

ผลและวิจารณ์

พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ

การศึกษาพฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็ม (Mobilized Unit Skin Friction) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อเสาเข็ม ขณะที่เสาเข็มได้ส่งถ่ายแรงไปสู่มวลดินบริเวณผิวเสาเข็ม ตลอดความยาวตาม ลักษณะ และคุณสมบัติของชั้นดินที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นพฤติกรรมการถ่ายแรงของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

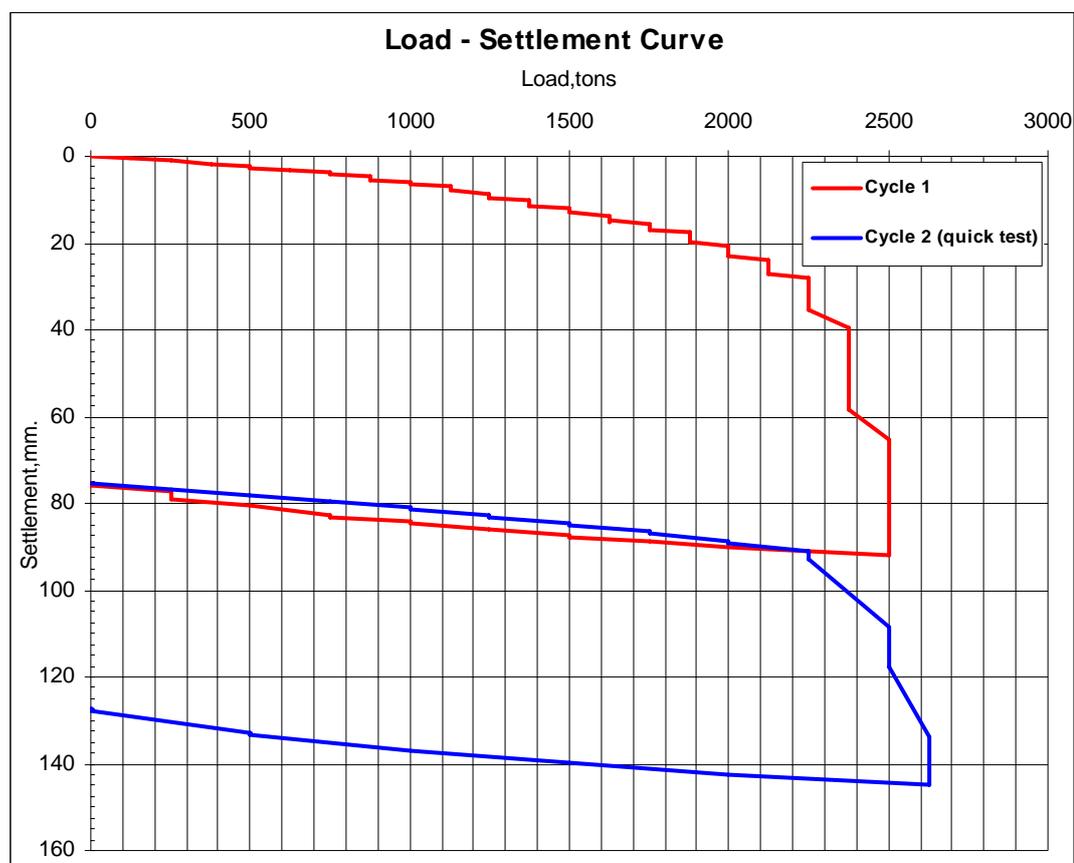
สำหรับการศึกษาวิจัยผลการทดสอบเสาเข็มได้ทำการแบ่งประเภทของชั้นดินเป็น 6 ประเภท ตามพฤติกรรมของการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่เกิดขึ้นในชั้นดินแต่ละประเภท โดยได้วิเคราะห์จากผลการทดสอบเสาเข็มจากทั้งหมด 12 ชุดข้อมูล และมีผลการเจาะสำรวจดินในบริเวณที่ทำการทดสอบเสาเข็มไว้ ซึ่งในแต่ละพื้นที่โครงการก่อสร้างจะมีลักษณะชั้นดินแต่ละประเภทมีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่แตกต่างกัน

1. พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ ของเสาเข็มที่ศึกษา

การทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมต่างๆ โดยทั่วไปมีการทดสอบค่าน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (Load-Settlement Curve) ดังตัวอย่างในภาพที่ 28 ในแต่ละรอบของการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจริงที่ใช้ในการออกแบบของเสาเข็ม แสดงดังตารางที่ 8

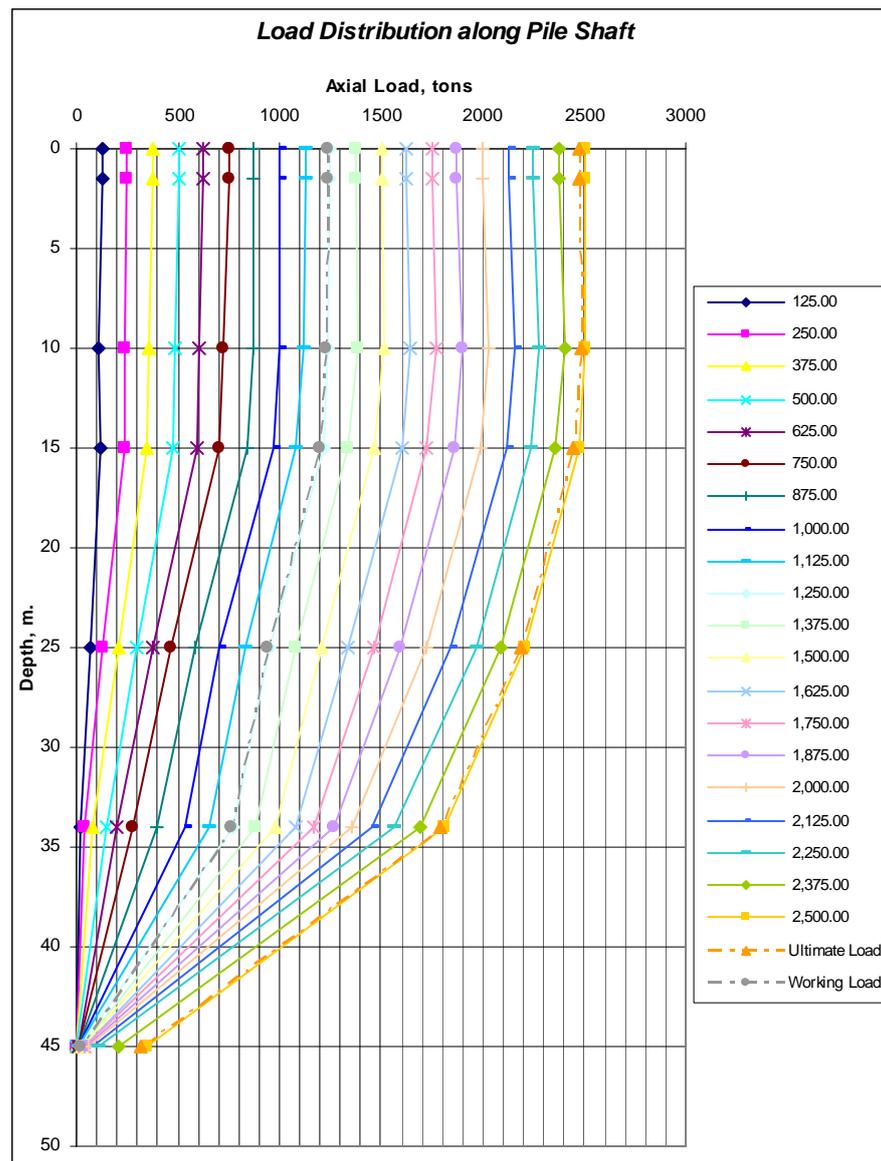
ตารางที่ 8 ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มทดสอบ

No.	Type of test	Limit load type	Failure Load Interpretation Curve tons.
P1	Static Test	Max. test	2,496
P2	Static Test	Ultimate load	1,715
P3	Static Test	Ultimate load	978
P4	Static Test	Max. test	3,078
P5	Static Test	Ultimate load	2,473
P6	Static Test	Ultimate load	1,347
P10	Static Test	Max. test	1,370
P11	Static Test	Ultimate load	2,336
P12	Static Test	Max. test	2,993

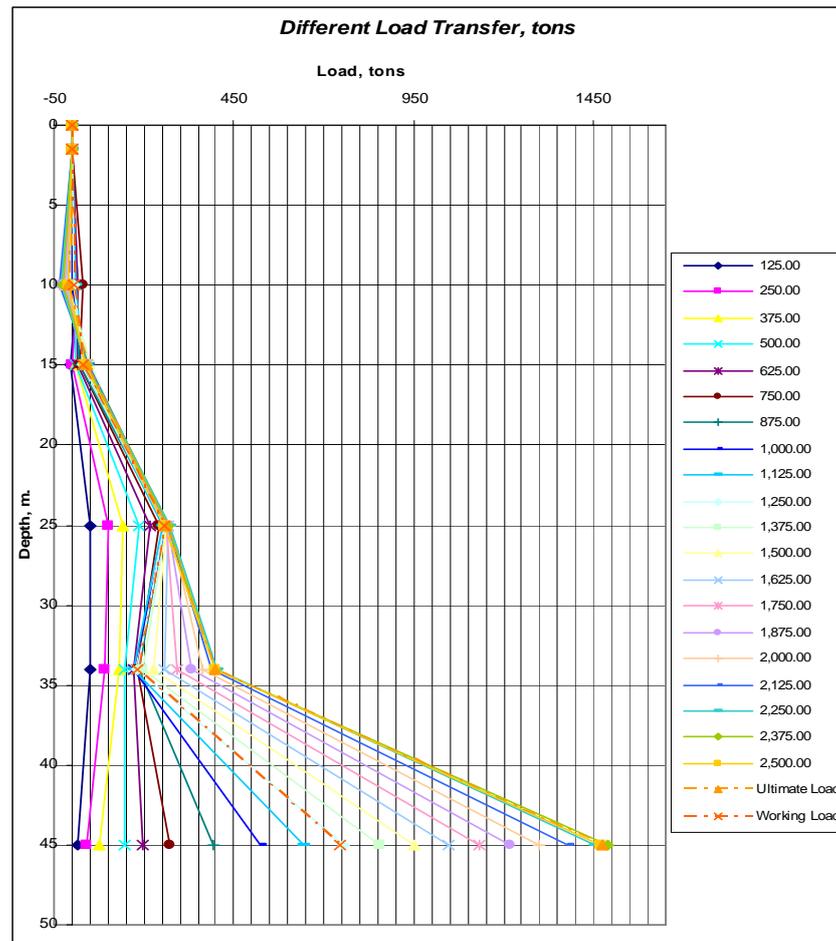


ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มต้นที่ P5

การถ่ายแรงของเสาเข็มในขณะที่ทำการให้น้ำหนักบรรทุกที่หัวเสาเข็มทดสอบนั้น พฤติกรรมในการถ่ายแรงจะส่งถ่ายจากที่ผิวไปยังชั้นดินโดยรอบของเสาเข็ม และค่อยถ่ายแรงไปยังปลายของเสาเข็มเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น ด้วยการตรวจวัด ณ ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain Gauge ดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 29 และผลต่างของน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่แต่ละประเภทของชั้นดินที่มี คุณสมบัติแตกต่างกัน ดังตัวอย่างภาพที่ 30



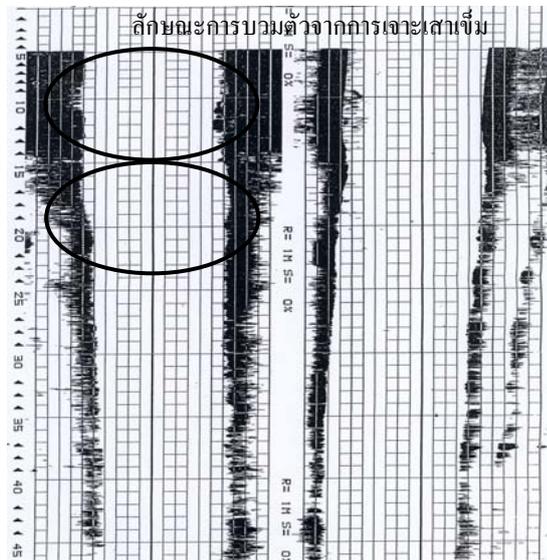
ภาพที่ 29 ลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ ในชั้นดินเสาเข็มต้นที่ P5



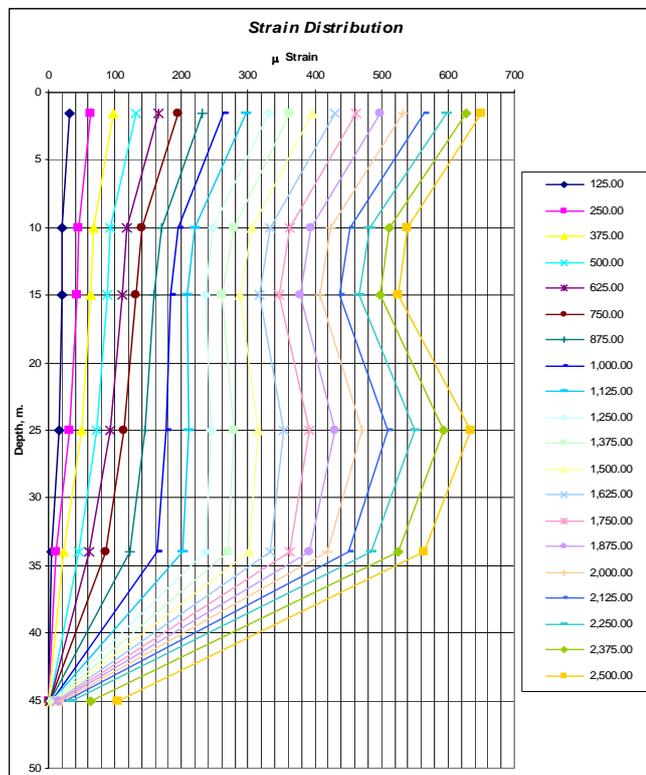
ภาพที่ 30 ผลต่างของน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่แต่ละประเภทของชั้นดินเสาเข็มต้นที่ P5

จากการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงของเสาเข็ม และผลต่างของน้ำหนักที่ถ่ายลงสู่แต่ละประเภทของชั้นดินนั้น พบว่าค่าน้ำหนักที่แปลผลจากตำแหน่งที่มีการติดตั้ง Strain Gauge ในระดับความลึกประมาณ 5-18 เมตรหรือช่วงที่เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าที่เป็นลบ ซึ่งได้ตั้งสมมุติฐานว่าเป็นผลมาจากขนาดพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มในช่วงนั้นมีลักษณะของการบวมตัวจากการเจาะเสาเข็มด้วยสว่านใกล้กับปลายของเหล็กปลอก (Casing) ทำให้ดินบริเวณนั้นโดนตัดอย่างรวดเร็วและติดไปกับใบของสว่านด้วยรวมทั้งในขณะที่ทำการดึงเหล็กปลอกออกจนกรีดเหลวได้ไหลเข้าไปแทนที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มในช่วงนั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดของเสาเข็มโดยรวมซึ่งจะพบได้มากของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยที่พื้นที่ปลายของเหล็กปลอกเป็นดินเหนียวอ่อนและดินถูกรบกวนมาก (Disturb) ทำให้การส่งถ่ายค่าความเครียด (Strain) ณ บริเวณนั้นเกิดการผิดปรกติ ดังนั้นผลการตรวจวัดในบริเวณนั้นจึงมักพบว่ามีลักษณะที่ผิดปรกติไปซึ่งจะทราบผลได้จากการทดสอบความสมบูรณ์ของตัวเสาเข็ม (Sonic Logging Test) และลักษณะ

การเอียงตัวของเสาเข็มดังภาพที่ 31 และ ภาพที่ 32 แสดงค่าความเครียดตามระดับความลึกของเสาเข็ม

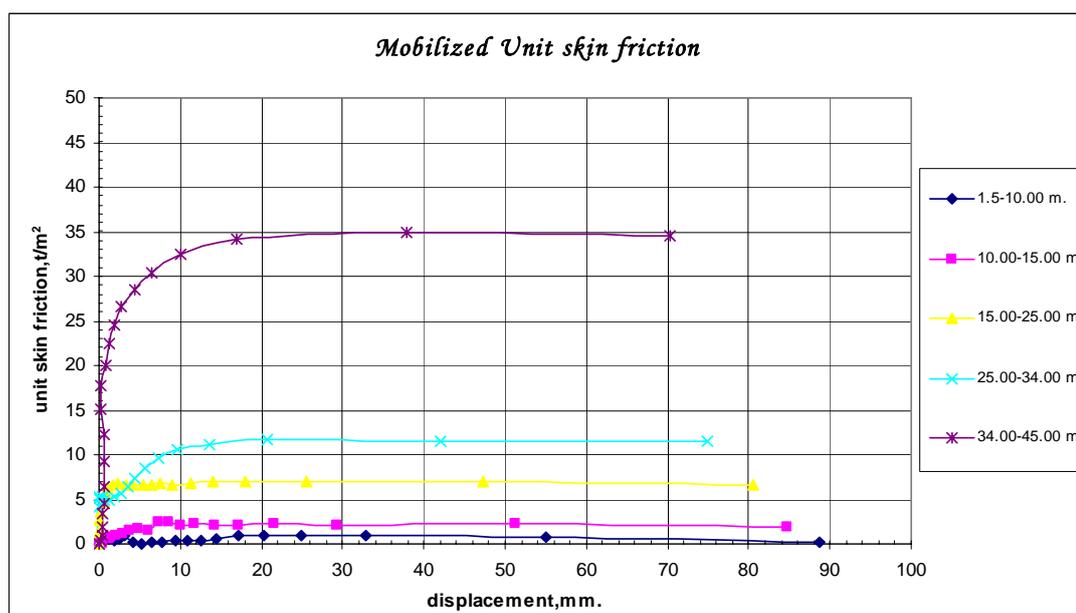


ภาพที่ 31 ผลการทดสอบความสมบูรณ์และผลลักษณะการเอียงตัวของเสาเข็มต้นที่ P5



ภาพที่ 32 ค่าความเครียดที่ระดับความลึกต่างๆ ของเสาเข็มต้นที่ P5

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มจำนวน 12 ชุดข้อมูล ที่มีการก่อสร้างในพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานคร โดยการวิเคราะห์พบว่าเสาเข็มแต่ละต้นในขณะทำการทดสอบ มีความสามารถในการรับหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวกับค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับ ชนิด ประเภท และกำลังรับแรงเฉือนของชั้นดิน ตลอดจน ขนาด พื้นที่ผิวโดยรอบของเสาเข็ม และความยาวของเสาเข็ม ซึ่งแสดงรายละเอียดดังตัวอย่างภาพที่ 33



ภาพที่ 33 การพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มต้นที่ P5

2. พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มในชั้นดินต่างๆ

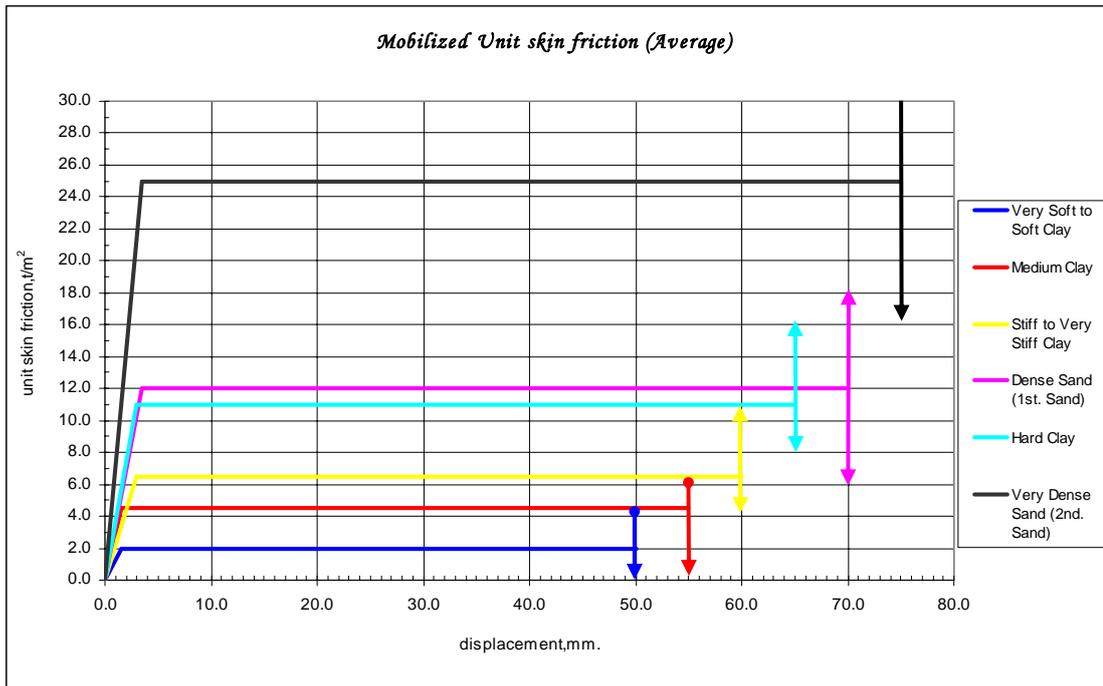
การศึกษาถึงพฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่เกิดขึ้นในชั้นดินแต่ละประเภทนั้น สามารถจำแนกจากผลการวิเคราะห์ตามลักษณะชั้นดินที่แบ่งเป็นประเภทดังกล่าว ซึ่งสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมในการรับหน่วยแรงกับค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม พบว่าขณะที่เสาเข็มค่อยๆ ได้รับน้ำหนักบรรทุกกระทำในช่วงของการทดสอบเสาเข็มจากจำนวนรอบที่ทำการทดสอบนั้น เสาเข็มจะส่งถ่ายแรงไปยังมวลดินที่อยู่โดยรอบ ทำให้มวลดินที่ได้รับแรงน้อยๆ จนไปถึงการรับแรงที่สูงสุดจะเกิดการพัฒนาเต็มที่ (Full Mobilized) ทำให้หน่วยแรงนั้นมีค่าสูงสุดและจะค่อยลดลงไปจนหน่วยแรงมีค่าค่อนข้างคงที่ (Residual Shaft Friction) ดังนั้น พฤติกรรมการพัฒนา

แรงเสียดทานผิวของเสาเข็มในแต่ละชั้นดินจะสรุปในภาพรวมที่เกิดขึ้นได้ ดังตารางที่ 9 และภาพที่ 36-41

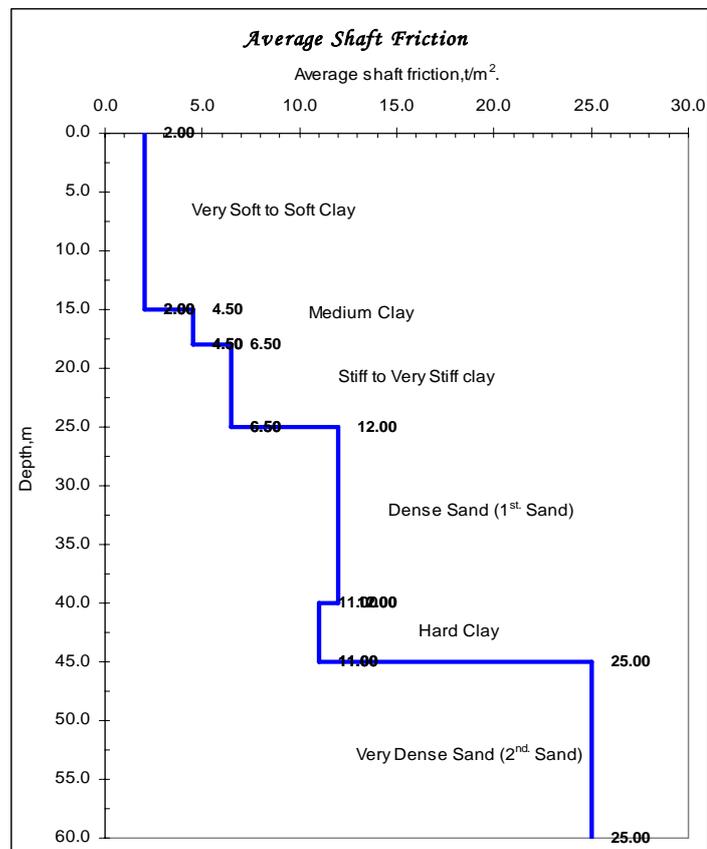
ตารางที่ 9 การพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มในแต่ละชั้นดิน

Soil Layer	Mobilized Unit Skin Friction			
	Shaft Friction (Lower – Upper) t/m ²	Average Shaft Friction t/m ²	Critical Displacement mm.	% Diameter %
Very Soft to Soft Clay	< 4	2.0	2 - 12	0.10 - 0.80
Medium Clay	< 6	4.5	2 - 10	0.10 - 0.60
Stiff to Very Stiff Clay	4 - 11	6.5	2 - 10	0.10 - 0.60
Dense Sand (1 st Sand)	6 - 18	12.0	2 - 12	0.10 - 0.80
Hard Clay	8 - 16	11.0	2 - 10	0.10 - 0.60
Very Dense Sand (2 nd Sand)	16 - 40	25.0	2 - 10	0.10 - 0.60

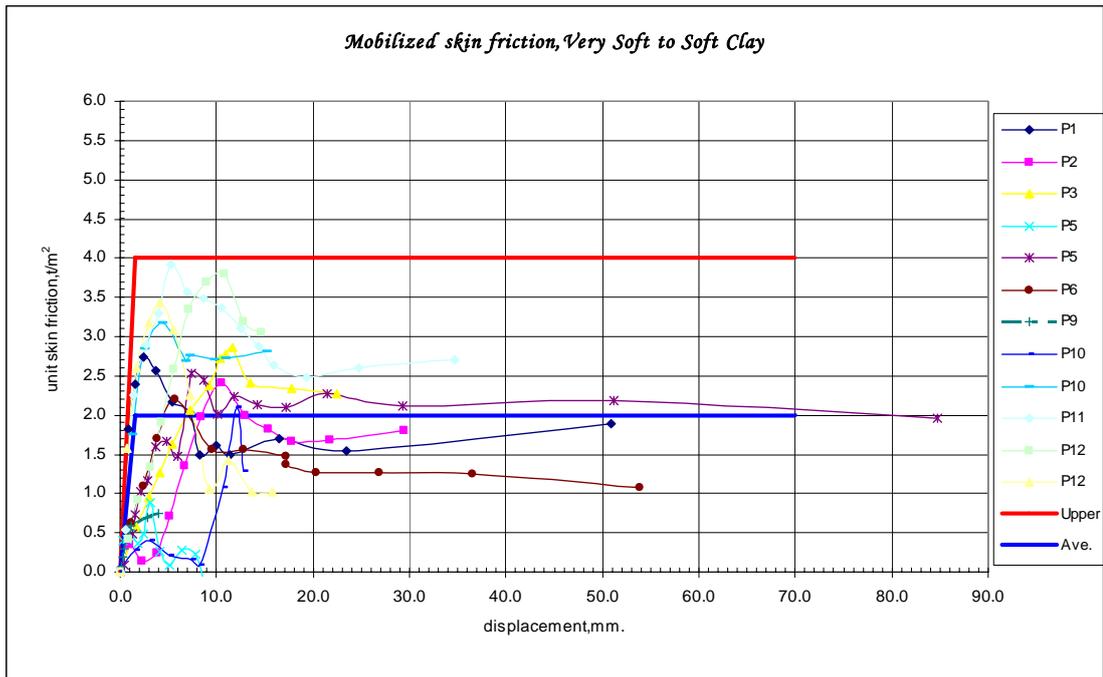
ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานที่ผิวของชั้นดิน ซึ่งได้สรุปตามชั้นดินออกเป็น 6 ส่วนคือ (1) ชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 15 ม. มีค่าหน่วยแรงเสียดทานเฉลี่ย 2 ตัน/ตร.ม. (2) ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางหนาประมาณ 3 ม. มีค่าหน่วยแรงเสียดทานเฉลี่ย 4.5 ตัน/ตร.ม. (3) ชั้นดินเหนียวแข็งหนาประมาณ 7 ม. มีค่าหน่วยแรงเสียดทานเฉลี่ย 6.5 ตัน/ตร.ม. (4) ชั้นทรายแน่นชั้นแรกหนาประมาณ 20 ม. มีค่าหน่วยแรงเสียดทานเฉลี่ย 12 ตัน/ตร.ม. (5) ชั้นดินเหนียวแข็งมากซึ่งเรียงตัวสลับกับชั้นทรายแน่นหนาประมาณ 5 ม. มีค่าหน่วยแรงเสียดทานเฉลี่ย 11 ตัน/ตร.ม. (6) ชั้นทรายแน่นมากชั้นที่สองมีความลึกมากกว่า 45 ม. มีค่าหน่วยแรงเสียดทานเฉลี่ย 25 ตัน/ตร.ม. จากผลการศึกษาถึงค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานที่ผิวของชั้นดินตามระดับความลึก โดยแสดงจากผลเฉลี่ยของพฤติกรรมลักษณะเป็น Residual Shaft Friction ที่เป็นลักษณะของเส้นตรง ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าในชั้นดินที่เป็นดินเหนียวทั้ง 3 ประเภทนั้นการพัฒนาของค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะของ Strain Softening ภายหลังจากการพัฒนาของหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นแล้ว โดยค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของชั้นดิน โดยเฉลี่ยเป็นผลการศึกษาสำหรับเสาเข็มเจาะที่มีการก่อสร้างในลักษณะของชั้นดินกรุงเทพมหานคร ดังแสดงดังภาพที่ 34 และภาพที่ 35



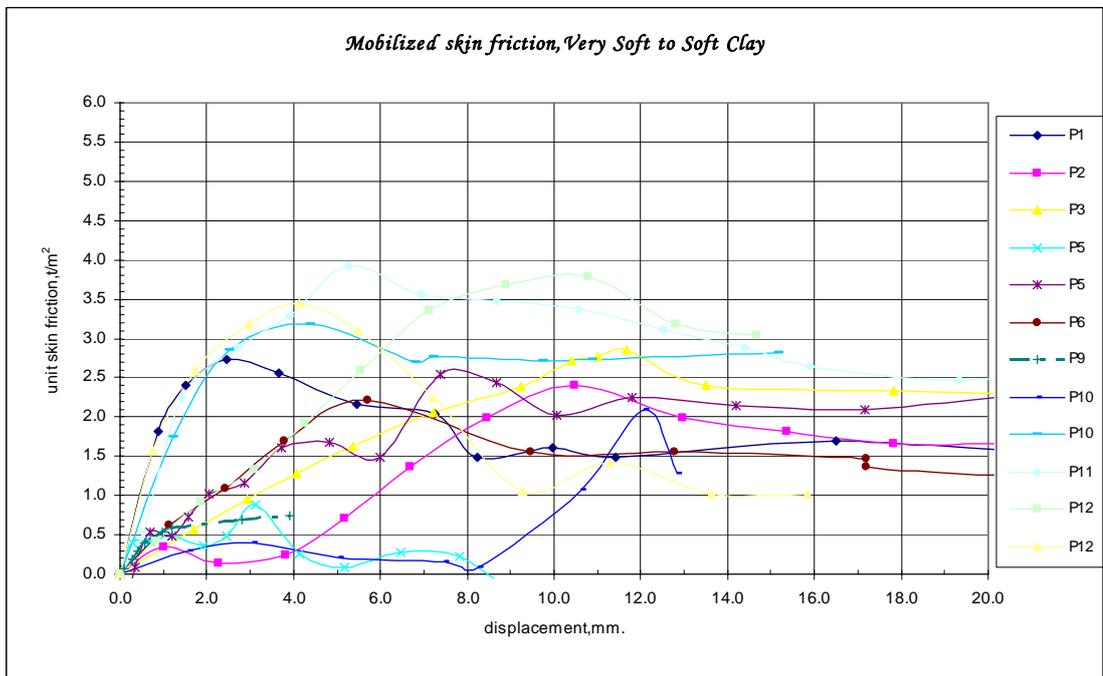
ภาพที่ 34 ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานที่ผิวของแต่ละชั้นดิน



ภาพที่ 35 ค่าเฉลี่ยแรงเสียดทานที่ผิวของชั้นดินตามความลึก

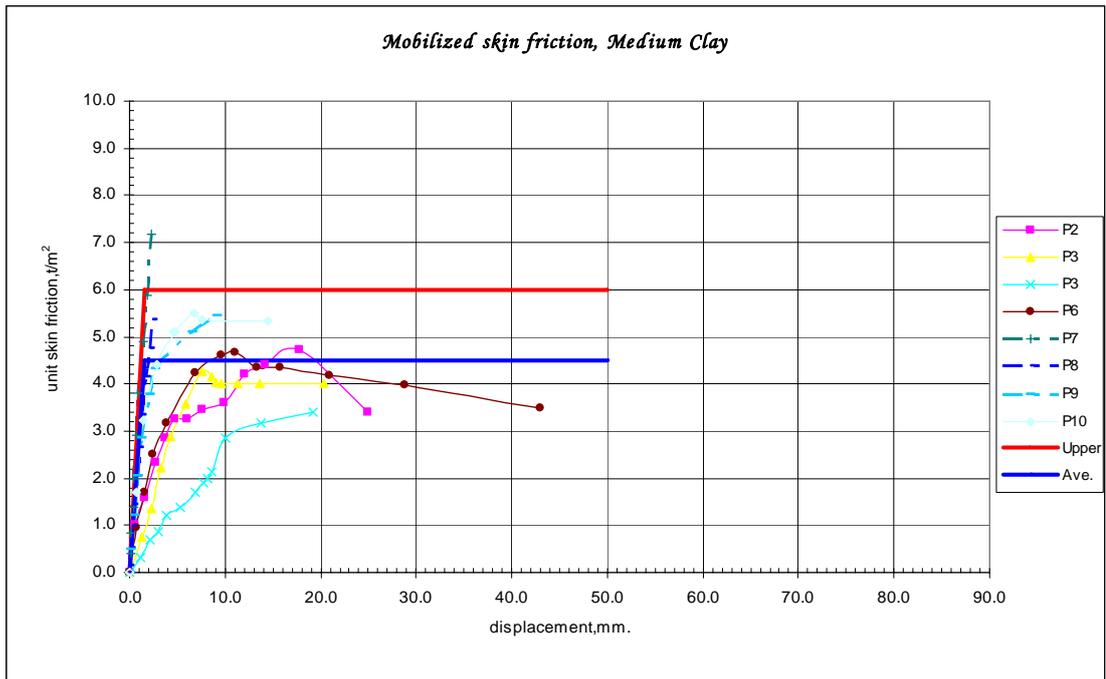


ก) ในชั้นดิน Very Soft to Soft Clay

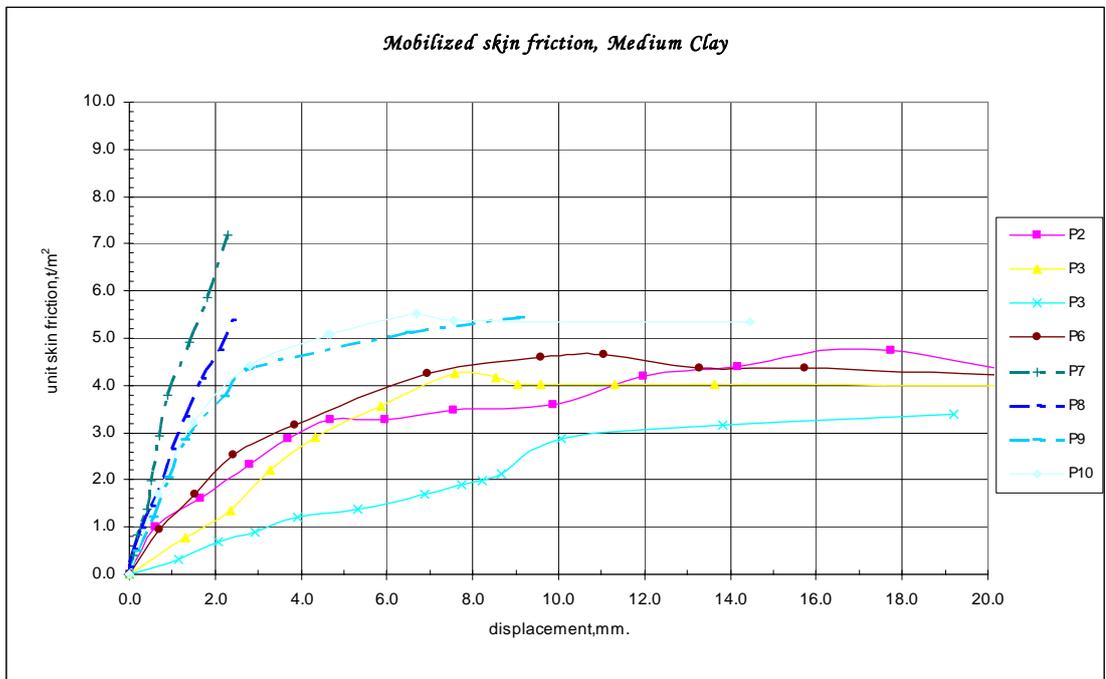


ข) ภาพขยายในชั้นดิน Very Soft to Soft Clay

ภาพที่ 36 พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวเสาเข็มในชั้นดิน Very Soft to Soft Clay

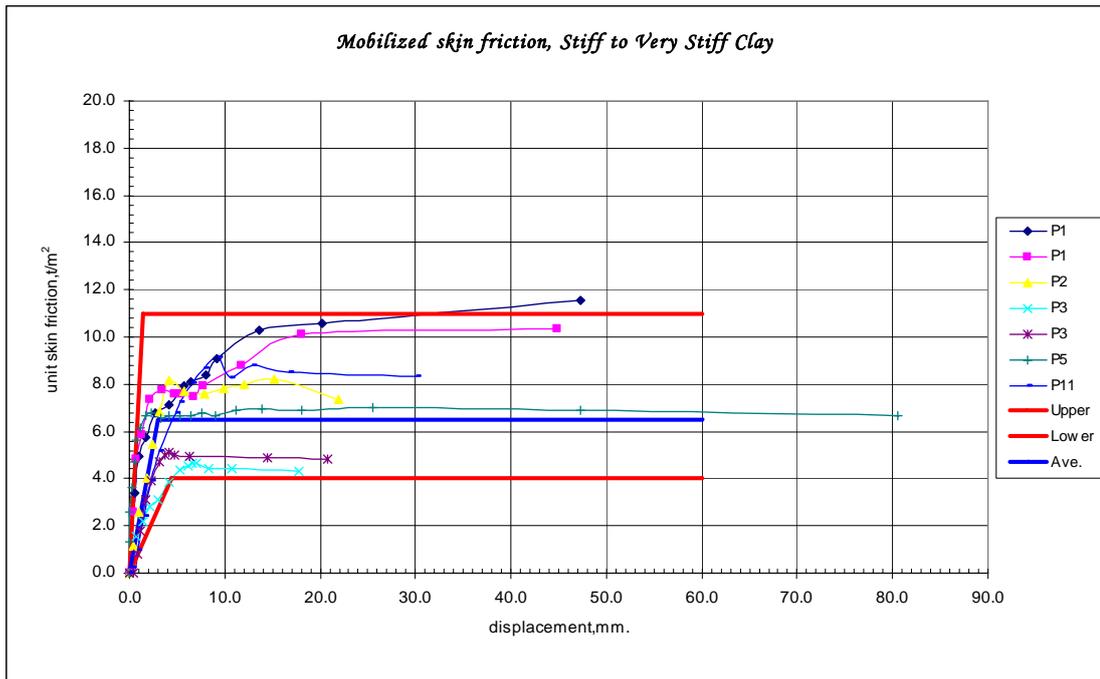


ก) ในชั้นดิน Medium Clay

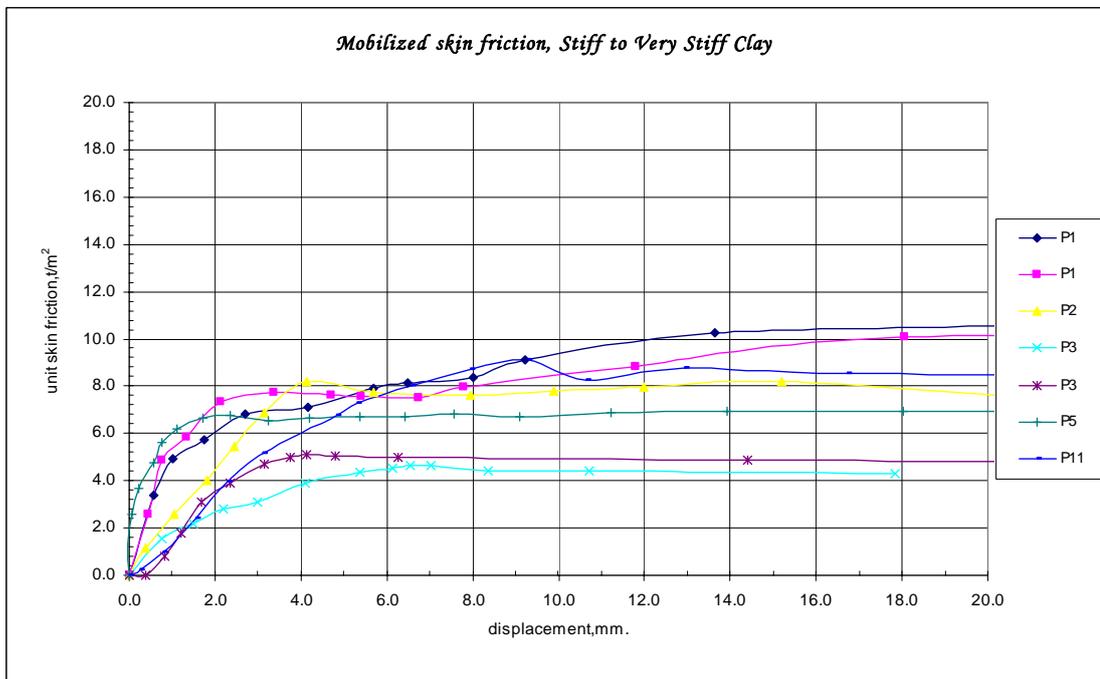


ข) ภาพขยายในชั้นดิน Medium Clay

ภาพที่ 37 พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวเสาเข็มในชั้นดิน Medium Clay

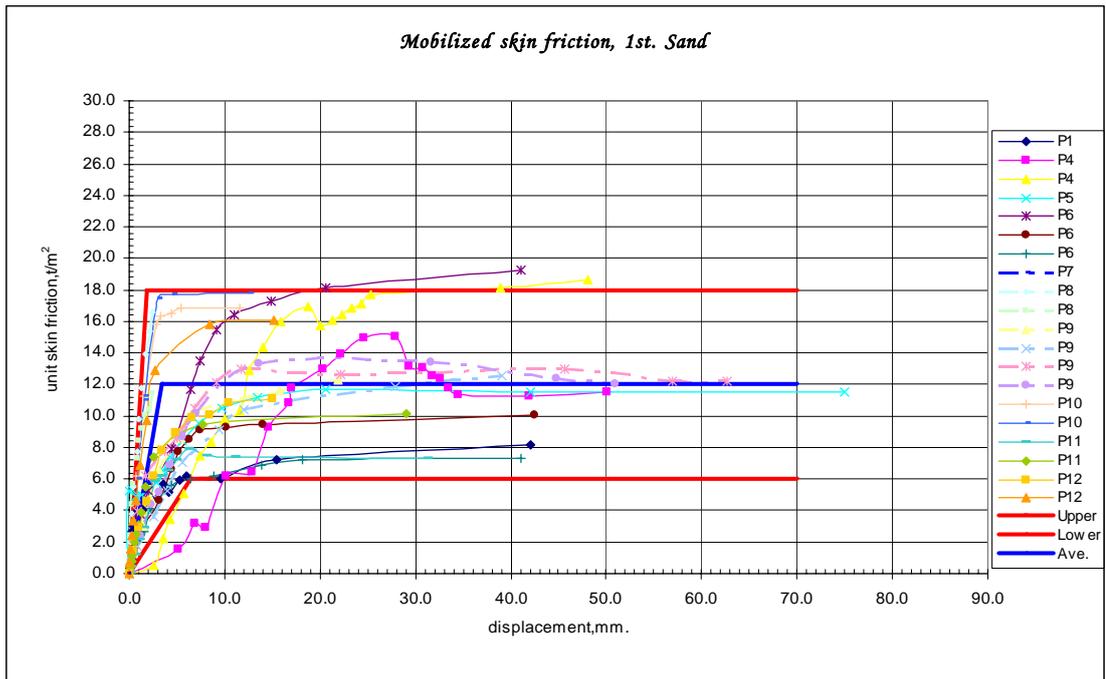


ก) ในชั้นดิน Stiff to Very Stiff Clay

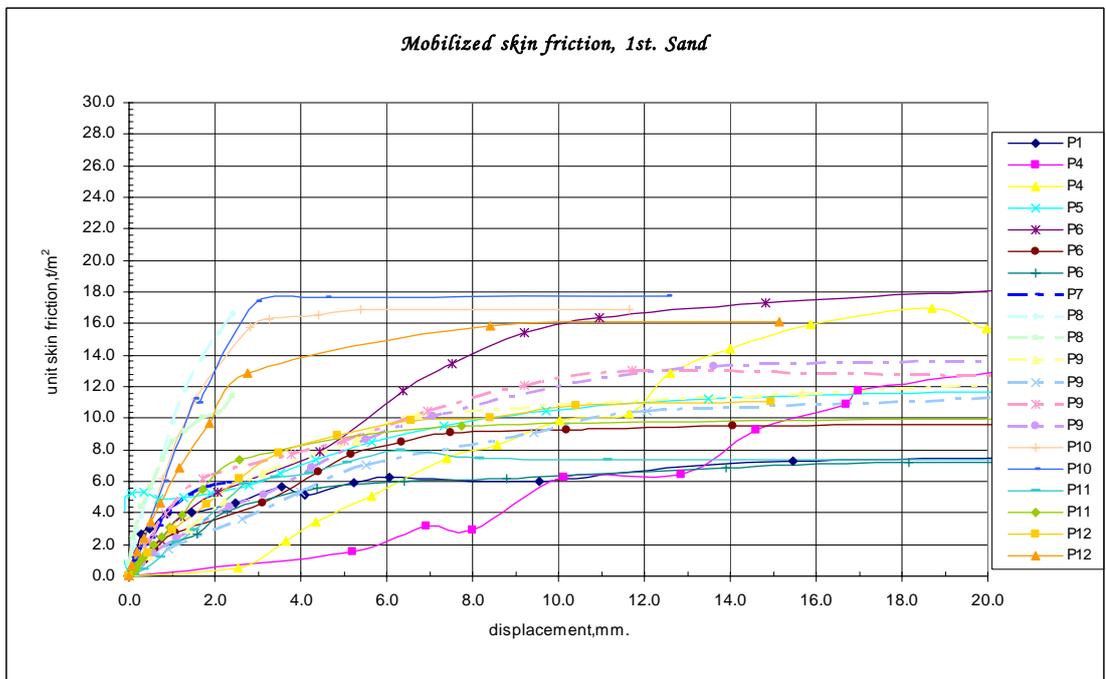


ข) ภาพขยายในชั้นดิน Stiff to Very Stiff Clay

ภาพที่ 38 พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวเสาเข็มในชั้นดิน Stiff to Very Stiff Clay

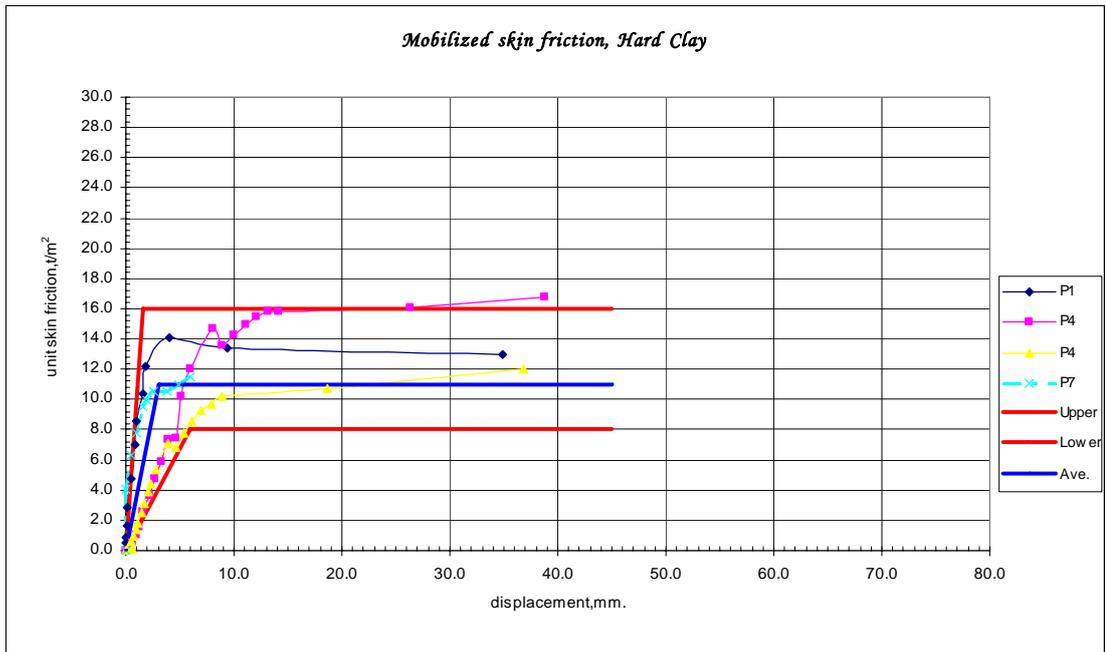


ก) ในชั้นดิน Dense Sand (1st Sand)

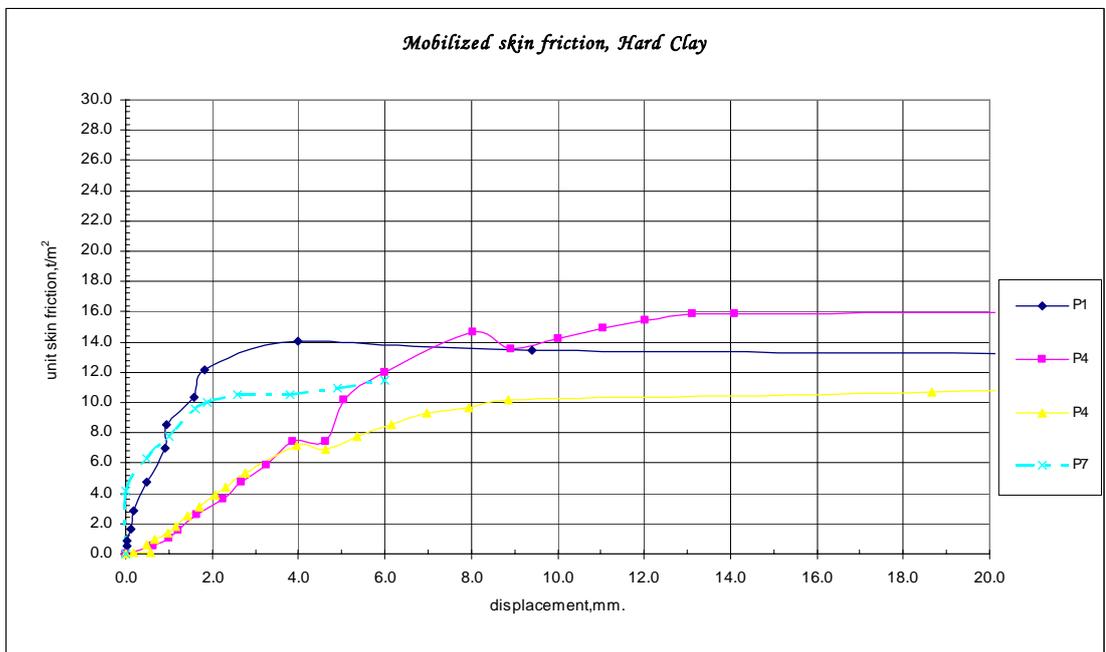


ข) ภาพขยายในชั้นดิน Dense Sand (1st Sand)

ภาพที่ 39 พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวเสาเข็มในชั้นดิน Dense Sand (1st Sand)

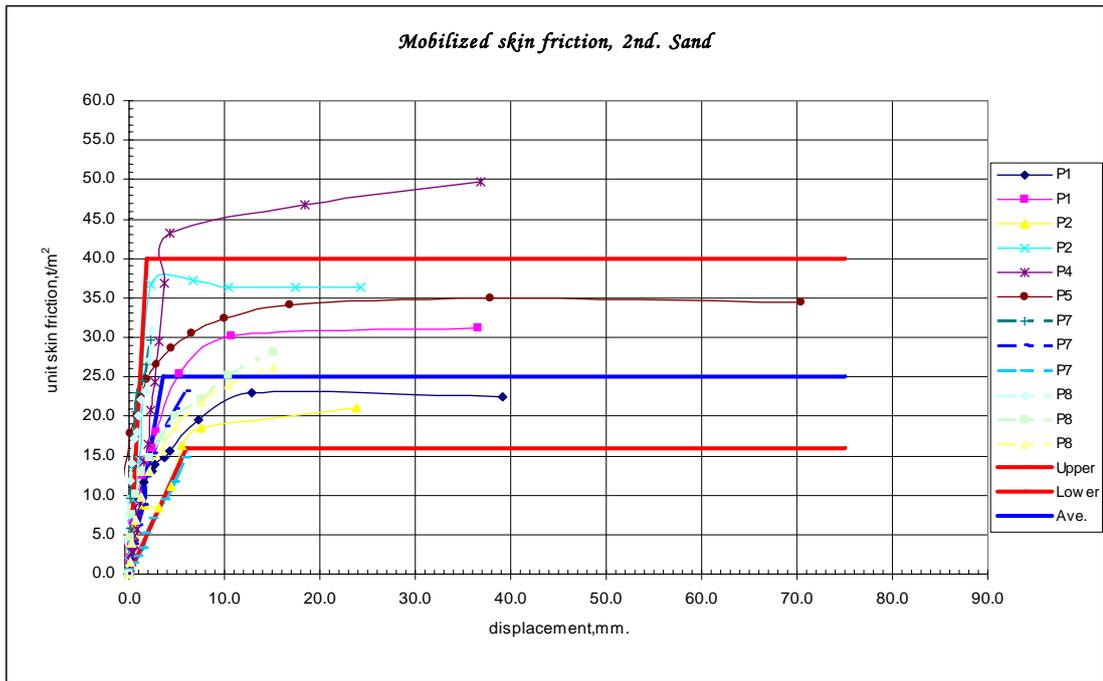


ก) ในชั้นดิน Hard Clay

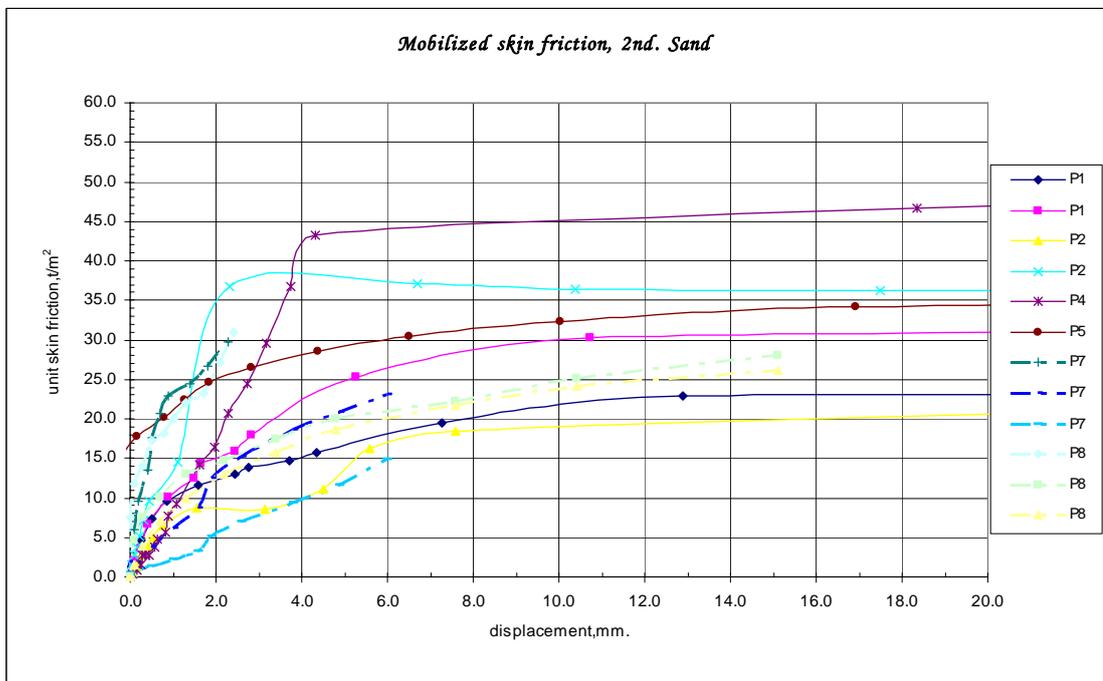


ข) ภาพขยายในชั้นดิน Hard Clay

ภาพที่ 40 พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวเสาเข็มในชั้นดิน Hard Clay



ก) ในชั้นดิน Very Dense Sand (2nd Sand)



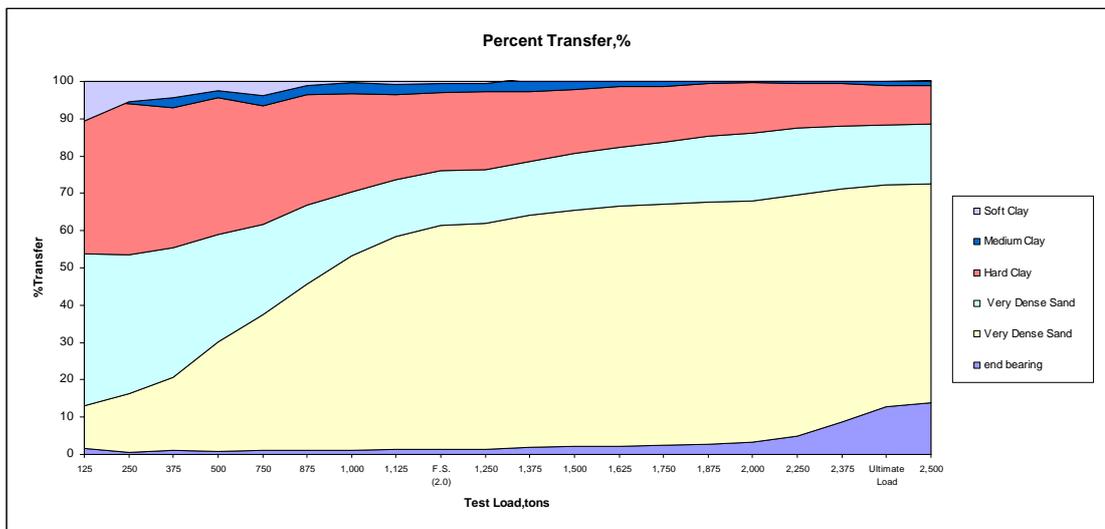
ข) ภาพขยายในชั้นดิน Very Dense Sand (2nd Sand)

ภาพที่ 41 พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวเสาเข็มในชั้นดิน Very Dense Sand (2nd Sand)

เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินตามความลึกต่างๆ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินตามประเภท และลักษณะที่แตกต่างกันนั้นที่มีการวิเคราะห์จากฐานข้อมูลทั้งหมด 12 ชุดข้อมูล นั้นได้หาค่าจากการทดสอบเสาเข็มในแต่ละรอบของการทดสอบ ในขณะที่มีการให้น้ำหนักบรรทุกน้อยๆ และค่อยเพิ่มน้ำหนักขึ้นจนถึงสถานะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate Pile Capacity) หรือน้ำหนักทดสอบสูงสุด (Maximum Load Test) ในกรณีที่มีการทดสอบเสาเข็ม ไม่เกิดการพิบัติ

เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินต่างๆ ของเสาเข็มแต่ละต้นนั้นจะมีความแตกต่างกันไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ สภาพของชั้นดิน, ความหนาของชั้นดิน, ความสามารถในการรับแรงเฉือนของชั้นดิน, ขนาด, พื้นที่ผิวโดยรอบ และความยาวของเสาเข็ม ตลอดจนวิธีและขั้นตอนในการทดสอบ สังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มไปยังปลายเสาเข็มนั้นมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงไปยังผิวเสาเข็ม เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนใกล้น้ำหนักทดสอบสูงสุดเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงไปยังปลายเสาเข็มจะมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนอันเนื่องมาจากเกิดการคลายตัวของดินบริเวณรอบผิวเสาเข็มขณะทำการทดสอบใกล้จุดพิบัติ ทำให้แรงส่วนหนึ่งส่งถ่ายไปยังปลายของเสาเข็มมากขึ้น แต่ก็ยังไม่มากพอเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่ถ่ายไปยังผิวเสาเข็มดังตัวอย่างภาพที่ 42 ดังนั้นพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงของเสาเข็มในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยรวมเป็นการถ่ายแรงไปยังผิวของเสาเข็ม หรือเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกด้วยผิวเสาเข็มเป็นส่วนใหญ่ (Friction Pile)



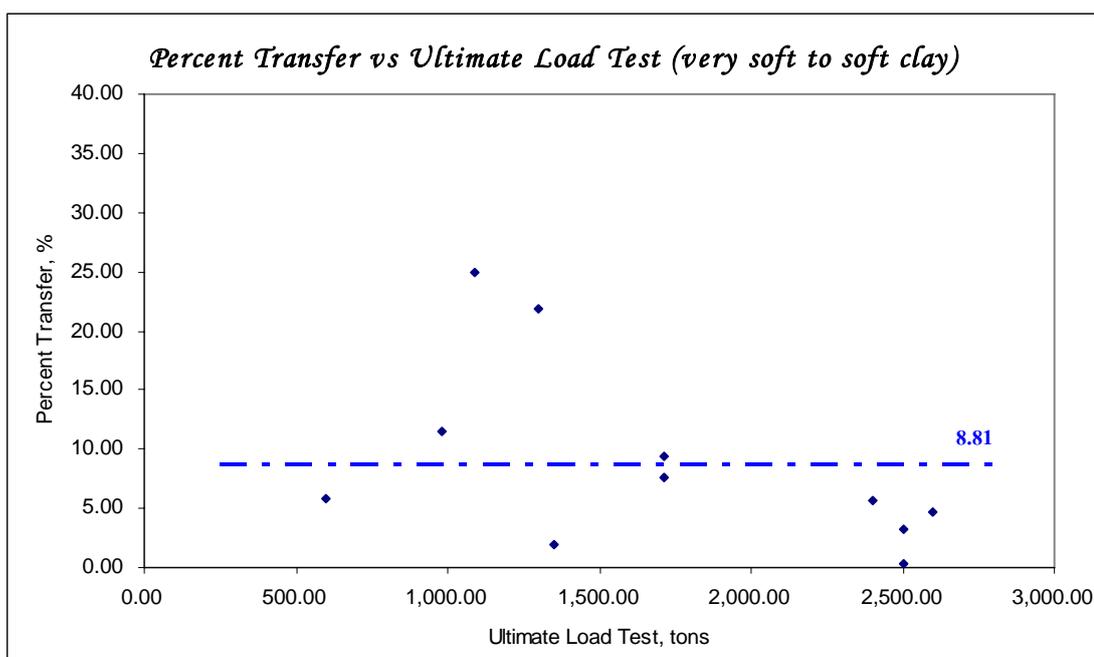
ภาพที่ 42 เปอร์เซนต์การถ่ายแรงของเสาเข็มต้นที่ P5

1. เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มสถานะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

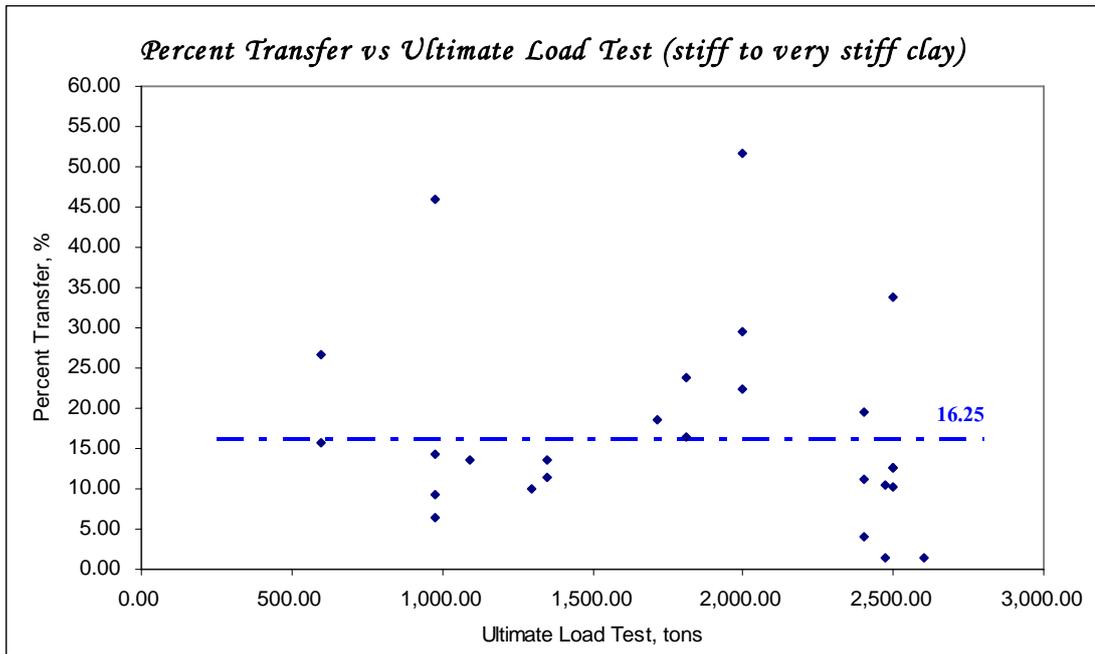
ในการทดสอบเสาเข็มได้กำหนดน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทดสอบสูงสุด เพื่อให้ทราบถึงค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม ซึ่งจะทำให้เสาเข็มเกิดการพิบัติ ในการศึกษาพบว่าเสาเข็มไม่ได้เกิดการพิบัติทุกต้น ทำให้วิเคราะห์ถึงพฤติกรรมที่เสาเข็มได้รับการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสูงสุด เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มที่ศึกษาพบว่า การถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินที่แตกต่างกันมีลักษณะกระจายระยอยอยู่มาก จึงได้แบ่งประเภทของชั้นดินเป็น 3 ประเภท คือ ชั้นดิน 1. Very Soft to Soft Clay, 2. Stiff to Very Stiff Clay, 3. Dense to Very Dense Sand โดยได้ศึกษาวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มของดินทั้ง 3 ประเภท สรุปได้ดังตารางที่ 10 และภาพที่ 43-45

ตารางที่ 10 เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มของดินทั้ง 3 ประเภทจากน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

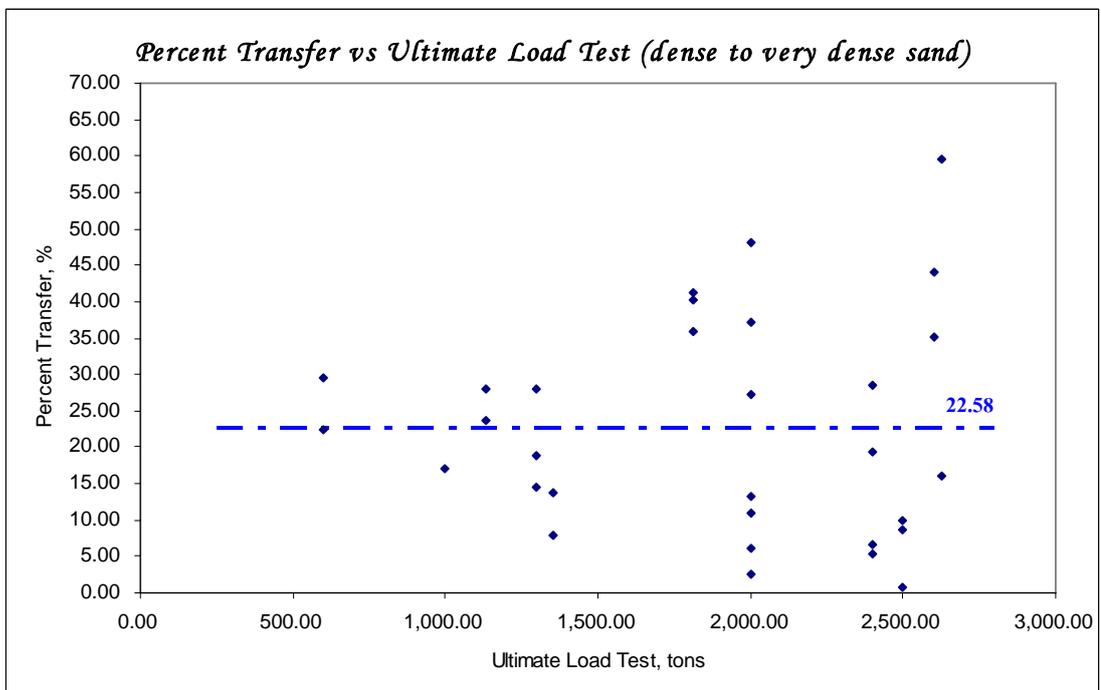
Soil Type	Thickness m.	% Transfer (Maximum)	% Transfer (Average)
Very Soft to Soft Clay	2.0-20.50	24.89	8.81
Stiff to Very Stiff Clay	2.0-29.0	51.78	16.25
Dense to Very Dense Sand	2.0-22.0	59.56	22.58



ภาพที่ 43 เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มในชั้นดิน Very Soft to Soft Clay



ภาพที่ 44 เปอร์เซนต์การถ่ายแรงของเสาเข็มในชั้นดิน Stiff to Very Stiff Clay



ภาพที่ 45 เปอร์เซนต์การถ่ายแรงของเสาเข็มในชั้นดิน Dense to Very Dense Sand

เมื่อได้วิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์ในการถ่ายแรงของเสาเข็มซึ่งมีการกระจายตัวอยู่มากทำให้ไม่พบรูปแบบความสัมพันธ์ สำหรับการวิเคราะห์ผลระหว่างเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.00 เปอร์เซ็นต์ กับเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงด้านที่ปลายเสาเข็มค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.00 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate Pile Capacity) หรือน้ำหนักทดสอบสูงสุด (Maximum Load Test) ในกรณีที่มีการทดสอบเสาเข็มไม่เกิดการพิบัติ สรุปได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เปอร์เซ็นต์ในการถ่ายแรงของเสาเข็มแรงเสียดทานที่ผิวกับแรงด้านที่ปลายเสาเข็ม สภาวะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

No.	Diameter m.	Length m.	Max. Load tons	Soil at Pile Tip	% Transfer Skin Friction	% Transfer End Bearing
P1	1.20	53.32	2,400	Hard Clay	88.77	11.23
P2	1.20	57.10	2,000	Very Dense Sand	84.72	15.28
P3	1.20	43.50	1,000	Very Stiff Clay	53.95	46.05
P4	1.20	62.03	2,500	Very Dense Sand	92.38	7.62
P5	1.20	46.00	2,625	Very Dense Sand	87.27	12.73
P6	1.00	43.87	1,300	Medium Dense Sand	93.28	6.72
P10	1.00	41.10	1,350	Very Dense Sand	80.38	19.62
P11	0.80	47.64	1,135	Very Dense Sand	90.03	9.97
P12	1.50	49.54	2,600	Very Dense Sand	85.24	14.76
Average					84.00	16.00

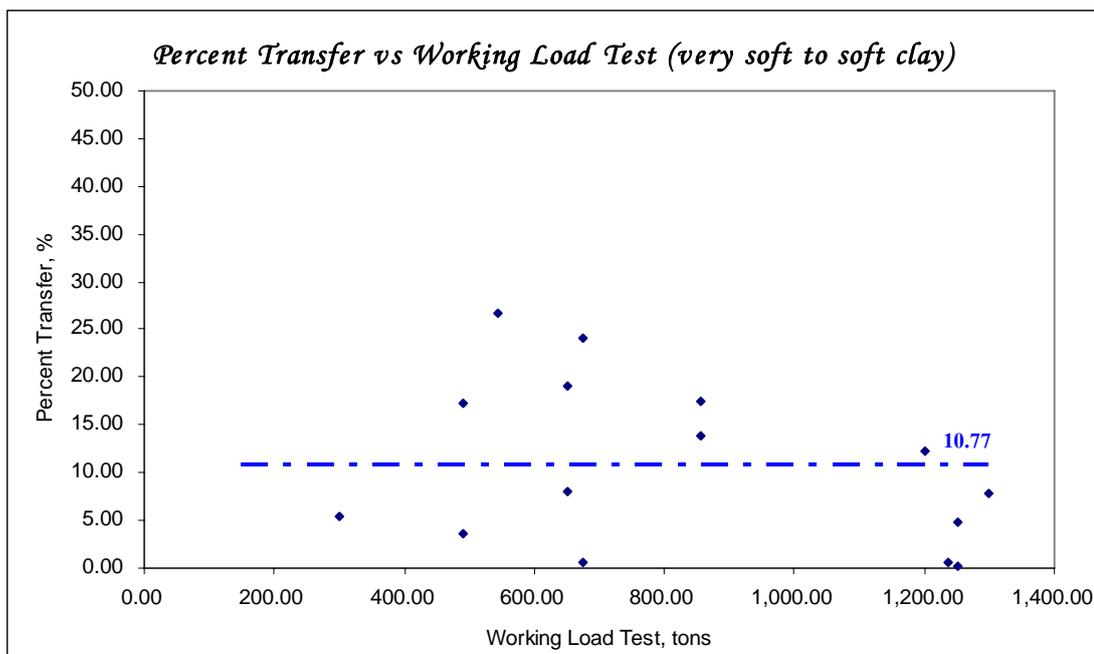
2. เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มสถานะที่เสาเข็มใช้งาน

จากการศึกษาผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มสูงสุดทำให้ทราบถึงพฤติกรรมเสาเข็ม แต่เสาเข็มที่ได้ออกแบบไว้ในขณะใช้งาน กำลังที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นจริงจะไม่เกินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกไม่เกินกึ่งหนึ่งของน้ำหนักทดสอบสูงสุด

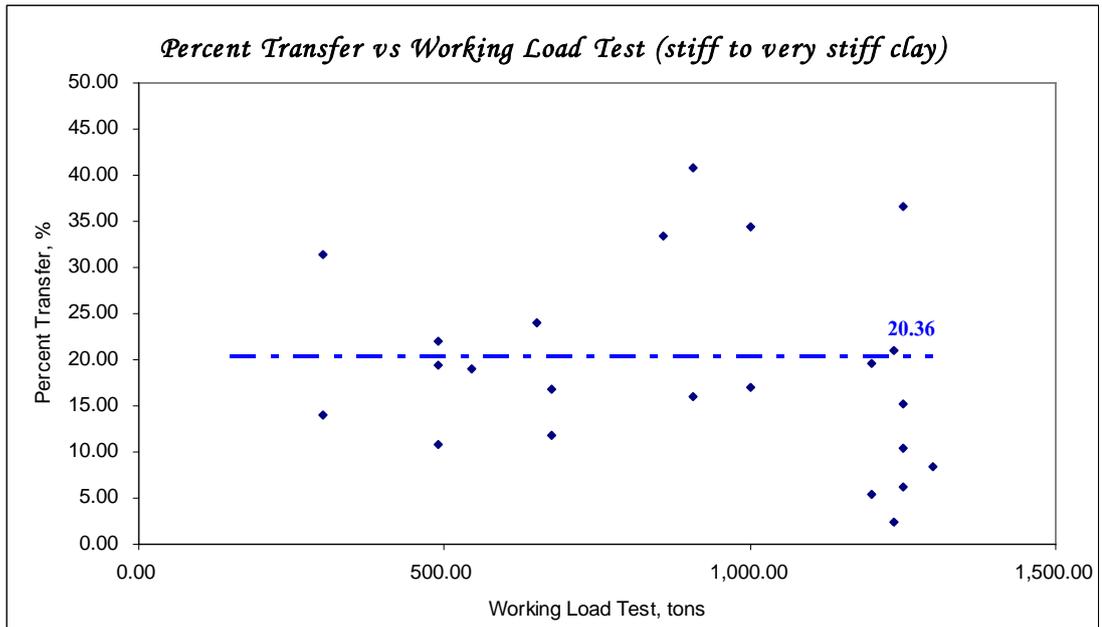
การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มของดินทั้ง 3 ประเภทสรุปได้ดังตารางที่ 12 และภาพที่ 46-48

ตารางที่ 12 เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มของดินทั้ง 3 ประเภทจากสถานะใช้งาน

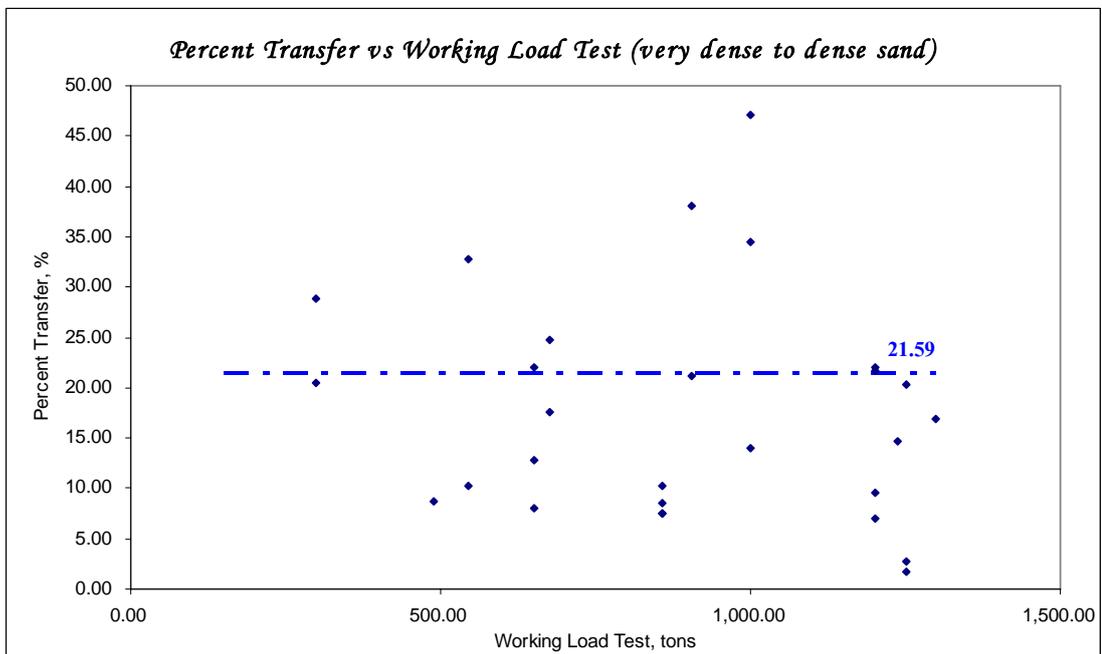
Soil Type	Thickness m.	% Transfer (Maximum)	% Transfer (Average)
Very Soft to Soft Clay	2.0-20.50	26.72	10.77
Stiff to Very Stiff Clay	2.0-29.0	52.92	20.36
Dense to Very Dense Sand	2.0-22.0	62.55	21.59



ภาพที่ 46 เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มในชั้นดิน Very Soft to Soft Clay



ภาพที่ 47 เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มในชั้นดิน Stiff to Very Stiff Clay



ภาพที่ 48 เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มในชั้นดิน Dense to Very Dense Sand

ได้วิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์ในการถ่ายแรงของเสาเข็มซึ่งมีการกระจายตัวอยู่มากทำให้ไม่พบรูปแบบความสัมพันธ์ สำหรับการวิเคราะห์ผลระหว่างเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 94.28 เปอร์เซ็นต์ กับเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงด้านที่ปลายเสาเข็มค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.72 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เสาเข็มรับน้ำหนักในขณะที่ใช้งาน แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มที่ก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานครเมื่อได้รับน้ำหนักบรรทุกกระทำแรงส่วนใหญ่จะถ่ายไปยังผิวของเสาเข็มจากนั้นจะค่อยถ่ายไปยังปลายเสาเข็มน้อยกว่า และเมื่อเพิ่มน้ำหนักทดสอบแรงที่ถ่ายลงไปยังปลายเสาเข็มเพิ่มมากขึ้นในขณะที่แรงที่ถ่ายไปยังผิวเสาเข็มจะมีค่าลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับสภาพการทดสอบ คือ การพิบัติของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เกิดจากแรงด้านที่ผิวเสาเข็ม ในขณะที่แรงด้านที่ปลายเสาเข็มเกิดการพัฒนายังไม่เต็มที่ จึงไม่ทราบถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ปลายเสาเข็มที่เกิดขึ้นจริง สรุปได้ดังตารางที่ 13

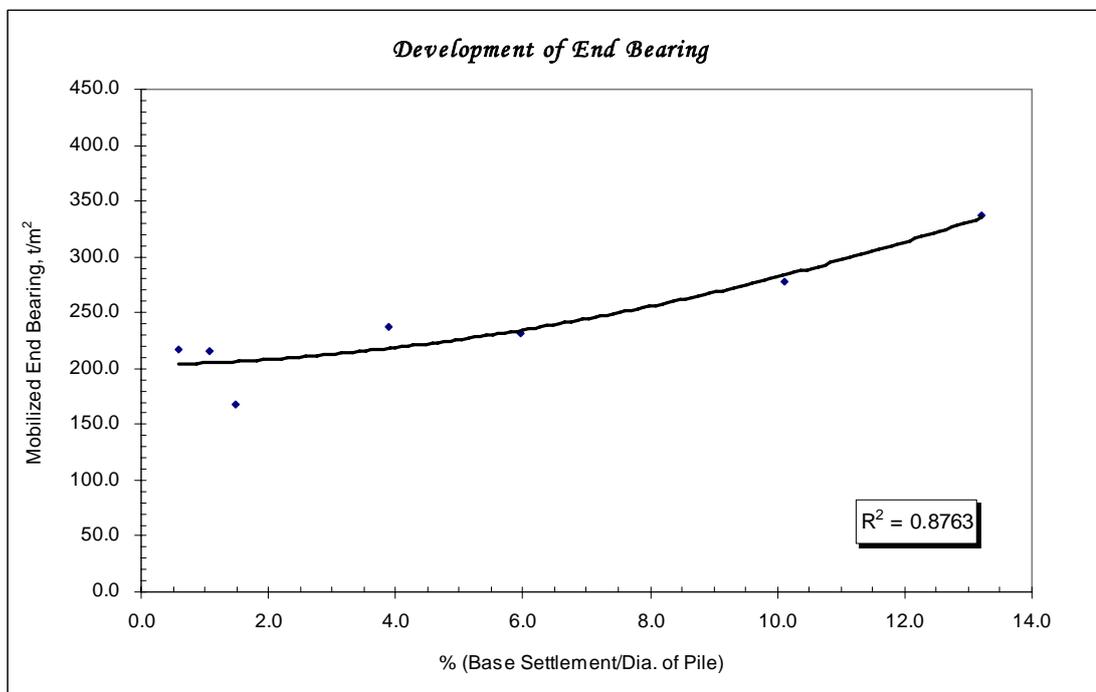
ตารางที่ 13 เปอร์เซ็นต์ในการถ่ายแรงของเสาเข็มแรงเสียดทานที่ผิวกับแรงด้านที่ปลายเสาเข็ม สภาวะที่เสาเข็มใช้งาน

No.	Diameter m.	Length m.	Max. Load tons	Soil at Pile Tip	% Transfer Skin Friction	% Transfer End Bearing
P1	1.20	53.32	2,400	Hard Clay	97.54	2.46
P2	1.20	57.10	2,000	Very Dense Sand	98.55	1.45
P3	1.20	43.50	1,000	Very Stiff Clay	81.96	18.04
P4	1.20	62.03	2,500	Very Dense Sand	98.33	1.47
P5	1.20	46.00	2,625	Very Dense Sand	98.60	1.40
P6	1.00	43.87	1,300	Medium Dense Sand	93.90	6.10
P10	1.00	41.10	1,350	Very Dense Sand	95.60	4.40
P11	0.80	47.64	1,135	Very Dense Sand	88.66	11.34
P12	1.50	49.54	2,600	Very Dense Sand	95.39	4.61
Average					94.28	5.72

3. เปอร์เซ็นต์การพัฒนาแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

การทดสอบเสาเข็มภายใต้น้ำหนักทดสอบสูงสุดซึ่งอยู่ประมาณ 2-3 เท่าของน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มที่ออกแบบ การวิเคราะห์ถึงการพัฒนาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มที่ได้ค่าจากการวัดจากตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain Gauge ที่ปลายเสาเข็ม ทำให้ทราบถึงน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายไปยังปลายเสาเข็มเมื่อทำการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุด

การพัฒนาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มไปจนถึงจุดพิบัติของปลายเสาเข็มนั้น จะมีความสัมพันธ์กันกับค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างการทรุดตัวที่เกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็มหลังจากการยึดหดตัวของเสาเข็มแล้ว กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม พบว่าเปอร์เซ็นต์การทรุดตัวมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 - 12 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 49 และ ดังตารางที่ 14 โดยค่าเปอร์เซ็นต์การทรุดตัวที่ปลายเสาเข็มสูงสุดประมาณ 20 - 30 เปอร์เซ็นต์ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (Tomlinson, 1995) แสดงว่าการทดสอบเสาเข็มจนถึงจุดพิบัตินั้น การทรุดตัวที่ปลายเสาเข็มเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มนั้น ยังไม่เพียงพอต่อการพัฒนาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มสูงสุดได้



ภาพที่ 49 เปอร์เซ็นต์การพัฒนาแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

ตารางที่ 14 เปอร์เซ็นต์ค่าการทรุดตัวที่ปลายเสาเข็มเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม

No.	Dia. m.	Total Settlement of Pile Head mm.	Elastic compression on of Pile mm.	Net Settlement mm.	Max. Load Transfer to the Base VWSG tons.	Mobilized End Bearing t/m ²	% Base Sett./Dia.
P1	1.20	75.03	28.44	46.59	268.00	236.96	3.9
P2	1.20	94.14	22.50	71.64	262.01	231.67	6.0
P3	1.20	90.93	14.20	76.73	450.36	398.21	6.4
P4	1.20	51.13	33.47	17.66	190.44	168.39	1.5
P5	1.20	144.99	23.59	121.40	314.96	278.49	10.1
P6	1.00	102.70	13.60	89.10	87.41	111.29	8.9
P7	2.00	-	-	31.70	1,343	427.49	1.6
P8	2.00	-	-	52.80	1,200	381.97	2.6
P9	1.00	-	-	60.00	290	369.24	6.0
P10	1.00	149.17	17.04	132.13	264.93	337.32	13.2
P11	0.80	24.35	15.76	8.59	108.64	261.13	1.1
P12	1.50	20.88	12.15	8.73	383.84	217.21	0.6

อัตราส่วนปลอดภัย

การศึกษาค่าอัตราส่วนปลอดภัยของเสาเข็ม โดยได้มีการแยกวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยกันระหว่างค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มกับค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็ม โดยได้คำนึงถึงสถานะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกประลัยหรือน้ำหนักทดสอบสูงสุดในกรณีที่มีการทดสอบเสาเข็มไม่เกิดการพิบัติ และสถานะที่เสาเข็มใช้งานซึ่งได้กำหนดไว้ไม่เกิน 2 เท่าของน้ำหนักทดสอบสูงสุด

1. ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม

จากการศึกษาวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดของชั้นดินจากข้อมูลหลุมเจาะในพื้นที่ทดสอบเสาเข็ม กับหน่วยแรงกระทำขณะทำการทดสอบเสาเข็มโดยแปรผลจากค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้ง Strain Gauge พบว่ามีค่าอัตราส่วนปลอดภัยกระจายอยู่ในช่วงค่อนข้างกว้าง ทั้งนี้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับ ประเภท ลักษณะ กำลังรับแรงเฉือนของชั้นดิน ตลอดจน ขนาด ความยาว และวิธีที่ใช้ในการทดสอบเสาเข็มต้นนั้น

2. ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็ม

ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็มที่ได้วิเคราะห์จากข้อมูลจากหลุมเจาะทดสอบดินในพื้นที่ของโครงการจากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับค่าประลัยค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแรงดันที่ปลายเสาเข็ม ทั้งนี้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับ ประเภทของชั้นดิน กำลังรับแรงเฉือนของดิน และความแน่นตัวของชั้นดินได้ปลายเสาเข็ม ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Modified Mazurkiewicz ซึ่งเป็นวิธีทางกราฟิกเพื่อนำมาช่วยในการหาค่าแรงดันทานที่ปลายเสาเข็ม โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาสามารถให้ค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุดและ พบว่าการพัฒนาแรงดันที่ปลายเสาเข็มนั้นไม่สามารถหาค่าได้ทั้งหมด ดังตารางที่ 15 เนื่องจากการทดสอบเสาเข็มที่รับแรงเสียดทานที่ผิวเป็นหลัก โดยเฉพาะในชั้นดินกรุงเทพมหานคร นั้น การทดสอบในขณะที่ให้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดแล้วแต่เสาเข็มยังไม่เกิดการพิบัติ ทำให้แรงที่ส่งถ่ายไปยังปลายเสาเข็มมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการพัฒนาของแรงดันที่ปลายเสาเข็มได้ ดังนั้นสามารถวิเคราะห์หาแรงดันที่ปลายเสาเข็มได้ในบางต้นเท่านั้น

ตารางที่ 15 การพัฒนาของแรงดันที่ปลายเสาเข็มทดสอบ

No.	Type of test	Max./Ultimate load tons.	Working load tons.	Mobilized end bearing tons.	Limit load type
P1	Static Test	2,400	1,200	ไม่ชัดเจน	Max. test
P2	Static Test	2,000	857.50	285.00	Ultimate load
P3	Static Test	1,000	489	150.00	Ultimate load
P4	Static Test	2,500	1,250	ไม่ชัดเจน	Max. test
P5	Static Test	2,625	1,237.75	152.00	Ultimate load
P6	Static Test	1,300	650	50.00	Ultimate load
P7	Bidirectional Test	1,811	905.50	N.A.	Max. test
P8	Bidirectional Test	2,000	1,000	N.A.	Max. test
P9	Bidirectional Test	600	300	N.A.	Max. test
P10	Static Test	1,350	675	ไม่ชัดเจน	Max. test
P11	Static Test	1,135	544.85	162.00	Ultimate load
P12	Static Test	2,600	1,300	ไม่ชัดเจน	Max. test

ในการศึกษาค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็ม พบว่าการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ตรวจวัดได้จากตำแหน่ง Strain Gauge ที่ปลายเสาเข็มนั้นมีค่าไม่สมเหตุผล เนื่องจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มจนถึงจุดพิบัตินั้น แรงทั้งหมดส่วนใหญ่จะถ่ายไปยังผิวรอบเสาเข็มมากกว่าที่ปลายของเสาเข็ม การพิบัติที่เกิดขึ้นจริงจะเป็นการพิบัติด้วยมวลดินบริเวณรอบผิวเสาเข็มมากกว่าที่เกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็ม พฤติกรรมดังกล่าวจึงแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักที่ถ่ายลงไปยังปลายเสาเข็มยังไม่เกิดการพัฒนาดั้มที่

จากการศึกษาค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มและค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็มนั้น ในการออกแบบเสาเข็มในขณะใช้งานจริงโดยใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยจะเป็นตัวลดความสามารถในการรับแรงแบกทานของดินบริเวณปลายและรอบผิวเสาเข็ม ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ พบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยโดยส่วนใหญ่ยังมีค่าเพียงพออยู่ในขณะที่มีการทดสอบเสาเข็มจนถึงจุดพิบัติแล้ว แต่ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็มนั้นยังมีค่าที่สูงอยู่ ดังนั้นในการออกแบบเสาเข็มควรใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีการแยกกันระหว่างค่าแรงเสียดทานที่ผิวกับค่าแรงดันที่ปลายเสาเข็มออกจากกันเพื่อใช้เป็นเกณฑ์

โดยค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงเสียดทานและค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็มในสถานะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยหรือน้ำหนักทดสอบสูงสุดและสถานะที่เสาเข็มใช้งาน สรุปได้ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 สรุปค่าอัตราส่วนปลอดภัยของเสาเข็ม

No.	Dia. m.	Length m.	Max./Ultimate Load		Working Load
			FS _{skin friction}	FS _{end bearing}	FS _{skin friction}
P1	1.20	53.32	0.99	-	1.47
P2	1.20	57.10	1.63	-	2.04
P3	1.20	43.50	2.19	2.33	2.76
P4	1.20	62.03	1.10	-	1.67
P5	1.20	46.00	1.69	2.16	2.54
P6	1.00	43.87	0.90	6.43	1.73
P7	2.00	61.00	1.32	-	2.68
P8	2.00	55.00	1.17	-	1.57
P9	1.00	41.90	1.54	-	3.19
P10	1.00	41.10	1.05	-	1.56
P11	0.80	47.64	1.13	-	2.44
P12	1.50	49.54	1.37	-	1.44
Average			1.34	3.64	2.09

การวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหาพารามิเตอร์จากผลการทดสอบเสาเข็ม

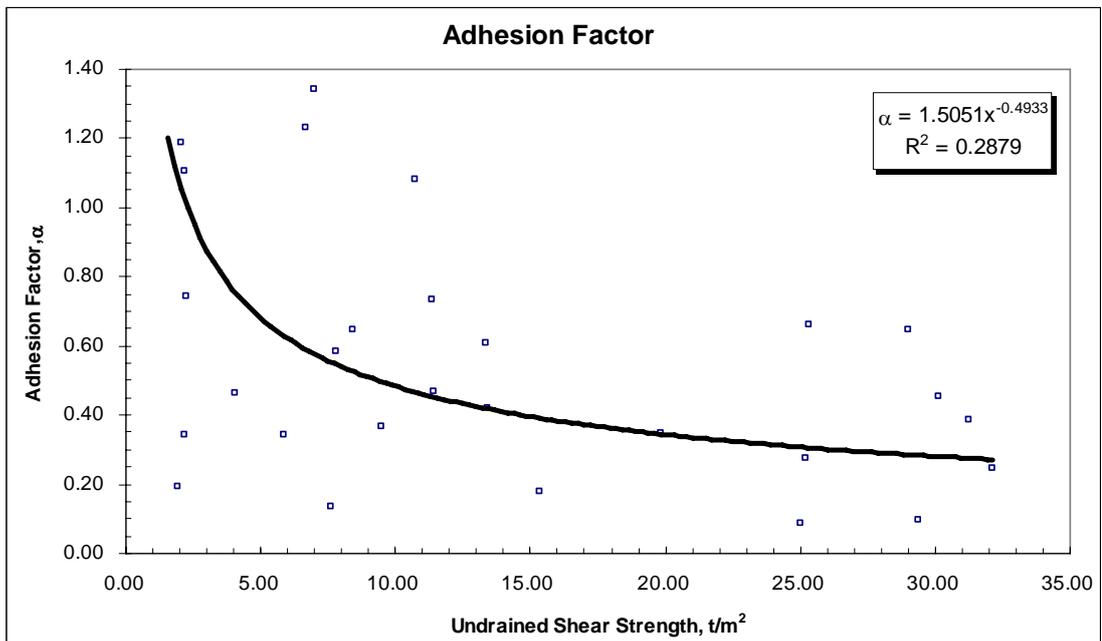
การวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบเสาเข็มจากผลการทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับ พารามิเตอร์ของดิน, ความยาวของเสาเข็ม, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม, วิธีและเครื่องจักรที่ใช้ก่อสร้าง, เวลาในการก่อสร้าง ตลอดจนการใช้ประเภทของสารละลายรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ จากการศึกษาได้วิเคราะห์ห้กลับเพื่อหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเสาเข็มซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินประเภทต่างๆ

1. การประมาณค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม

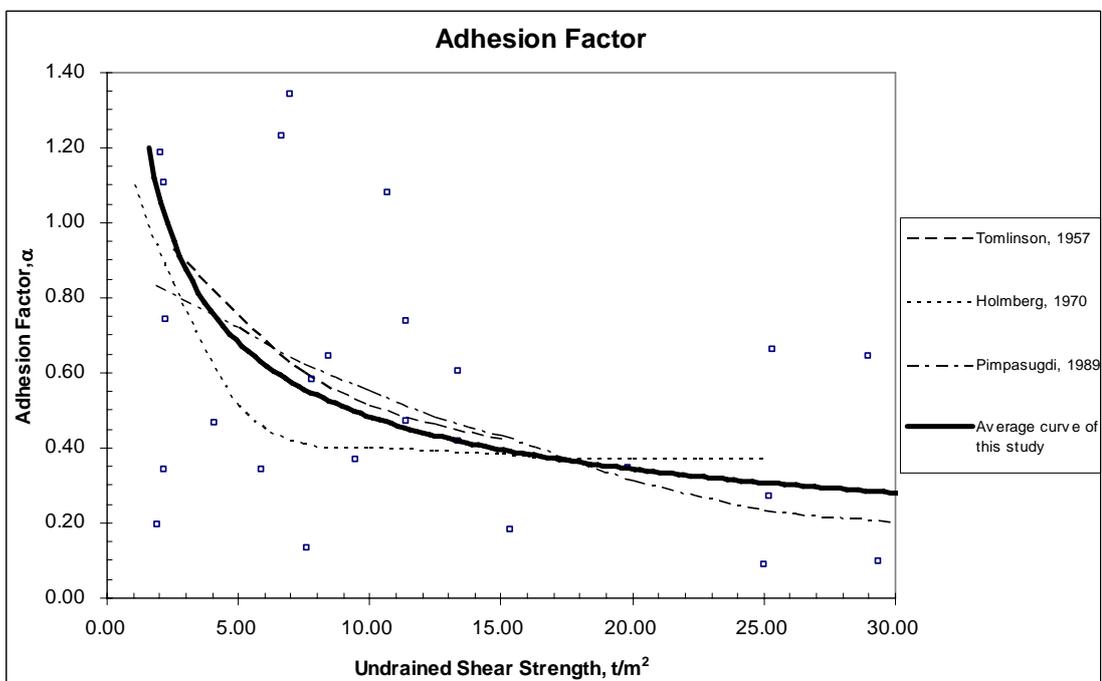
การประมาณค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มซึ่งแสดงในรูปของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (Adhesion Factor, α) และสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (Friction Factor, β) ในการหาค่าของพารามิเตอร์นั้นซึ่งได้จากการวิเคราะห์ห้กลับจากค่าแรงเสียดทานสูงสุด (f) ซึ่งคำนวณได้โดยใช้ข้อมูลผลการวัดค่าการถ่วงน้ำหนักบรรทุกที่กระทำจากหัวเสาเข็มและที่ตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละชั้นดินจนถึงปลายเสาเข็ม

1.1 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (Adhesion Factor, α)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียว (Undrained Shear Strength, S_u) ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเสาเข็ม ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) มีความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะค่อนข้าง Conservative (ค่อนข้างต่ำ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวกระจายอยู่ในช่วง 2-15 ตัน/ตร.ม. โดยเฉพาะเมื่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียว (S_u) มีค่าที่สูงขึ้น สำหรับค่า Adhesion Factor ที่มีค่ามากกว่าหนึ่งนั้นแสดงถึงพฤติกรรมที่หน่วยแรงนั้นมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดและเป็นผลจากการประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบในสนาม แสดงดังภาพที่ 50 และมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากผลการวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมาเป็นผลให้ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 51



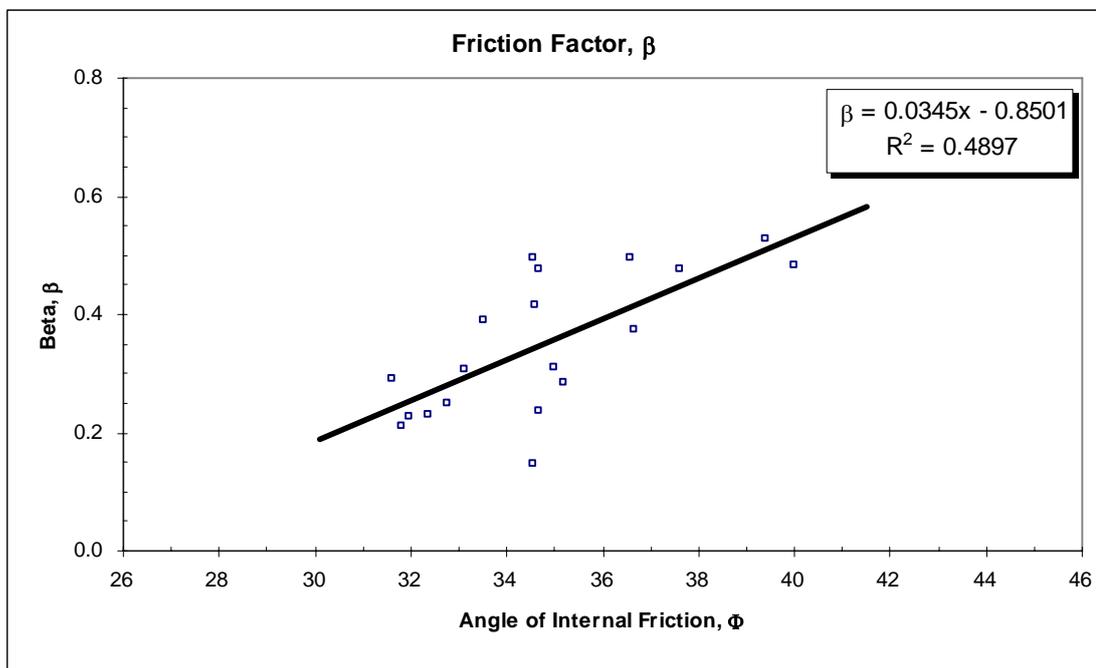
ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนทานในชั้นดินเหนียวกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียว



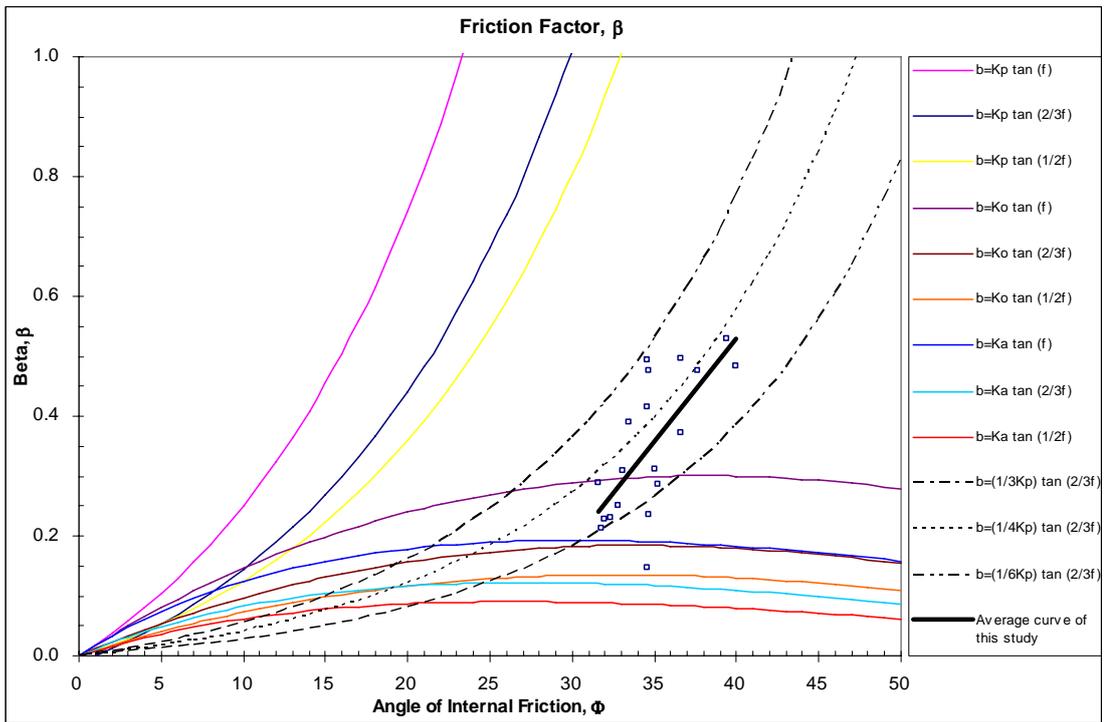
ภาพที่ 51 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนทานในชั้นดินเหนียวกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียว

1.2 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (Friction Factor, β)

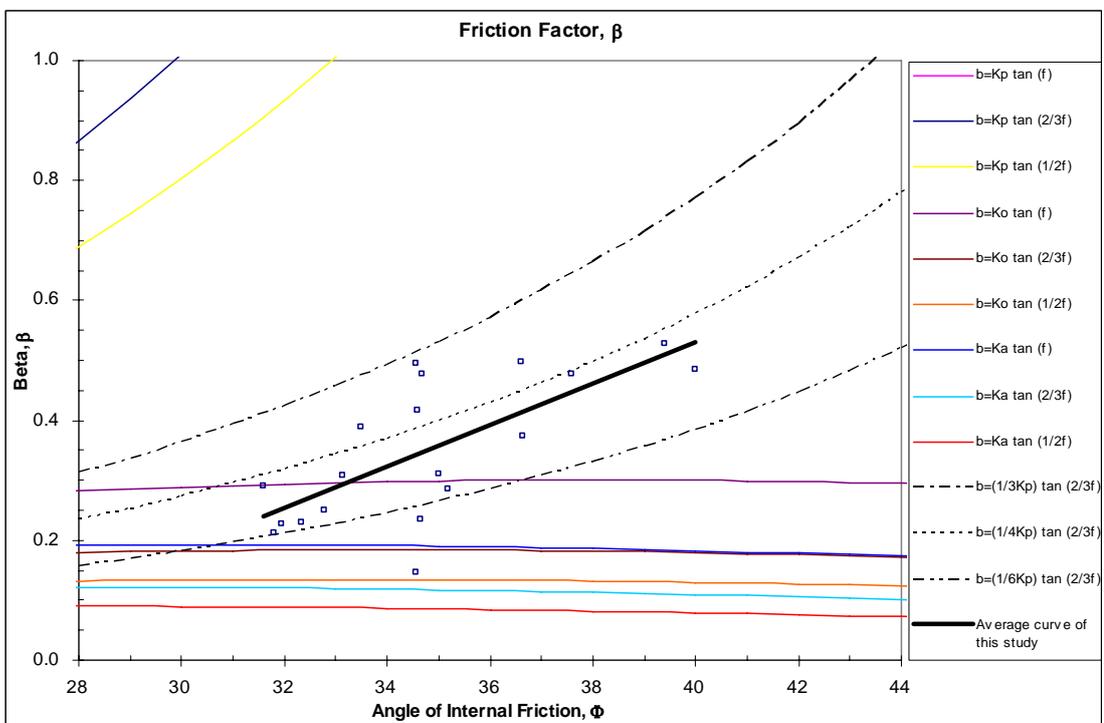
ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) หรือค่า $K_s \tan \delta$ กับมุมต้านทานภายในของทราย (Angle of Shearing Resistance, ϕ) มีความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.5 ดังภาพที่ 52 ซึ่งค่า $K_s \tan \delta$ เมื่อค่า K_s (Lateral Earth Pressure) มีสถานะ Active, Static, Passive และค่า δ (Soil-Pile Friction Angle) มีค่าประมาณ $1/2\phi$, $2/3\phi$, ϕ ของค่ามุมต้านทานภายในของทราย โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานที่ได้มีค่ากระจายตัว และมีแนวโน้มไปในทางสถานะ Passive นั่นคือเป็นลักษณะที่เสาเข็มขณะทำการทดสอบหรือเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกนั้นจะเคลื่อนตัวเข้าหามวลดิน และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $1/3$ ถึง $1/6$ ของค่า $\beta = K_p \tan 2/3\phi$ ซึ่งหมายถึงข้อมูลผลการศึกษาให้ผลในลักษณะของพฤติกรรมทางด้าน Passive มากกว่าพฤติกรรมทางด้าน Static ที่ได้ใช้สำหรับการออกแบบกันอยู่โดยทั่วไปสำหรับเสาเข็มที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธีการขุดเจาะ ดังแสดงในภาพที่ 53 และภาพที่ 54



ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทรายกับมุมต้านทานภายในของทราย



ภาพที่ 53 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทรายกับมุมด้านทานภายในของทราย



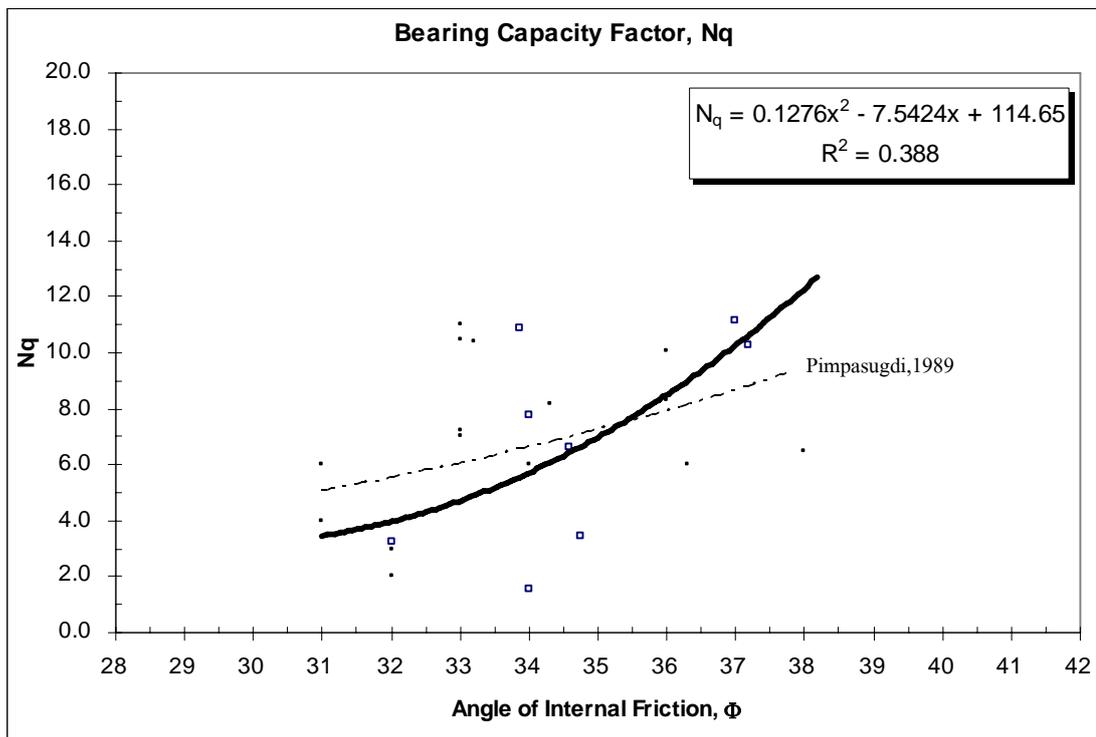
ภาพที่ 54 ภาพขยายเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทรายกับมุมด้านทานภายในของทราย

2. การประมาณค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

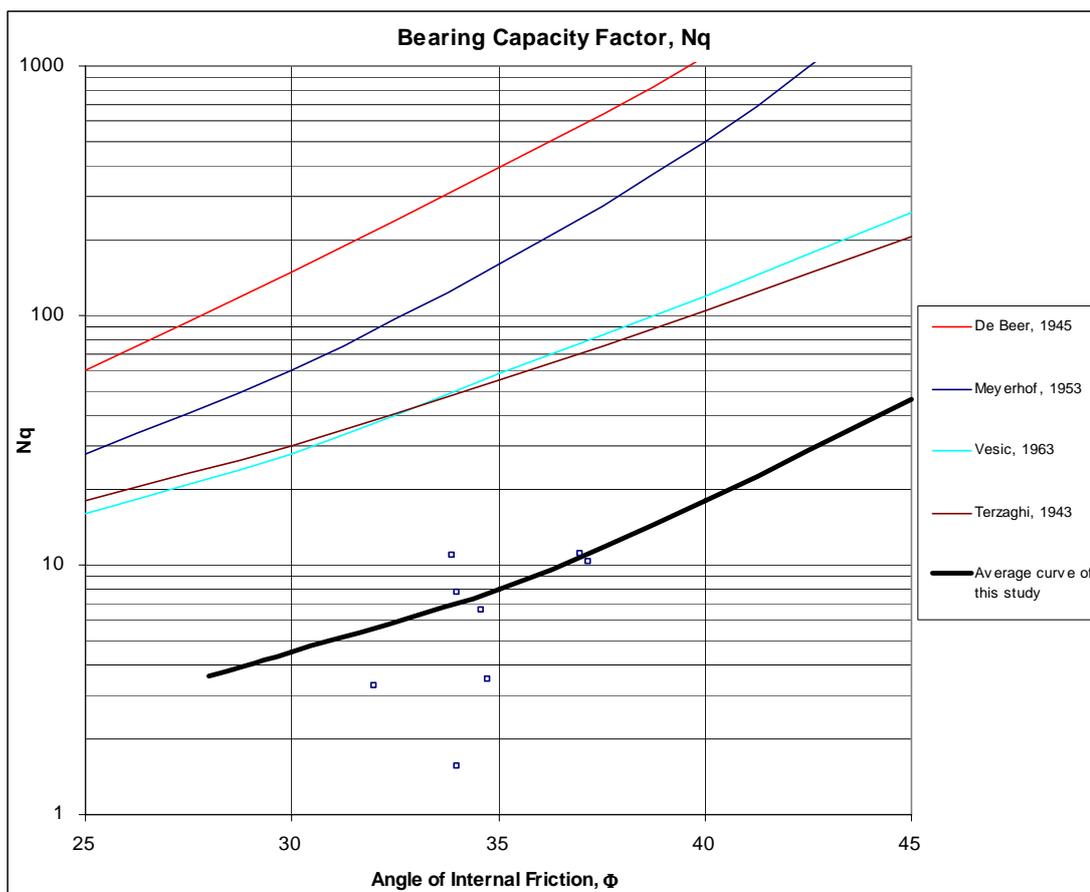
การประมาณค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มซึ่งมีค่าพารามิเตอร์อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor, N_q) สำหรับเสาเข็มที่ปลายอยู่ในชั้นดินทราย และค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor, N_q) สำหรับเสาเข็มที่ปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว

2.1 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor, N_q)

จากการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงของเสาเข็มอย่างต่อเนื่องพบว่า ในการพิบัติของเสาเข็มนั้นแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจะถูกพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดก่อนการพัฒนาจนถึงจุดสูงสุดของแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor, N_q) ที่ใช้ในการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยวิธีสถิตศาสตร์ จะใช้ในรูปแบบของค่า Mobilized N_q ซึ่งยังเป็นค่าไม่ถึงจุดสูงสุดเพื่อไม่ทำให้เกิดการทรุดตัวของเสาเข็มที่มากเกินไปสำหรับการออกแบบ โดยในการวิเคราะห์หาค่า Mobilized N_q จากการศึกษาได้ศึกษาถึงพฤติกรรมของการพัฒนาแรงต้านที่ปลายของเสาเข็มภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor, N_q กับค่ามุมด้านทานภายในของทราย (Angle of Shearing Resistance, ϕ) ซึ่งพบว่าค่าที่ได้มีค่าแนวโน้มที่ต่ำโดยอยู่ในช่วง 2–12 ดังแสดงในภาพที่ 55 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบเสาเข็มจากพฤติกรรมของการพิบัติที่เกิดขึ้นบริเวณผิวเสาเข็มจนทำให้การทรุดตัวมีค่าสูงขึ้นในขณะที่แรงต้านที่ปลายเสาเข็มเริ่มเกิดการพัฒนารับกำลังขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่มีการศึกษาก่อนหน้านี้ดังแสดงในภาพที่ 56 โดยค่า Bearing Capacity Factor, N_q ที่ได้มีค่าที่ต่ำกว่าผลของ Terzaghi ซึ่งให้ค่าที่ต่ำกว่างานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของการถ่ายแรงของเสาเข็มในลักษณะของชั้นดินที่มีหลายชั้นนั้นผลของการถ่ายแรงไปยังผิวเสาเข็มลงสู่ชั้นดินชั้นต่างๆมีค่าที่สูงกว่าการถ่ายแรงไปยังปลายของเสาเข็มอยู่มากทำให้การพัฒนาของแรงต้านที่ปลายไปสู่การพิบัติที่ปลายเสาเข็มยังไม่เพียงพอ



ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor กับค่ามุมต้านทานภายในของทราย



ภาพที่ 56 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor กับค่ามุมต้านทานภายในของทราย

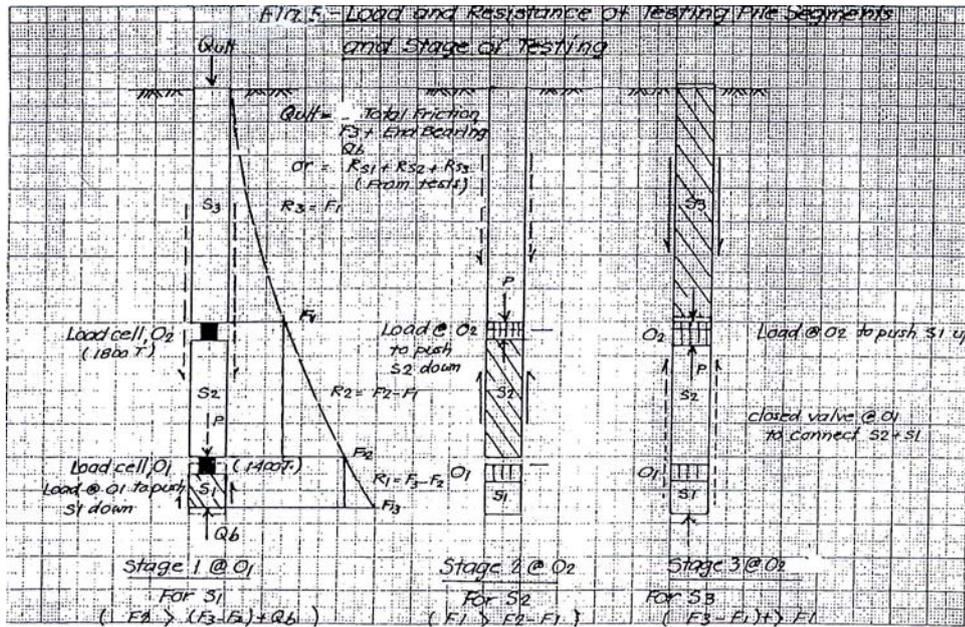
2.2 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor, N_c)

ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor, N_c) สำหรับเสาเข็มที่ปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว โดยที่ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวมีจำนวน 3 ต้น คือ ต้น P1, ต้น P3 และต้น P8 พบว่าค่า Bearing Capacity Factor, N_c เท่ากับ 7.3, 11.6, และ 9.4 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.4 ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อช่วงปลายของเสาเข็มจมอยู่ในชั้นดินเหนียวมีค่าค่ามุมต้านทานภายในเท่ากับศูนย์โดยค่า Bearing Capacity Factor, N_c เท่ากับ 9 สำหรับค่าแรงต้านที่ปลายที่มีค่าสูงขึ้นในขณะที่ทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเปรียบเทียบกับแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับแรงต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็มจากการเจาะสำรวจชั้นดินในสนาม

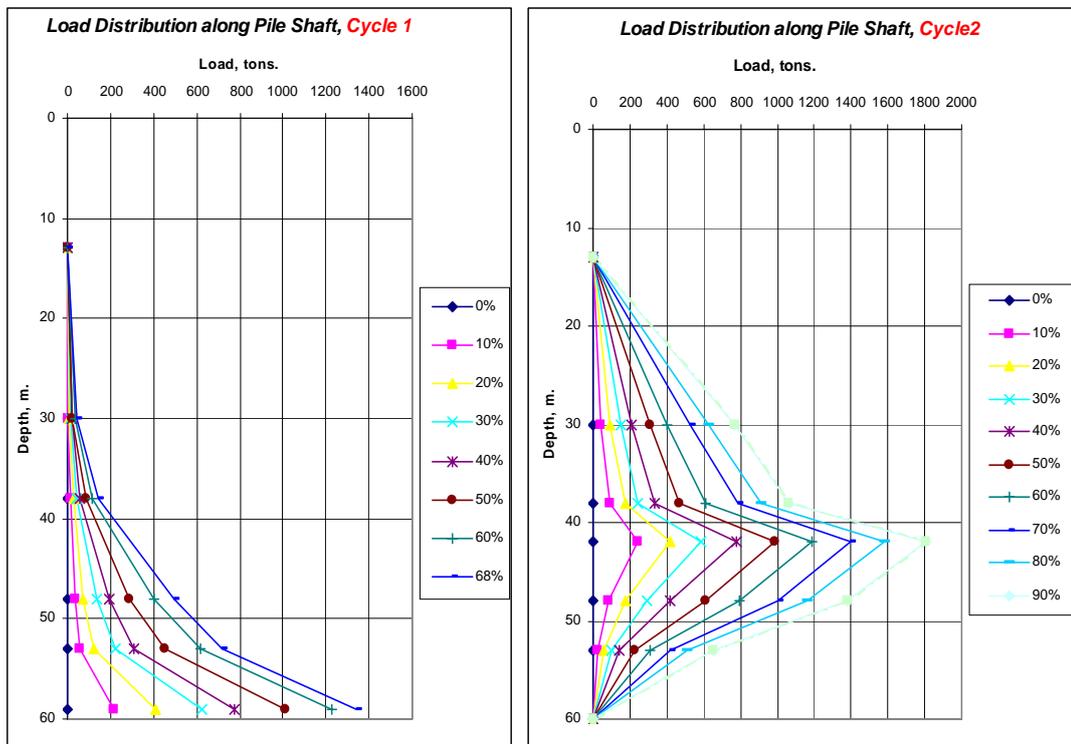
การวิเคราะห์ผลทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test

วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยวิธี Bi-Directional Static Load Test หรือการทดสอบ The Osterberg Cell Load Test ซึ่งได้มีการคิดค้นวิธีการที่นำมาใช้ในการทดสอบเสาเข็ม โดย Osterberg, 1998 เป็นวิธีการทดสอบ โดยการใช้แม่แรง Hydraulic Jack ติดตั้งเข้าไปในขณะทำการก่อสร้างเสาเข็ม แทนวิธีการทดสอบ Static Pile Load Test ที่มีการใช้ Overhead Reaction Frame ซึ่งมีการติดตั้งแม่แรง Hydraulic Jack บริเวณปลายและค่อนไปยังกึ่งกลางของเสาเข็ม ในการศึกษาวิจัยได้รวบรวมผลการทดสอบเสาเข็มโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test ไว้จำนวน 3 ต้น ซึ่งผลการทดสอบที่ได้สามารถแยกค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มกับค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มออกจากกันได้

สำหรับการทดสอบการรับน้ำหนักเสาเข็มด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test เป็นการทดสอบน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนจากแรงต้านที่ผิวและที่ปลายเสาเข็มต่อแม่แรง Hydraulic Jack (Osterberg Cell) ที่ติดตั้งเพื่อแยกส่วนของเสาเข็มออกเป็น 3 ส่วน โดยหลักการที่สำคัญในการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test คือการอัดแรงแก่แม่แรง Hydraulic Jack ที่ละตัว โดยขั้นแรกทำการอัดแรงไปยังแม่แรงตัวล่าง ซึ่งถ้าเกิดแรงต้านสูงสุดของ 2 ส่วนบนมากพอจะสามารถหาค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจนถึงจุดพิบัติได้ ภายหลังจากความดันของแม่แรงตัวล่างจนหมดแล้วจากนั้นก็ทำการอัดแรงไปยังแม่แรงตัวกลาง โดยเปิดแม่แรงตัวล่างให้เป็นอิสระเพื่อไม่ให้น้ำหนักสามารถถ่ายลงไปสู่ปลายเสาเข็มได้เพื่อหาค่าแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มส่วนกลาง โดยทั่วไปในการติดตั้งแม่แรงตัวกลางจะประเมินว่าส่วนบนของเสาเข็มจะรับแรงมากกว่าส่วนกลางทำให้สามารถทดสอบจนเข้าสู่จุดพิบัติได้ ส่วนขั้นตอนสุดท้ายจะต้องต่อพ่วงแม่แรงทั้งส่วนบนและส่วนล่างเข้าด้วยกันและทำการอัดแรงไปยังแม่แรงตัวกลาง ในขณะที่ทำการปิดแม่แรงส่วนล่างจะเกิดการส่งถ่ายแรงเข้าถึงกันเพื่อหาค่าแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มส่วนบนให้เข้าสู่จุดพิบัติ โดยผลรวมของน้ำหนักทดสอบสูงสุดที่เข้าสู่จุดพิบัตินำมารวมกันก็จะเป็นน้ำหนักบรรทุกพิบัติของเสาเข็มได้ ดังภาพที่ 57 โดยลักษณะการถ่ายแรงของเสาเข็ม (Load Transfer) ของเสาเข็มซึ่งแสดงผลของรอบที่ทำการทดสอบที่ทำการทดสอบจำนวน 2 รอบ ดังภาพที่ 58

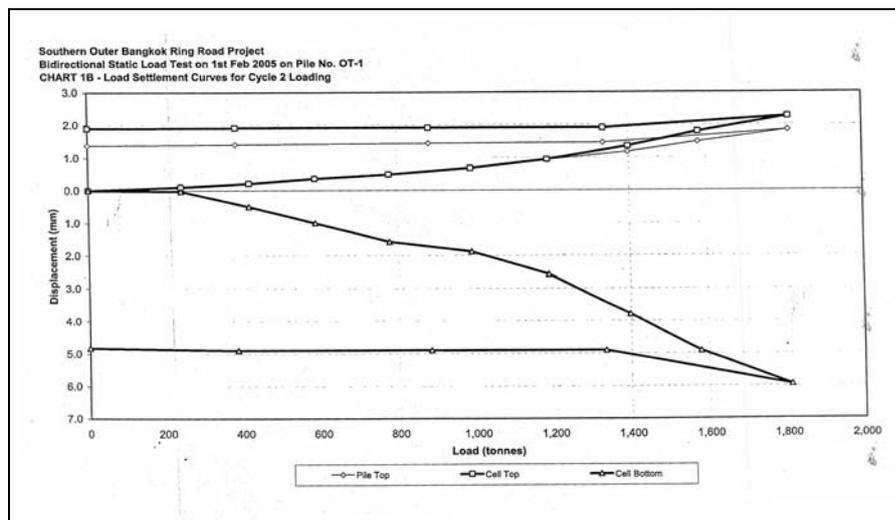
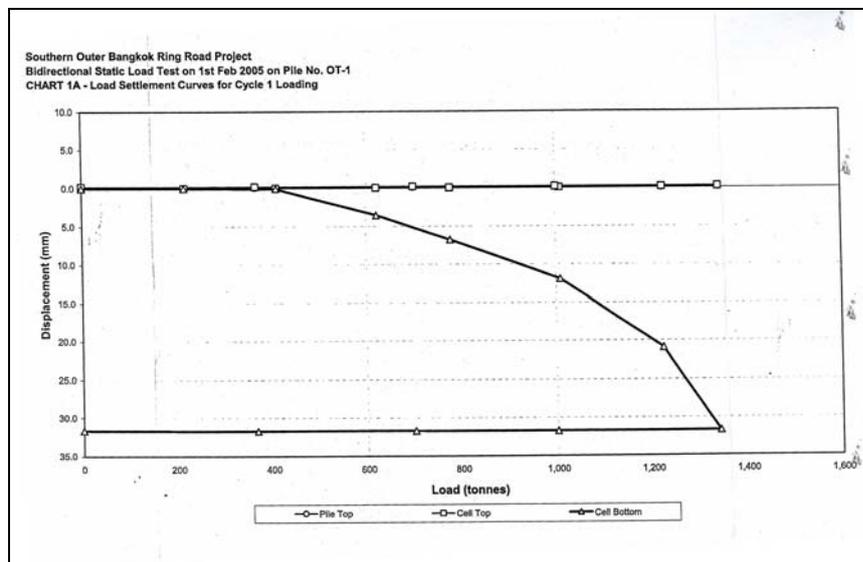


ภาพที่ 57 การทดสอบเสาเข็มวิธี Osterberg Cell โดยทำการแยกส่วนของเสาเข็มออกเป็น 3 ส่วน

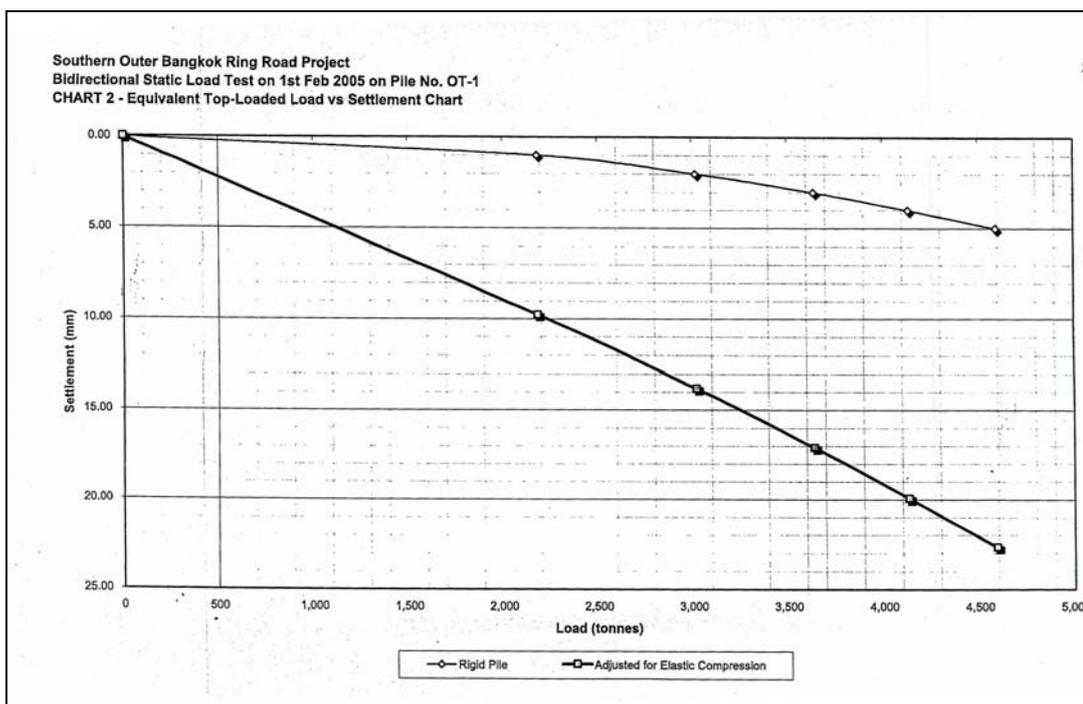


ภาพที่ 58 การส่งถ่ายแรงของเสาเข็มต้นที่ P7 จากการทดสอบ Osterberg Cell

สำหรับค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test ของทั้งส่วนบนและส่วนล่างตามขั้นตอนการทดสอบ ดังภาพที่ 59 โดยจะนำค่าน้ำหนักบรรทุกที่ทำการทดสอบในแต่ละรอบที่ค่าการเคลื่อนตัวเท่ากันมารวมกันเป็นค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยค่าการทรุดตัวของเสาเข็มก็คือค่าการเคลื่อนตัวที่เท่ากันในแต่ละรอบของการทดสอบนั้น เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มต้องทำการรวมค่าการเคลื่อนตัวเนื่องจากผลของ Elastic Pile Shortening ที่ทำการวัดด้วย Tell Tale จากการติดตั้งไว้เพื่อวัดการเคลื่อนตัวของแต่ละส่วนของเสาเข็มเทียบกับระดับที่หัวเสาเข็มไว้ด้วยก็จะได้ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Total Pile Settlement) ดังภาพที่ 60



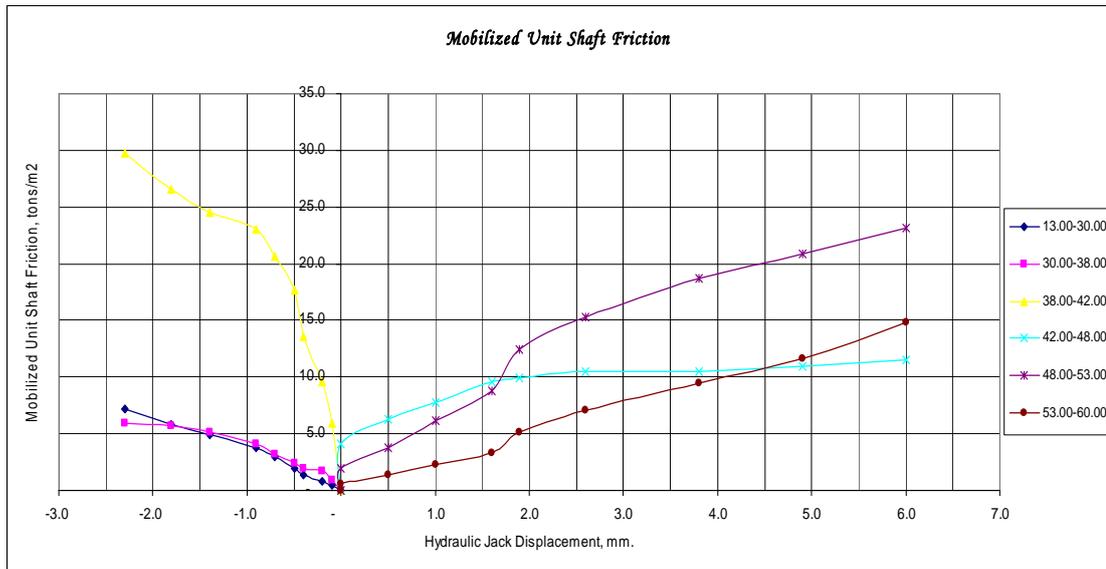
ภาพที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวต้น P7 ในแต่ละรอบ



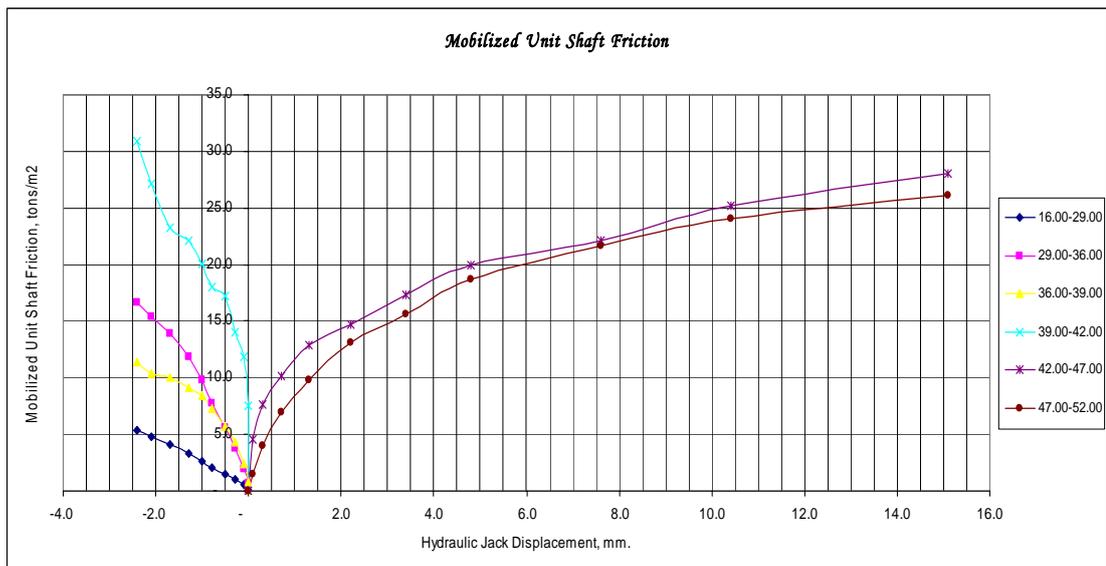
ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการทรุดตัวทั้งหมดตั้งแต่ P7
(Total Pile Settlement)

1. การพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ โดยการทดสอบเสาเข็มวิธี **Bi-Directional Static Load Test**

จากการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มในแต่ละชั้นดินด้วยวิธีการทดสอบเสาเข็มวิธี Bi-Directional Static Load Test พบว่าการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มเกิดการพัฒนาเต็มที่ (Full Mobilized) ในขณะที่การทรุดตัวของเสาเข็มเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ประมาณ 1-6 มิลลิเมตร โดยหน่วยแรงมีค่าใกล้เคียงและสูงกว่าเล็กน้อยในชั้นดิน Soft Clay เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบทั่วไป (Conventional Static Load Test) ดังภาพที่ 61 และภาพที่ 62 ทั้งนี้เนื่องมาจากวิธีที่ใช้ในการทดสอบ Bi-Directional Static Load Test ซึ่งทำการถ่ายน้ำหนักบรรทุกให้แก่เสาเข็ม โดยใช้แม่แรง Hydraulic Jack ที่ติดตั้งในตัวเสาเข็ม โดยตรงในขณะที่ทำการทดสอบ แรงเสียดทานผิวของเสาเข็มสามารถพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดได้ก่อน เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบเสาเข็มวิธี Static Load Test ซึ่งเป็นการทดสอบที่ให้น้ำหนักบรรทุกที่หัวเสาเข็มโดยลักษณะการถ่ายแรงของเสาเข็มจะส่งถ่ายไปยังชั้นดินที่อยู่ด้านบนก่อนแล้วค่อยถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินอื่นๆ ลงมา



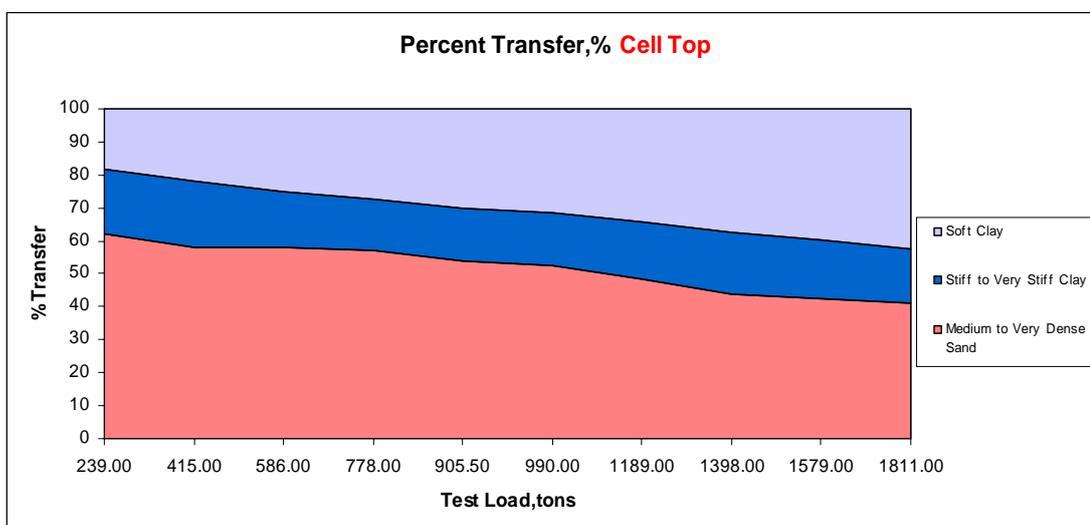
ภาพที่ 61 การพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มต้นที่ P7 ด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test



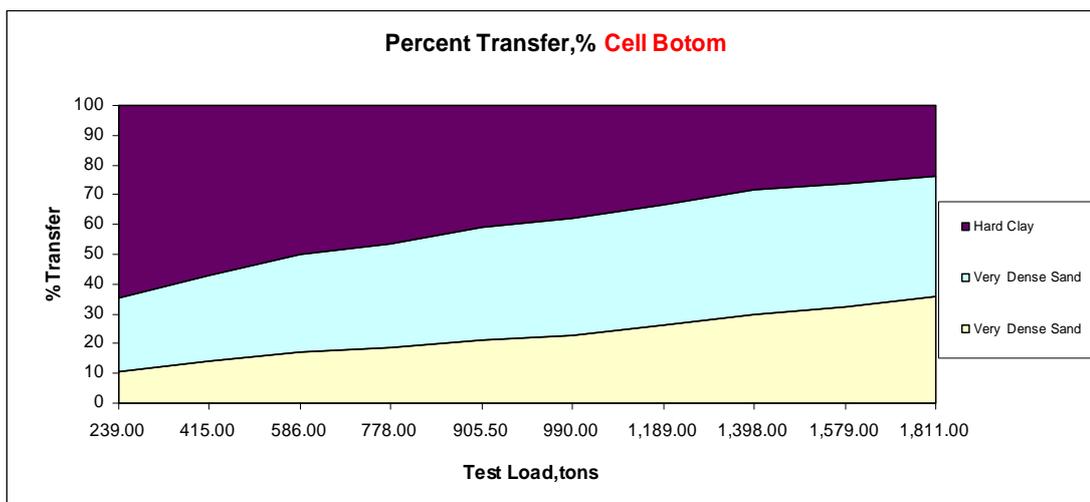
ภาพที่ 62 การพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มต้นที่ P8 ด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test

2. เปรอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินตามความลึกต่างๆ โดยการทดสอบเสาเข็มวิธี Bi-Directional Static Load Test

เปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มจากวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load Test ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างจากการทดสอบโดยทั่วไป คือ การถ่ายแรงที่ผิวของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินในช่วงบนของแม่แรง Hydraulic Jack ชั้นดินที่อยู่ด้านล่างหรือใกล้กับแม่แรงจะได้รับแรงที่มีค่าสูงกว่าดินชั้นบนขึ้นไป และจะค่อยลดลงเมื่อทดสอบน้ำหนักเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 63 ทั้งนี้เนื่องมาจากผลจากการอัดแรงไปยังแม่แรง Hydraulic Jack ตัวกลางซึ่งเป็นลักษณะของแรงดึง เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบด้วยวิธี Static Pile Load Test การให้น้ำหนักทดสอบบนหัวเสาเข็มโดยลักษณะของการถ่ายแรงจะส่งถ่ายไปยังชั้นดินที่อยู่ด้านบนก่อน อันเนื่องมาจากวิธีการทดสอบ ส่วนการถ่ายแรงของเสาเข็มในช่วงระหว่างแม่แรงตัวบนกับตัวล่าง พบว่าการถ่ายแรงมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยทั่วไปอันเนื่องมาจาก การทดสอบเป็นลักษณะของแรงอัดเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามน้ำหนักทดสอบที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังภาพที่ 64



ภาพที่ 63 เปรอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มต้นที่ P7 (Cell Top) ด้วยวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load



ภาพที่ 64 เเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มคั่นที่ P7 (Cell Bottom) ด้วยวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load

3. ค่าอัตราส่วนปลอดภัยโดยการทดสอบเสาเข็มวิธี Bi-Directional Static Load

จากการศึกษาอัตราส่วนปลอดภัยด้วยวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load Test ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ผิวเสาเข็มที่ประเมินได้มีค่าที่มีลักษณะเดียวกันกับผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Static Pile Load Test โดยทั่วไป สำหรับค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงต้านที่ปลายเสาเข็มไม่สามารถหาค่าการพัฒนาแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ได้ทั้งนี้เนื่องมาจากวิธีที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งใช้แม่แรง Hydraulic Jack ตัวล่างทำการถ่ายแรงลงไปยังชั้นดินใต้ปลายเสาเข็มด้วยน้ำหนักทดสอบสูงสุดเพื่อหาค่าหน่วยแรงสูงสุดจากแรงต้านของดินที่ปลายเสาเข็มโดยตรง

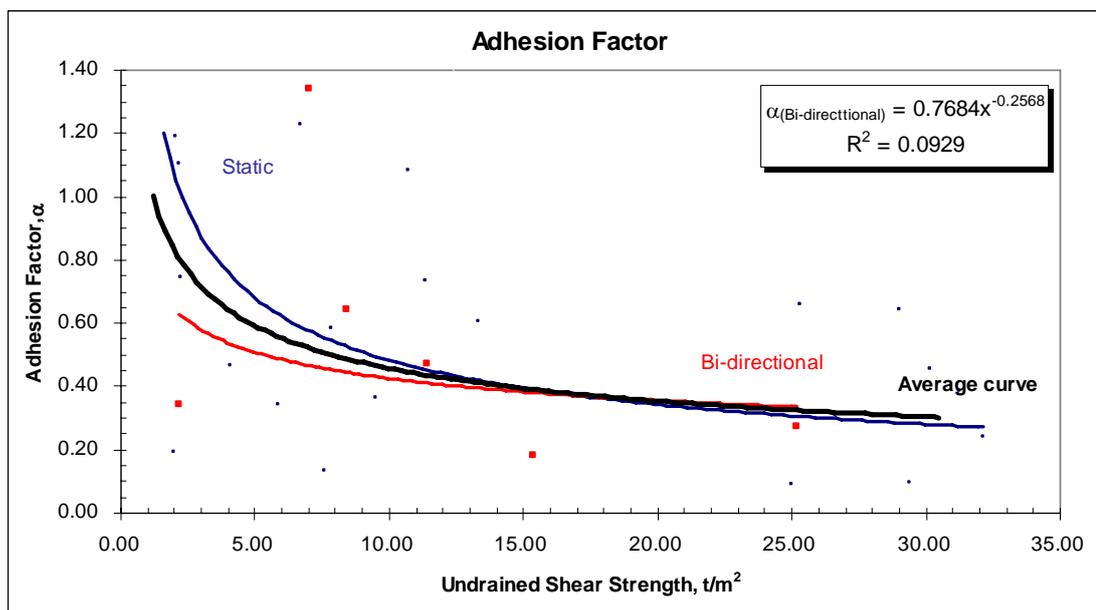
4. การวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหาพารามิเตอร์จากผลการทดสอบเสาเข็มวิธี Bi-Directional Static Load Test

ในการวิเคราะห์ห้กลับเพื่อหาพารามิเตอร์จากวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load Test ที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จะมีความแตกต่างจากการทดสอบด้วยวิธี Static Pile Load Test เนื่องจากวิธีที่ใช้ในการทดสอบ Bi-Directional Static Load Test ที่มีการติดตั้งแม่แรง Hydraulic Jack ในตัวเสาเข็ม และทำการอัดแรงไปยังแม่แรงทั้ง 2 ชุด ทำให้เกิดพฤติกรรมในการรับแรงของเสาเข็มที่แตกต่างกัน

4.1 การประมาณค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม โดยการทดสอบเสาเข็มวิธี Bi-Directional Static Load

4.1.1 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (Adhesion Factor, α)

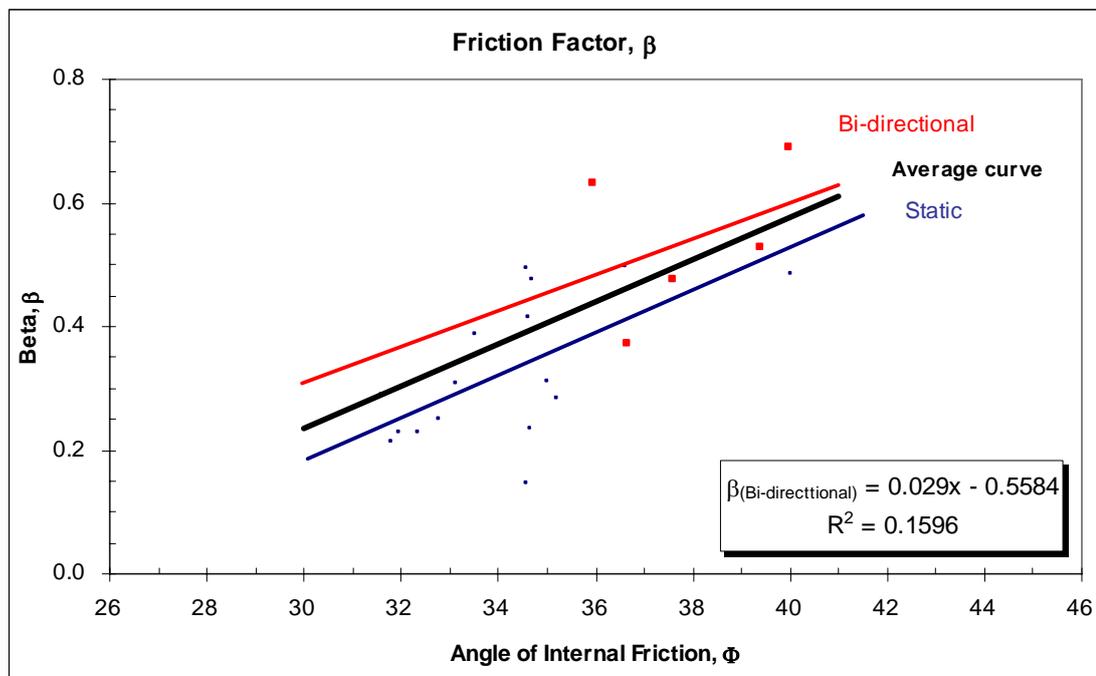
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียว (Undrained Shear Strength, S_u) ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test ซึ่งพบว่า สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว (α) มีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่วิเคราะห์ได้จากการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Conventional Static Pile Load Test อยู่ประมาณ 1.50 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 65 ซึ่งมาจากผลของการทดสอบโดยการอัดแรงในลักษณะแรงดึง และเนื่องจากการเกิดแรงต้านจากดินชั้นบนไม่เพียงพอต่อแรงอัดของแม่แรง Hydraulic Jack ตัวกลาง จึงเป็นผลให้ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นยังมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่



ภาพที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในชั้นดินเหนียวด้วยวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load

4.1.2 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (Friction Factor, β)

จากการนำผลการวิเคราะห์จากการทดสอบเสาเข็มวิธี Bi-Directional Static Load Test และวิธี Conventional Static Pile Load Test มาเปรียบเทียบกันพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) จากการทดสอบด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test มีค่าที่สูงกว่าประมาณ 2.0 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากวิธีที่ใช้ในการทดสอบมีความแตกต่างกัน โดยการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test จะทำการถ่ายน้ำหนักบรรทุกให้แก่เสาเข็มโดยใช้แม่แรง Hydraulic Jack ที่ติดตั้งอยู่ในตัวเสาเข็มซึ่งมีตำแหน่งใกล้กับชั้นทราย ดังนั้นในขณะที่ทำการทดสอบแรงเสียดทานในชั้นทรายสามารถพัฒนาได้จนถึงค่าสูงสุดในขณะที่การเคลื่อนตัวของเสาเข็มมีค่าเพียงเล็กน้อย และอาจเกิดจากแรงเสียดทานของตัวแม่แรง Hydraulic Jack ด้วยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูง ซึ่งมีความแตกต่างกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Static Pile Load Test ที่ทดสอบโดยการให้น้ำหนักบรรทุกบนหัวเสาเข็มพฤติกรรมถ่ายแรงไปสู่ดินจากชั้นบนก่อนที่ถ่ายแรงไปยังชั้นดินด้านล่าง ทำให้แรงเสียดทานในชั้นดินทรายที่อยู่ด้านล่างไม่สามารถพัฒนาตัวจนถึงค่าสูงสุดได้ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทราย (β) ที่วิเคราะห์ได้จึงมีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อทำการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test ดังภาพที่ 66

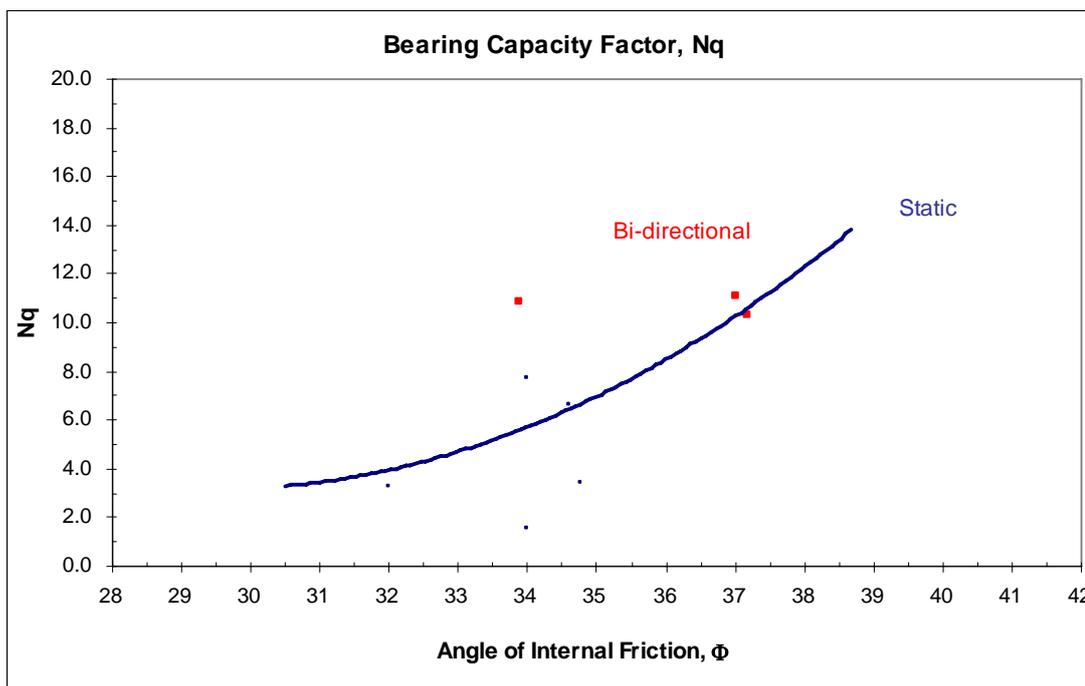


ภาพที่ 66 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเสียดทานในชั้นทรายกับมุมด้านทานภายในของทรายด้วยวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load

4.2 การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม โดยการทดสอบเสาเข็มวิธี Bi-Directional Static Load

4.2.1 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor, N_q)

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor, N_q) ของเสาเข็มที่ทดสอบด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test มีค่าประมาณ 10-11 ในขณะที่เสาเข็มที่ทดสอบด้วยวิธี Static Pile Load Test มีค่าประมาณ 2-12 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินทราย (Bearing Capacity Factor, N_q) ที่กระจายอยู่ค่อนข้างสูงกว่าประมาณ 2.5 เท่า นั้น ดังภาพที่ 67 เนื่องจากลักษณะการถ่ายแรงไปยังปลายเสาเข็มที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการทดสอบ นั่นคือ การทดสอบด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test ทำการให้น้ำหนักที่แม่แรง Hydraulic Jack ที่ติดตั้งบริเวณปลายเสาเข็มในขณะที่ทำการทดสอบขั้นตอนแรก (Stage1) ซึ่งทำให้ทราบค่าความต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็มโดยตรง สำหรับการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Static Pile Load Test ทำการบรรทุกน้ำหนักที่หัวเสาเข็ม ทำให้ลักษณะการถ่ายแรงจากเสาเข็มจากชั้นดินที่อยู่ด้านบนลงไปสู่ชั้นดินที่อยู่ด้านล่าง ดังนั้นค่าแรงต้านทานที่ปลายของเสาเข็มที่ทดสอบด้วยวิธี Static Pile Load Test จึงมีค่าน้อย



ภาพที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor กับค่ามุมต้านทานภายในของทราย ด้วยวิธีการทดสอบเสาเข็ม Bi-Directional Static Load

4.2.2 สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor, N_c)

จากการวิเคราะห์ห้กลับจากการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธี Bi-Directional Static Load Test เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor, N_c) มีค่าประมาณ 9.4 ในเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง (Hard Clay) ดันที่ P8

จากการศึกษาถึงวิธีการทดสอบ Bi-Directional Static Load Test ที่มีการติดตั้งแม่แรง Hydraulic Jack ที่บริเวณปลายเสาเข็มเพื่อทดสอบหาค่าแรงต้านที่ปลาย โดยทำการอัดแรงไปยังแม่แรงเพื่อหาแรงต้านทานของดินได้โดยตรง ซึ่งแรงที่ทำการทดสอบที่ปลายเสาเข็มนั้น ประมาณ 2.5 เท่าของน้ำหนักตัวเสาเข็ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่ากำลังต้านทานของดินชั้นนั้น จากการวิเคราะห์ห้กลับค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงต้านที่ปลายในชั้นดินเหนียว (Bearing Capacity Factor, N_c) มีค่าใกล้เคียงกับสมมุติฐานในการออกแบบ ทำให้ทราบค่าแรงต้านที่ปลายจากวิธีการทดสอบนี้ได้โดยตรง