจารณาทางด้านกำลังที่ดีและมีแรงยึดหยุ่น พบว่าวิธี High Pressure Mechanical Mixing และ Low Pressure Mechanical Mixing มีคุณสมบัติพอกัน

9. กรณีที่ต้องพิจารณาทางด้านกำลังที่สูง พบว่าวิธี Modified Dry Mixing และ Jet Grouting มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ซึ่งเนื้อของวัสดุมีความแข็งแรงแต่เปราะ ไม่ควรนำไปก่อสร้างในกรณีที่ต้องรับแรงกระทำด้านข้าง

ข้อเสนอแนะ

1. ฐานข้อมูลในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ จากการทำวิจัยนี้ยังไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของจังหวัดสมุทรปราการ และยังไม่ครอบคลุมถึงพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และดินเหนียวอ่อนมากที่ตกตะกอนใหม่ ทั้งหมด 13 จังหวัด หากมีการทำวิจัยต่อ โดยขยายพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ให้ครอบคลุมมากขึ้นหรือทั้งหมด ทำให้รวบรวมเป็นองค์ความรู้เกี่ยวกับข้อมูลดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและครอบคลุมยิ่งขึ้น

2. เมื่อมีข้อมูลผลการทดสอบที่เกี่ยวข้องหรือข้อมูลจากโครงการข้างเคียง สามารถนำมาเพิ่มเติมเพื่อความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นในการตรวจสอบคุณภาพ โดยป้อนข้อมูลผ่านฐานข้อมูลในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ของโปรแกรม ArcView 3.3 ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลทำได้แม่นยำมากขึ้น

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ตลอดจนการวิเคราะห์การถดถอยระหว่างคุณสมบัติดิน ควรเพิ่มการวิเคราะห์ข้อมูลดินเหนียวแข็งปานกลางและดินเหนียวแข็ง

4. จากการวิจัยครั้งนี้ยังขาดข้อมูลผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิค ดังนั้นควรมีการติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิค เช่น Surface Settlement Plate, Piezometer, Inclinator เป็นต้น เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทรุดตัว การบีบอัดของคันดินในลักษณะการเคลื่อนไถลของมวลดินให้อยู่ในสถานะใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ และเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย

5. นอกจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ทั้งหมด 4 วิธีแล้ว ควรศึกษาเพิ่มเติมทางด้านพฤติกรรมเชิงลึกเกี่ยวกับโซนที่มีอิทธิพล (Influence Zone) รอบบริเวณเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ และอายุการบ่มของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แต่ละต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กวีวงษ์ คุสุวรรณ. 2530. การประเมินค่าทางสถิติของสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกษม เพชรเกตุ. 2541. เทคนิคการใช้ Deep Soil Stabilization สำหรับงานดินอ่อนในประเทศไทย. การสัมมนาทางวิชาการเรื่อง การปรับปรุงคุณภาพดิน '41. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- จอม จันท์หิรัญ. 2543. พฤติกรรมของถนนบนดินอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย Cement Column ทางหลวงหมายเลข 34 สาย บางนา-ชลบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จารุณี ดีเลิศ. 2543. เอกสารประกอบการอบรมโปรแกรม ArcView และระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เบื้องต้น. โครงการธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมเพื่อการวางแผน กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี.
- ชิตชัย อนันตเศรษฐ และวัฒนา มกรโรจน์ฤทธิ์. 2545. การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการผสมปูนซีเมนต์สำหรับดินเหนียวแข็งและทรายปนดินเหนียว. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ขอนแก่น.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2549. Cement Pozzolan and Concrete. สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.
- ดรรรัตน์ ดิษบรรจง. 2540. ความรู้เบื้องต้นและการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS). กองสำรวจทรัพยากรธรรมชาติด้วยดาวเทียม, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์. 2541. การปรับปรุงดินในงานทางหลวง. สัมมนาเรื่องการปรับปรุงคุณภาพดิน'41. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

บริษัท เอส ที เอส อินสตรูमेंท์ จำกัด. 2549ก. รายงานผลการเจาะสำรวจดินเพื่อการก่อสร้าง
คลองระบายน้ำและถนนพร้อมอาคารประกอบส่วนที่ 1, กรุงเทพฯ.

_____. 2549ข. รายงานผลการเจาะสำรวจดินเพื่อการก่อสร้างคลองระบายน้ำและถนนพร้อม
อาคารประกอบส่วนที่ 2, กรุงเทพฯ.

_____. 2549ค. รายงานผลการเจาะสำรวจดินเพื่อการก่อสร้างคลองระบายน้ำสถานีสูบน้ำ
สะพานยกระดับและถนนพร้อมอาคารประกอบส่วนที่ 3, กรุงเทพฯ.

บริษัท เท็น คอนซัลแต้นท์ จำกัด. 2549. รายงานการผสมทดลอง (Mix Design) ของเสาเข็มดิน-
ซีเมนต์แบบ Wet Mixed., กรุงเทพฯ.

บริษัท ไทย ทีน็อกซ์ จำกัด. 2549. วิธีการควบคุมงานก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยวิธีระบบ
เปียก การผสมแบบ Mechanical Mixing และฉีดน้ำปูนด้วยความดันต่ำ, กรุงเทพฯ.

บริษัท ไพลอน จำกัด. 2549. วิธีการทำแปลงทดลองสำหรับงานเสาเข็มดิน-ซีเมนต์, กรุงเทพฯ.

บริษัท ฟาสต์ แทรค เทคโนโลยี จำกัด. 2549. วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนโดยใช้เสาเข็มดิน-
ซีเมนต์, กรุงเทพฯ.

บริษัท อิตัลไทยเทรวิ จำกัด. 2549. วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนโดยใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์,
กรุงเทพฯ.

ปณฺฑิต สุวรรณวิวัฒนา. 2545. ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ โดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์
GRASS. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พงษ์ศิลป์ เดชะดวงศ์. 2544. การศึกษาพฤติกรรมความเค้นความเครียดของกำแพงกันดินชนิด
เรียงต่อเนื่องด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มณฑา ตันติพรหมินทร์. 2546. แผนภูมิสำหรับการออกแบบความสูงคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน
กรุงเทพฯ ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์.

บัณฑิต วณิชวิภากิจ. 2529. การประเมินวิธีการวิเคราะห์และพารามิเตอร์ของดินเพื่อออกแบบคัน
ดินบนดินอ่อนกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รสสุคนธ์ ชื่นวัฒนา. 2546. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิชาญ ภูพัฒน์, วรากร ไผ่เรียง, ก่อโชค จันทรวงกูร, นิรันดร์ ชัยมณี, นิพนธ์ ชีระชัยกุลพานิช,
ปณูท สุวรรณวิวัฒนา และ เอกพงศ์ กิตติพัฒนศักดิ์. 2545. ข้อมูลสภาพดินบริเวณ
ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์,
กรุงเทพฯ.

อุทัย สุขสิงห์. 2549. การจัดการระบบฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ด้วยโปรแกรม
ArcView3.2a-3.3. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

อนุวัฒน์ ทองคำ. 2538. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยวิธีผสมซีเมนต์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Bergado, D.T., J.C. Chai, M.C. Alfaro and A.S. Balasubramaniam. 1992. **Improvement
Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment.** Division of
Geotechnical & Transportation Engineering. Asian Institute of Technology, Bangkok,
Thailand.

Bjerrum, L. 1972. **Embankment on Soft Ground,** Proc. ASCE Specialty Conference on
Earth and Earth – Supported Structures. Perdue University, Indiana

Brom, B.B. 1984. **Stabilization of Soft clay with Lime Column**, Proc. Seminar of Soil Improvement and Construction Techniques. Nanyang Technological Institute, Singapore.

Gunther, J., G. Holm, G. Westberg and H. Eriksson. 2004. **Modified Dry Mixing (MDM)-A New Possibility in Deep Mixing.**

Japan-Thailand Joint Study Project on Soft Clay Foundation between Department of Highways, Ministry of Transport and Communications & Japan International Cooperation Agency. 1998. **Manual for Design and Construction of Cement Column Method (Final Draft).**

Joseph, E. B. **Foundation Analysis and Design.** McGraw-Hill International Book Company.

Mesri, G. 1975. **New Design Procedure for Stability of Soft Clay.** Geotech. Eng., ASCE

Mitsuo, N. 1998. **Quality Control of DMM (Deep Mixing Method).** 1 Seminar of Japan-Thailand Joint Study Project of Soft Clay Foundation.

Moh, Z.C. and E.W. Brand. 1969. **Pore Pressure under a Bund on Soft Fissured Clay.** Proceedings Performance of Earth and Earth-Supported Structures. Perdue University.

Matsumoto, J., J. Ohbayashi, K harada, H. Tsuboi and T. Matsui. 1998. **Application Examples of Some Innovative Ground Improvement Techniques Developed in Japan.** 2 nd International Conference on Ground Improvement Techniques.

Porbaha, A. 2002. **State of the Art in Quality Assessment of Deep Mixing Technology.** New Technology & Research. Department of Transportation, USA.

Seah, T.H. 1998. **Quality Control of Deep Stabilization Method.** สัมมนาเรื่องการปรับปรุงคุณภาพดิน'41. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

Saitoh, S., S. Nishioka, R. Okumura and Y. Suzuki. 1996. **Required Strength of Cement Improved Ground.** Grouting and Deep Mixing. 10 th ICSMFE.

Takeda, T., Y. Yamane, M. Yamamura and H. Ueki. 1998. **Ground Improvement by Jet & Mechanical Mixing Method.** 2 nd International Conference on Ground Improvement Techniques.

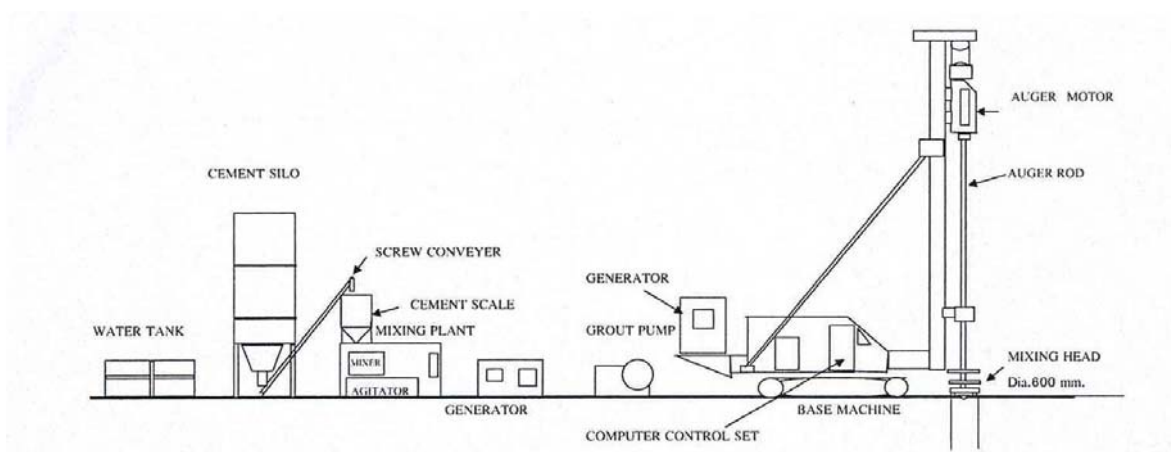
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

Low Pressure Mechanical Mixing

การก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ของวิธีนี้เป็นการฉีดน้ำปูนด้วยความดันต่ำ ทำให้การสูญเสียกำลังของดินในแนวราบมีน้อยและการผสมโดยใบเกล็ดตามขนาดของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ กวนผสมทำให้ดินผสมเข้ากับน้ำปูนได้ดีสม่ำเสมอตลอดความยาวของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

สำหรับอุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ มีรายละเอียดลักษณะการจัดวางอุปกรณ์และเครื่องจักรต่างๆ แสดงดังภาพผนวกที่ ก1, รูปถ่ายอุปกรณ์และเครื่องจักรต่างๆ แสดงดังภาพผนวกที่ ก2 และภาพผนวกที่ ก3 มีรายละเอียดดังนี้



ภาพผนวกที่ ก1 แสดงลักษณะการจัดวางอุปกรณ์วิธี Low Pressure Mechanical Pressureที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

ที่มา: บริษัท ไพรอน จำกัด (2549)

1. เครื่องเจาะ (Base Machine) ประกอบด้วย

- รถเจาะ (Rig)
- หัวเจาะ (Mixing Head)

2. ชุดคอมพิวเตอร์ควบคุม (Computer Control Set) ประกอบด้วย

- หน้าจอแสดงผล (Monitor)
- เครื่องวัดความลึก (Encoder)
- เครื่องวัดการไหล (Flow meter)



ตัวรถ



หัวเจาะ



หน้าจอแสดงผล



เครื่องพิมพ์ข้อมูล

ภาพผนวกที่ ก2 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องเจาะ โดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure

3. แพล้นผสมน้ำปูน (Mixing Plant) ประกอบด้วย

- ถังผสม (Mixing Tank)
- ท่อส่งซีเมนต์ (Screw Conveyor)
- ถังเก็บปูนซีเมนต์ (Cement Silo)



ถังเก็บปูนซีเมนต์



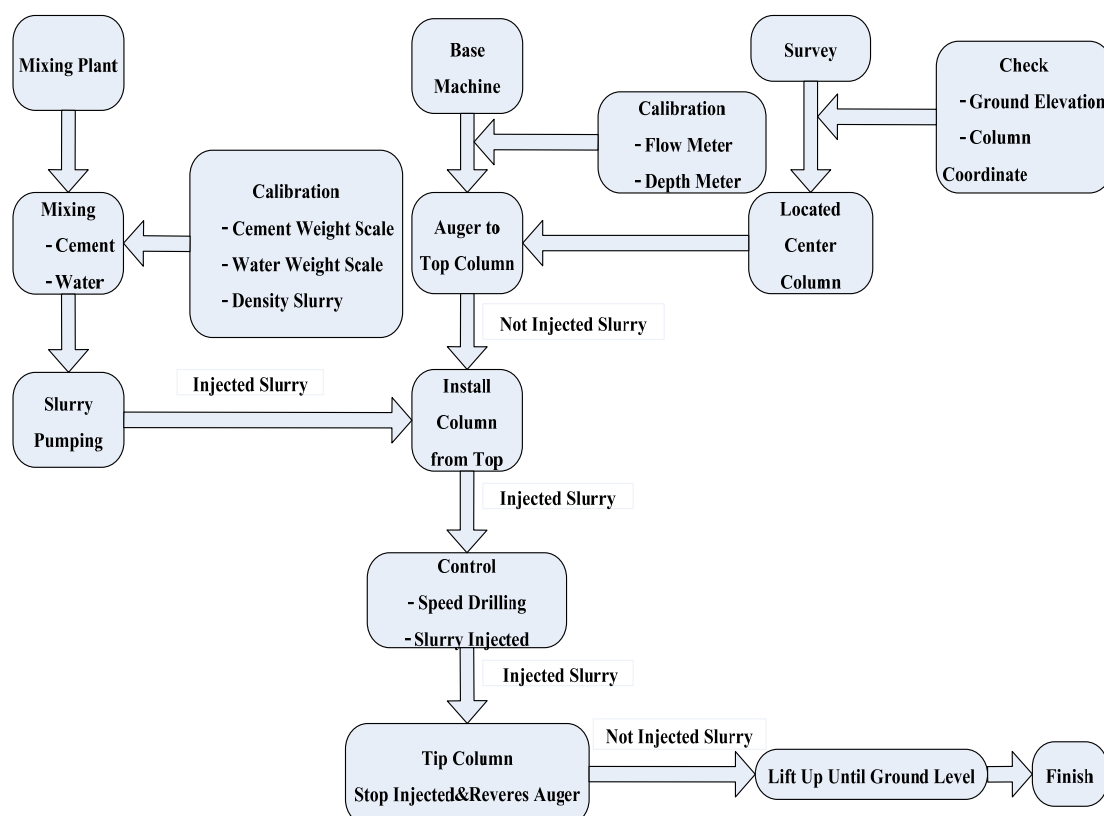
ถังผสม



ท่อส่งซีเมนต์

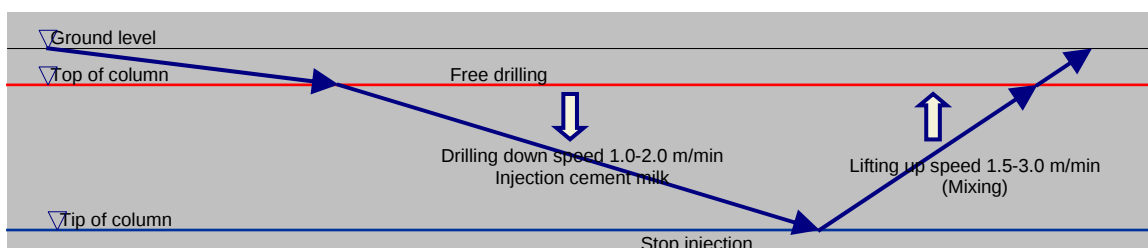
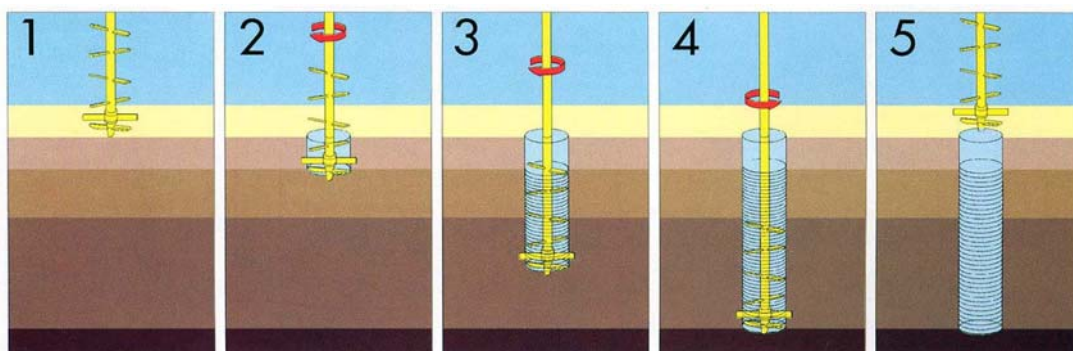
ภาพผนวกที่ ก3 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดแพล้นผสมน้ำปูนโดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure

ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จะเริ่มจากการปรับเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ทั้งหมดแสดงตามลำดับการทำงานดังภาพผนวกที่ ก4 และภาพตัดขวางรายละเอียดในการทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์และขั้นตอนการก่อสร้างดังภาพผนวกที่ ก5 และภาพผนวกที่ ก6 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้



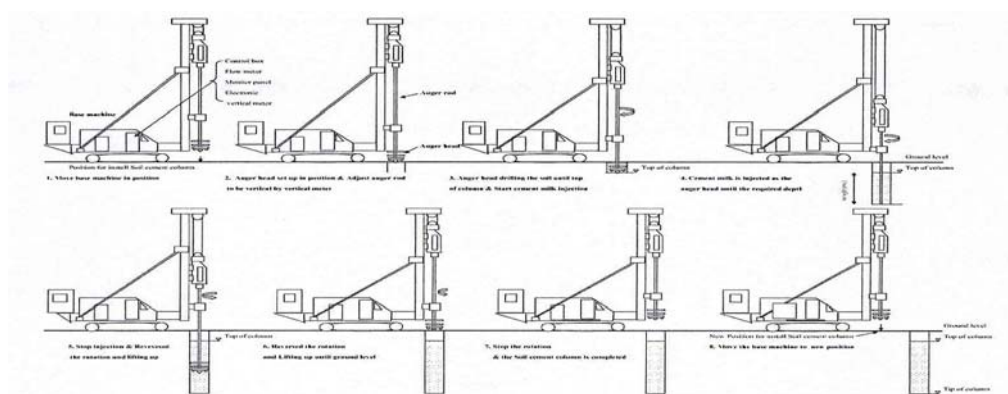
ภาพผนวกที่ ก4 สรุปแผนการทำงานและการปรับเทียบเครื่องมือโดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure เพื่อก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

ที่มา: บริษัท ไพรอน จำกัด (2549)



ภาพผนวกที่ ก5 ภาพตัดขวางแสดงการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure

ที่มา: บริษัท ไทย ทีน็อกซ์ จำกัด (2549)



ภาพผนวกที่ ก6 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Low Pressure Mechanical Pressure

ที่มา: บริษัท ไพรอน จำกัด (2549)

อธิบายขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ตามภาพผนวกที่ ก6 ดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งศูนย์กลางของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ลงบนพื้นดิน
2. เคลื่อน Base Machine เข้าไปยังตำแหน่งในข้อ 1
3. นำหัวเจาะที่ติดกับ Base Machine ไปยังตำแหน่งในข้อ 1
4. ปรับให้ก้านหัวเจาะอยู่ในแนวตั้ง
5. เจาะพร้อมหมุนหัวเจาะลงไปที่ระดับหัวเสาเข็มโดยไม่ถีดินน้ำปูน
6. เริ่มการถีดินน้ำปูนพร้อมหมุนหัวเจาะจากระดับหัวเสาเข็มดินที่กำหนด
7. เจาะผสมดินลงด้วยความเร็วขาลงและถีดินน้ำปูนตามรายการคำนวณตลอดความยาวเสาเข็มจนถึงระดับความลึกที่กำหนด
8. หยุดการถีดินน้ำปูน
9. หมุนหัวเจาะกลับทิศทางและถอนหัวเจาะขึ้นด้วยความเร็วขาขึ้นคงที่
10. ขณะก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ สามารถควบคุมการก่อสร้างผ่านชุดคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งภายในรถเจาะและพิมพ์ข้อมูลออกมาทันที ดังภาพผนวกที่ ข7 ประกอบด้วยข้อมูลดังนี้
 - ชื่อหมายเลขเสาเข็มดิน-ซีเมนต์
 - วันที่และเวลาที่ทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์
 - อัตราส่วนผสมน้ำ-ปูนซีเมนต์

- ปริมาณน้ำปูนซีเมนต์ที่ใช้ ณ ระดับต่างๆ และปริมาณน้ำปูนทั้งหมดที่ทำการก่อสร้างในแต่ละต้น

- ความดันที่ใช้ในการอัดฉีด

- อัตราความเร็วในการเจาะและการถอนก้านเจาะ

- รอบการหมุนก้านเจาะ

COLUMN RECORD					
DATE 2001/06/29					
COLUMN-No. 00016					
TIME	DEPTH	SPEED	AMPERAGE	FLOW	TOTAL
min:sec	m	m/min	A	L/min	l
00:00	00.0	00.0	0000	000	0000
00:00	01.0	00.0	0129	000	0000
00:05	01.1	00.0	0127	120	0007
00:47	02.0	01.4	0164	166	0123
01:26	03.0	01.6	0169	166	0232
02:02	04.0	01.6	0190	168	0335
02:42	05.0	01.6	0111	167	0443
03:22	06.0	01.4	0092	166	0553
04:02	07.0	01.3	0089	165	0665
04:41	08.0	01.6	0081	166	0775
05:20	09.0	01.5	0080	168	0886
06:00	10.0	01.4	0092	168	0997
06:39	11.0	01.6	0087	180	1104
07:19	12.0	01.5	0099	167	1216
07:59	13.0	01.4	0107	167	1329
08:39	14.0	01.7	0136	167	1441
09:19	15.0	01.4	0117	167	1554
10:02	16.0	01.4	0113	165	1671
10:04	16.0	00.3	0119	166	1678
*10:06	16.0	00.0	0083	160	1684
10:27	16.0	01.8	0060	000	1684
10:54	15.0	02.8	0077	000	1684
11:14	14.0	02.9	0123	000	1684
11:35	13.0	02.9	0164	000	1684
11:56	12.0	02.9	0150	000	1684
12:17	11.0	02.9	0190	000	1684
12:38	10.0	02.9	0143	000	1684
12:59	09.0	02.9	0092	000	1684
13:20	08.0	02.8	0140	000	1684
13:41	07.0	02.9	0088	000	1684
14:02	06.0	02.9	0128	000	1684
14:22	05.0	02.9	0242	000	1684
14:43	04.0	02.4	0224	000	1684
15:07	03.0	02.6	0325	000	1684
15:28	02.0	02.4	0301	000	1684
16:15	01.0	02.2	0166	000	1684
16:56	00.0	02.9	0003	000	1684

Computer Print Out Type 1

Column No.: 0001					
Date : 17/12/01					
Time: 12:59:00					
Depth (m)	Flow (litre)				
	0	10	20	30	40
0.00	[				X
0.50	[				X
1.50	[				X
2.00	[				X
2.50	[				X
3.00	[				X
3.50	[				X
4.00	[				X
4.50	[				X
5.00	[				X
5.50	[				X
6.00	[				X
6.50	[				X
7.00	[				X
7.50	[				X
8.00	[				X
8.50	[				X
9.00	[				X
9.50	[				X
10.00	[				X
10.50	[				X
11.00	[				X
11.50	[				X
12.00	[				X
12.50	[				X
13.00	[				X
13.50	[				X
14.00	[				X

Total consumption (l): 841

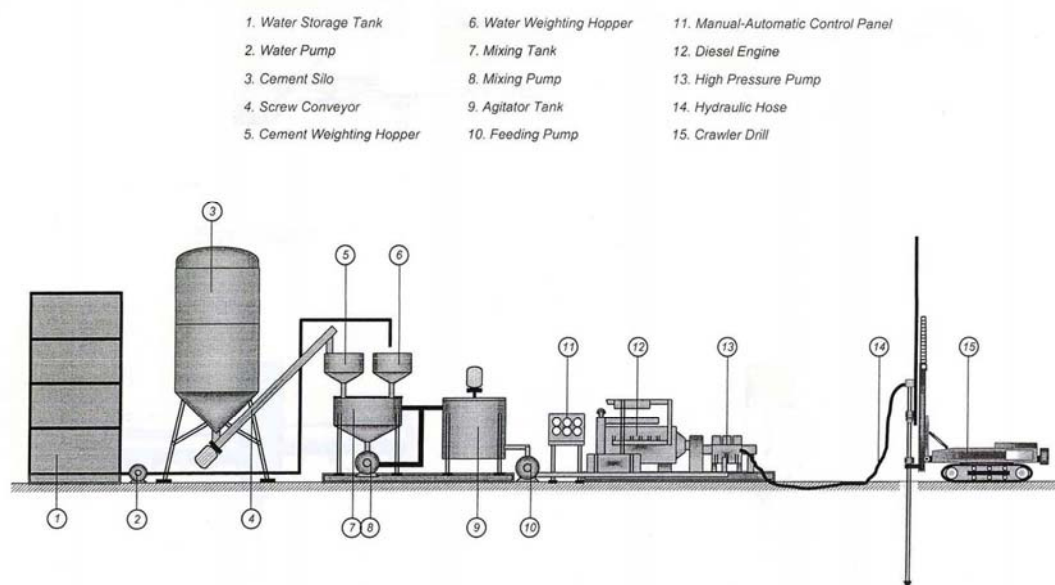
Computer Print Out Type 2

ภาพผนวกที่ ก7 แสดงผลการบันทึกข้อมูลด้วยระบบคอมพิวเตอร์

ที่มา: บริษัท ไทย ทีน็อกซ์ จำกัด (2549)

Jet Grouting

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting เป็นหนึ่งในวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินทางวิศวกรรมระดับลึก (Deep Ground Improvement) เพื่อเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของชั้นดิน ป้องกันการเคลื่อนตัวของดิน และเพิ่มเสถียรภาพความลาดชัน โดยมีรายละเอียดลักษณะการจัดวางอุปกรณ์และเครื่องจักรต่างๆ ดังภาพผนวกที่ ก8



ภาพผนวกที่ ก8 แสดงลักษณะการจัดวางอุปกรณ์วิธี Jet Groutingที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

ที่มา: บริษัท ไพรอน จำกัด (2549)

สำหรับอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน แบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ กล่าวคือ ส่วนเครื่องจักรหลัก (Base Machine) และส่วน Agent Plant เครื่องจักรหลักจะดำเนินการเกี่ยวกับกระบวนการอัดฉีด และผสมน้ำปูนภายในดิน ในขณะที่ส่วน Agent Plant จะมีหน้าที่ป้อนส่วนผสมน้ำปูนที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินให้กับเครื่องจักรหลักอย่างต่อเนื่องและเพียงพอ ทั้งในด้านปริมาณและความดัน โดยเครื่องจักรและเครื่องมือหลักๆ ดังภาพผนวกที่ ก9 ประกอบด้วย

- ถังเก็บปูนผง และถังเก็บน้ำ (Cement Silo and Water Tank) ใช้ในการเก็บสำรองปูนซีเมนต์ผงและน้ำ ที่จะนำมาใช้ผสมเป็น Cement Slurry

- ถังผสม (Mixer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ผสมปูนซีเมนต์ผงกับน้ำ ให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะทำการอัดฉีดเข้าไปในชั้นดินที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพ

- ถังกวน (Agitator) เป็นภาชนะที่บรรจุน้ำปูนสำรองไว้เพื่อรอการอัดฉีด ทำให้การผสมในถังผสมต่อเนื่อง

- ปั๊มอัดฉีดความดันสูง (High Pressure Pump) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายน้ำปูนที่ผสมแล้วไปตามระบบท่อด้วยความดัน 200-400 บาร์

- เครื่องเจาะและอัดฉีด (Jet Grout Drilling Rig) ชุดเครื่องเจาะทั้งหมดจะติดตั้งอยู่บนรถดินตะขาบ บริเวณส่วนหน้าของตัวรถจะมี Hydraulic Rotary Drill Head ติดตั้งอยู่และสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งได้



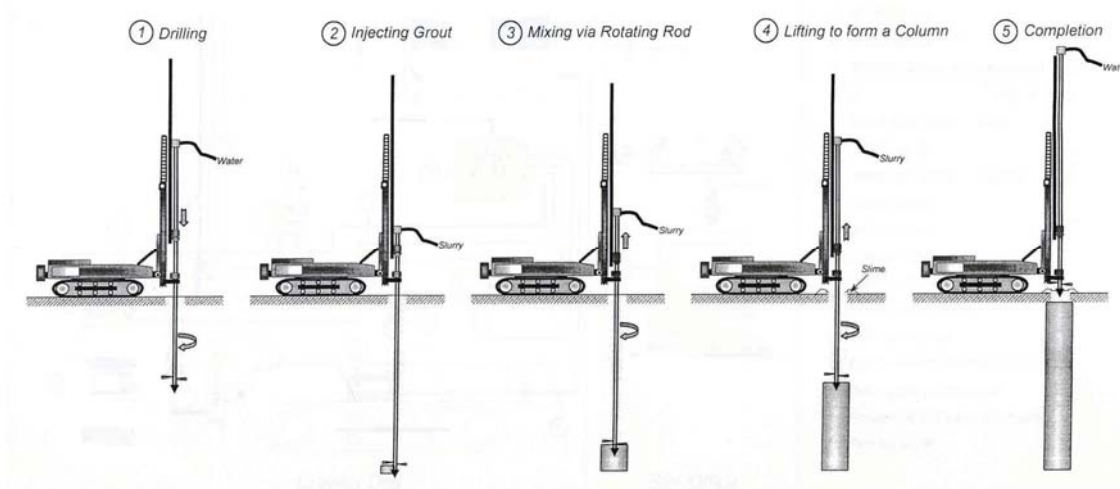
เครื่องเจาะและอัดฉีด



ถังกวน

ภาพผนวกที่ ก9 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือวิธี Jet Grouting

ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แสดงดังภาพผนวกที่ ก10 จะเริ่มจากการทำ Drilling หรือ Prejetting เป็นการกดก้านเจาะลงไปดินจนถึงระดับต่ำสุดของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ โดยในขณะที่กดก้านเจาะลงไปในดินนั้นจะมีการหมุนก้านและอัดฉีดน้ำที่ความดันประมาณ 200-250 บาร์ เพื่อทำลายโครงสร้างเนื้อดินเดิม ขั้นตอนต่อไปเป็นการทำ Jet Grouted Column โดยการฉีดน้ำปูน ด้วยความดันประมาณ 250-400 บาร์ จากจุดต่ำสุดของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ และจะมีการหมุน และยกก้านในความเร็วที่ได้คำนวณไว้แล้วไปพร้อมๆกัน จนถึงระดับหัวเสาเข็มที่ต้องการ แล้วจึงทำการเคลื่อนย้ายเข้าไปเจาะในตำแหน่งเสาเข็มต้นต่อไป



ภาพผนวกที่ ก10 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยวิธี Jet Grouting

ที่มา: บริษัท ไพรอน จำกัด (2549)

Modified Dry Mixing

สำหรับเครื่องจักรและอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน สามารถแยกส่วนประกอบที่สำคัญคือส่วนที่ทำหน้าที่เจาะผสม กับส่วนที่เป่าปูนซีเมนต์ผง (Carrier) ดังภาพผนวกที่ ก11 ประกอบด้วย

- เครื่องจักรสำหรับเจาะ (Installer) เป็นเครื่องจักรที่ผลิตขึ้นสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยเฉพาะ ลักษณะของเครื่องจักรสามารถขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลบนล้อสายพานดินตะขาบ มีแกนเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 127 มิลลิเมตร ยาว 17.50 เมตร มีใบกวนผสมติดตั้งอยู่ที่ปลายด้านล่างของแกนเจาะ ทำหน้าที่ในการกวนผสมปูนซีเมนต์ผงกับดินเดิม

- เครื่องจักรสำหรับเป่าปูนซีเมนต์ผง (Carrier) ใช้สำหรับเป่าปูนซีเมนต์ผงส่งไปยังเครื่องจักรสำหรับเจาะ เครื่องจักรสามารถขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลบนล้อสายพานดินตะขาบ บนตัวเครื่องจักรจะมีถังไซโลปูนสำหรับบรรจุปูนซีเมนต์ผงติดตั้งอยู่จำนวน 2 ถัง สามารถบรรจุปูนซีเมนต์ผงได้ครั้งละประมาณ 25,000-26,000 กิโลกรัม



ใบกวน



เครื่องจักรสำหรับเจาะ



เครื่องจักรสำหรับเป่าปูนซีเมนต์

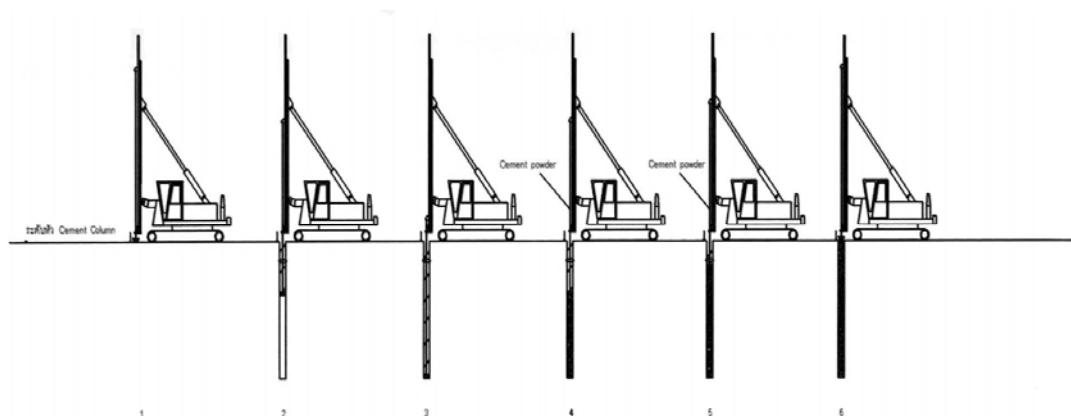


หน้าจอแสดงผล

ภาพผนวกที่ ก11 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือวิธี Modified Dry Mixing

ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์แสดงดังภาพผนวกที่ ก12 มีขั้นตอนที่ง่ายและรวดเร็วมาก กล่าวคือเมื่อทราบความยาวของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการแล้วทำการป้อนค่าความยาวและปริมาณปูนซีเมนต์ลงบนเครื่องควบคุม จากนั้นขับเคลื่อนเครื่องจักรสำหรับเจาะไปยังตำแหน่งที่จะเจาะ ทำการเจาะโดยหมุนแกนเจาะตามเข็มนาฬิกาพร้อมฉีดน้ำและผงปูนซีเมนต์ลงไปตีกวนดิน จนถึงระดับปลายเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ น้ำที่เพิ่มเข้าไปในมวลดินจะออกจากรูที่แยกออกมาจากรูที่แยกออกจากรูฉีดปูนซีเมนต์ เพื่อป้องกันการอุดตัน การเพิ่มน้ำเข้าไปทำให้สามารถเจาะเข้าไปในชั้นดินเหนียวแข็งได้ง่าย และทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

สมบูรณ์มากขึ้น หลังจากนั้นทำการกดปุ่ม Automatic บนคันบังคับควบคุมในเครื่องจักร เพื่อปล่อยปูนซีเมนต์ผงและน้ำจากปลายเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ขึ้นมา โดยที่แกนเจาะจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาจนผสมปูนซีเมนต์ผงกับดินตลอดความยาวเสาเข็มดิน-ซีเมนต์จนถึงระดับบนของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยอัตโนมัติ



ภาพผนวกที่ ก12 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์วิธี Modified Dry Mixing

ที่มา: บริษัท ฟาสต์ แทรค เทคโนโลยี จำกัด (2549)

High Pressure Mechanical Mixing

สำหรับเครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ที่นำมาใช้ แสดงดังภาพผนวกที่ ก13 ประกอบด้วย

- เครื่องจักรสำหรับการเจาะ สามารถขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลบนล้อสายพานดินตะขาบ มีหัวเจาะแบบ Rotary ซึ่งหมุนไปพร้อมๆ กับก้านเจาะ หัวเจาะจะมีรูหัวฉีด (Nozzles) ปล่อยน้ำปูนด้วยแรงดันตลอดเวลา ในขณะเดียวกันที่หัวเจาะและก้านเจาะหมุนจนผสมดินกับซีเมนต์เข้าด้วยกัน ตามพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทำเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ตัวอย่างในสนาม

- ชุดอุปกรณ์ผสมน้ำปูน จะต้องมีความสามารถในการผสมและเก็บน้ำปูนปริมาณเพียงพอที่จะส่งให้เครื่องเจาะ มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติตั้งแต่การผสม, กักเก็บน้ำปูนและอัดฉีด

- ปัมแรงดันสูงสำหรับอัดฉีดน้ำปูน มีสมรรถนะในการอัดฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันตั้งแต่ 50-400 บาร์ อัตราการฉีดสูงสุด 236 ลิตร/นาทิต



เครื่องจักรสำหรับเจาะ



ไซโลปูนซีเมนต์



ปั้มแรงดันสูง



อุปกรณ์ผสมน้ำปูน

ภาพผนวกที่ ก13 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือวิธี High Pressure Mechanical Mixing

อธิบายขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ดังภาพผนวกที่ ก14 ดังนี้

1. การติดตั้ง Platform ในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างเพื่อรองรับน้ำหนักเครื่องจักร
2. สำรวจกำหนดตำแหน่งเสาเข็มดิน-ซีเมนต์
3. ย้ายเครื่องจักรไปยังตำแหน่งที่กำหนด ให้หัวเจาะอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์

4. เริ่มการเจาะโดยก้านเจาะจะหมุนด้วยความเร็วรอบและอัตราการเจาะตามที่กำหนด ใบกวนผสมซึ่งติดตั้งอยู่ที่ปลายด้านล่างของแกนเจาะจะทำหน้าที่ตัดและกวนดิน

5. ขณะที่หัวเจาะหมุนกวนผ่านชั้นดินลงไป จะทำการส่งน้ำปูนที่ถูกผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดด้วยแรงดันผ่านไปยังหัวฉีดที่ติดตั้งอยู่บริเวณปลายหัวเจาะ ตามแรงดันและอัตราการไหลที่กำหนด

6. เมื่อเจาะถึงระดับความลึกที่กำหนด ก้านเจาะจะหมุนชักขึ้นจากหลุมดินจะถูกกวนให้ผสมเข้ากันกับน้ำปูนอีกรอบ จนกระทั่งปลายก้านเจาะพ้นเหนือดินเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ

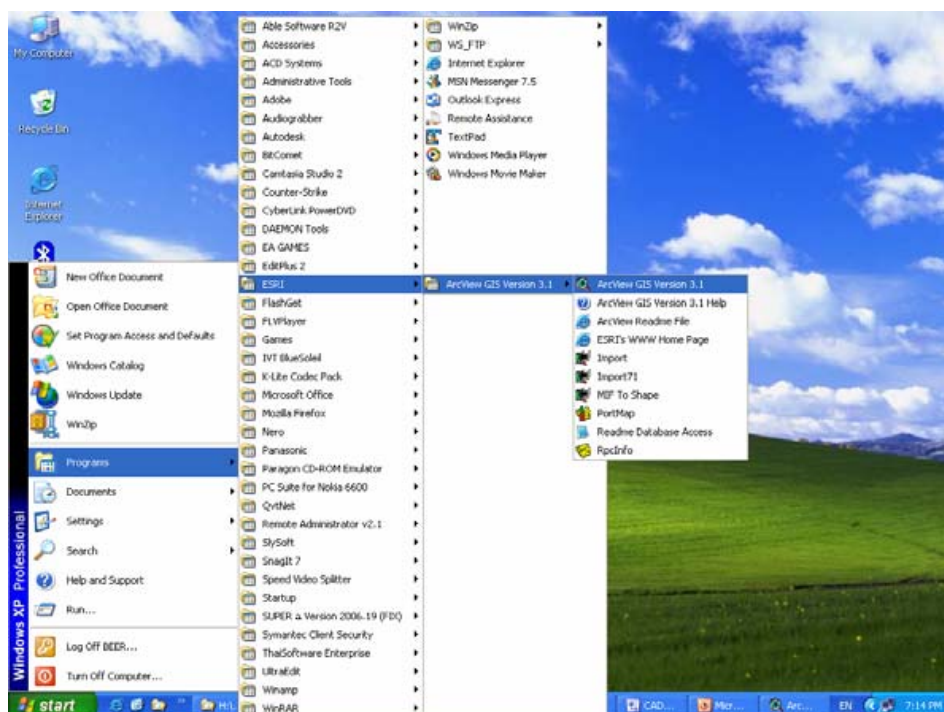
ภาคผนวก ข

การสร้างข้อมูลด้วยโปรแกรม ArcView GIS Version 3.1

การสร้างข้อมูลด้วยโปรแกรม ArcView GIS Version 3.1

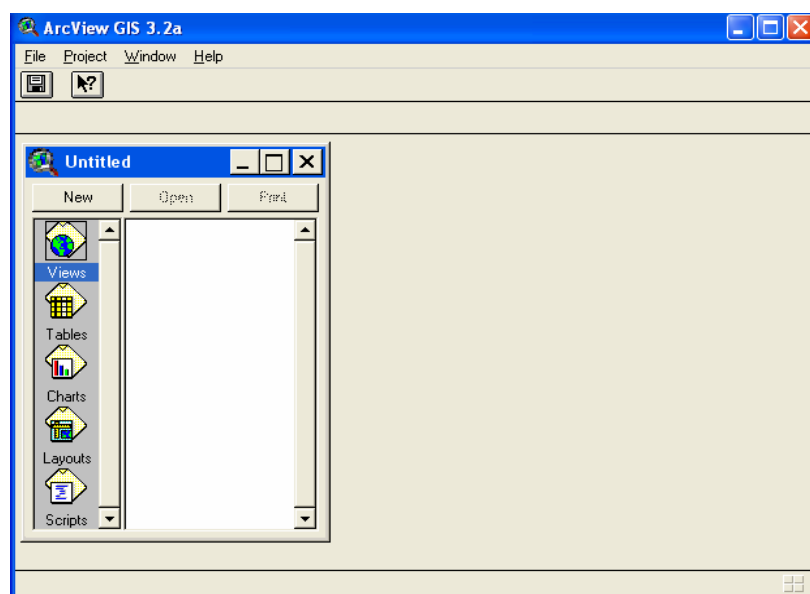
การสร้างข้อมูลโดยใช้โปรแกรม ArcView GIS Version 3.1 เพื่อรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ในบริเวณโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดโปรแกรม โดยเข้าที่ Start --> Programs --> Esri --> ArcView GIS Version 3.3 -> ArcView GIS Version 3.3 ดังภาพผนวกที่ ข1



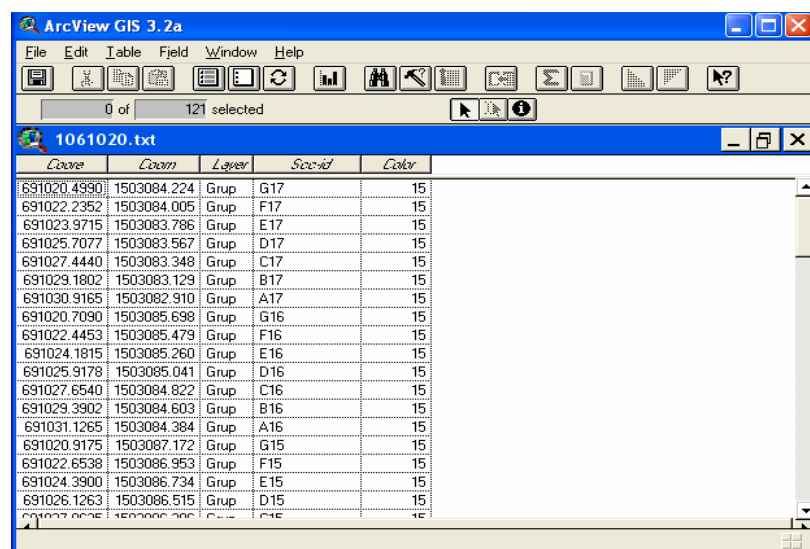
ภาพผนวกที่ ข1 การเข้าสู่โปรแกรม ArcView GIS Version 3.3

2. จะมีหน้าต่างขึ้นมาต้อนรับ และถามว่าท่านต้องการนำเข้าข้อมูลใหม่ หรือท่านต้องการเปิดโปรเจกที่มีอยู่แล้ว --> ให้เลือก Cancel ดังภาพดังภาพผนวกที่ ข2



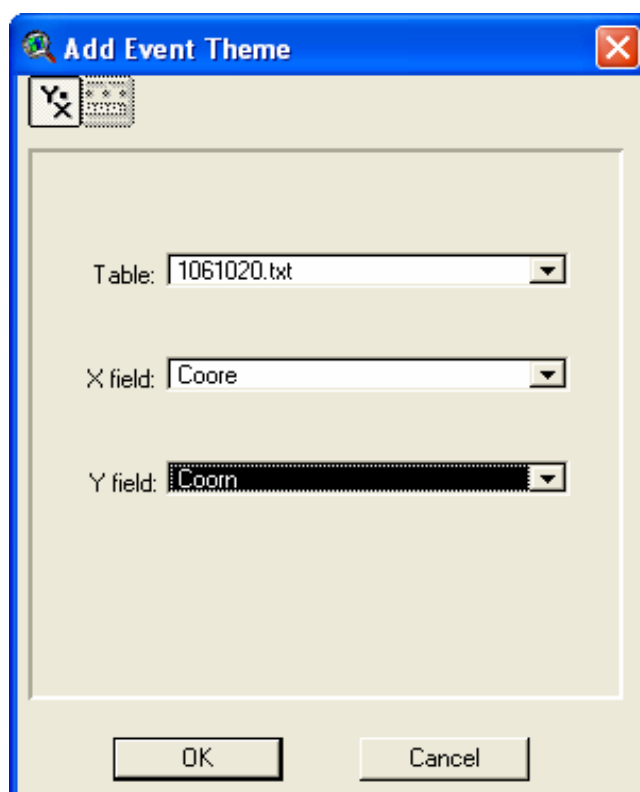
ภาพผนวกที่ ข2 หน้าต่างหลักของโปรแกรม

3. จะมีหน้าต่างขึ้นมาถามหา File ที่จะนำเข้า โดยให้เลือก List Files of Type: เป็น Delimited Text (*.txt)
4. ข้อมูลตารางที่ถูกสร้างมาจากโปรแกรม AutoCAD จะถูกนำมาเปิดในรูปแบบตารางของโปรแกรม ArcView ดังภาพผนวกที่ ข3



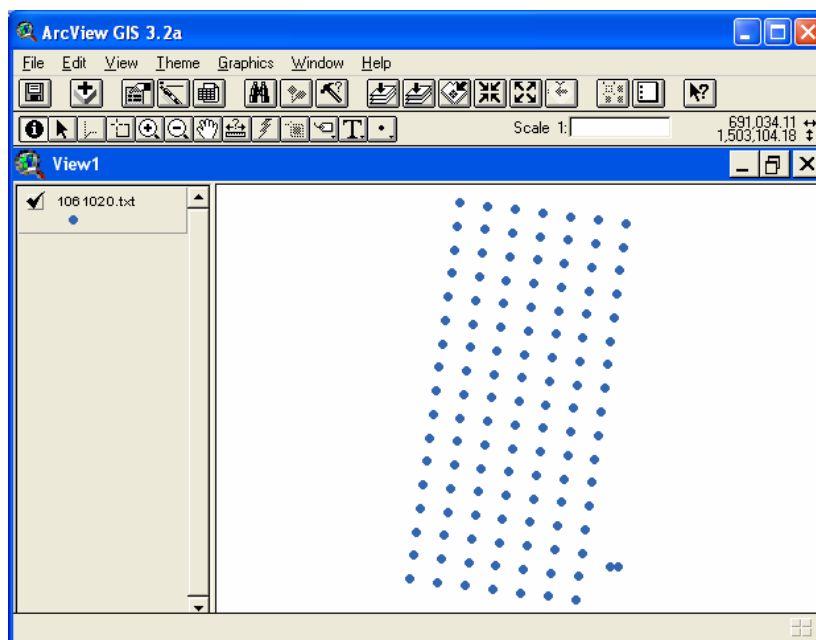
ภาพผนวกที่ ข3 ข้อมูลตารางที่ถูกนำมาเปิดด้วยโปรแกรม ArcView

5. เข้าสู่หน้าต่างหลัก และเลือกทำงานขั้นต่อไปที่หน้าต่าง Views -- > New
6. เลือกเมนู View -- > Add Event Theme...เพื่อนำค่าในตารางมาสร้าง (Generate) เป็นตำแหน่ง ดังภาพผนวกที่ ข4
7. จะมีหน้าต่างมาถามดังนี้
 - Table: เลือกสร้างข้อมูลจากตารางชื่อ
 - X field: สร้างพิกัด E จาก Field หรือ Column ชื่อ
 - Y field: สร้างพิกัด N จาก Field หรือ Column ชื่อ



ภาพผนวกที่ ข4 หน้าต่าง Field ที่จะใช้ทำการ Generate

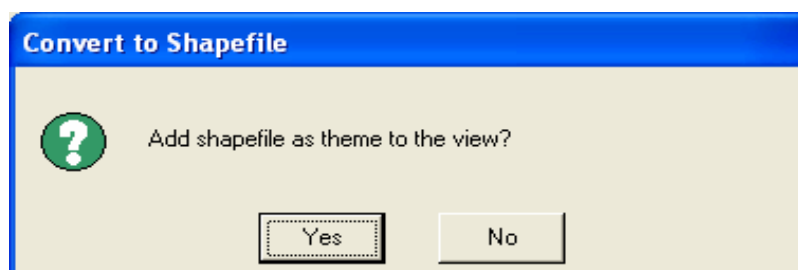
8. ข้อมูลจะถูกสร้างเป็นตำแหน่ง โดยแสดงในรูปของ Layer (ด้านซ้าย) ให้ Click เพื่อทำการแสดงข้อมูล ดังภาพผนวกที่ ข5



ภาพผนวกที่ ข5 ข้อมูลที่ถูก Generate เป็นตำแหน่ง

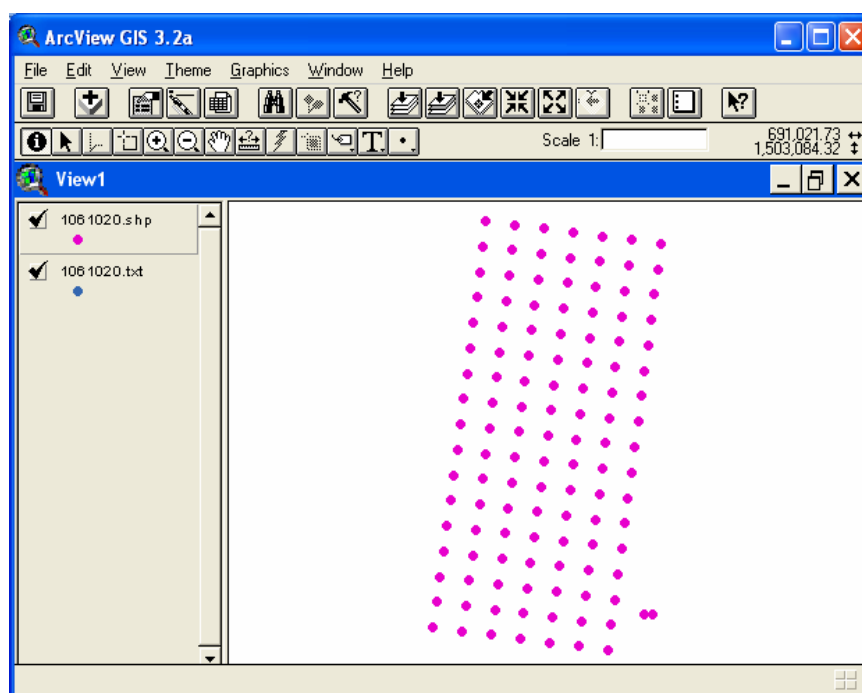
9. เลือกเมนู Theme --> Convert to Shape File... เพื่อเปลี่ยนข้อมูลหลุมเจาะเป็น Format ของ โปรแกรม

10. จากนั้นโปรแกรมจะทำการเปลี่ยน Format ให้อยู่ในรูป Shape File และมีหน้าต่างมาถามว่าท่านต้องการนำข้อมูลมาแสดงใน View นี้หรือไม่ --> ให้เลือก Yes ดังภาพผนวกที่ ข6



ภาพผนวกที่ ข6 หน้าต่างตอบรับการนำข้อมูลมาแสดง

11. จะมี Layer ใหม่ถูกสร้างขึ้นมา ดังภาพผนวกที่ ข7



ภาพผนวกที่ ข7 หน้าต่าง Layer ที่ถูกสร้างให้เป็น Format ของโปรแกรม

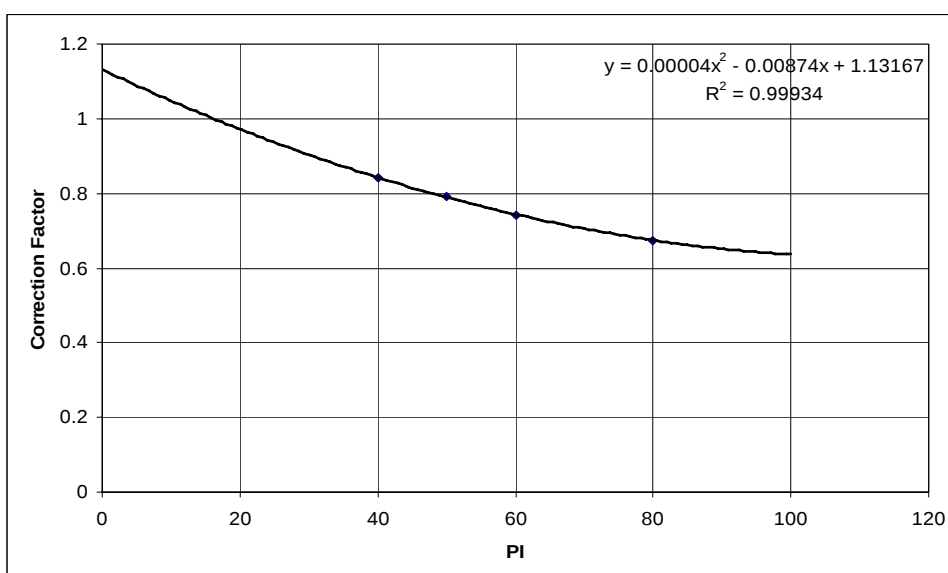
ภาคผนวก ค

วิธีการใช้กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึก

วิธีการใช้กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึก

มีขั้นตอนดังนี้

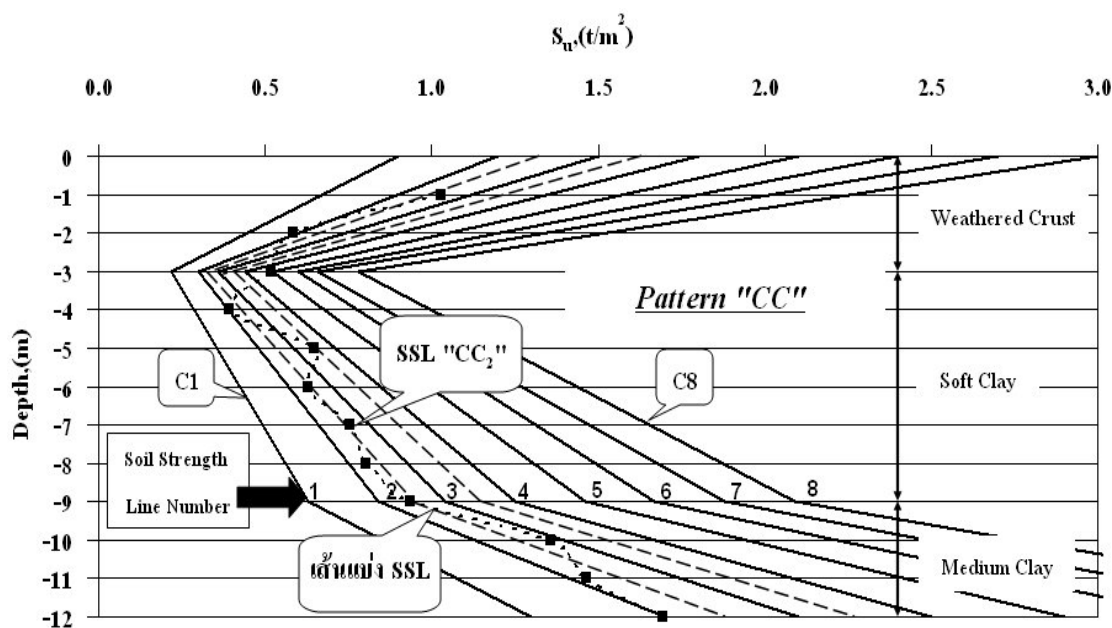
1. เปรียบเทียบตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจของโครงการฯ (Borehole) และหลุมเจาะทดสอบ Field Vane Shear Test เพื่อนำค่า P.I. ของหลุมเจาะสำรวจของโครงการฯ มาใช้ปรับแก้
2. นำค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินตามความลึก ที่ได้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test ณ บริเวณที่ทำการก่อสร้าง มาปรับแก้โดย Bjerum (1972) ดังภาพผนวกที่ ค1
3. Plot ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินตามความลึกที่ปรับแก้แล้ว เพื่อดูแนวโน้มว่าเส้นกราฟที่ได้ใกล้เคียงกับ Soil Strength Line No.(SSL No.) ไດ
4. Soil Strength Line No.(SSL No.) ไດๆ ที่plot แล้วต่ำกว่าหรือเท่ากับ C2 ถือว่าเป็นตำแหน่ง Soft Spot แต่ถ้ามากกว่า C2 ขึ้นไปถือว่าเป็นตำแหน่งดินเหนียวอ่อนปกติ



ภาพผนวกที่ ค1 แสดงค่า Correlation Factor (μ)

ตัวอย่างการใช้เส้นกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึก

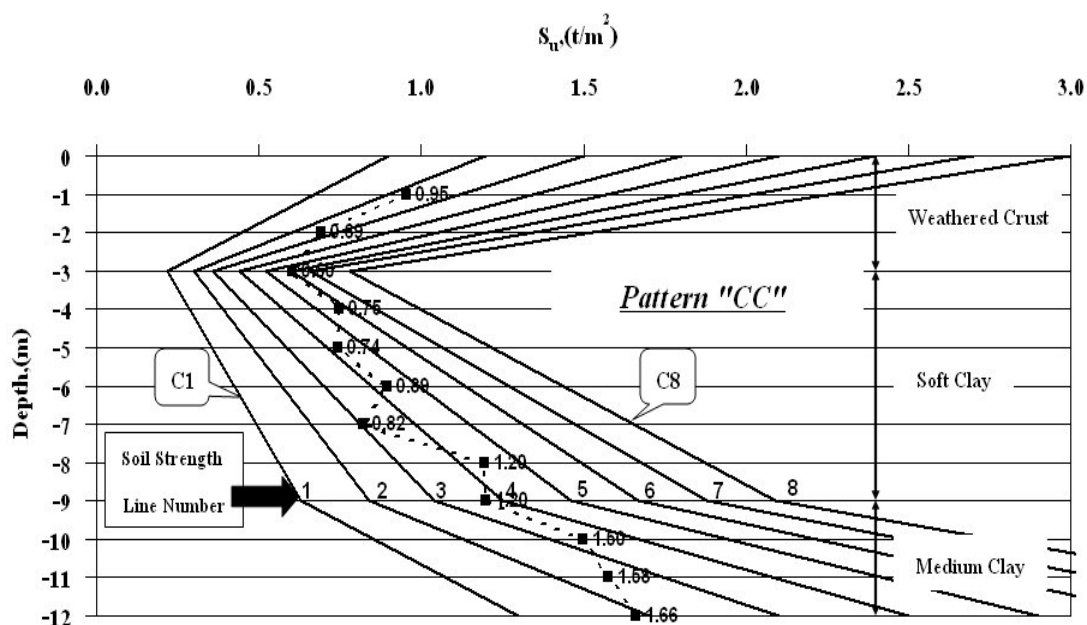
ตัวอย่างที่ 1 ต้องการทราบว่า ผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนามที่ตำแหน่ง FV2-5 อยู่ใน SSL No. ไດ



ภาพผนวกที่ ค2 กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึก ตัวอย่างที่ 1

จากภาพผนวกที่ ค2 เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินตามความลึก ที่ได้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test ตำแหน่ง FV2-5 (Sta.7+622) มา plot พบว่าทุกค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณาแต่ละจุดจากเส้นแบ่ง SSL เห็นว่าจุดส่วนใหญ่อยู่ใน SSL No.2 ดังนั้นเส้นกราฟใกล้เคียง Soil Strength Line (SSL No.) ที่ 2

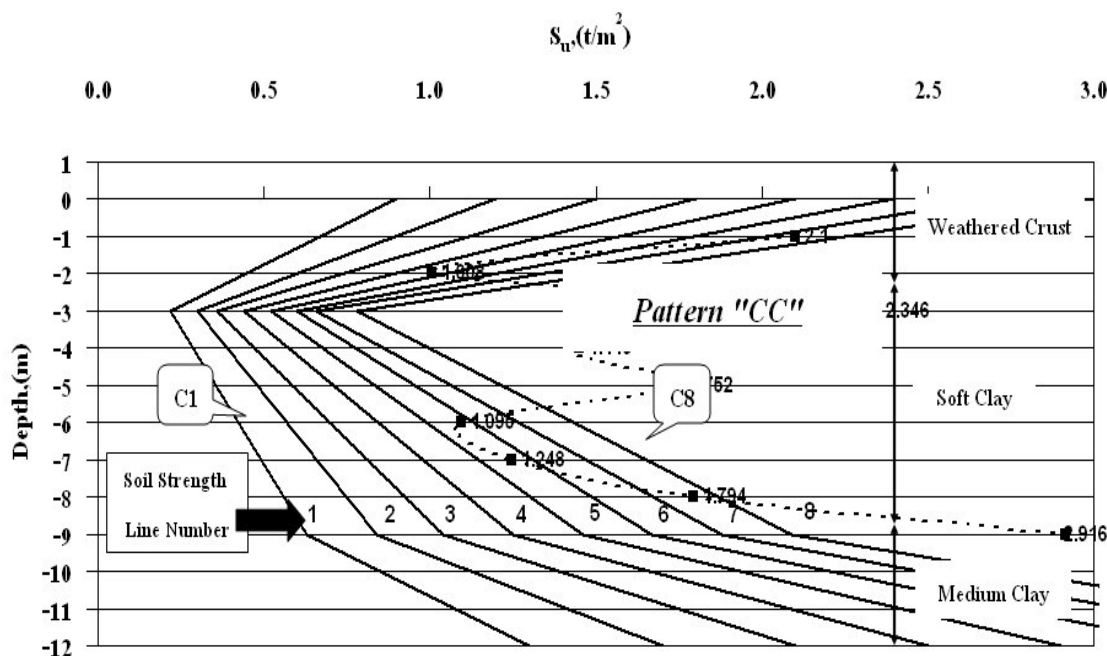
ตัวอย่างที่ 2 ต้องการทราบว่า ผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนามที่ตำแหน่ง FVS1 อยู่ใน
SSL No. ไດ



ภาพผนวกที่ ค3 กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึก ตัวอย่างที่ 2

จากภาพผนวกที่ ค3 เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินตามความลึก ที่ได้จากการทดสอบ
Field Vane Shear Test ตำแหน่ง FVS1 (Sta.0+080) มา plot พบว่าทุกค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้
ดังนั้นเส้นกราฟใกล้เคียง Soil Strength Line (SSL No.) ที่ 4

ตัวอย่างที่ 3 ต้องการทราบว่า ผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนามที่ตำแหน่ง FV1-1 อยู่ใน
SSL No. ไค



ภาพผนวกที่ ค4 กราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงเฉือนและความลึก ตัวอย่างที่ 3

จากภาพผนวกที่ ค4 เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินตามความลึก ที่ได้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test ตำแหน่ง FV1-1(Sta.1+300) มา plot พบว่าไม่สามารถระบุได้ว่าแนวโน้มของเส้นกราฟใกล้เคียง Soil Strength Line (SSL No.) ไค ถ้าผลการทดสอบที่ Plot ได้มีลักษณะเช่นนี้จะต้องทำการทดสอบ Field Vane Shear Test ใหม่

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายสมพงษ์ โรจน์กังสดาล
เกิดวันที่	24 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2525
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยนเรศวร (พ.ศ.2547)