

## การเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตอกในบริเวณชั้นดินกรุงเทพ Pile Set-up in Bangkok Subsoil

พิสิทธิ์ ชันดีวัฒนกุล

มหาวิทยาลัยรังสิต 13000

E-mail: drpisitk@yahoo.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิจัยเรื่องการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพโดยใช้การทดสอบ Dynamic pile load test เพื่อหาลำดับของเสาเข็มที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากตอกเสาเข็ม และยืนยันความแม่นยำของผลการทดสอบด้วย Static pile load test พื้นที่ศึกษามีสองพื้นที่อยู่ในจังหวัดสมุทรปราการและนนทบุรี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลาของพื้นที่ทั้งสองค่อนข้างแตกต่างกันมากในพื้นที่สมุทรปราการหลังจากตอกเสาเข็มหนึ่งเดือนกำลังเพิ่มขึ้น 3.5 ถึง 4.2 เท่า ในขณะที่ผลการทดสอบที่พื้นที่นนทบุรีพบว่าค่าการเพิ่มขึ้นมีเพียงประมาณ 1.6 ถึง 1.7 เท่า นอกจากนี้การศึกษานี้พบว่าสมการที่แนะนำโดย Guang-Yu (1988) และ Svinkin (1996) ไม่สามารถทำนายผลการทดลองของการวิจัยนี้ได้อย่างถูกต้องครบถ้วน การศึกษานี้ยังพบว่าผลการทดสอบ Static และ Dynamic pile load test มีความสอดคล้องกัน

**คำสำคัญ:** การเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลาของเสาเข็ม, ชั้นดินกรุงเทพ, การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์, การทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตย์ศาสตร์

### Abstract

This paper presents results of a research on set-up of piles driven in Bangkok sub soil conditions. In this study, the Dynamic pile load tests were carried out at various times after driving. The study also included the Static pile load tests to confirm the results obtained from the Dynamic pile load tests. The study covers two sites, one in Samutprakarn province (east of Bangkok), the other in Nonthaburi province (north-west of Bangkok). The results of the tests show that behaviors of pile set-up of the two sites are quite difference. In Samutprakarn site, strength of pile at one month increased by 3.5 to 4.2 times that of the initial strength at driving, while at Nothaburi site, the increase was only about 1.6 to 1.7 times. The study also found that the equations proposed by Guang-Yu (1988) and Svinkin (1996) cannot predict pile set-up in these two sites. The results of Static pile load tests confirmed the validity of the Dynamic pile load tests.

**Keywords:** pile set-up, Bangkok sub soil, dynamic pile load test, static pile load test

## 1. ที่มาและความสำคัญ

การเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลา (Pile set-up) ของเสาเข็มตอกเป็นประเด็นสำคัญประเด็นหนึ่งในการควบคุมกระบวนการตอกเสาเข็มให้ได้กำลังที่สามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัยและประหยัด ขั้นตอนการกำหนดความยาวของเสาเข็มโดยทั่วไปจะเริ่มจากการคำนวณความยาวของเสาเข็มจากข้อมูลสำรวจดินโดยใช้ Static formula หลังจากนั้นจะต้องมีการยืนยันความถูกต้องของความยาวเสาเข็มที่คำนวณได้ โดยขั้นตอนการยืนยันกำลังของเสาเข็มมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดและความสำคัญของโครงการ ในกรณีที่เป็นโครงการขนาดเล็กโดยทั่วไปจะใช้วิธีการนับ Blow count ด้วยสูตรตอกเสาเข็มที่เหมาะสมเป็นเครื่องมือยืนยันกำลัง แต่หากเป็นโครงการขนาดใหญ่หรือโครงการที่มีความสำคัญ โดยทั่วไปจะใช้การทดสอบเสาเข็มในสนามเป็นการยืนยันความยาวของเสาเข็มด้วย วิธีที่ให้ผลที่แม่นยำที่สุดในการยืนยันกำลังของเสาเข็มคือการทำ Static pile load test แต่วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและต้องใช้เวลา ซึ่งในทางปฏิบัติมีการใช้ Dynamic pile load test เป็นทางเลือกที่ประหยัดและรวดเร็วกว่า ในโครงการที่เร่งด่วนอาจทำ Dynamic pile load test ขณะที่ตอกเสาเข็ม (Initial Strike) ซึ่งจะให้กำลังของเสาเข็มขณะตอกซึ่งจะต่ำกว่ากำลังระยะยาวที่เสาเข็มถูกใช้งานมาก ในการประมาณกำลังขณะใช้งานจากกำลังที่ทดสอบได้ขณะตอกเสาเข็มจำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลา ซึ่งมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางดังสรุปในรายงานของ Ng (2011) และ Komurka et. al. (2003) ในรายงานดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่างเช่น ชนิดของดิน ชนิดของเสาเข็ม และขนาดของเสาเข็ม ผลการศึกษายังหาข้อสรุปที่ชัดเจนยังไม่ได้ กอปรการศึกษาเรื่องนี้สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯยังมีจำกัด จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้

## 2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นตามเวลาของกำลังของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยการใช้การทดสอบ Dynamic pile load test ที่เวลาต่างๆ และเพื่อตรวจว่าผลการทดสอบ Dynamic pile load test ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบแบบ Static pile load test หรือไม่

## 3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเพิ่มขึ้นตามเวลาของกำลังของเสาเข็มตอกมีสาเหตุหลักๆอยู่ 2 สาเหตุคือ 1) จากการอัดตัวคายน้ำของดินรอบๆเสาเข็มซึ่งถูกเสาเข็มดันออกขณะตอกเสาเข็ม และ 2) การเพิ่มขึ้นของกำลังของดินรอบเสาเข็มจากกระบวนการ Thixotropy และ Aging (Komurka et. al., 2003) กระบวนการ Thixotropy (Mitchell, 1976) คือกระบวนการคืนกำลังของดินที่ถูกรบกวน ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นทันทีหลังการตอกเสาเข็ม ส่วนกระบวนการ Aging น่าจะเกิดขึ้นในระยะยาวหลังการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดแล้ว

Svinkin (1996) พบว่ากราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตามเวลาจะอยู่ในช่วงสมการที่ 1 และ 2

$$Q_t = 1.4Q_{EOD}t^{0.1} \quad , \text{ ค่าสูงสุด} \quad (1)$$

$$Q_t = 1.025Q_{EOD}t^{0.1} \quad , \text{ ค่าต่ำสุด} \quad (2)$$

เมื่อ  $Q_t$  คือกำลังของเสาเข็มที่เวลา  $t$  ใดๆ (หน่วยเป็นวัน)และ  $Q_{EOD}$ คือกำลังของเสาเข็มหลังตอก

Guang-Yu (1988) พบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มขึ้นอยู่กับค่า Sensitivity,  $S_t$  ของดิน โดยค่ากำลังของเสาเข็มที่ 14 วัน  $Q_{14}$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$Q_{14} = (0.375S_t + 1)Q_{EOD} \quad (3)$$

#### 4. วิธีดำเนินการวิจัย

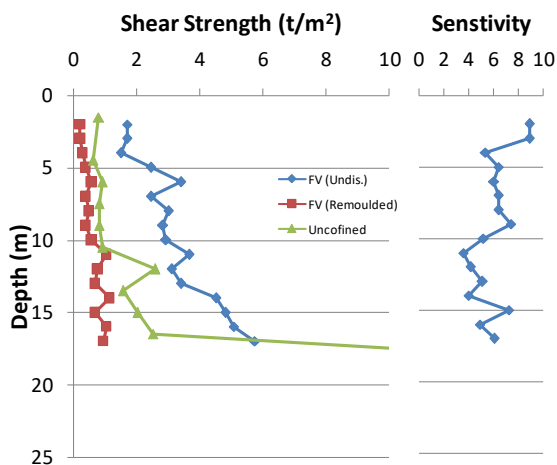
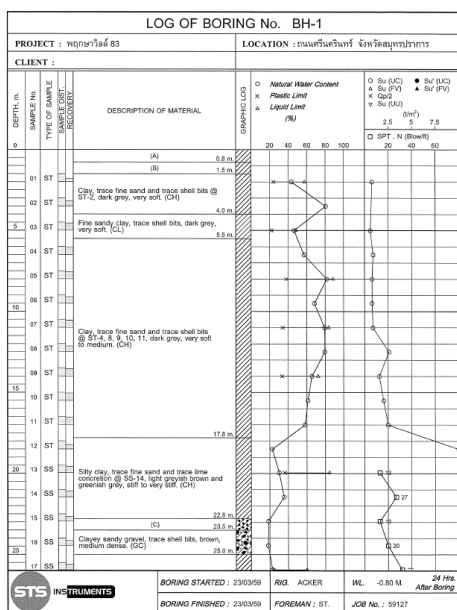
การศึกษานี้ประกอบด้วย การทดสอบ Dynamic pile load test ขณะตอกเสาเข็ม (Initial strike) การทดสอบ Dynamic pile load test หลังจากทิ้งเสาเข็มไว้ 1 เดือน (Restrike) และการทดสอบ Static pile load test ของเสาเข็มหลังจากทดสอบ Restrike 1 เดือน เพื่อยืนยันกำลังที่ได้จาก Dynamic pile load test โดยการศึกษารอบคลุมพื้นที่สองจุดคือที่จังหวัดสมุทรปราการ และ ที่จังหวัดนนทบุรี จำนวนการทดสอบหลักของแต่ละพื้นที่แสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการยังมีการทดสอบเสริมด้วยการทดสอบ Dynamic pile load test แบบ Restrike ที่ 1 วัน และที่ 6 วัน จำนวน 3 สามต้น

ตารางที่ 1 จำนวนการทดสอบหลัก

Initial Dynamic Pile Load Test	Restrike Dynamic Pile Load Test at 30 Days	Static Pile Load Test
3	3	1

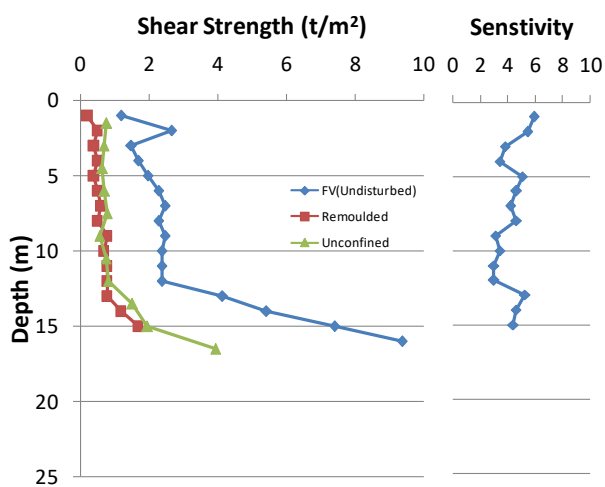
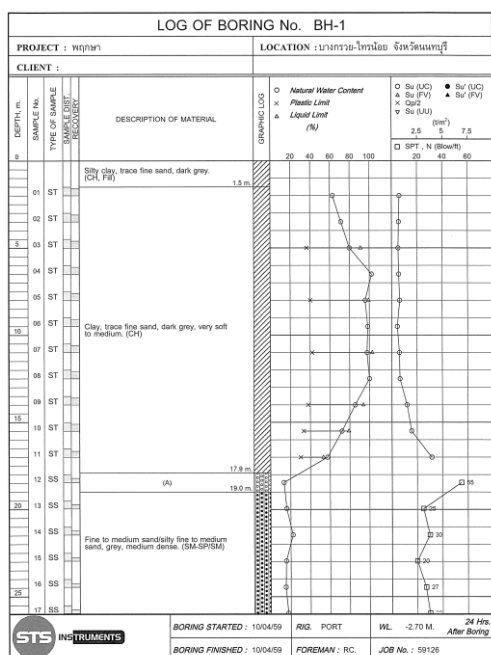
ก่อนการทดสอบเสาเข็มแต่ละพื้นที่ ได้ทำการสำรวจข้อมูลดินตรงตำแหน่งที่ทดสอบ การทดสอบในแต่ละพื้นที่ประกอบด้วย การเจาะสำรวจดิน 1 หลุม และ การทดสอบ Field vane shear 1 หลุม โดยทำการทดสอบแบบ Undisturbed และ Remoulded เพื่อหาค่า Sensitivity ของดิน ตัวอย่างที่เก็บจากหลุมเจาะสำรวจได้นำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบ Unconfined compression test และการทดสอบ Atterberg's limits

ผลการเจาะสำรวจดินและผลการทดสอบ Field vane shear test ของพื้นที่สมุทรปราการ แสดงในรูปที่ 1 ชั้นดินของพื้นที่นี้ประกอบด้วยชั้นดินถมหนาประมาณ 1.5 เมตร ได้ชั้นดินถมเป็นดินเหนียวอ่อนจนถึงความลึกประมาณ 17.5 เมตร หลังจากนั้นเป็นดินเหนียวแข็งจนถึงความลึกประมาณ 22.5 เมตร ได้ดินเหนียวแข็งเป็นชั้นทรายแน่นปานกลางหนาประมาณ 2 เมตรซึ่งรองรับด้วยชั้นดินเหนียวแข็งไปจนถึงระดับก้นหลุมเจาะที่ประมาณ 30 เมตร ชั้นทรายที่ปรากฏน่าจะเป็น Sand lenses เนื่องจากขอมูลจากหลุมเจาะสำรวจดินอื่นที่อยู่ใกล้เคียงอีกสองหลุมไม่พบชั้นทราย ผลการทดสอบ Field vane shear แสดงให้เห็นว่าดินบริเวณนี้ Sensitivity ของดินเหนียวอ่อนมีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงประมาณ 4-9 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 6.0



รูปที่ 1 ข้อมูลดินพื้นที่สมุทรปราการ

ส่วนผลการเจาะสำรวจดินและผลการทดสอบ Field vane shear test ของพื้นที่นนทบุรีแสดงในรูปที่ 2 ชั้นดินของพื้นที่นี้ประกอบด้วยชั้นดินถมหนาประมาณ 1.5 เมตรเช่นกัน และได้ชั้นดินถมเป็นดินเหนียวอ่อนจนถึงความลึกประมาณ -18 เมตร หลังจากนั้นเป็นชั้นทรายแน่นถึงแน่นปานกลาง ไปจนถึงระดับก้นหลุมเจาะที่ประมาณ -30 เมตร ผลการทดสอบ Field vane shear แสดงให้เห็นว่าดินบริเวณนี้ Sensitivity ของดินเหนียวอ่อนมีค่าต่ำกว่าของพื้นที่สมุทรปราการ โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 3-6 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4.3



รูปที่ 2 ข้อมูลดินพื้นที่นนทบุรี

เสาเข็มที่ใช้ทดสอบเป็นเสาเข็มไอ22 หน้าตัด มอก. ปลายของเสาเข็มทดสอบในพื้นที่สมุทรปราการและพื้นที่นนทบุรีอยู่ที่ประมาณ -24 และ -20 เมตรตามลำดับ

## 5. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบ Dynamic pile load test ของพื้นที่สมุทรปราการและพื้นที่นนทบุรีแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยในตารางแสดงค่าแรงเสียดทาน กำลังที่ปลายเสาเข็ม และกำลังรวม ที่ได้จากการทดสอบ Dynamic pile load test ในตารางยังแสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มในรูปของอัตราส่วนของกำลังที่ได้จากการทดสอบแบบ Restrike ที่เวลาต่างๆ เทียบกับแบบ Initial จะเห็นว่าที่ผลการทดสอบที่พื้นที่สมุทรปราการและนนทบุรีค่อนข้างแตกต่างกัน ผลการทดสอบที่พื้นที่สมุทรปราการแสดงว่าค่ากำลังของเสาเข็มที่ 1 เดือน เพิ่มขึ้นจากค่าขณะตอกเสาเข็ม 3.5 ถึง 4.2 เท่า ในขณะที่ผลการทดสอบที่พื้นที่นนทบุรีพบว่าค่าการเพิ่มขึ้นมีเพียงประมาณ 1.6 ถึง 1.7 เท่า เป็นที่น่าสังเกตว่ากำลังขณะตอกเสาเข็มของพื้นที่สมุทรปราการมีค่าอยู่ในช่วง 22-27 ตัน โดยเป็นค่าแรงเสียดทานประมาณ 15-20 ตันและกำลังที่ปลายเสาเข็มประมาณ 7 ตัน ในขณะที่ของพื้นที่นนทบุรีกำลังขณะตอกที่มีค่าอยู่ในช่วง 51-55 ตันโดยเป็นค่าแรงเสียดทานประมาณ 34-38 ตันและกำลังที่ปลายเสาเข็มประมาณ 17 ตัน

ถึงแม้ว่าผลการทดสอบในทั้งสองพื้นที่มีลักษณะคล้ายกันในแง่ที่การเพิ่มขึ้นตามเวลาของแรงเสียดทานของเสาเข็มมีค่าสูงกว่าของแรงต้านที่ปลายเสาเข็มแต่สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังที่ปลายเสาเข็มแตกต่างกันมาก ในขณะที่แรงเสียดทานของพื้นที่สมุทรปราการที่ 1 เดือน เพิ่มขึ้นถึง 4.0-5.3 เท่า ในขณะที่แรงต้านที่ปลายเสาเข็มเพิ่มขึ้นเพียง 1.9-2.6 เท่า ส่วนในพื้นที่นนทบุรีแรงเสียดทานที่ 1 เดือน เพิ่มขึ้นประมาณ 1.8 เท่า ในขณะที่แรงต้านที่ปลายเสาเข็มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (1.0-1.2 เท่า)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ Dynamic pile load test พื้นที่สมุทรปราการ

เสาเข็ม หมายเลข	ระยะเวลา วัน	กำลังจากผลการทดสอบ			อัตราส่วนกำลัง Restrike / Initial		
		Friction	End Bearing	Total	Friction	End Bearing	Total
S1	0	15.0	6.7	21.7	1.00	1.00	1.00
	31	78.9	12.8	91.7	5.26	1.91	4.23
S2	0	20.0	7.2	27.2	1.00	1.00	1.00
	31	89.1	19.0	108.1	4.46	2.64	3.97
S3	0	19.9	7.1	27.0	1.00	1.00	1.00
	31	80.4	13.4	93.8	4.04	1.89	3.47
S4	1	24.1	9.0	33.1	1.32	1.29	1.31
	6	39.8	10.9	50.7	2.17	1.56	2.00
S5	1	25.1	10.9	36.0	1.37	1.56	1.42
	6	48.5	11.8	60.3	2.65	1.69	2.38
S6	1	23.8	14.5	38.3	1.30	2.07	1.51
	6	45.0	12.7	57.7	2.46	1.81	2.28

หมายเหตุ: เนื่องจากการทดสอบเสาเข็มหมายเลข S4 ถึง S6 ไม่มีการทดสอบแบบ Initial จึงใช้ค่า Initial จากค่าเฉลี่ยของเสาเข็มหมายเลข S1 ถึง S3 ในการคำนวณอัตราส่วน

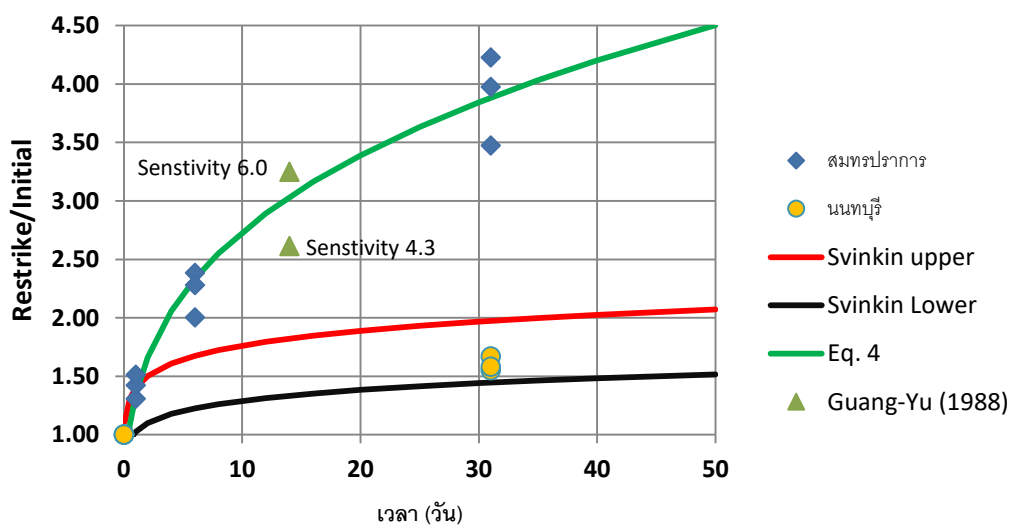
### ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ Dynamic pile load test พื้นที่นนทบุรี

เสาเข็ม หมายเลข	ระยะเวลา วัน	กำลังจากผลการทดสอบ			Restrike / Initial Ratio		
		Friction	End Bearing	Total	Friction	End Bearing	Total
N1	0	33.9	16.6	50.5	1.00	1.00	1.00
	31	60.3	18	78.3	1.78	1.08	1.55
N2	0	37.8	17	54.8	1.00	1.00	1.00
	31	70.3	21.1	91.4	1.86	1.24	1.67
N3	0	34.1	16.7	50.8	1.00	1.00	1.00
	31	62.3	18	80.3	1.83	1.08	1.58

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน Restrike/Initial กับเวลา ของทั้งสองพื้นที่ แสดงในรูปที่ 3 พร้อมกับค่าแนวโน้มสูงสุดและต่ำสุดที่เสนอโดย Svinkin (1996) (สมการที่ 1 และ 2) จะเห็นว่าสำหรับพื้นที่นนทบุรีค่ากำลังของเสาเข็มที่ 1 เดือน เพิ่มขึ้นจากค่าขณะตอกใกล้เคียงกับค่าแนวโน้มต่ำสุดเสนอโดย Svinkin ในขณะที่ผลการทดสอบที่พื้นที่สมุทรปราการให้ค่าสูงกว่าค่าแนวโน้มสูงสุดที่เสนอโดย Svinkin มาก ในเบื้องต้นผู้วิจัยพบว่าเมื่อปรับสมการของ Svinkin ตามสมการที่ 4 ผลการทำนายค่าการเพิ่มขึ้นของกำลังมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลทดสอบที่สมุทรปราการ อย่างไรก็ตามเนื่องจากจำนวนการทดสอบมีจำกัด ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

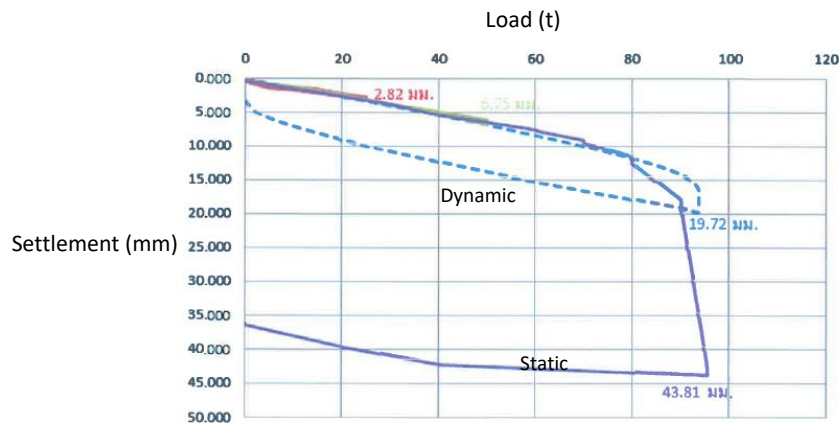
$$Q_t = 0.5Q_{EOD}t^{0.3} \quad (4)$$

ในรูปที่ 3 ยังแสดงค่าการเพิ่มขึ้นของกำลังที่ 14 วันที่เสนอโดย Guang-Yu (1988) (สมการที่ 3) โดยใช้ค่า Sensitivity ของดิน โดยในพื้นที่สมุทรปราการและนนทบุรีมีค่าเท่ากับ 6.0 และ 4.3 ตามลำดับ จะเห็นว่าสำหรับพื้นที่สมุทรปราการสมการที่เสนอโดย Guang-Yu ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบ ส่วนที่พื้นที่นนทบุรีสมการให้ค่าที่สูงกว่าผลทดสอบมาก

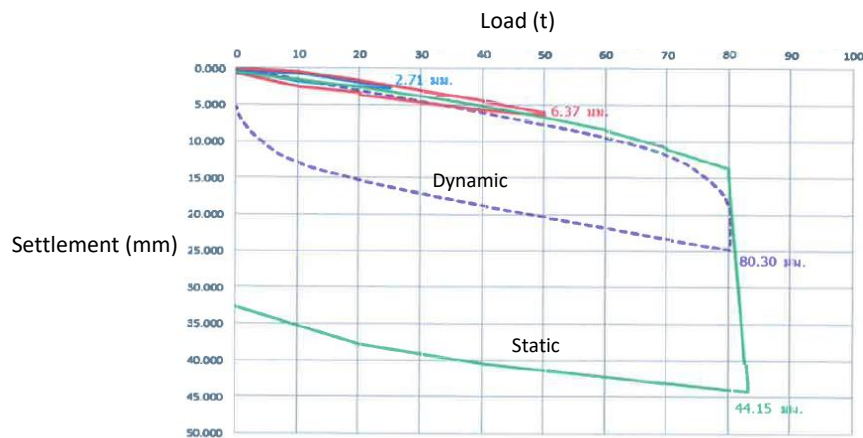


รูปที่ 3 กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังตามเวลา

เพื่อยืนยันความแม่นยำของผลการทดสอบ Dynamic pile load test การศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการทดสอบ Static pile load test ของเสาเข็มหมายเลข S3 ของพื้นที่สมุทรปราการ และ N3 ของพื้นที่นนทบุรี ที่ระยะเวลา 2 เดือนหลังจากตอกเสาเข็ม หรือ 1 เดือนหลังจากทดสอบ Restrike เพื่อให้กำลังที่อาจสูญเสียจากตอกเสาเข็มขณะทดสอบแบบ Restrike พื้นคืนกลับมา รูปที่ 4 และ 5 เปรียบเทียบกราฟ Load-Settlement จากผลการทดสอบ Dynamic pile load test กับ Static pile load test ของพื้นที่สมุทรปราการและนนทบุรีตามลำดับ จะเห็นว่าผลการทดสอบทั้งสองชนิดให้ค่าใกล้เคียงกันทั้งพื้นที่สมุทรปราการและนนทบุรี ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าผลการทดสอบ Dynamic pile load test มีความแม่นยำเพียงพอ



รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการทดสอบแบบ Dynamic และ Static ของพื้นที่สมุทรปราการ



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการทดสอบแบบ Dynamic และ Static ของพื้นที่นนทบุรี



## 6. สรุป

ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของกำลังของเสาเข็มตอกในแต่ละพื้นที่ของกรุงเทพมหานครมีความแตกต่างกันมาก
- 2) สมการที่แนะนำโดย Guang-Yu (1988) และ Svinkin (1996) ไม่สามารถทำนายผลการทดลองของการวิจัยนี้ได้อย่างถูกต้องครบถ้วน และ
- 3) ผลการทดสอบ Static และ Dynamic pile load test มีความสอดคล้องกัน

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณบริษัทพุกาษา เรียลเอสเตท จำกัด (มหาชน) ที่กรุณาให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยฉบับนี้

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Guang-Yu, Z. (1988). "Wave Equation Applications for Piles in Soft Ground," Proc., 3rd International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles (B. H. Fellenius, ed.), Ottawa, Ontario, Canada, pp. 831-836.
- [2] Komurka, V. E., Wagner, A. B., and Edil, T. B. (2003). Estimating Soil/Pile Set-Up. Final Report Submitted to the Wisconsin Department of Transportation, September, Wisconsin Highway Research Program #0092-00-14, 55 pp.
- [3] Mitchell, James K. (1976). Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., pp. 1-210.
- [4] Skov, R., and Denver, H. (1988). "Time-Dependence of Bearing Capacity of Piles." Proceedings of 3rd International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, B. H. Fellenius, ed., Ottawa, Ontario, Canada, pp.879-888.
- [5] Svinkin, Mark R. (1996) "Setup and Relaxation in Glacial Sand – Discussion." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122(4), pp. 319-321.