บทที่ 6

ผลทดสอบและการวิเคราะห์กำลังอัดแกนเดียว ของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม

การวิเคราะห์กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม

เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำและการยุบตัวสูง ซึ่งเป็นปัญหาทางด้านวิศวกรรมอย่างมาก การปรับปรุงคุณสมบัติของดินจึงเข้ามามีบทบาทอย่างมากต่องานวิศวกรรมโยธา การนำเทคนิคผสมลึก (Deep Mixing Technique) ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเป็นการปรับปรุงดินในสนาม โดยทำให้ดินจับตัวกันด้วยพันธะซีเมนต์ (Cementation bond) และส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงขึ้น ในบทนี้ได้ทำการรวบรวมผลด้านกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก ตอน 3 ตอนอำเภอบางพลี – อำเภอธัญบุรี หลักพื้นฐานที่ใช้ในการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของกำลังของดินผสมซีเมนต์และวิธีการเพิ่มประสิทธิผลของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้งด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ โดยจะแนะนำสมการและตัวแปรกำลังที่ใช้ในการออกแบบ

จากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของงานทางด้านวิศวกรรมโยธา และเกี่ยวเนื่องจากสภาพชั้นดินอ่อนซึ่งเป็นปัญหาทางด้านวิศวกรรม จึงเป็นสิ่งสำคัญและน่าสนใจในการนำปัญหาดังกล่าวมาศึกษาเพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน การใช้เทคนิคการผสมลึกในสนาม (In-situ Deep Mixing Technique) ได้ถูกนำมาใช้โดยทำการสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกลุ่มๆ โดยใช้ซีเมนต์เข้ามาผสมทำเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil-cement pile) เพื่อแก้ปัญหาด้านกำลัง การทรุดตัวของดิน การพังทลายและการลื่นไถลด้านข้าง

1. การออกแบบ

กลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยวิธีผสมลึก ถูกออกแบบโดยพิจารณากำลังรับแบกทานของดิน (Bearing Capacity) และวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analyses) กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มซีเมนต์ขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวบริเวณรอบๆ เสาเข็ม (Soil Failure) และกำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็ม (Pile Failure) ในกรณีของการวิบัติเนื่องจากดินรอบข้าง การวิบัติจะขึ้นกับทั้งกำลังต้านทานรอบผิวของเสาเข็มดินซีเมนต์ตลอดความยาวเข็มรวม

กับกำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็ม โดยเราสามารถหาค่ากำลังรับแบกทานของเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องจากการวิบัติของดินรอบข้าง ดังสมการที่ 6.1 คือ

$$Q_{ult,soil} = \left(\pi dH + 2.25\pi d^2\right)S_u \tag{6.1}$$

เมื่อ $Q_{ult,soil}$ คือกำลังรับแบกทานของเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องจากการวิบัติจากดินรอบข้าง d คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม H คือความยาวเข็ม และ S_u คือค่าเฉลี่ยของกำลังต้านทานแรงเฉือนดินแบบไม่ระบายน้ำของดินบริเวณรอบเสาเข็ม โดยสมมุติให้กำลังต้านทานที่ผิวของดินเสาเข็มดินซีเมนต์เท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวบริเวณรอบๆ เสาเข็มดินซีเมนต์ตลอดความลึกของเสาเข็ม และกำลังต้านทานที่ปลายเข็ม เท่ากับ $9S_u$

ในกรณีของการวิบัติในตัวเสาเข็ม โดยทั่วไปกำลังของทั้งดินรอบข้างเสาเข็มดินซีเมนต์และตัวเสาเข็มดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผล แต่สำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์ Horpibulsuk (2001) พบว่าในที่ช่วงหน่วยแรงประสิทธิผลต่ำกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่จุดคราก กำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีค่าเกือบคงที่และไม่แปรผันตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผล และเขายังสรุปอีกว่าโดยมากหน่วยแรงประสิทธิผลที่กระทำต่อเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่จุดคราก ดังนั้นกำลังรับแรงแบกทานเนื่องจากการวิบัติของเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถคำนวณได้โดยอาศัยเพียงแค่ตัวแปรกำลัง (Strength parameters) ดังสมการที่ 6.2 คือ

$$Q_{ult,col} = \left(q_{uf}\right)A_{col} \tag{6.2}$$

เมื่อ $Q_{ult,col}$ คือกำลังรับแรงแบกทานของดินจากการวิบัติเนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์ A_{col} คือพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มและ q_{uf} คือกำลังที่จุดวิบัติในสนามของเสาเข็มดินซีเมนต์

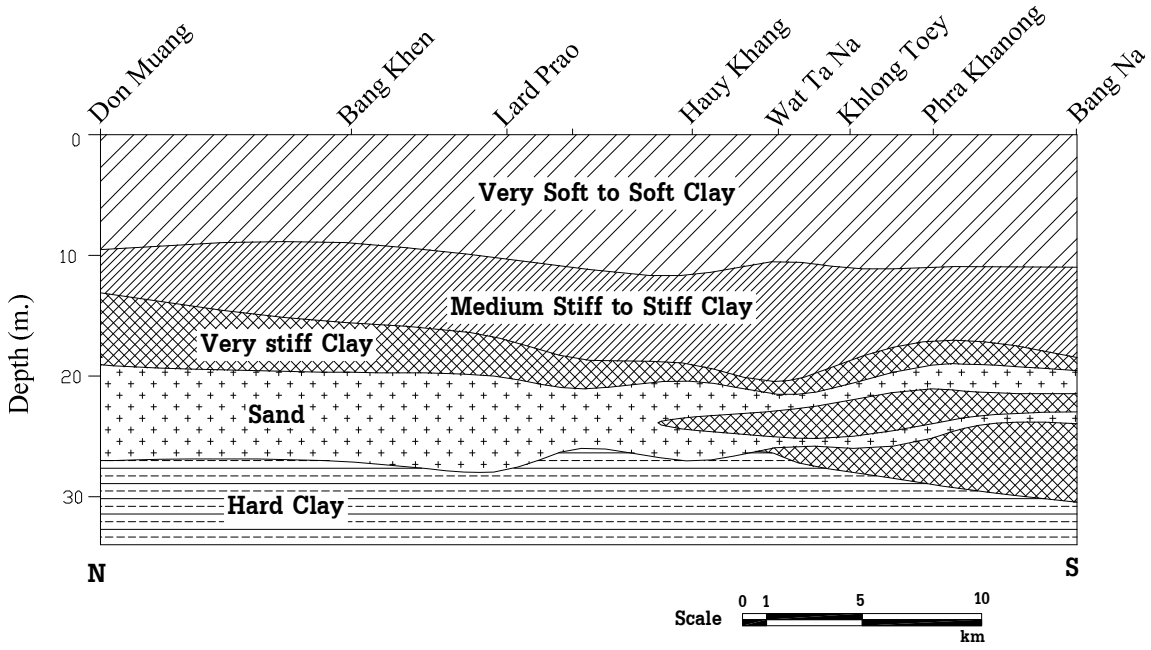
สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพทางลาด ภายใต้แรงกดและข้อสมมุติฐานที่ว่าดินรอบข้างเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์สามารถต้านแรงเฉือนได้เนื่องจากผลของค่าเฉลี่ยของกำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุทั้งสองชนิดนี้ โดยค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือน (S_{av}) สามารถหาได้ดังสมการที่ 6.3 คือ

$$S_{av} = aS_{col} + \left(1-a\right)S_u \tag{6.3}$$

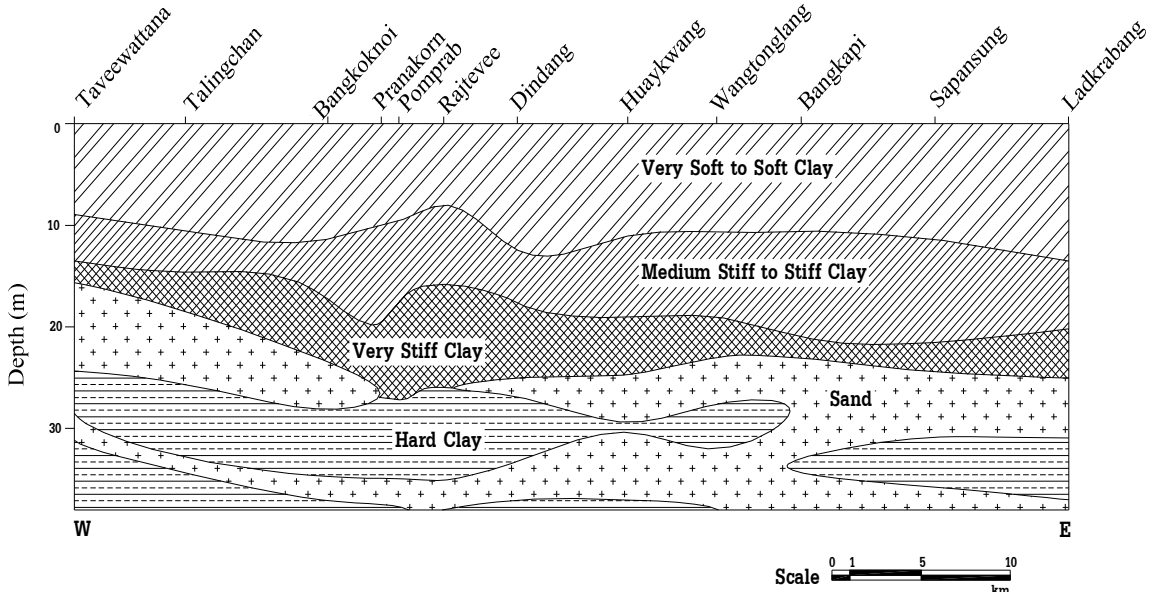
เมื่อ S_{av} คือกำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยของดินรอบข้างและเสาเข็มดินซีเมนต์ S_{col} คือกำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยของเสาเข็ม เท่ากับ $\frac{q_{uf}}{2}$ และ a คืออัตราส่วนของพื้นที่ที่ถูกแทนที่ จากความสัมพันธ์ข้างต้น เพื่อให้สมการดังแสดงข้างต้นนี้สามารถถูกนำใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวแปรกำลัง (Strength parameters) ที่ใช้ในสมการเหล่านี้จะต้องเป็นตัวแปรที่เหมาะสมและมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด การศึกษาถึงความแปรปรวนของกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามจึงมีความจำเป็นเพื่อให้ค่าที่ใช้ในการออกแบบมีความถูกต้องเหมาะสมกับการใช้งาน

2. **คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินเหนียวกรุงเทพ**

จากพฤติกรรมดินเหนียวอ่อนกรุงเทพซึ่งเกิดจากการตกตะกอนบริเวณปากแม่น้ำโดยลักษณะการเกิดดินเหนียวอ่อนบริเวณนี้ เม็ดดินจะถูกพัดพาจากแม่น้ำลงสู่ทะเล และน้ำทะเลก็หนุนกลับเข้ามาตกตะกอน ทำให้ดินเหนียวอ่อนนั้นมีทั้งแบบตกตะกอนในแม่น้ำและในทะเล ซึ่งเป็นลักษณะการเกิดของดินเหนียวอ่อนบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง หรือเรียกดินเหนียวกรุงเทพโดยมีลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 10 ถึง 12 เมตร ชั้นถัดลงไปจะเป็นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งมากและชั้นทรายสลับกันไป ดังภาพที่ 6.1



ก) จากทิศเหนือไปใต้



ข) จากทิศตะวันตกไปตะวันออก

ภาพที่ 6.1 ลักษณะภาพตัดขวางของดินกรุงเทพ ฯ

บริเวณโครงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก ตอน 3 ตอนอำเภอบางพลี – อำเภอธัญบุรี แสดงดังภาพที่ 6.2 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมในรายงานการสำรวจหลุมเจาะแสดงดังในภาพที่ 6.3 และจากผลการเจาะสำรวจดินจำนวน 5 หลุม สามารถสรุปลักษณะชั้นดินได้ดังนี้

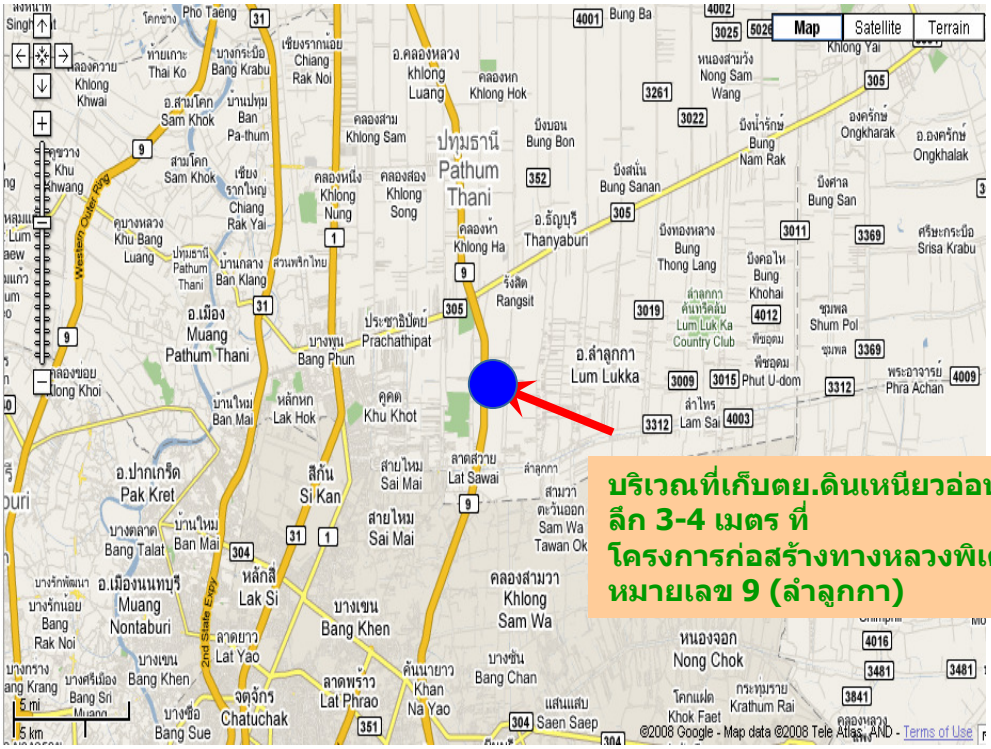
ชั้นดินตอนบนสุดจะเป็นชั้นดินถม หนาประมาณ 1.50 ถึง 2.00 เมตร

<u>ดินชั้นที่ 1</u> พบวางตัวอยู่ใต้ชั้นดินถมลงไปจนถึงระดับความลึกประมาณ 12 ถึง 13 เมตร จะเป็นชั้นดินเหนียว สภาพอ่อนมากถึงอ่อน สีเทา (Very soft to soft grey clay) มีค่าความชื้นธรรมชาติในดินอยู่ระหว่าง 50 ถึง 114.5% มีค่า Unconfined Compressive Strength อยู่ระหว่าง 13.6 ถึง 45.9 กิโลปาสคาลต่อตารางเมตร จัดเป็นดินในกลุ่ม CH

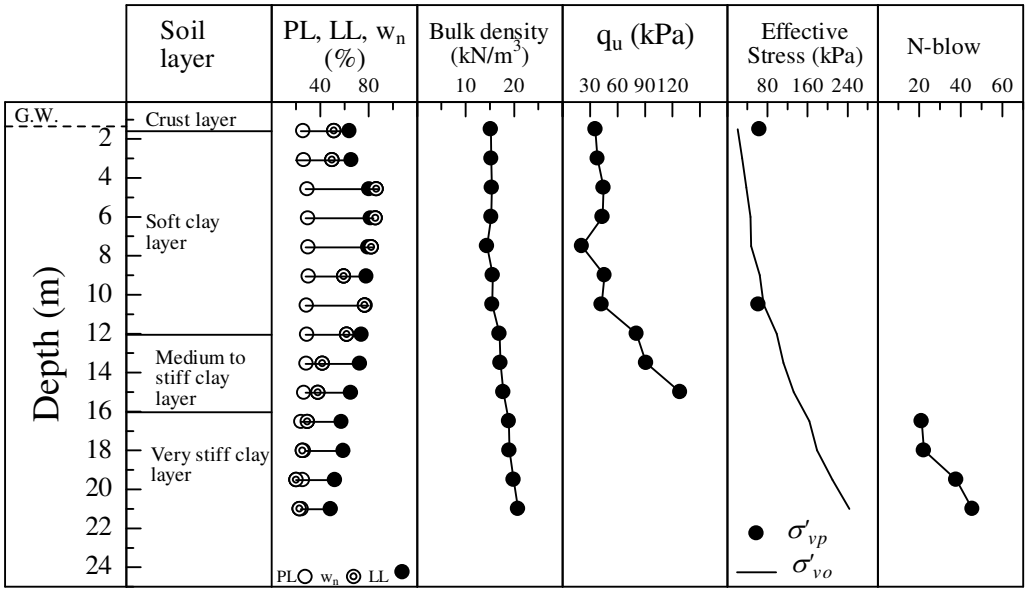
<u>ดินชั้นที่ 2</u> พบวางตัวอยู่ใต้ชั้นดินชั้นที่ 1 ลงไปจนถึงระดับความลึกประมาณ 16 ถึง 18 เมตร จะเป็นชั้นดินเหนียว สภาพแข็งปานกลางถึงแข็ง สีเทา (Medium to stiff grey clay) มีค่าความชื้นธรรมชาติในดินอยู่ระหว่าง 38.4 ถึง 69.2% มีค่า Unconfined Compressive Strength อยู่ระหว่าง 51.8 ถึง 84.4 กิโลปาสคาลต่อต่อตารางเมตร จัดเป็นดินในกลุ่ม CH

<u>ดินชั้นที่ 3</u> พบวางตัวอยู่ใต้ชั้นดินชั้นที่ 2 ลงไปจนกระทั่งสิ้นสุดความลึกของหลุมเจาะ จะเป็นชั้นดินเหนียว สภาพแข็งมากถึงแข็งมากที่สุด สีเทาและสีน้ำตาล (Very stiff to hard clay, grey, brown) มีค่าความชื้นธรรมชาติในดินอยู่ระหว่าง 22.1 ถึง 39.2% มีค่า SPT – N อยู่ระหว่าง 17 ถึง 36 ครั้งต่อฟุต จัดเป็นดินในกลุ่ม CH และสำหรับดินชั้นล่างสุดของหลุมเจาะที่ 2 เป็นชั้นทรายมีค่าความชื้นธรรมชาติในดินเท่ากับ 23.4% และมีค่า SPT – N เท่ากับ 50 ครั้งต่อฟุต

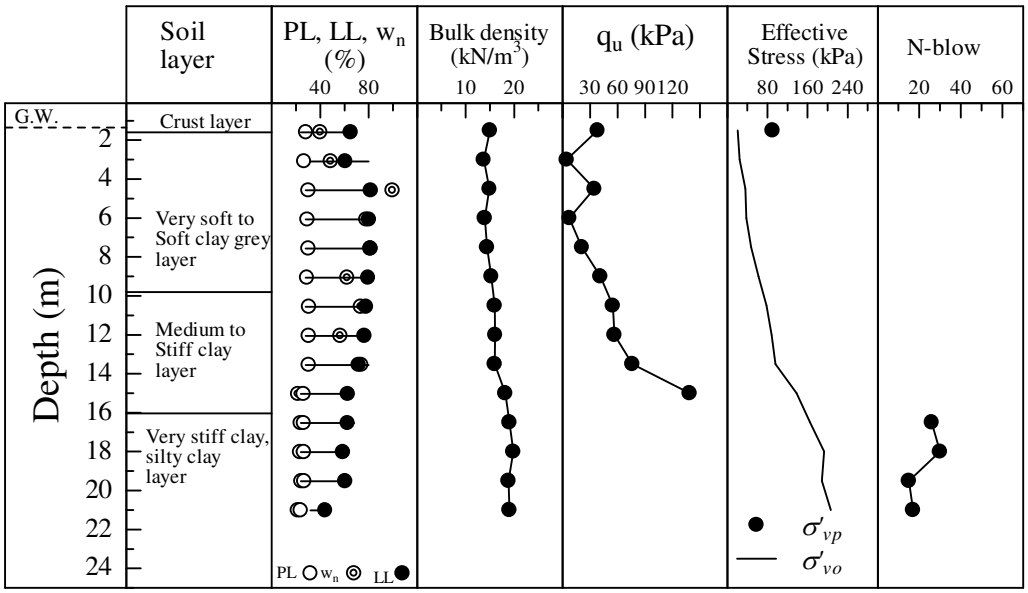
ระดับน้ำในหลุมเจาะภายหลังได้ทำการเจาะสำรวจเสร็จสิ้นแล้ว พบว่าระดับน้ำในหลุมเจาะอยู่ที่ระดับความลึก 1.30 ถึง 2.00 เมตรจากปากหลุมเจาะ ซึ่งระดับน้ำใต้ดินนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามฤดูกาล



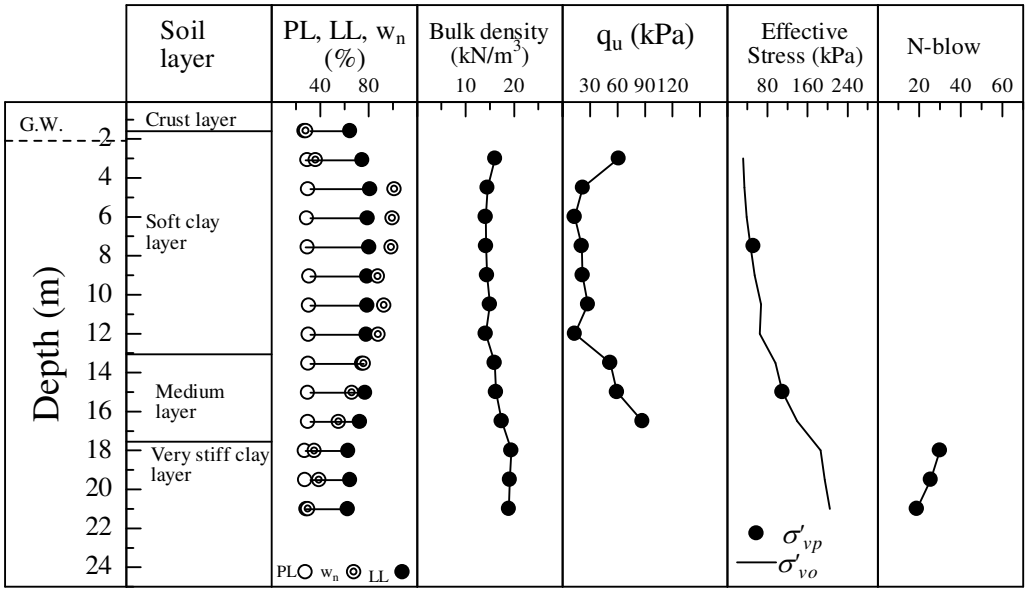
ภาพที่ 6.2 บริเวณเก็บตัวอย่างทดสอบ



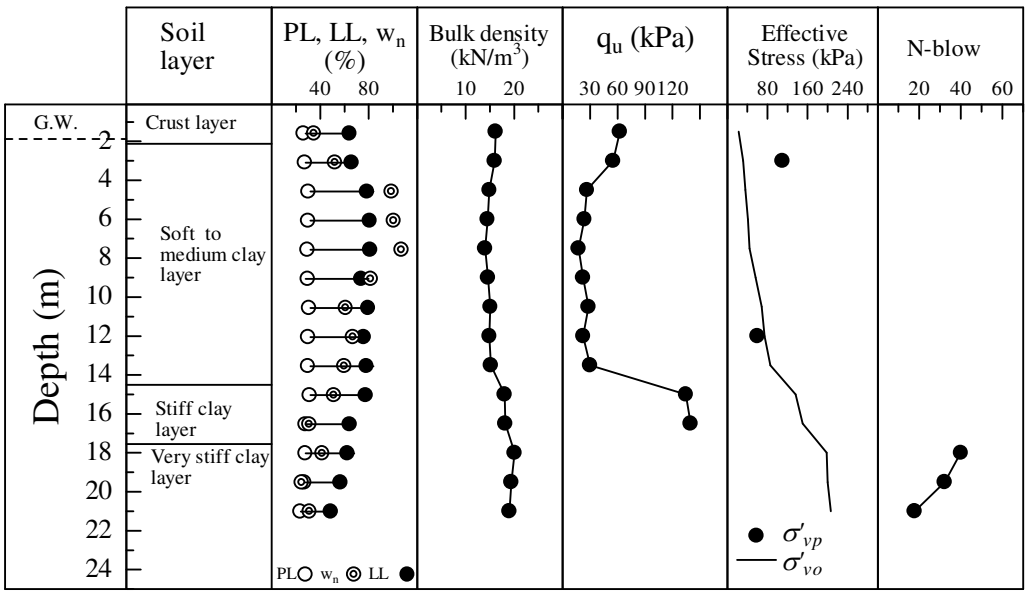
ก) กม. 41+500 BH-1



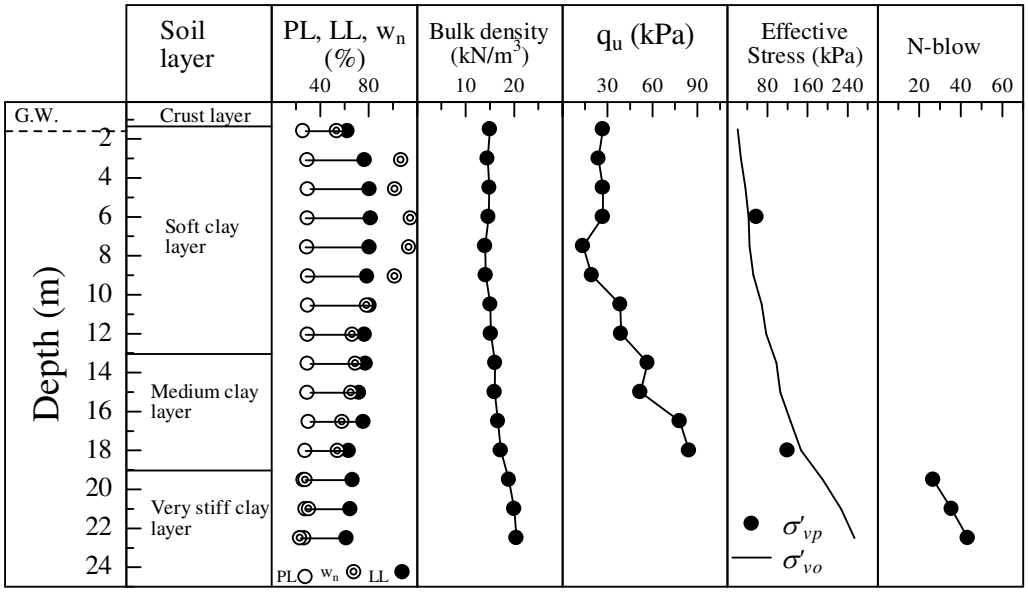
ข) กม. 42+000 BH-2



ค) กม. 48+750 BH-3



ง) กม. 49+200 BH-4



จ) กม. 53+200 BH-5

ภาพที่ 6.3 คุณสมบัติทางธรณีเทคนิคโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก ตอน 3 ตอนอำเภอบางพลี – อำเภอธัญบุรี

3. รายละเอียดการทดสอบในสนาม

โครงงานก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณทางหลวงหมายเลข 9 ตอนวงแหวนตะวันออก (ตอน3) ได้เริ่มขึ้นในช่วงปีพ.ศ. 2549 ภายใต้ความรับผิดชอบของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย เสาเข็มดินซีเมนต์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.60 เมตร ความลึกเท่ากับ 12 เมตร ระยะห่างจากศูนย์เสาถึงศูนย์เสาแต่ละต้นเท่ากับ 1 เมตร โดยติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์ทั้ง 2 ระบบคือระบบเปียกและระบบแห้ง ทั้งนี้สำหรับระบบเปียกทำการผสมน้ำเพิ่มด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, *W/C* เท่ากับ 1.0 รายละเอียดการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 6.1 ทั้งนี้ใช้ที่อัตราการชักขึ้น 20 มิลลิเมตรต่อรอบ และที่แรงดัน 5.5 บาร์ เครื่องจักรรุ่น KC-1 ความเร็วรอบแกนเจาะ 200 รอบต่อนาที สำหรับการก่อสร้างระบบแห้ง ทั้งนี้ก่อนทำการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในแปลงทดสอบและในสนามจริงต้องทำการเก็บตัวอย่างดินในสนามมาทำการทดสอบหาปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ค่ากำลังตามต้องการตามมาตรฐานที่ทางกรมทางหลวงได้กำหนดไว้สำหรับงานในห้องปฏิบัติการ ตารางที่ 6.2 แสดงค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับการออกแบบส่วนผสมเพื่อ

ก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการทางหลวงหมายเลข 9 ตอน 3 บริเวณอำเภอบางพลี – ธัญบุรีนี้ และภาพที่ 6.4 แสดงเครื่องจักรในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

ตารางที่ 6.1
รายละเอียดการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

Column No.	Location	Cement content, Kg/m^3	W/C	Penetration rate, (m/min)	Executing day	Coring day	Testing day
Dry Mixing, curing time = 3 days							
1	Sta. 41+657-แปลงทดสอบ	150	-	1	5/4/49	6/4/49	8/4/49
2	สนามจริง ครั้งที่ 1	150	-	1	5/8/49	6/8/49	8/8/49
3	Sta. 41+985.50 สนามจริง ครั้งที่ 2	150	-	1	2/10/49	3/10/49	5/10/49
4	Sta. 42+116 สนามจริง ครั้งที่ 3	150	-	1	17/10/49	18/10/49	20/10/49
5	Sta. 42+135.50 สนามจริง ครั้งที่ 4	150	-	1	25/10/49	25/10/49	28/10/49
6	Sta. 44+000.50 สนามจริง ครั้งที่ 5	150	-	1	16/11/49	16/11/49	20/11/49
7	Sta. 43+930.50 สนามจริง ครั้งที่ 6	150	-	1	22/11/49	22/11/49	25/11/49
8	Sta. 43+690.00 สนามจริง ครั้งที่ 7	150	-	1	8/12/49	8/12/49	12/12/49
9	Sta. 44+165.50 สนามจริง ครั้งที่ 8	150	-	1	18/12/49	19/12/49	21/12/49
10	Sta. 43+960.00 สนามจริง ครั้งที่ 9	150	-	1	23/12/49	23/12/49	26/12/49
11	Sta. 53+266.00 แถวที่ 215 สนามจริง ครั้งที่ 10	150	-	1	23/1/50	24/1/50	26/1/50
12	Sta. 46+446.50 แถวที่ 232 สนามจริง ครั้งที่ 11	150	-	1	30/1/50	30/1/50	1/2/50

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

Column No.	Location	Cement content, Kg/m^3	W/C	Penetration rate, (m/min)	Executing day	Coring day	Testing day
13	Sta. 52+945.00 สนามจริง ครั้งที่ 12	150	-	1	18/3/50	19/3/50	21/3/50
14	Sta. 53+195.50 แถวที่ 144 สนามจริง ครั้งที่ 13	150	-	1	16/3/50	17/3/50	18/3/50
Dry Mixing, curing time = 14 days							
15	Sta. 41+657-แปลงทดสอบ	150	-	1	5/4/49	6/4/49	19/4/49
16	สนามจริง ครั้งที่ 1	150	-	1	5/8/49	6/8/49	19/8/49
17	สนามจริง ครั้งที่ 2	150	-	1	22/8/49	23/8/49	7/9/49
18	Sta. 41+985.50 สนามจริง ครั้งที่ 3	150	-	1	17/10/49	18/10/49	31/10/49
19	Sta. 53+341.00 สนามจริง ครั้งที่ 4	150	-	1	15/12/49	16/12/49	29/12/49
Wet Mixing, curing time = 28 days							
1	Sta. 49+129.5 R2 สนามจริง ครั้งที่ 1	185	1	1	16/1/50	17/2/50	20/2/50
2	Sta. 48+976.50 R4 สนามจริง ครั้งที่ 2	185	1	1	20/11/49	20/12/49	26/12/49
3	Sta. 49+131 R2 สนามจริง ครั้งที่ 3	185	1	1	16/1/50	17/2/50	20/2/50
4	Sta. 48+978 R4 สนามจริง ครั้งที่ 4	185	1	1	20/11/49	24/11/49	22/12/49

ก) หัวเจาะระบบ Dry Mixing

ข) หัวเจาะระบบ Wet Mixing

ภาพที่ 6.4 Double mixing machine

ตารางที่ 6.2

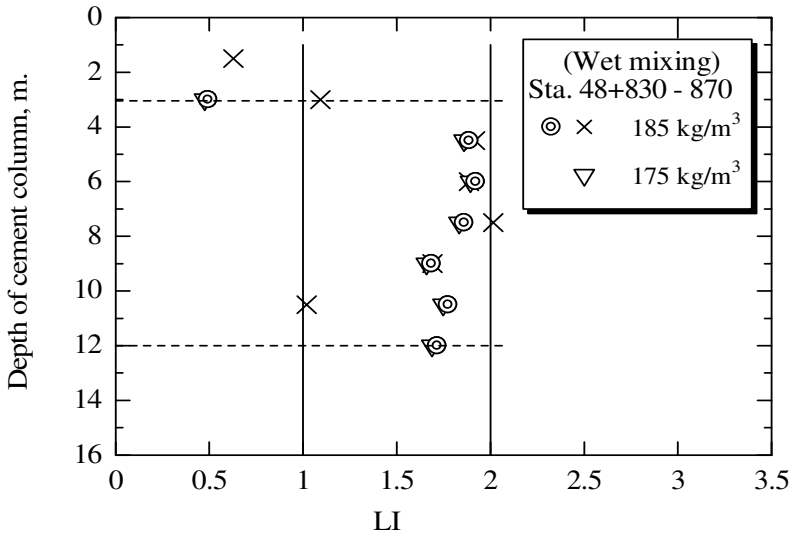
กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน 3) (กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย, 2549)

Depth,	Cement content	Water-cement Ratio	Laboratory Strength, q_{ul} (kPa)			
m.	C (kg/m^3)	W/C	$q_{ul(0\ days)}$	$q_{ul(7\ days)}$	$q_{ul(14\ days)}$	$q_{ul(28\ days)}$
3	0	-	24			
	150	-		872.8	1167.2	1453
	175	-		1007.8	1378	1744.8
	200	-		1261.6	1627.6	1969.2
	250	-		1596.2	1996.4	2249.8
6	0	-	26.8			
	150	-		803.00	985.40	1245.60
	175	-		992.20	1180.60	1463.20
	200	-		1224.20	1446.20	1694.40
	250	-		1676.20	1932.20	2168.20
12	0	-	39			
	150	-		1022.2	1245.6	1549.4
	175	-		1208.6	1429.4	1730.2
	200	-		1420.6	1610.8	1914.6
	250	-		1735.4	1954.6	2243.8
3	175	1		631	758	1053
(3C/1	185	1		703	874	1121
	200	1		793	920	1175
6	175	1		565	722	999
(3C/1)	185	1		634	773	1119, Ref.
	200	1		668	918	1236
9	175	1		552	658	807
(3C/1)	185	1		638	775	940
	200	1		705	900	1090
12	175	1		527	717	862
(3C/1)	185	1		644	829	1011
	200	1		723	972	1092

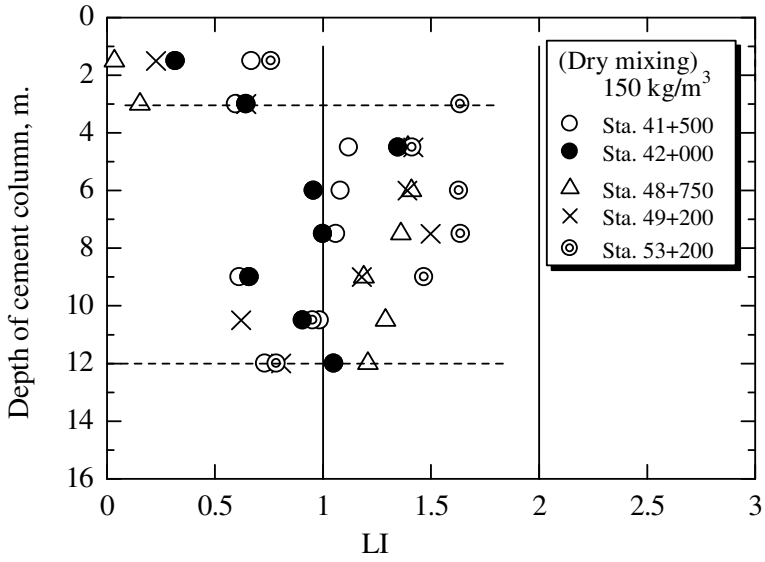
จากผลทดสอบในตารางที่ 6.2 ของดินเหนียวผสมซีเมนต์แบบ Dry Mixing ของโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน 3) ตอนอำเภอบางพลี – อำเภอธัญบุรี ที่บริเวณหลุมเจาะที่ 5 ที่ Sta. 53+200 ที่ความลึก 3, 6 และ 12 เมตร ที่อัตราส่วนของปริมาณปูนซีเมนต์ 150, 175, 200 และ 250 กิโลกรัมต่อน้ำหนักของดินเปียก 1 ลูกบาศก์เมตร ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างดินเหนียวผสมซีเมนต์แบบ Dry Mixing ที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ปริมาณซีเมนต์ 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่า 1000 กิโลปาสคาล (ข้อกำหนดของกรมทางหลวง) และสำหรับระบบ Wet Mixing บริเวณ Sta. 49+000 ที่ระยะบ่ม 28 วัน ที่ปริมาณซีเมนต์ 185 กิโลกรัมต่อน้ำหนักของดินเปียก 1 ลูกบาศก์เมตร จะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่า 1000 กิโลปาสคาล ดังนั้นการปรับปรุงดินในสนามจริงแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 6.1 โดยลักษณะการเก็บตัวอย่างในสนามขึ้นมาทดสอบแสดงดังในภาพที่ 6.5

ภาพที่ 6.5 ลักษณะการ Coring ในสนาม

ผลทดสอบปริมาณความชื้นและกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามที่บ่มในที่และบ่มในห้องทดสอบแสดงในภาพที่ 6.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน (ข้อมูลจากหลุมเจาะสำรวจ) ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ Sta. 48+830 ถึง 48+870 และ Sta. 49+129.50 ถึง 49+131 สำหรับการก่อสร้างแบบระบบเปียกที่ปริมาณซีเมนต์ 175 และ 185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งมีการผสมน้ำเพิ่มด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, *W/C* = 1 พบว่าปริมาณความชื้นในดินหลังจากเติมน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวตลอดความลึก 3 ถึง 12 เมตรของเสาเข็มดินซีเมนต์ สำหรับกรณีการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบแห้ง ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าปริมาณความชื้นในดินอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลวในช่วงความลึกมากกว่า 3 ถึง 8 เมตรของเสาเข็มดินซีเมนต์ของทุกสถานี (Station) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ แต่ที่ความลึกมากกว่า 9 เมตรนั้นมีเพียงที่ Sta. 48+750 เท่านั้นที่มีปริมาณความชื้นในช่วง 1 ถึง 2 เท่าของดัชนีเหลว สำหรับที่สถานีอื่น ๆ จะมีปริมาณความชื้นในช่วงต่ำ (น้อยกว่าขีดจำกัดเหลว) ดังนั้นที่ช่วงความลึก 9 ถึง 12 เมตรในงานระบบแห้งอาจจะให้ค่ากำลังที่แตกต่างกันมากเพราะมีปัจจัยเรื่องปริมาณความชื้นและลักษณะสภาพของดินในการผสมที่มีปริมาณความชื้นน้อยเกินไปทำให้เนื้อดินมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ



ก) บริเวณที่ทำเสาเข็มดินซีเมนต์แบบระบบเปียก (*W/C*=1)

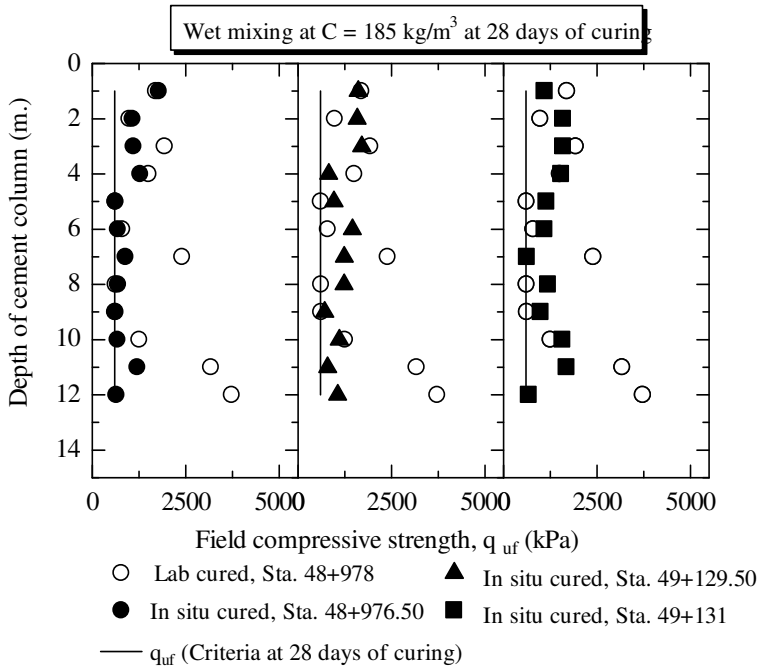


ข) บริเวณที่ทำเสาเข็มดินซีเมนต์แบบระบบแห้ง

ภาพที่6.6 ปริมาณความชื้นตลอดความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ Station ต่าง ๆ (ข้อมูลปริมาณความชื้นเริ่มต้นจากหลุมเจาะสำรวจ)

ผู้เขียนขอจำแนกกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เป็น 1) กำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวผสมซีเมนต์ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory unconfined compressive strength, q_{ul}) 2)

กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ได้สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวโดยอาศัยสมการที่ 4.8 (Predicted strength, q_{up}) 3) กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามและบ่มในห้องปฏิบัติการ (Lab cured – field compressive strength, $q_{uf\text{-}lab\ cured}$) ซึ่งได้จากการทำ Dry DMM สำหรับโครงการก่อสร้างนี้ และ 4) กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามและบ่มในสนาม (In situ cured – field compressive strength, $q_{uf\text{-}in\ situ\ cured}$) ซึ่งได้จากการทำ Wet DMM ยกเว้นที่ Sta. 48+978 สำหรับโครงการก่อสร้างนี้ ภาพที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามที่ได้จากการบ่มในสนามและห้องปฏิบัติการตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อัตราการขุดเจาะ 1 เมตรต่อนาที ที่ปริมาณซีเมนต์ 185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าตลอดความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์โดยส่วนใหญ่กำลังอัดแกนเดียวที่บ่มในสนามและบ่มในห้องปฏิบัติการที่ความลึกเดียวกันนั้นมีค่าที่แตกต่างกันหรือมีความแปรปรวนมากและมีค่าแตกต่างกันมากในช่วงความลึก 11 ถึง 12 เมตร ทั้งนี้อาจเพราะอุณหภูมิที่แตกต่างกันของการบ่มในที่กับการบ่มในห้องปฏิบัติการ แต่กำลังอัดแกนเดียวที่ได้ยังคงให้ค่าที่สูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐานกรมทางหลวงตลอดความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ และจะเห็นว่าความแปรปรวนของกำลังตลอดความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้จากการบ่มในห้องปฏิบัติการมีค่ามากกว่าการบ่มในสนาม



ภาพที่ 6.7 กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามที่บ่มในที่กับบ่มในห้องปฏิบัติการที่สถานีต่าง ๆ สำหรับระบบเปียกที่อายุบ่ม 28 วัน

การประยุกต์ใช้สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม

เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากงานวิจัยนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องประยุกต์ใช้สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ในการทำนายการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม คือความแปรปรวนของชั้นดิน ปริมาณความชื้น วิธีการก่อสร้าง และความไม่สม่ำเสมอของการผสมดินกับซีเมนต์ ปัจจัยเหล่านี้ได้รับการศึกษาโดยการเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์จากโครงการก่อสร้างถนนทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนตะวันออกที่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทคนิคผสมลึก (Deep mixing method) สายหนึ่งสายบางพลี – ธัญบุรี จังหวัดกรุงเทพ ฯ ที่สถานี (Station) ต่างๆ ตัวอย่างดินซีเมนต์ในสนามจะถูกเก็บโดยใช้ Coring cutter และตัดแต่งให้มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงเท่ากับ 1.0 ซึ่งเท่ากับก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการทดสอบจะควบคุมให้ปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์ที่ได้จากการผสมในสนามและบ่มในห้องปฏิบัติการ (Lab cured – field compressive strength, $q_{uf\text{-}lab\ cured}$) มีการสูญเสียปริมาณความชื้นน้อยที่สุดโดยทำการหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกการผสมในสนามจะกระทำโดยเครื่องจักรผสมกับน้ำและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่กำหนด ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ได้จากการสุ่มทดสอบ (Trial test) ในสนามที่ต้องการเท่ากับ 300 หรือ 400 หรือ 600 กิโลปาสคาล ที่อายุบ่ม 3, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ (กรณีใดกรณีหนึ่ง) ปริมาณความชื้นในสนามที่สถานีต่างๆ แสดงดังภาพที่ 6.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดกับสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวในสมการที่ 4.8 (LI = 1-2 ของดัชนีเหลว) ซึ่งจะให้ค่าถูกต้องและใช้ได้ในช่วงความลึก 3 ถึง 8 เมตรสำหรับวิธีผสมแห้ง และตลอดความลึกของเสาเข็มในช่วง 3 ถึง 12 เมตรสำหรับวิธีผสมเปียก เมื่อสมการที่ 4.8 มีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม ในช่วงที่ w_c/C มีค่าระหว่าง 2.5 ถึง 7.5 ซึ่งผู้เขียนขอหยิบยกสมการที่ 4.8 มาใช้ในบทนี้เพื่อใช้สมการดังกล่าวช่วยในการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

สำหรับดินเหนียวที่มีการบวมตัวต่ำและสูง (7 – 60 วัน)

$$\left\{\frac{q_{(w_c/C)_D}}{q_{(w_c/C)_{28}}}\right\}=\left[\frac{(w_c/C)_{28}}{(w_c/C)_D}\right]^{1.40}(0.103+0.265\ln D) \qquad (6.1)$$

เมื่อ $q_{(w_c/C)1,D}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ต้องการทราบ ที่ w_c/C หลังจากอายุบ่ม D วัน $q_{(w_c/C)28}$ คือกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ทราบค่า ที่ระยะบ่ม 28 วัน

ประสิทธิภาพการเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามถูกควบคุมโดยข้อกำหนดด้านกำลังอัดแกนเดียวที่ระยะบ่ม ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น ภาพที่ 6.7 แสดงข้อมูลของกำลังอัดแกนเดียวที่ได้ตลอดความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ให้ค่าสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยแม้ว่าจะมีสภาวะในการบ่มที่แตกต่างกันก็ตาม สิ่งนี้ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของการบ่มที่แตกต่างกันทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการสำหรับการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามทั้งระบบเปียกและระบบแห้งนี้เป็นได้ตามที่กำหนด

ตารางที่ 6.3 แสดงกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบเปียกที่ได้จากการผสมในสนามด้วยเครื่องจักรและบ่มในห้องปฏิบัติการ (Lab cured – field compressive strength, $q_{uf\text{-}lab\ cured}$) กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามด้วยเครื่องจักรและบ่มในสนาม (In situ cured – field compressive strength, $q_{uf\text{-}in\ situ\ cured}$) เปรียบเทียบกับกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory unconfined compressive strength, q_{ul}) จะพบว่าค่าเฉลี่ยของค่ากำลังอัดแกนเดียวในสนามที่บ่มในสนามและบ่มในห้องปฏิบัติการ เท่ากับ 1117.89 และ 1608.03 กิโลปาสคาล ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (Standard deviation, *S.D.*) ของกำลังอัดแกนเดียวในสนามที่บ่มในสนามและบ่มในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 369.97 และ 1036 กิโลปาสคาล ตามลำดับ และพบว่าจากค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Coefficient of variation, *C.V.*) ของการทดสอบในสนามที่มีสภาวะการบ่มแตกต่างกันนั้น การบ่มในสนามจะให้การกระจายของข้อมูล (*C.V.* = 33.10%) ที่น้อยกว่าการบ่มในห้องปฏิบัติการ (*C.V.* = 64.43%) ซึ่งสอดคล้องกับผลในภาพที่ 6.7

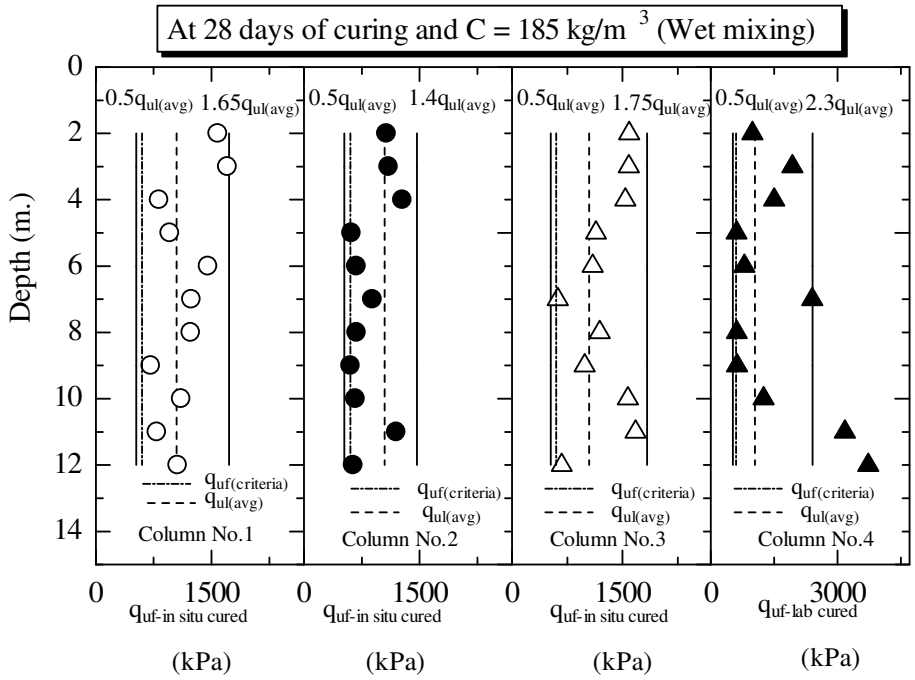
จากผลในตารางที่ 6.3 จะสามารถหาการแปรปรวนของค่ากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามกับค่าเฉลี่ยของกำลังอัดแกนเดียวในห้องปฏิบัติการ (Average Laboratory unconfined compressive strength, $q_{ul(avg)}$) ($q_{ul(avg}$ = 1047.75 kPa) ดังในภาพที่ 6.8 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากการผสมในสนามและบ่มในสนามมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 1.75 เท่าของกำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยที่ได้จากในห้องปฏิบัติการ และกำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากการผสมในสนามและบ่มในห้องปฏิบัติการมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 2.3 เท่าของกำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิของการบ่มและความแปรปรวนของอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio) ในสนาม เนื่องจากในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่แต่ละสถานีนั้น ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ใช้มีค่าคงที่

ตลอดสถานีทดสอบ แต่อาจมีการแปรปรวนของปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตลอดความลึกของชั้นดินด้วยทั้งนี้ให้ผลสอดคล้องกับผลการศึกษาในส่วนต้นที่กล่าวมาแล้วนั้นและพบว่าอัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวนี้ (q_{uf} = (0.5-1.75)q_{up} ในกรณีบ่มในสนามและ q_{uf} = (0.5-2.3)q_{up} ในกรณีบ่มในห้องปฏิบัติการ) มีค่าประมาณเท่ากับอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ได้จากการทำนายและที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (ความสัมพันธ์จากสมการที่ 6.1 ดังข้างต้น) แสดงในภาพที่ 6.9 สิ่งนี้เป็นการยืนยันให้เห็นว่าในทางปฏิบัติ เราสามารถใช้สมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวที่นำเสนอนั้นมาใช้ในการประมาณกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ได้ โดยมีความผิดพลาดที่ยอมรับได้

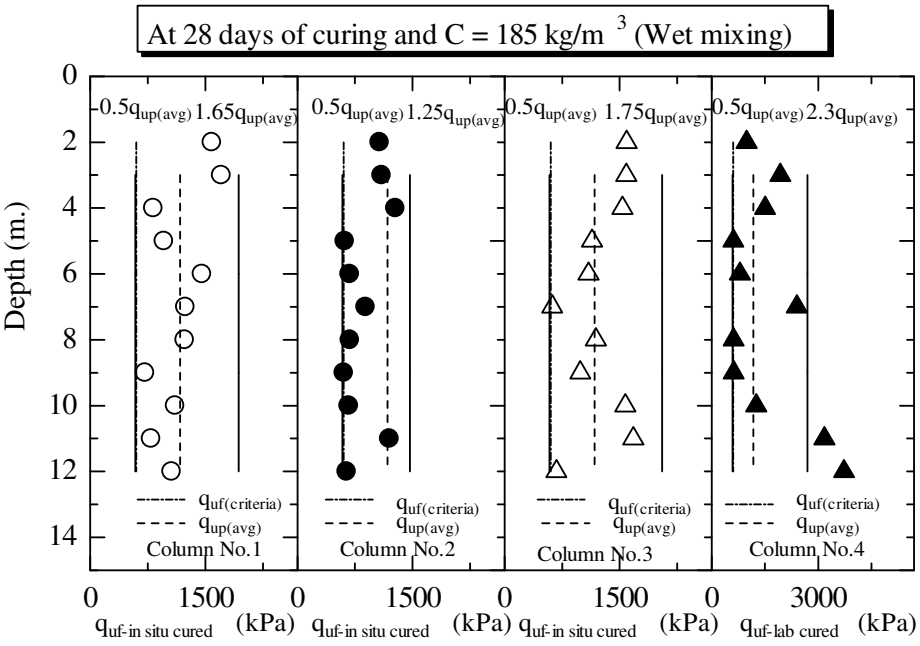
ตารางที่ 6.3

กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนามที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการก่อสร้างแบบระบบเปียก

Wet mixing at 28 days of curing, 185 kg/m^3					
Depth of column (m.)	q_{ul} (kPa)	$q_{uf\text{-}in\ situ\ cured}$ (kPa)			$q_{uf\text{-}lab\ cured}$ (kPa)
		Col. No. 1	Col. No. 2	Col. No. 3	Col. No. 4
1		1612.2	1775.3	1097	1695.2
2		1582.3	1070.4	1590.1	982.3
3	1121	1707.75	1096.9	1585.4	1931.1
4		821.8	1277.3	1536.9	1501.7
5		959.5	615.2	1140.3	609.7
6	1119	1455.5	681.4	1094.5	795.1
7		1239	887.7	620.3	2397.8
8		1230.7	682.6	1189.2	616.5
9	940	712.9	603.9	986.8	618.7
10		1106.1	668.3	1574.1	1252.5
11		791.5	1197.2	1678.9	3171
12	1011	1060.52	639.4	675.2	3724.8
Average, $\overline{X}$	1047.75	1117.89			1608.03
Standard deviation, $S.D$	88.32	369.98			1036.08
Coefficient of variation, *C.V.*	8.43%	33.10%			64.43%



ภาพที่ 6.8 กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบเปียกที่ได้จากการผสมในสนามและบ่มในที่และบ่มในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับกำลังเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อายุบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 6.9 กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบเปียกที่ได้จากการผสมในสนามและบ่มในที่และบ่มในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับกำลังที่ได้จากการทำนายที่อายุบ่ม 28 วัน

ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามมีค่าสูงพอสมควรในทางปฏิบัติ แต่ผลทดสอบ (ภาพที่ 6.8 – 6.9) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมในสนามด้วยเครื่องจักรทั้งบ่มในสนามและบ่มในที่ กับการผสมดินซีเมนต์ด้วยมือในห้องปฏิบัติการ

ดังนั้นสำหรับข้อมูลในสนามของการก่อสร้างในระบบเปียกนั้นสรุปได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวในสนามที่บ่มในห้องปฏิบัติการจะให้ค่าความแปรปรวนมากกว่าในการบ่มในสนาม ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดความลึกในสนามมีน้อยกว่าการบ่มในห้องปฏิบัติการและให้ค่าความแปรปรวนของกำลังอัดแกนเดียวในสนามต่อกำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 0.5 ถึง 2.3 เท่า แต่อย่างไรก็ตามควรมีข้อมูลผลทดสอบในสนามในกรณีการบ่มในห้องปฏิบัติการให้มากกว่านี้ เพื่อความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

สำหรับผลทดสอบในสนามสำหรับการก่อสร้างระบบแห้งแสดงดังตารางที่ 6.4 ถึงตารางที่ 6.5 และภาพที่ 6.10 ที่ระยะบ่ม 3 และ 14 วัน ตามลำดับ พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ได้จากการผสมในสนามที่ผสมด้วยเครื่องจักร (q_{uf}) มีค่าต่ำกว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบห้องปฏิบัติการมาก ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 1.3 เท่า และ 0.4 ถึง 0.8 เท่าของกำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ย ($q_{ulavg\ at\ 3\ days}$ = 726.8 kPa, $q_{ulavg\ at\ 14\ days}$ = 1132.73 kPa) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ที่ระยะบ่ม 3 และ 14 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 6.10 และพบว่าค่าเฉลี่ยของกำลังอัดแกนเดียวในสนามที่บ่มในห้องปฏิบัติการที่ระยะบ่ม 3 และ 14 วัน เท่ากับ 549.87 และ 633.37 กิโลปาสคาล ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (Standard deviation, *S.D.*) ที่ระยะบ่ม 3 และ 14 วัน เท่ากับ 143.39 และ 100.69 กิโลปาสคาล ตามลำดับ และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย (Coefficient of variation, *C.V.)* ของการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามสำหรับระบบแห้งนั้น ที่อายุบ่ม 3 วัน มีค่าเท่ากับ 26.08% และที่อายุบ่ม 14 วัน มีค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายเท่ากับ 15.90% นั้นแสดงให้เห็นว่าที่อายุบ่ม 14 วันมีการกระจายข้อมูลน้อยกว่าที่อายุบ่ม 3 วัน แต่จากผลข้อมูลข้อทั้งการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในแบบระบบเปียกและระบบแห้งนั้นจะพบว่ากำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามของระบบเปียกมีการกระจายข้อมูลหรือมีความแปรปรวนของกำลังตลอดความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่สูงกว่าการทำเสาเข็มในระบบแห้ง

ตารางที่ 6.4

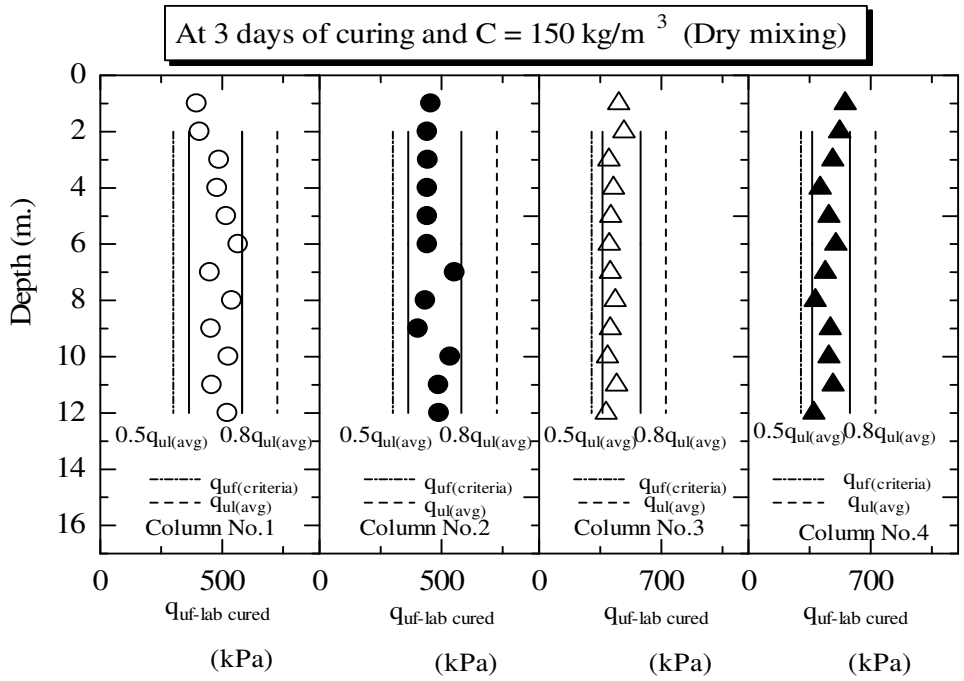
กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนามที่อายุบ่ม 3 วัน ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 150 กิโลกรัมต่อลบ.ม.สำหรับระบบแห้ง

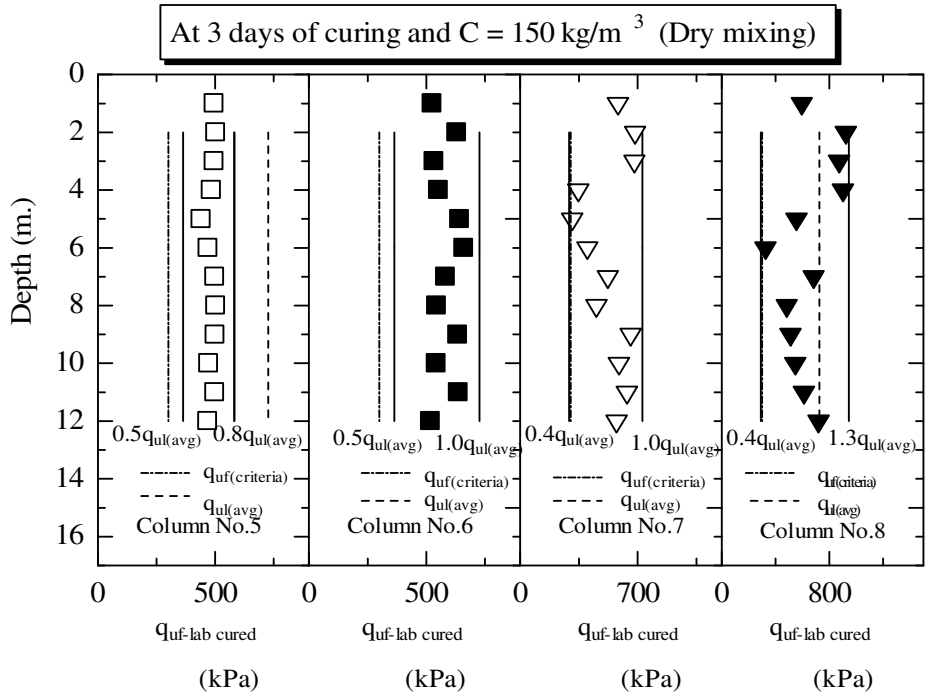
$q_{uf\text{-}lab\ cured}$ (kPa) (Dry mixing at 3 days of curing, 150 kg/m^3)															
Depth (m.)	q_{ul}(kPa)	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12	No. 13	No. 14
1		396	456	456	554	496	524	582	596	824	424	524	754	678	424
2		408	442	486	522	502	630	684	924	852	382	530	904	312	382
3	670	488	444	400	482	496	532	680	874	642	480	492	810	540	480
4		480	442	426	410	484	552	346	902	694	446	488	858	644	446
5		518	442	410	460	440	642	310	556	794	432	490	866	580	432
6	668.4	566	442	402	500	470	660	400	326	650	444	504	696	772	444
7		450	554	408	440	498	582	522	684	638	458	502	780	982	458
8		540	434	436	382	502	544	454	484	852	524	484	732	556	524
9		454	404	408	468	500	634	658	512	692	442	494	768	906	442
10		526	536	392	460	472	542	588	548	674	458	474	766	908	458
11		458	488	444	484	498	636	636	612	668	458	502	854	706	458
12	842	522	490	384	374	468	518	574	720	712	476	498	764	758	476
Average, $\bar{X}$	726.8	549.87													
$S.D$	99.77	143.39													
C.V.	13.73%	26.08%													

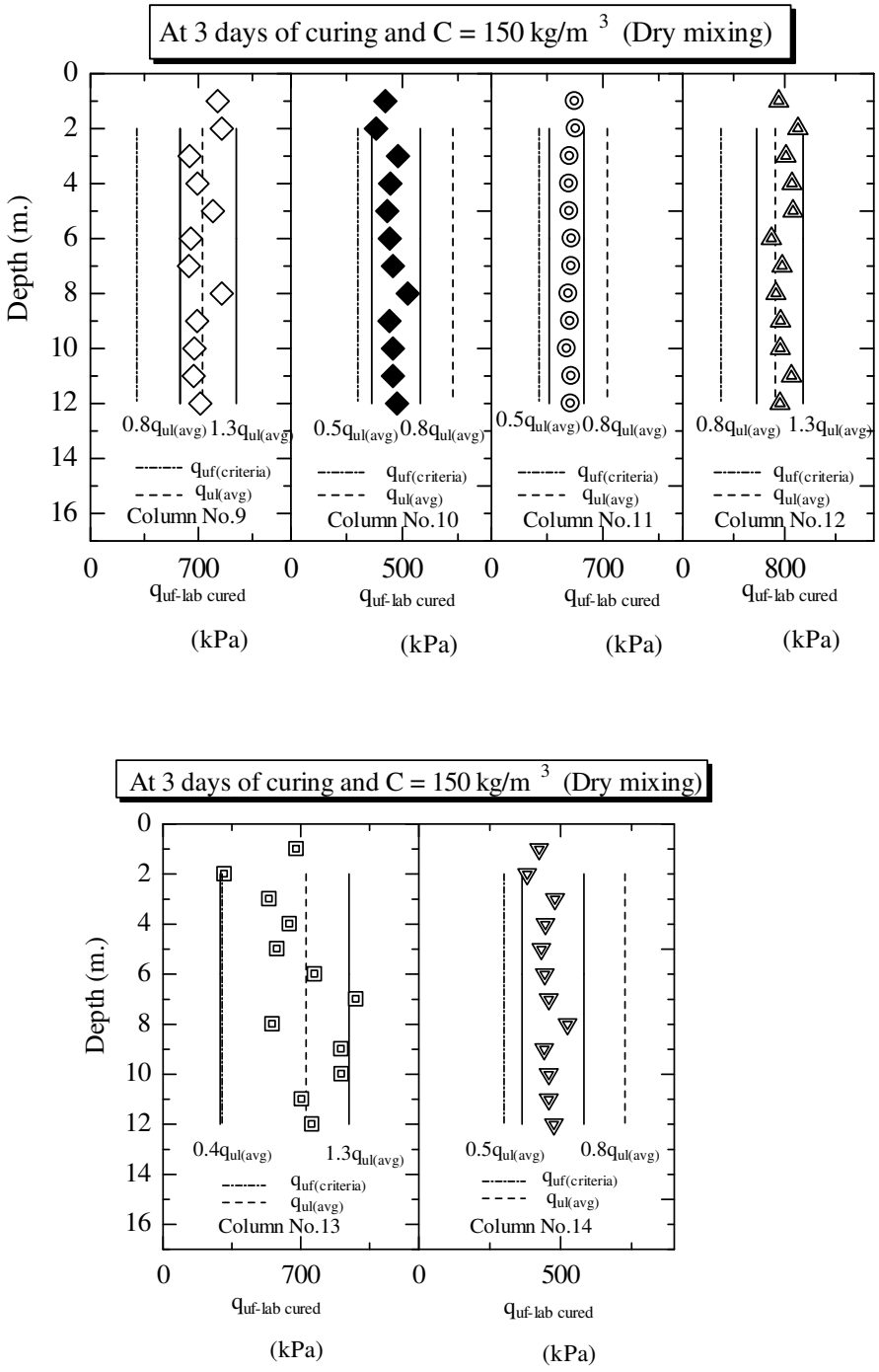
ตารางที่ 6.5

กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนามที่อายุบ่ม 14 วัน ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการก่อสร้างแบบระบบเปียก

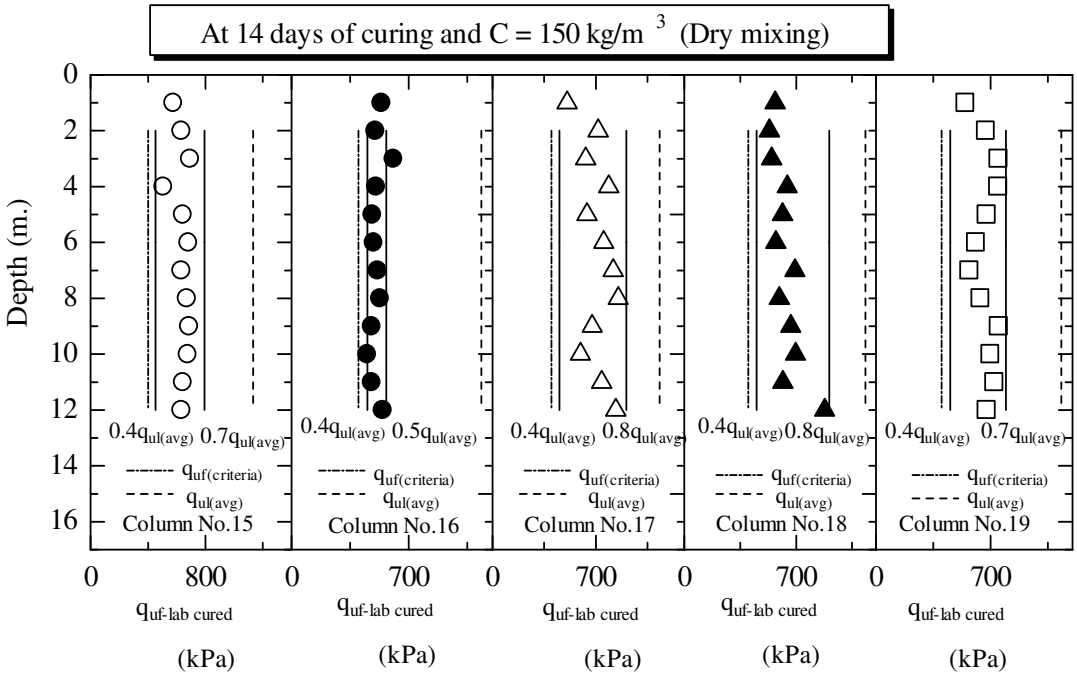
Dry mixing at 14 days of curing, 150 kg/m^3						
Depth of column (m.)	q_{ul} (kPa)	$q_{uf\text{-}lab\ cured}$ (kPa)				
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
1		576	536	506	568	546
2		632	500	716	532	670
3	1167.2	692	608	632	546	748
4		506	504	788	644	746
5		642	482	640	614	676
6	985.4	680	490	754	572	610
7		632	514	818	692	570
8		670	528	852	594	638
9		686	478	676	666	750
10		676	452	596	696	698
11		642	478	740	616	722
12	1245.6	632	544	836	878	676
Average, $\bar{X}$	1132.73	633.37				
Standard deviation, $S.D$	133.48	100.69				
Coefficient of variation, *C.V.*	11.78%	15.90%				


At 3 days of curing and C = 150 kg/m 3 (Dry mixing)
Depth (m.)
0
2
4
6
8
10
12
14
16
0.5qul(avg) 0.8qul(avg)
quf(criteria)
qul(avg)
Column No.1
Column No.2
Column No.3
Column No.4
0
500
700
quf-lab cured
(kPa)


At 3 days of curing and C = 150 kg/m 3 (Dry mixing)
Depth (m.)
0
2
4
6
8
10
12
14
16
0.5qul(avg) 0.8qul(avg)
0.5qul(avg) 1.0qul(avg)
0.4qul(avg) 1.0qul(avg)
0.4qul(avg) 1.3qul(avg)
quf(criteria)
qul(avg)
Column No.5
Column No.6
Column No.7
Column No.8
0
500
700
800
quf-lab cured
(kPa)



ก) อายุบ่มเท่ากับ 3 วัน



ข) อายุบ่มเท่ากับ 14 วัน

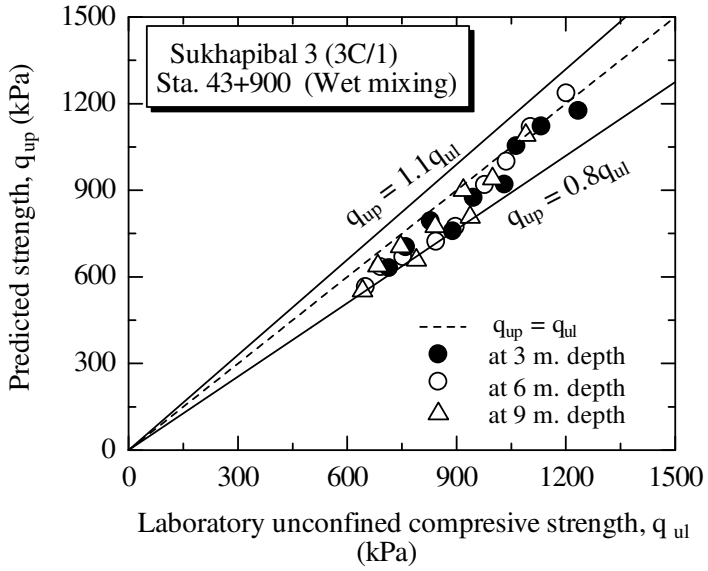
ภาพที่ 6.10 กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบแห้งที่ได้จากการผสมในสนามและบ่มในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับกำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากตารางที่ 6.3 ถึง 6.5 สรุปได้ว่าการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบแห้งจะให้ค่าความแปรปรวนของกำลังน้อยกว่าการทำในระบบเปียก และสำหรับในระบบเปียกนั้นการบ่มในสนามจะให้ค่าความแปรปรวนน้อยกว่าการบ่มในห้องปฏิบัติการ แต่สำหรับในระบบแห้งนั้นมักจะทำการบ่มในห้องปฏิบัติการและเราพบว่าที่อายุบ่ม 14 วันให้ค่าความแปรปรวนน้อยกว่าที่อายุบ่ม 3 วัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะดินมีการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์มากกว่า และเมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยในสนามพบว่าการทำด้วยระบบเปียกนั้นให้ค่ากำลังที่สูงกว่ากำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยในห้องปฏิบัติการทั้งการบ่มในสนามและบ่มในห้องปฏิบัติการซึ่งให้ผลตรงกันข้ามกับการทำในระบบแห้งซึ่งมีค่ากำลังอัดแกนเดียวในสนามน้อยกว่ากำลังอัดแกนเดียวในห้องปฏิบัติการ

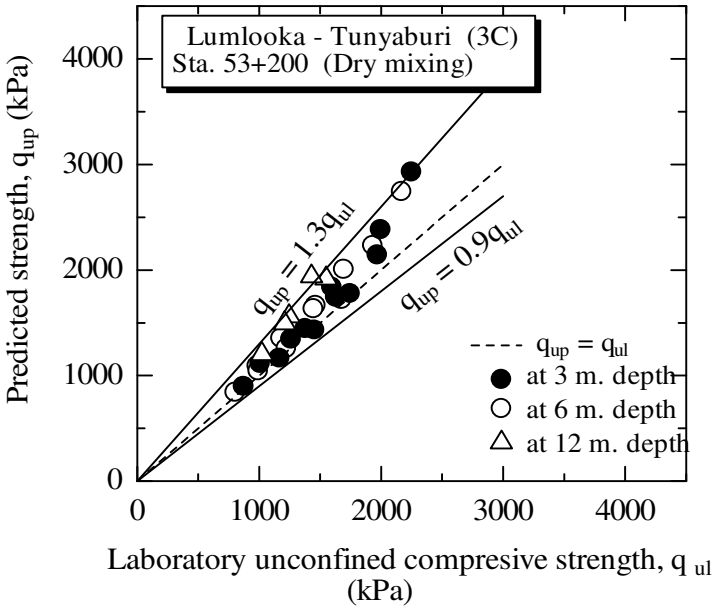
ตัวอย่างดินที่ได้จากการผสมด้วยมือและเตรียมในห้องปฏิบัติการและตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามด้วยเครื่องจักรได้จากตัวอย่างที่เจาะเก็บด้วย Coring cutter ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันกับที่เก็บ

ตัวอย่างสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะมีวิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์และสภาพการบ่มที่ความแตกต่างกันของระบบเปียกและระบบแห้ง ลักษณะและวิธีการสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่แตกต่างกันทำให้ได้ลักษณะของแฟบริค (Fabric) ที่แตกต่างกัน ปัจจัยทั้งสอง (วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์และสภาพการบ่ม) นี้ทำให้กำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างที่เก็บจากเสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบเปียกมีค่าแตกต่างจากกำลังในห้องปฏิบัติการและในสนามมากกว่ากำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้รับการผสมในสนามและบ่มในห้องปฏิบัติการสำหรับระบบแห้ง ดังนั้นเราพบว่าการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยระบบแห้งจะให้ค่าความแปรปรวนของกำลังตามความลึกและช่วงห่างของความแตกต่างของกำลังในสนามและในห้องปฏิบัติการที่น้อยกว่าระบบเปียก แต่การทำเสาเข็มในระบบแห้ง ($q_{uf} = 0.4q_{ul}$) จะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวในสนามที่ต่ำที่สุดน้อยกว่าระบบเปียก ($q_{uf} = 0.5q_{ul}$) ดังนั้นเพื่อความถูกต้องในการใช้งานสำหรับการออกแบบจึงควรกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) ให้เหมาะสมและถูกต้อง ดังรายละเอียดที่กล่าวในหัวข้อถัดไป

จากผลทดสอบที่ได้ข้างต้น กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามโดยระบบเปียกมีความแปรปรวนในช่วง 50 ถึง 230 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยในห้องปฏิบัติการ และสำหรับระบบแห้งจะมีค่าประมาณ 40 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์และ 40 ถึง 130 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุบ่ม 14 และ 3 วัน ตามลำดับ ดังนั้นเราสามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามได้โดยอาศัยผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ได้จากดินตัวอย่างที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ การประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ผสมในสนามที่อายุบ่มใดๆ สามารถกระทำได้ดังแสดงในภาพที่ 6.11 โดยอาศัยสมการที่ (6.1) ให้ผลดังตารางที่ 6.6 และพบว่าความแปรปรวนของการทำนายกำลังอัดแกนเดียวอยู่ระหว่าง 80 ถึง 130 เปอร์เซ็นต์สำหรับงานการก่อสร้างโครงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนตะวันออก ดังในภาพที่ 6.11 และนำผลทดสอบโครงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณเขตลาดกระบังดังข้อมูลในตารางที่ 6.6 มาร่วมวิเคราะห์ผล พบว่าค่าความแปรปรวนเท่ากับ 80 ถึง 135 เปอร์เซ็นต์ ดังในภาพที่ 6.12



ก) ระบบเปียก



ข) ระบบแห้ง

ภาพที่ 6.11 เปรียบเทียบการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับโครงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนตะวันออก

ตารางที่ 6.6

กำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากการทำนายสำหรับงานการก่อสร้างโครงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนตะวันออก และโครงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณเขตลาดกระบัง

วงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน3C/1) สุขาภิบาล 3 กม. ที่ 43+900 (Wet mixing) (*LL* = 80 – 91.5%, *PL* = 25 – 29.6%, รายงานผลทดสอบจากกรมทางหลวง, 2549)						
Depth (m.)	Curing time, *D* (days)	Cement content, *C* (%)	Water content, w_c (%)	Water/cement ratio, w_c/C	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)
3	7	24.12	122.62	5.08	631	621.42
	14	24.12	122.62	5.08	758	805.93
	28	24.12	122.62	5.08	1053	990.43
	7	25.50	124.00	4.86	703	661.27
	14	25.50	124.00	4.86	874	857.60
	28	25.50	124.00	4.86	1121	1053.94
	7	27.57	126.06	4.57	793	720.65
	14	27.57	126.06	4.57	920	934.62
	28	27.57	126.06	4.57	1175	1148.58
6	7	22.03	108.33	4.92	565	650.91
	14	22.03	108.33	4.92	722	844.17
	28	22.03	108.33	4.92	999	1037.43
	7	23.29	109.59	4.71	634	692.29
	14	23.29	109.59	4.71	773	897.83
	28	23.29	109.59	4.71	1119	Reference
	7	25.18	111.48	4.43	668	753.88
	14	25.18	111.48	4.43	918	977.71
	28	25.18	111.48	4.43	1236	1201.54

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

Depth (m.)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	Water content, w_c (%)	Water/cement ratio, w_c/C	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)
9	7	18.80	89.60	4.77	552	680.04
	14	18.80	89.60	4.77	658	881.95
	28	18.80	89.60	4.77	807	1083.86
	7	19.87	90.67	4.56	638	722.90
	14	19.87	90.67	4.56	775	937.53
	28	19.87	90.67	4.56	940	1152.16
	7	21.48	92.28	4.30	705	786.63
	14	21.48	92.28	4.30	900	1020.18
	28	21.48	92.28	4.30	1090	1253.73
โครงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ทางหลวงหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน 3) ตอนอำเภอลำลูกกา – ธัญบุรี (Dry mixing) (LL = 60 – 90.4%, PL = 24.4 – 30.5%, รายงานผลทดสอบจากกรมทางหลวง, 2549)						
3	7	20.95	106.7	5.09	872.8	898.92
	14	20.95	106.7	5.09	1167.2	1165.81
	28	20.95	106.7	5.09	1453	Reference
	7	24.44	106.7	4.37	1007.8	1115.44
	14	24.44	106.7	4.37	1378	1446.62
	28	24.44	106.7	4.37	1744.8	1777.80
	7	27.93	106.7	3.82	1261.6	1344.73
	14	27.93	106.7	3.82	1627.6	1743.99
	28	27.93	106.7	3.82	1969.2	2143.25
	7	34.92	106.7	3.06	1596.2	1837.85
	14	34.92	106.7	3.06	1996.4	2383.51
	28	34.92	106.7	3.06	2249.8	2929.18

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

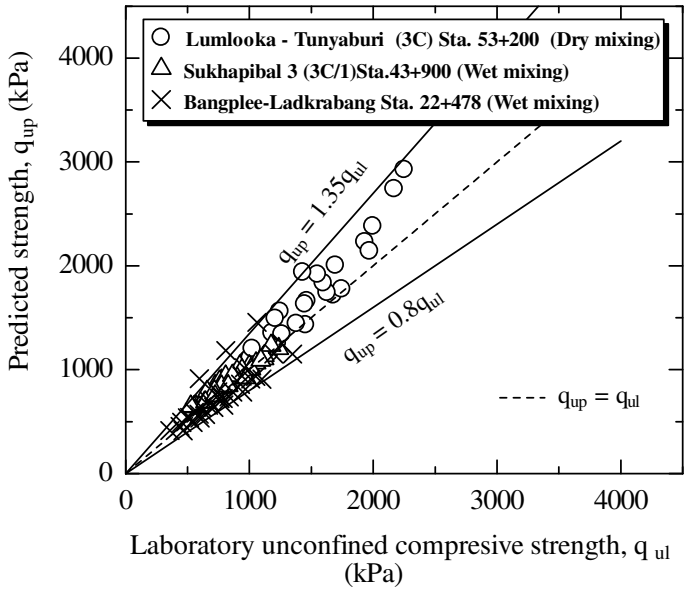
Depth (m.)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	Water content, w_c (%)	Water/cement ratio, w_c/C	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)
6	7	21.45	114.5	5.34	803.00	841.75
	14	21.45	114.5	5.34	985.40	1091.67
	28	21.45	114.5	5.34	1245.60	1341.59
	7	25.025	114.5	4.58	992.20	1044.50
	14	25.025	114.5	4.58	1180.60	1354.62
	28	25.025	114.5	4.58	1463.20	1664.74
	7	28.6	114.5	4.00	1224.20	1259.21
	14	28.6	114.5	4.00	1446.20	1633.08
	28	28.6	114.5	4.00	1694.40	2006.94
	7	35.75	114.5	3.20	1676.20	1720.97
	14	35.75	114.5	3.20	1932.20	2231.93
	28	35.75	114.5	3.20	2168.20	2742.89
12	7	16.12	66.6	4.13	1022.2	1205
	14	16.12	66.6	4.13	1245.6	1563
	28	16.12	66.6	4.13	1549.4	1921
	7	18.81	66.6	3.54	1208.6	1495
	14	18.81	66.6	3.54	1429.4	1940
โครงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ทางหลวงหมายเลข 3256 อำเภอบางพลี - ลาดกระบัง (Wet mixing) (LL = 70 - 80%, PL = 29 – 30.7%) (รายงานผลทดสอบจากกรมทางหลวง, 2549)						
3	7	19.74	110.54	5.60	358.6	413.88
	14	19.74	110.54	5.60	499.8	536.77
	28	19.74	110.54	5.60	669	Reference
	7	23.03	113.83	4.94	453.2	492.92

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

Depth (m.)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	Water content, w_c (%)	Water/cement ratio, w_c/C	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)
	14	23.03	113.83	4.94	614.4	639.27
	28	23.03	113.83	4.94	864.6	785.62
	7	26.32	117.12	4.45	592.6	571.01
	14	26.32	117.12	4.45	770.2	740.54
	28	26.32	117.12	4.45	1010.4	910.08
	7	32.89	123.70	3.76	761.8	722.91
	14	32.89	123.70	3.76	940.4	937.55
	28	32.89	123.70	3.76	1196.6	1152.18
6	7	19.14	100.34	5.24	439.2	454.00
	14	19.14	100.34	5.24	556	588.79
	28	19.14	100.34	5.24	758.2	723.58
	7	22.33	103.53	4.63	516.8	539.20
	14	22.33	103.53	4.63	673.4	699.29
	28	22.33	103.53	4.63	927.8	859.38
	7	25.52	106.72	3.18	596.2	913.39
	14	25.52	106.72	3.18	808.4	1184.58
	28	25.52	106.72	3.18	1060.6	1455.77
	7	31.90	113.10	3.54	742.8	784.97
	14	31.90	113.10	3.54	958.8	1018.03
	28	31.90	113.10	3.54	1261	1251.09
12	7	17.06	95.66	5.61	463.2	413.27
	14	17.06	95.66	5.61	600.8	535.97
	28	17.06	95.66	5.61	791.8	658.67
	7	19.90	98.50	4.95	543.8	492.20

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

Depth (m.)	Curing time, D (days)	Cement content, C (%)	Water content, w_c (%)	Water/cement ratio, w_c/C	Laboratory strength, q_{ul} (kPa)	Predicted strength, q_{up} (kPa)
	14	19.90	98.50	4.95	711.6	638.34
	28	19.90	98.50	4.95	946.2	784.48
	7	22.75	101.35	4.45	646.2	570.20
	14	22.75	101.35	4.45	836	739.50
	28	22.75	101.35	4.45	1101	908.79
	7	28.44	107.04	3.76	788.2	721.95
	14	28.44	107.04	3.76	1051	936.29
	28	28.44	107.04	3.76	1347.6	1150.64



ภาพที่ 6.12 เปรียบเทียบการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับกำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับโครงการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์บริเวณเขตลำลูกกา สุขาภิบาล3 บางพลี ลาดกระบัง

ข้อเสนอแนะในการทำงานทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามเริ่มต้นจากการกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับปริมาณความชื้นในสนาม เพื่อให้ได้กำลังที่ต้องการ (Target strength) ในระยะเวลาที่กำหนด จากการศึกษา กำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการในสนามควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการในห้องปฏิบัติการสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบแห้งและกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการในสนามควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2.0 เท่าของกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการในห้องปฏิบัติการสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในระบบเปียก เนื่องจากความแปรปรวนของสภาพชั้นดิน ปริมาณความชื้น วิธีการก่อสร้าง และสภาพการบ่ม

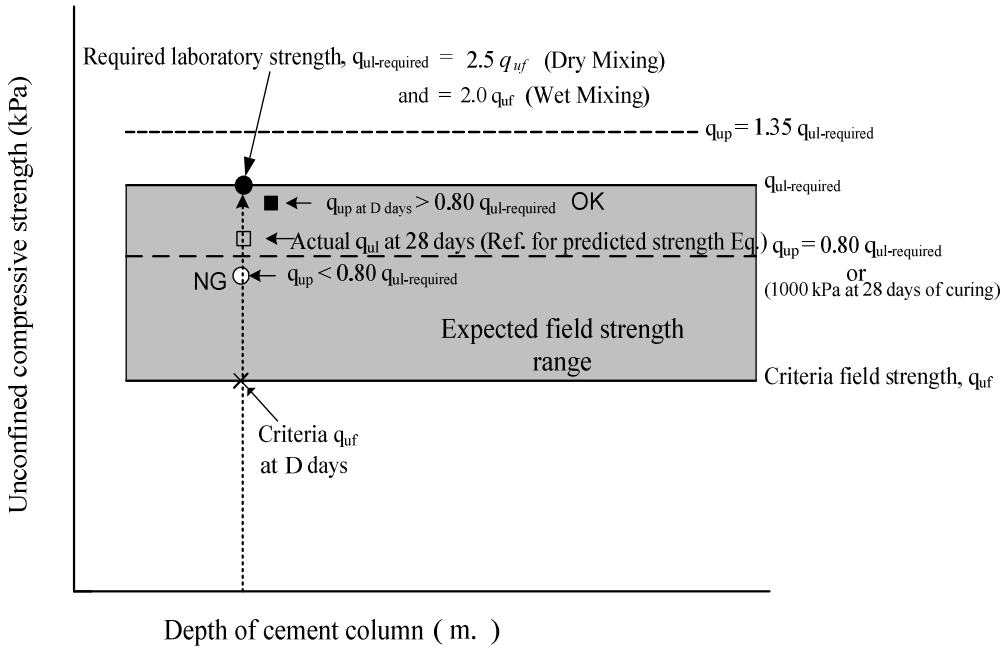
เพื่อให้ได้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สอดคล้องกับกำลังที่ต้องการ จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างดินในสนามหลายๆ ตำแหน่ง และทำการทดสอบหลายครั้ง (Trial test) จนได้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม การทำงานสามารถทำได้ง่ายขึ้นโดยการใช้กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม ปริมาณซีเมนต์ และปริมาณน้ำค่าหนึ่ง เป็นค่าอ้างอิง เพื่อทำนายอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ (Soil-water/cement ratio, w_c/C) ที่อายุบ่มที่ต้องการ โดยที่ความแปรปรวนของผลทำนายจากสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวที่ (6.1) มีค่าอยู่ระหว่าง 80 ถึง 135 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนการทำงานและตรวจสอบคุณสมบัติของดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนาม เมื่อทราบค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการในสนามสามารถสรุปได้ดังนี้ (ดูภาพที่ 6.13)

1. ทำการเก็บตัวอย่างที่ความลึกต่าง ๆ ในสนามมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยให้ปริมาณความชื้นในดินเท่ากับ 1 – 2 เท่าของดัชนีเหลวโดยอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์อยู่ระหว่าง 2.5 – 7.5 (w_c/C = 2.5 – 7.5) ที่อายุบ่ม 28 วันซึ่งเป็นข้อมูลอ้างอิง จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนปริมาณซีเมนต์โดยอาศัยการประมาณจากสมการที่ (6.1)
2. ประมาณกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการในห้องปฏิบัติการที่อายุบ่มนั้น ๆ ต้องมีค่ามากกว่าผลคูณระหว่างกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการในสนาม (300, 400 และ 600 กิโลปาสคาลที่อายุบ่ม 3, 14 และ 28 วันตามลำดับ) กับอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.5 สำหรับการก่อสร้างในระบบแห้ง และอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2 สำหรับระบบเปียก ทั้งนี้สำหรับระบบเปียกกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ (W/C = 1)

3. ถ้ากำลังที่ได้จากการทำนายจากสมการที่ (6.1) มีค่ามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการในห้องปฏิบัติการที่ได้จากการคำนวณในข้อ (2) และมากกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวง (มากกว่า 1000 กิโลปาสคาลที่อายุบ่ม 28 วัน) เราสามารถสรุปได้ว่า ดินซีเมนต์นี้มีความแข็งแรงตามเกณฑ์
4. ถ้าพบว่ากำลังอัดแกนเดียวที่ได้จากการทำนายจากสมการที่ (6.1) มีค่าน้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดแกนเดียวที่ต้องการในห้องปฏิบัติการให้เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์
5. ทำการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในแปลงทดสอบ

- ถ้าครบอายุบ่ม กำลังอัดแกนเดียวที่เกิดขึ้นมากกว่าข้อกำหนดในสนามแล้วสามารถสรุปได้ว่าเสาเข็มดินซีเมนต์นี้แข็งแรง
- ถ้าครบอายุบ่ม กำลังอัดแกนเดียวที่เกิดขึ้นน้อยกว่าข้อกำหนดในสนามแล้วให้ทดสอบ Pile load test โดยเสาเข็มดินซีเมนต์ต้องมีค่ากำลังรับน้ำหนักไม่น้อยกว่า 20 ตัน



ภาพที่ 6.13 สรุปขั้นตอนการทำงานการปรับปรุงดินด้วยวิธีผสมลึกโดยการทำเสาเข็มดินซีเมนต์

ภาพที่ 6.14 และ 6.15 แสดงความสัมพันธ์กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้จากสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียว (สมการที่ 6.1) โดยทำการตรวจสอบกับขั้นตอนที่นำเสนอข้างต้นกับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองสายกรุงเทพ ฯ – ชลบุรี ตอนศรีนครินทร์ ทางเข้าสนามบินสุวรรณภูมิที่อายุบ่ม 14 และ 28 วัน และโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างหมายเลข 3256 สายทางแยกทางหลวงหมายเลข 34 บรรจบหมายเลข 3268 บริเวณบางพลี - ลาดกระบัง ที่อายุบ่ม 14 วัน โดยมีผลทดสอบและรายละเอียดการออกแบบส่วนผสมในห้องปฏิบัติการดังตารางที่ 6.7 และ 6.8 พบว่าจากการนำขั้นตอนที่นำเสนอข้างต้นมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบนี้กำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามมีค่าสูงกว่ากำลังอัดแกนเดียวที่มาตรฐานกำหนดไว้ทั้งในระบบเปียกและระบบแห้ง ดังนั้นขั้นตอนที่นำเสนอข้างต้นสามารถนำไปช่วยในการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ได้ ซึ่งจะมีประโยชน์มากทั้งทางด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 6.7

ผลทดสอบและรายละเอียดข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมเสาเข็มดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองสายกรุงเทพ ฯ – ชลบุรี ตอนศรีนครินทร์ที่อายุบ่ม 28 และ14 วัน

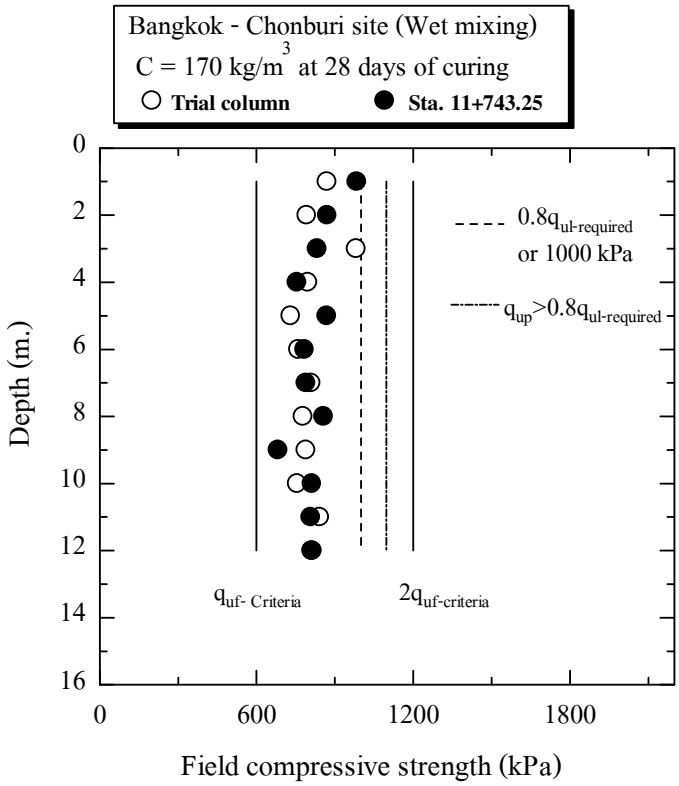
(รายงานผลทดสอบจากกรมทางหลวงปี 2547)

Description	Wet mixing	Dry mixing	Dry mixing	Remark
Results				
Depth, m.	4	4	4	
Curing time, days	28	28	14	
Soil unit weight, ton/m^3	1.49	1.49	1.49	
Initial water content, %	99.7	99.7	99.7	
Clay water cement c ratio,w_c/C	5.25	4.96	4.96	
Water/Cement ratio, W/C	1	0	0	
Laboratory strength, kPa	1149	1250.57	1051.87	

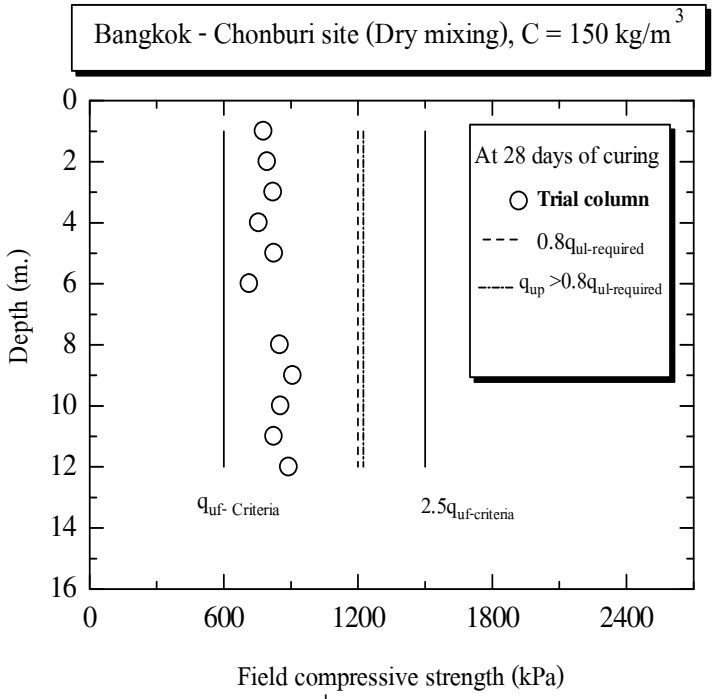
ตารางที่ 6.7 (ต่อ)

Description	Wet mixing	Dry mixing	Dry mixing	Remark
Designing				
Trial Cement content, %	22.8	20	20	
Factor of safety, Fs	2	2.5	2.5	Wet mixing = 2, Dry mixing = 2.5
Predicted Strength from Eq.6.1	1096.86	1224.18	837.86	> $q_{uf\text{-}required}$ × Fs × 0.80 or >1000 kPa for 28 days
Designed Cement content, kg/ m^3	170	150	150	

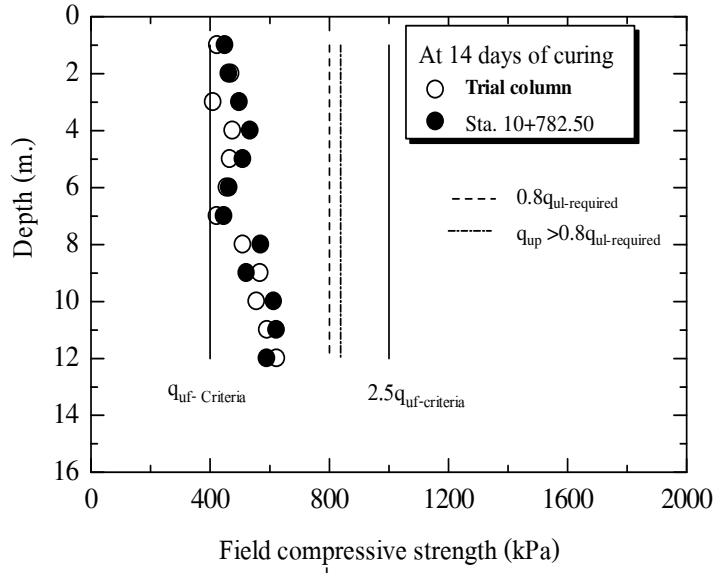
Notation; $q_{uf\text{-}required}$ = 300, 400, 600 kPa at 3, 14 and 28 days of curing respectively



ก) ระบบเปียก ที่อายุบ่ม 28 วัน



ข) ระบบแห้ง ที่อายุบ่ม 28 วัน



ค) ระบบแห้ง ที่อายุบ่ม 14 วัน

ภาพที่ 6.14 ผลการตรวจสอบขั้นตอนการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนามที่โครงการก่อสร้างบริเวณถนนสายกรุงเทพ – ชลบุรี ระบบเปียกและแห้งที่อายุบ่ม 14 และ 28 วัน

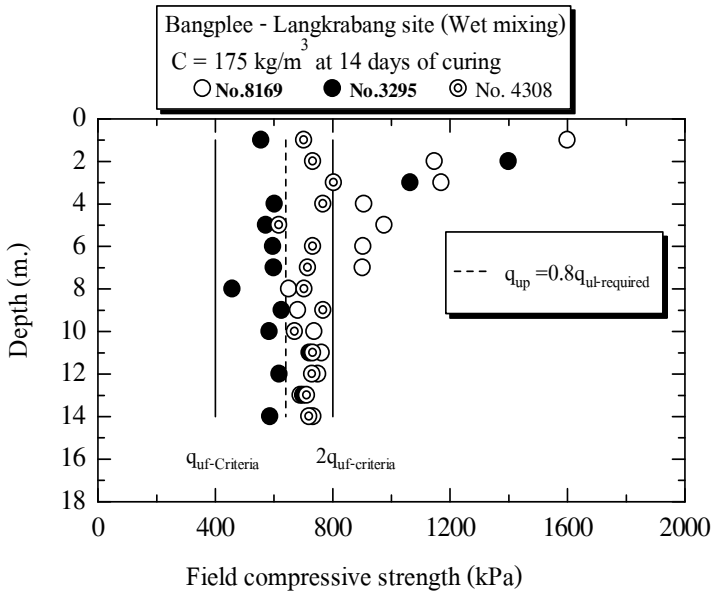
ตารางที่ 6.8

ผลทดสอบและรายละเอียดข้อกำหนดในการออกแบบส่วนผสมเสาเข็มดินซีเมนต์โครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างหมายเลข 3256 สายทางแยกทางหลวงหมายเลข 34 บรรจบหมายเลข 3268 บริเวณบางพลี - ลาดกระบัง ที่อายุบ่ม 14 วัน

(รายงานผลทดสอบจากกรมทางหลวงปี 2549)

Description	Wet mixing	Remark
Results		
Depth, m.	3	
Curing time, days	14	
Soil unit weight, ton/m^3	1.45	
Initial water content, %	90.8	
Clay water cement c ratio,w_c/C	5.6	
Water/Cement ratio, W/C	1	
Laboratory strength, kPa	669	
Designing		
Trial Cement content, %	23.05	
Factor of safety, Fs	2	Wet mixing = 2
Predicted Strength from Eq.6.1	639.92	$\geq q_{uf\text{-}required} \times Fs \times 0.80 = 640$ kPa
Designed Cement content, kg/ m^3	175	

Notation; $q_{uf\text{-}required}$ = 300, 400, 600 kPa at 3, 14 and 28 days of curing respectively



ภาพที่ 6.15 ผลการตรวจสอบขั้นตอนการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการและในสนามที่โครงการก่อสร้างบริเวณบางพลี – ลาดกระบัง ในระบบเปียกที่อายุบ่ม 14 วัน