

พฤติกรรมของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับเสาเข็มแบบเรีท ภายใต้แรงกระทำในแนวนราบ

Behavior of Soil-Pile Interaction of Barrette Pile under Lateral Loading

สมเกียรติ ทิพย์สุนธยา

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
E-mail: t.somkiat_gte@yahoo.com

วิไลลักษณ์ สระมูล

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
E-mail: wilailakk@gmail.com

ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์

E-mail: s_chanchai@yahoo.com

Manuscript received October 22, 2015
Revised April 29, 2016

บทคัดย่อ

โครงการก่อสร้างต่าง ๆ ที่มีการใช้เสาเข็มรับแรงด้านข้าง ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ออกแบบคือ p - y Curve ซึ่งสร้างขึ้นตามสมการของทฤษฎีต่างๆ อย่างไรก็ตามการคำนวณหา ค่า p - y Curve จากทฤษฎีนั้นมักจะทำให้ค่าที่แตกต่างจากการวิเคราะห์ที่ได้จากงานสนาม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะ ทำการศึกษาหา p - y Curve ด้วยวิธีวิเคราะห์ที่กลับจากการ ทดสอบเสาเข็มรับแรงดันด้านข้างในสนาม และวิเคราะห์เทียบกับ ทฤษฎีของ Matlock ด้วยโปรแกรม LPILE นอกจากนี้ยังได้ ทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการรับแรงในแนวด้านข้าง งานวิจัยนี้ได้ทำเสาเข็มแบบเรีทที่มีหน้าตัดขนาด 0.8×2.0 เมตร ในพื้นที่บริเวณโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนต่อขยาย จังหวัด

สมุทรปราการ การทดสอบพิจารณาการให้แรงแนวนราบแบบ กระทำซ้ำแบบ Static Loading ภายใต้สภาวะ Stress Control จำนวน 10 รอบ โดย Cycle ที่ 1 ให้แรงกระทำ 196 kN, 392 kN, 587 kN และ 785 kN ตามลำดับ ส่วน Cycle ที่ 2 – 10 ให้ แรงกระทำซ้ำที่ 785 kN เท่านั้น ในเสาเข็มได้มีการติดตั้ง เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวแนวนราบ (Inclinometer) และตัววัด ค่าความเครียด (Strain) ชนิด Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG) ผลจากการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าเส้น p - y Curve ด้วยวิธี วิเคราะห์ที่กลับนั้นจะให้ค่า p - y Curve สูงกว่าเส้นที่ได้จากการ วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Matlock อย่างไรก็ตามในช่วงที่รับแรง กระทำซ้ำรอบที่ 2 ถึงรอบที่ 10 ค่าของ p - y Curve จะลดลงและ มีแนวโน้มที่จะตกลงไปยังเส้นทฤษฎีของ Matlock ในช่วงที่มีการ

เคลื่อนตัวสูงเนื่องจากค่า *Stiffness* ของดินมีค่าลดลง

ABSTRACT

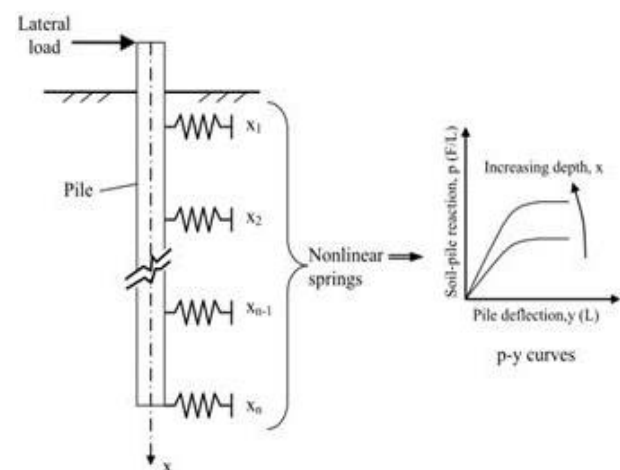
Construction of project using lateral load pile, the important data for analysis and design is p-y curve which have been generally established by different theory. However, the calculated p-y curves by theory mostly differ from the data referred to the field. Therefore, this research aims to study p-y curve by backed analysis from lateral pile load test in the field and compare to Matlock's theory by LPILE program. Additionally, the influence of the horizontal cyclic loading is considered to this research. In the research field, the barrette pile size 0.8 x 0.2 m was constructed in the area of MRT Green Line Extension project, Samutprakarn province. The lateral static load tests under stress control were focused on 10 cycles. For the first cycle, the forces were applied to the pile with 196 kN, 392 kN, 587 kN and 785 kN, respectively. For cycles 2nd – 10th cycle, the forces were applied only 785 kN. The inclinometer and Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG) was installed in the barrette pile for lateral displacement and strain. The analysis result indicates that the p-y curves by back analysis method are higher than the curves of Matlock's method. However, under repeated loading 2nd – 10th cycle the p-y curves trend to decrease and drop down to the line of Matlock's theory in the zone of large deflection due to decreasing of soil stiffness

Keywords: p-y Curve, Soil Resistance, Barrette Pile, Lateral Load

1. บทนำ

ปัจจุบันโครงการงานก่อสร้างในกรุงเทพมหานครในส่วนของงานฐานรากได้มีการนำเสาเข็มแบบเรี (Barrette Pile) มาใช้มากขึ้น เนื่องด้วยต้องการให้ฐานรากสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้นกว่าเสาเข็มปกติทั่วไปและไม่ใช้พื้นที่มากเกินไปในการก่อสร้างฐานราก ที่สำคัญในการก่อสร้างทางรถไฟฟ้านั้นได้มีการออกแบบให้มีการรับแรงทางด้านข้างเพื่อรองรับแรงเหวี่ยงจากการเข้าโค้งของรถไฟฟ้า รวมถึงการรับแรงจากแผ่นดินไหวในแนวราบ ซึ่งจะส่งผลให้เสาเข็มมีการเคลื่อนตัวในแนวราบด้วย วิธีการหาค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบกับความสัมพันธ์ของแรงนี้มีวิธีการที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ วิธีการบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on Elastic Foundation) วิธีการยื่น

เทียบเท่า (Equivalent Cantilever Method) และวิธี p-y Curve (รูปที่ 1) เป็นต้น โดยใน 2 วิธีแรกที่ได้กล่าวมานั้นมีข้อจำกัด คือสามารถใช้ได้กับชั้นดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันเท่านั้น แต่วิธี p-y Curve สามารถนำมาใช้วิเคราะห์กับดินที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้ อย่างไรก็ตามในอดีตนักวิจัยได้เริ่มศึกษาพฤติกรรมการรับแรงด้านข้าง p-y Curve ของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลางตามวิธีของ Matlock แต่มีข้อจำกัดคือเป็นเพียงการศึกษา กับเสาเข็มที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 60 เซนติเมตร เมื่อนำวิธีดังกล่าวนี้มาวิเคราะห์กับเสาเข็มขนาดใหญ่อาจจะทำให้การวิเคราะห์ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมการรับแรงของเสาเข็ม เนื่องจากปัจจัยในเรื่องรูปทรงเสาเข็ม ที่อาจจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือรูปอื่นๆ สำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวกรุงเทพ-สมุทรปราการได้มีการออกแบบเสาเข็มแบบเรีขนาดใหญ่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่สามารถรับแรงในแนวราบได้ ทางกลุ่มวิจัยจึงมีแนวคิดนำวิธี p-y Curve มาศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มตามทฤษฎีเทียบกับผลทดสอบที่ได้จริงในงานสนาม โดยคำนึงถึงเสาเข็ม วางอยู่ในชั้นดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและที่สำคัญแรงที่กระทำยังอยู่ในรูปของการเคลื่อนที่ซ้ำในแนวราบ โดยกำหนดขอบเขตการศึกษา รูปแบบ p-y Curve จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LPILE ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์เสาเข็มที่รับแรงทางด้านข้างโดยวิธี p-y Curve โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์นำมาเทียบกับวิธีของ Matlock [2]

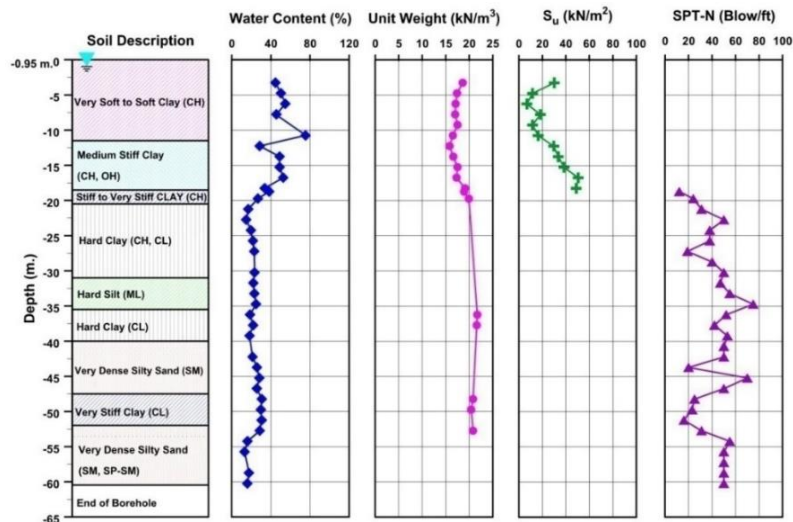


รูปที่ 1 แบบจำลอง p-y Curve [1]

2. ข้อมูลของเสาเข็มและลักษณะชั้นดิน

เสาเข็มที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นรูปแบบแบบเรีทสี่เหลี่ยม ขนาด 0.8×2 เมตร จำนวน 1 ต้น ตั้งอยู่ที่โครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวเบร้ง-สมุทรปราการ โดยมีผลการเจาะสำรวจดิน BH-VB-17

Park & Ride ดังตารางที่ 1 และลักษณะชั้นดินดังรูปที่ 2 ระดับน้ำใต้ดินประมาณ -0.95 เมตร จากผิวดิน โดยได้มีการเจาะสำรวจไว้ตั้งแต่เริ่มสำรวจออกแบบ



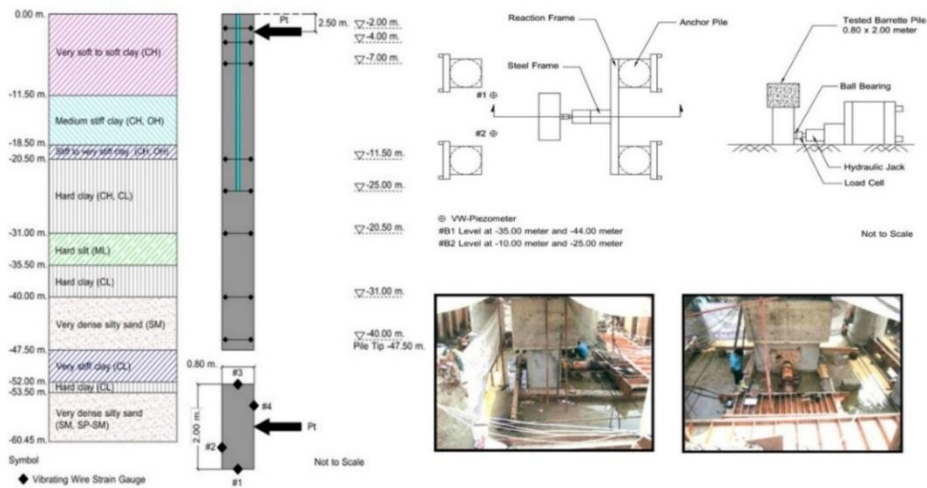
รูปที่ 2 ลักษณะชั้นดินบริเวณที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 1 ข้อมูลชั้นดินจากรายงานสำรวจออกแบบ

Depth (m)	γ (kN/m ³)	w (%)	S_u (kN/m ²)	SPT (Blow/ft)
0-11.0	17.35	64	15	-
11.0-16.5	16.63	42	34	-
16.5-20.5	18.80	38	50	18
20.5-31.0	20.8	20	-	>30
31.0-35.5	21	22	-	>30
35.5-40.0	21.65	20	-	>30
40.0-47.5	21	25	-	>30
47.5-52.0	20.6	30	-	21
52.0-53.5	20.8	29	-	>30
53.5-60.5	20.8	15	-	>30

3. วิธีการทดสอบ

การทดสอบเสาเข็มนี้เป็นการทดสอบโดยให้แรงกระทำในแนวราบที่หัวเสาเข็มและปล่อยคืนทั้งหมด 10 รอบ (Cycles) โดยให้ตำแหน่งแรงกระทำอยู่ที่ระดับ 2.5 เมตร ลงมาจากหัวเสาเข็ม ในระหว่างการทดสอบได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัด ได้แก่ (1) Inclinator มีความยาวที่ปลายท่ออยู่ที่ความลึกระดับที่ -21 เมตร (2) Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG) โดยติดตั้งที่ความลึก -2, -4, -7, -11.5, -20.5, -25 และ -40 เมตร (3) Dial Gauge ที่หัวเสาเข็ม จำนวน 2 ตัว การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3

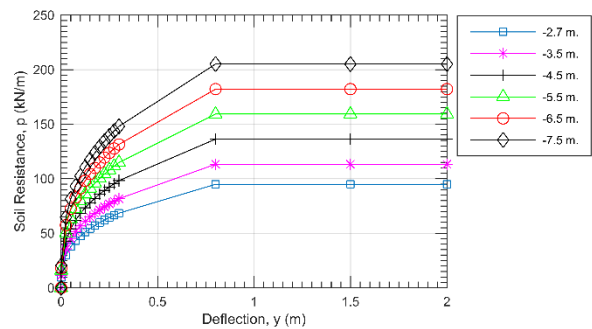


รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ Lateral Pile Load Test (จากข้อมูลรายงานผลการทดสอบ)

4. การวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ที่ได้ใช้โปรแกรม LPILE ช่วยในการสร้าง p-y Curves พารามิเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรม LPILE แสดงดังในตารางที่ 2 โดยอ้างอิงจากข้อมูลผลการเจาะสำรวจดิน พารามิเตอร์ดินที่ใช้ได้แก่ หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของดิน (Effective Unit Weight of Soil, γ') หน่วยแรงเฉือน (Undrained Shear Strength, S_u) มุมเสียดทานของดิน (Friction Angle, ϕ) ได้จากการประมาณค่าจาก SPT สำหรับค่าแนะนำจากโปรแกรม ได้แก่ ความเครียดที่ 50 % (Soil Strain Parameter, ε_{50}) และ Soil Modulus Parameter (k_{py}) การวิเคราะห์นี้เริ่มจากการสร้าง p-y Curve หรือความสัมพันธ์ระหว่าง Soil Resistance (p) กับ Deflection (y) ซึ่งค่า p และ y ได้จากการคำนวณตามวิธีของ Matlock โดยเฉพาะที่ความลึก 0 - 5 เมตร แสดงดังรูปที่ 4 สำหรับการสร้าง p-y Curve เริ่มต้น แต่ส่วนใหญ่แล้วผลจะไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากใน

สนาม จากนั้นจะทำการปรับค่า p ในโปรแกรม LPILE เพื่อให้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มมีความสอดคล้องกับผลทดสอบจริงในสนาม ดังนั้นค่า p ที่ได้นี้จะสามารถเป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบรับแรงในแนวด้านข้างต่อไป



รูปที่ 4 p-y Curve เริ่มต้น

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองในโปรแกรม LPILE

Soil Type (p-y Curve Model)	From (m)	To (m)	$\gamma^{[1]}$ (kN/m ³)	$S_u^{[2]}$ (kN/m ²)	$\varepsilon_{50}^{[3]}$	$k_{py}^{[4]}$ (kN/m ³)	$\phi^{[5]}$ (Degree)
User Input p-y Curves	0.20	5.0	7.54	-	-	-	-
Soft Clay (Matlock)	5.0	9.0	7.54	15.8	0.020	-	-
Soft Clay (Matlock)	9.0	16.0	6.82	33.87	0.020	-	-
Stiff Clay free water (Reese)	16.0	18.0	8.99	50	0.007	55000	-
Stiff Clay free water (Reese)	18.0	28.5	10.99	196.2	0.005	110000	-
Stiff Clay free water (Reese)	28.5	33.0	11.19	196.2	0.005	110000	-
Stiff Clay free water (Reese)	33.0	37.5	11.84	196.2	0.005	110000	-
Sand (Reese)	37.5	45.0	11.19	-	-	34000	35
Stiff Clay free water (Reese)	45.0	49.5	10.79	137.34	0.005	110000	-
Stiff Clay free water (Reese)	49.5	51.0	10.99	196.2	0.005	110000	-
Sand (Reese)	51.0	57.95	10.99	-	-	34000	35

1, 2 และ 5 ข้อมูลจาก Soil Profile

3 และ 4 ประมาณค่าจาก S_u [3]

คุณสมบัติของเสาเข็มในงานวิจัยนี้ดังตารางที่ 3 พารามิเตอร์สำหรับเสาเข็มเพื่อวิเคราะห์หน้าตัดสำหรับการสร้างความสัมพันธ์ของ Bending Moment กับ ความโค้ง (M-Phi Diagram) สามารถใช้โปรแกรม LPILE สร้างความสัมพันธ์นี้ได้โดยสามารถใส่ค่าพารามิเตอร์ของคอนกรีตและเหล็กเสริม ในส่วนของแบบจำลองของเสาเข็มผู้วิจัยทำการเลือกการวิเคราะห์แบบกำหนดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Bending Moment, M กับค่า Bending Stiffness, $E_p I_p$ ดังรูปที่ 5 เนื่องจากผู้วิจัยใช้วิธีตามสมการที่พัฒนาโดย Branson ได้รวมอยู่ใน American Concrete Institute [5] ภายใต้แรงกระทำช่วงแรก หน้าตัดเสาเข็มจะยังไม่เกิดการแตกร้าว

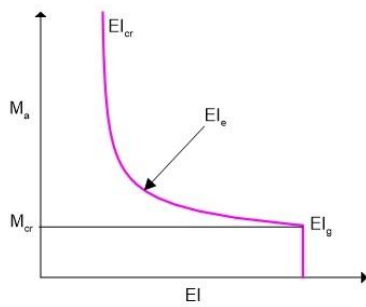
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์สำหรับเสาเข็ม

Pile Tip (m)	Area (m ²)	$I_p^{[1]}$ (m ⁴)	$E_p^{[2]}$ (kN/m ²)
45.0	1.6	0.11	2.8×10^7

$$1 \text{ Moment of Inertial, } I_p = \frac{bh^3}{12} + (2n-1)A_{s_i}d_i^2 \quad [4]$$

$$2 \text{ Modulus of Concrete, } E_c = 151000\sqrt{f_c'} \quad [3]$$

(Uncracked section) แต่เมื่อแรงกระทำมากขึ้นเสาเข็มจะเกิดการแตกร้าว (Cracked Section) เหล็กเสริมในเสาเข็มจะเริ่มต้านแรงกระทำ ในสภาพเป็นจริงโมเมนต์ความเค้นเฉื่อยไม่พิจารณาเหล็กเสริม (I_g) นั้นไม่ได้เปลี่ยนไปเป็นโมเมนต์ความเค้นเฉื่อยแตกร้าว (I_{cr}) ที่เดียวแต่จะค่อยๆ เปลี่ยนไปอย่างค่อยเป็นค่อยไปดังรูปที่ 5 สามารถใช้สมการที่ 1 เพื่อหาโมเมนต์ความเค้นเฉื่อยประสิทธิภาพ (I_e) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความแกร่งเมื่อโมเมนต์ที่มากกระทำ (M_a) น้อยกว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดการแตกร้าว (M_{cr}) ค่า I_e จะเท่ากับ I_p เมื่อโมเมนต์ที่มากกระทำ M_a อยู่ในช่วงระหว่างโมเมนต์ที่เกิดการแตกร้าว (M_{cr}) กับโมเมนต์ดัดประลัย (M_u) โมเมนต์ความเค้นเฉื่อยประสิทธิภาพหาได้จากสมการที่ 1 และโมเมนต์ดัดที่เกิดการแตกร้าว (M_{cr}) หาได้จากสมการที่ 2



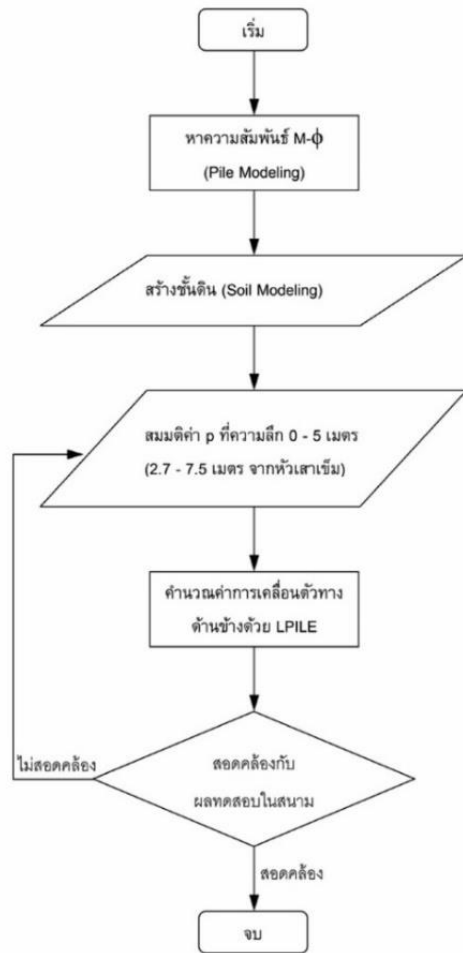
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ค่า EI ตามโมเมนต์ดัด

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (1)$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_c} \quad (2)$$

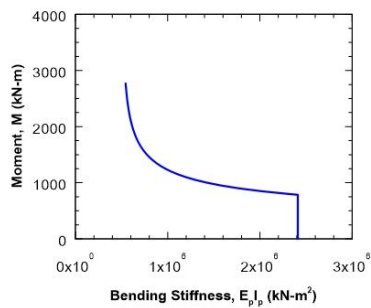
เมื่อ I_{cr} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยแตกร้าว
 I_e คือ โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล
 I_g คือ โมเมนต์ความเฉื่อยไม่พิจารณาเหล็กเสริม
 M_a คือ โมเมนต์ดัดที่กระทำ
 M_{cr} คือ โมเมนต์ดัดที่เกิดการแตกร้าว
 f_r คือ โมดูลัสการแตกหักของคอนกรีต
 y_c คือ ระยะจากจุด C.G. ถึงขอบด้านบนหน้าตัดไม่พิจารณาเหล็กเสริม

โดยสมมติให้ค่า E_c มีค่าคงที่ ขั้นตอนการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 6 โดยเริ่มจากสร้างชั้นดินในโปรแกรมและสร้าง Parameter สำหรับเสาเข็มเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Bending Moment กับ $E_p I_p$ และทำการนำเข้าสู่โปรแกรมสำหรับ p-y Curve เริ่มต้นใช้ตามวิธีของ Matlock [2] จากนั้นทำการปรับค่า p จนค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากการประมวลผลจากโปรแกรมให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบ



รูปที่ 6 ขั้นตอนการวิเคราะห์

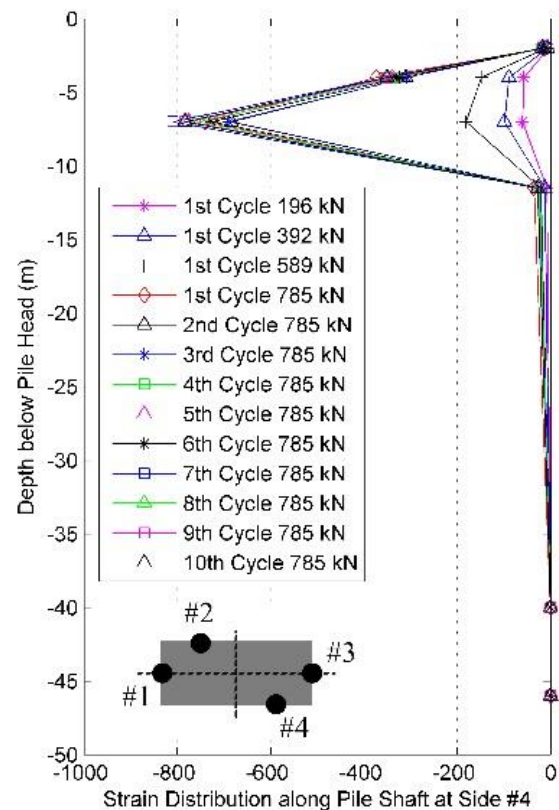
สำหรับการวิเคราะห์สภาพหน้าตัดร้าวโดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความโค้ง (M-Phi Diagram) ซึ่งได้จากโปรแกรม LPILE ผู้วิจัยได้เลือกขนาดและจำนวนเหล็กเสริมที่ความลึก 1-12 เมตร ที่มีจำนวนเหล็กเสริมเท่ากับ 28-DB32 (ปริมาณเหล็กเสริม 1.4 %) มาทำการวิเคราะห์ เนื่องจากว่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นมีผลกระทบตั้งแต่ความลึกประมาณ 0-15 เมตร



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแกร่งกับโมเมนต์

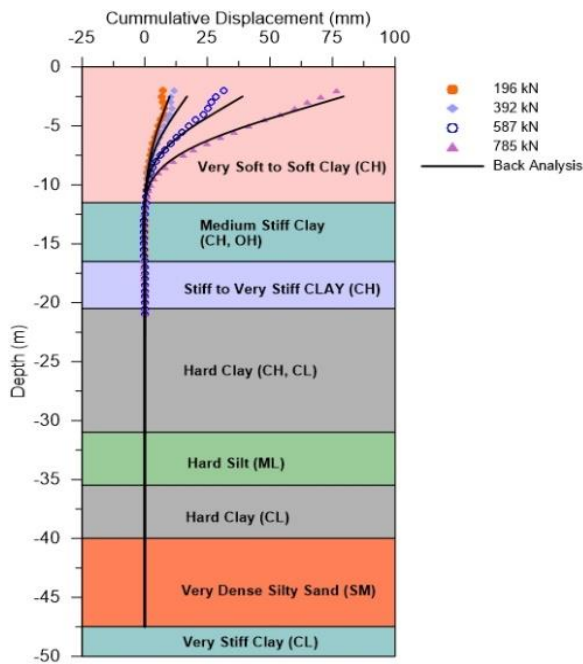
5. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

ค่า Strain ที่วัดได้ จาก VSWG No.4 ที่ความลึก 7 เมตร มีการเปลี่ยนแปลงค่า Strain ของเสาเข็มมากที่สุดสังเกตได้จากข้อมูลผลการทดสอบดังรูปที่ 8 ซึ่งสอดคล้องกับค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มรูปที่ 9 ที่ตำแหน่ง 7 เมตร เป็นจุดหมุนของเสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้าง



รูปที่ 8 ค่า Strain ที่วัดได้จาก VSWG วัดระหว่างทำการทดสอบ

ตั้งแต่ความลึกประมาณ 12 เมตร มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในช่วงชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง ช่วงความลึกที่ประมาณ 40 - 45 เมตร มีผลแสดงถึงการไม่เคลื่อนตัวของเสาเข็ม ผลการเคลื่อนตัวในสนามเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ห้กลับใน Cycle ที่ 1 ดังรูปที่ 9



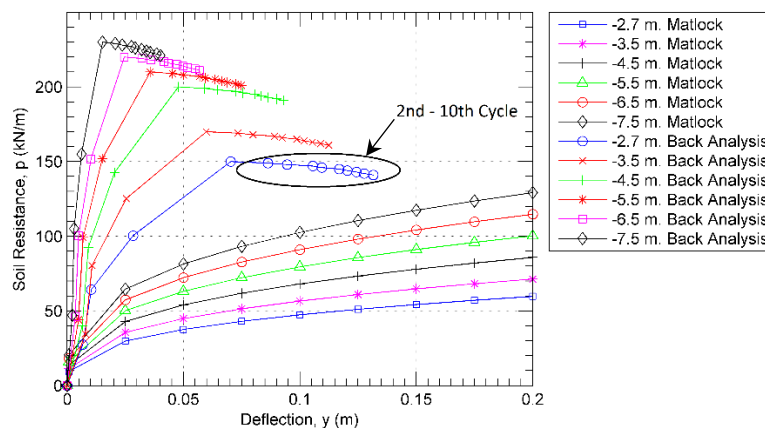
รูปที่ 9 ตัวอย่างการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง Cycle ที่ 1

ผลจากการให้แรงกระทำซ้ำทำให้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเพิ่มขึ้นที่ความลึกเดียวกัน ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นตามจำนวน Cycle ของการให้แรงกระทำซ้ำนั้นส่งผลให้ค่า Soil Resistance, p นั้นลดลงดังรูปที่ 10 ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้น p - y Curve ที่ได้จากการวิเคราะห์กลับดังรูปที่ 10

6. อภิปรายผลและสรุปผล

ค่า p สูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์กลับด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสนามโดยพิจารณาที่ค่า Deflection เดียวกันพบว่าค่า p สูงกว่าวิธี Matlock ประมาณ 3-5 เท่า โดยความแตกต่างนี้เพิ่มขึ้นตามความลึกของชั้นดิน

หลังจากที่มีแรงกระทำซ้ำที่ 785 kN รอบที่ 2 ถึงรอบที่ 10 ค่า p มีแนวโน้มตกลงมาใกล้กับเส้นของ Matlock อันเนื่องมาจากค่า Deflection สูงขึ้นในขณะที่แรงคงเดิมซึ่งทำให้ค่า Stiffness ของดินมีค่าลดลงไปด้วย



รูปที่ 10 เปรียบเทียบ p - y Curve ระหว่างทฤษฎีของ Matlock และวิธีวิเคราะห์กลับด้วยข้อมูลทดสอบในสนาม

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) โครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว (ส่วนต่อขยายบางรี-สมุทรปราการ) ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับงานวิจัยนี้และขอขอบพระคุณคุณทินกร โรจนธรา วิศวกรที่ปรึกษา บริษัท เอ็ม เอ

เอ คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ให้คำแนะนำแนวทางในการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Federal Highway Administration, "Chapter 8: Analyses of the lateral load tests at the route 351 bridge", <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/04043/08.cfm>, 2012.

- [2] H. Matlock, "Correlation for design of laterally loaded pile in soft clay", Proceeding of the II Annual Offshore Technology Conference, Houston Texas, vol. 1, paper no. OTC 1204, pp. 577-594, 1970.
- [3] L. C. Reese and W. V. Impe, "Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading", 2nd ed. Leiden: CRC Press, 2011.
- [4] อมร พิมานมาศ ปรีดา ไชยมหาวัน และ ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด, "การออกแบบโครงสร้างฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กชั้นสูง" กรุงเทพฯ: บริษัท ซีวิล เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์แอนด์ เทรนนิ่ง จำกัด, 2555.
- [5] American Concrete Institute, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05)", U.S.A. Farmington Hills, 2005.



Somkiat Thipsumontha is a master student in the department of Civil Engineering, Mahanakorn University of Technology.



laboratory and in-situ test.

Wilailak Sramoon is a lecturer in the department of Civil Engineering, Mahanakorn University of Technology. She received the B.Eng. (Civil Engineering) from Chiang Mai University, Thailand in 1994, M.Eng. (Geotechnical Engineering) from Asian Institute of Technology, Thailand in 1997, and Ph.D. (Civil Engineering) from Nagaoka University of Technology, Japan in 2003. Her research interests is soil testing technique for both



Chanchai Submaneewong received his B. Eng (honour) from KMUTT in 1997, M. Eng. and Ph. D. in Civil Engineering from Chulalongkorn University in 2000 and 2010, respectively. He is a Senior Geotechnical Professional Engineer (วช.) with over 18 years professional engineering experience in geotechnical design for major underground civil structures. He is experienced in the design of soil improvement, slope protection, shallow, pile foundations and retaining structures (Diaphragm Wall and Sheet pile) on public transportation, industrial, commercial, and residential development projects. Dr Chanchai is a member of the Engineering Institute of Thailand committees for Geotechnical and Tunnelling and a guest lecture in geotechnical engineering at several Thailand Universities.