



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินความแม่นยำของค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์  
Evaluation of accuracy of pile capacity by static method

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิคม

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561  
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 256109A1080031

สัญญาเลขที่ 221/2561

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินความแม่นยำของค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์

Evaluation of accuracy of pile capacity by static method

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม 2561

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 221/2561

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความแม่นยำและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์และผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธีการทดสอบ Static pile load test โดยเลือกใช้วิธี Meyerhof, Vesic, และ Janbu สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ปลายเสาเข็ม และใช้วิธี  $\lambda$ ,  $\alpha$ , และ  $\beta$  ในดินเหนียว และวิธี Meyerhof ในดินทราย สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ผิวของเสาเข็ม สำหรับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามจะถูกวิเคราะห์โดยวิธีของ Mazurkiewicz และ Chin จากผลการวิจัยพบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่วิเคราะห์โดยวิธี Chin มีค่ามากกว่าวิเคราะห์โดยวิธี Mazurkiewicz (1972) ประมาณ 1.39 เท่า และ 1.60 เท่า สำหรับกรณีเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะตามลำดับ ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ที่คำนวณแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยวิธีต่างๆ เมื่อนำมารวมกับผลการคำนวณหาแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มโดยวิธี Vesic มีค่าใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธี Mazurkiewicz มากที่สุด ส่วนวิธีของ Meyerhof ให้การประมาณค่าต่ำกว่าประมาณ 0.8 เท่า สำหรับเสาเข็มตอก และ 0.68 เท่า สำหรับเสาเข็มเจาะ แต่การคำนวณหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีของ Janbu ให้การประมาณค่าสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงประมาณ 1.12 เท่า สำหรับเสาเข็มตอก และ 1.25 เท่า สำหรับเสาเข็มเจาะ

คำสำคัญ: เสาเข็ม, กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม, วิธีสถิตยศาสตร์, การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนาม

## Abstract

The objective of this research is to evaluate accuracy and compare the different of ultimate pile capacities obtained from static formulas and static pile load test. The formulas proposed by Meyerhof, Vesic, and Janbu were used for calculating end bearing capacities. The  $\lambda$ ,  $\alpha$ , and  $\beta$  methods and Meyerhof method were used for calculating skin frictional capacities for clay and sand, respectively. For static pile load tests, the ultimate load capacities were analyzed by using Mazurkiewicz and Chin methods. The results showed that ultimate load capacities analyzed from Chin method were higher than Meyerhof method 1.39 times and 1.60 times for driven pile and bored pile, respectively. The ratios of the sum of skin frictional capacities calculated from various formulas and end bearing capacities calculated from Vesic method were almost similar to static pile load tests analyzed by Mazurkiewicz method. Ultimate load capacities analyzed from Meyerhof method were lower than static pile load tests 0.8 times and 0.68 times for driven pile and bored pile, respectively. However, ultimate load capacities analyzed from Janbu method were higher than static pile load tests 1.12 times and 1.25 times for driven pile and bored pile, respectively.

Keywords: pile, ultimate pile capacity, static method, pile load test

## สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ

บทคัดย่อ

สารบัญ

### บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1/1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1/3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1/3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1/4

### บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เสาค้ำ	2/1
2.2 ประเภทของเสาค้ำ	2/1
2.2.1 เสาค้ำตอก	2/1
2.2.2 เสาค้ำเจาะแห้ง	2/2
2.3 แรงต้านทานของเสาค้ำ (Load capacity of pile)	2/2
2.3.1 เสาค้ำรับแรงแบกทานส่วนปลาย (End bearing pile)	2/2
2.3.2 เสาค้ำเสียดทาน (Skin friction pile)	2/3
2.4 กลไกการรับน้ำหนักของเสาค้ำ (Load transfer mechanism)	2/3
2.5 การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงของเสาค้ำ (Pile capacity estimation)	2/4
2.5.1 การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงของเสาค้ำโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (Statics method)	2/4
2.5.2 การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงของเสาค้ำโดยวิธี Pile load test	2/9
2.6 การทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)	2/13
2.6.1 การประเมินหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจากผลการทดสอบ SPT	2/15
2.6.2 การประเมินหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทรายจากผลการทดสอบ SPT	2/15

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	3/1
3.2 รายละเอียดของโครงการที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์	3/3
3.2.1 โครงการก่อสร้างในจังหวัดระยอง	3/3
3.2.2 โครงการก่อสร้างในจังหวัดกรุงเทพมหานคร	3/8

<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ</b>	
4.1	ผลการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธี Static pile load test	4/1
4.2	ผลการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธีสถิตยศาสตร์	4/5
4.2.1	ผลการคำนวณหาค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม	4/5
4.2.2	ผลการคำนวณหาค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม	4/9
4.3	ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Mazurkiewicz และวิธีสถิตยศาสตร์	4/14
4.4	ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Chin และวิธีสถิตยศาสตร์	4/18
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการวิจัย</b>	
5.1	สรุปผลการวิจัย	5/1
	ผลงานตีพิมพ์	
	รายงานการเงิน	
	บรรณานุกรม	
	ประวัตินักวิจัย	

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่า $I_r$ ของดินแต่ละชนิด	2/6
ตารางที่ 2.2 ค่า $K$ ของเสาเข็มแต่ละชนิด	2/8
ตารางที่ 2.3 ค่าปรับแก้ $\eta_H$	2/14
ตารางที่ 2.4 ค่าปรับแก้ $\eta_B$	2/14
ตารางที่ 2.5 ค่าปรับแก้ $\eta_S$	2/15
ตารางที่ 2.6 ค่าปรับแก้ $\eta_R$	2/15
ตารางที่ 3.1 จำนวนเสาเข็มที่มีการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ UHV plant project	3/3
ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ UHV plant project	3/4
ตารางที่ 3.3 จำนวนเสาเข็มที่มีการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ CHP II PROJECT	3/5
ตารางที่ 3.4 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ CHP II PROJECT	3/5
ตารางที่ 3.5 จำนวนเสาเข็มที่มีการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ LLDPE EXPANSION AND HEXENE-1 PROJECT	3/6
ตารางที่ 3.6 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ LLDPE EXPANSION AND HEXENE-1 PROJECT	3/6
ตารางที่ 3.7 จำนวนเสาเข็มที่มีการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ PUI PROJECT	3/7
ตารางที่ 3.8 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ PUI PROJECT	3/7
ตารางที่ 3.9 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในบริเวณกรุงเทพมหานคร ประเภทเสาเข็มเจาะ	3/8
ตารางที่ 3.10 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในบริเวณกรุงเทพมหานคร ประเภทเสาเข็มตอก	3/9
ตารางที่ 4.1 ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Static pile load test	4/2
ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันที่ปลายเสาเข็ม	4/7
ตารางที่ 4.3 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม	4/11



## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	กลไกการรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Das, 2004)	2/3
รูปที่ 2.2	ค่าตัวประกอบหน่วยแรงต้านของดิน $N_c^*$ และ $N_q^*$ ของสมการ Meyerhof (1976)	2/5
รูปที่ 2.3	ลักษณะการวิบัติของเสาเข็มโดยสมมติฐานของ Janbu (1976)	2/7
รูปที่ 2.4	ค่า $\lambda$ ที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึก	2/8
รูปที่ 2.5	ค่า $\alpha$ (Empirical adhesion factor)	2/9
รูปที่ 2.6	การติดตั้งชุดทดสอบเสาเข็มรับแรงอัด (Static Load Test)	2/10
รูปที่ 2.7	การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Mazurkiewicz	2/10
รูปที่ 2.8	การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Chin	2/11
รูปที่ 2.9	การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Davission	2/12
รูปที่ 2.10	การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี De Beer	2/13
รูปที่ 3.1	ระเบียบวิธีวิจัย	3/2
รูปที่ 3.2	สมการคำนวณโดยวิธีสถิตยศาสตร์	3/2
รูปที่ 3.3	ตำแหน่งการทดสอบ Static pile load test โครงการ UHV plant project	3/3
รูปที่ 3.4	ตำแหน่งการทดสอบ Static load Tests โครงการ CHP II PROJECT	3/5
รูปที่ 3.5	ตำแหน่งการทดสอบ Static load Tests โครงการ LLDPE EXPANSION AND HEXENE-1 PROJECT	3/6
รูปที่ 3.6	ตำแหน่งการทดสอบ Static load Tests โครงการ PUI PROJECT	3/7
รูปที่ 4.1	ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีการทดสอบในสนาม	4/4
รูปที่ 4.2	ผลการเปรียบเทียบค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีต่างๆ	4/6
รูปที่ 4.3	ผลการเปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยวิธีต่างๆ	4/10
รูปที่ 4.4	ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Mazurkiewicz และวิธีสถิตยศาสตร์	4/17
รูปที่ 4.5	ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Chin และวิธีสถิตยศาสตร์	4/21

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ฐานราก (Foundation) เป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกจากสิ่งก่อสร้างและถ่ายทอดไปยังชั้นดินที่วางตัวอยู่ใต้สิ่งก่อสร้าง หรือถ่ายทอดไปยังวัสดุรองรับฐานราก ในการออกแบบฐานรากนั้น นอกจากการคำนึงถึงเสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของฐานรากที่ไม่มากเกินไปจนเกิดความปลอดภัยแล้ว ยังมีอีก 2 ปัจจัยหลักที่ควรได้รับการพิจารณา นั่นคือ กำลังของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างฐานรากจำเป็นต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายทอดมาจากสิ่งก่อสร้างได้อย่างปลอดภัย รวมไปถึงมวลดินที่วางตัวอยู่ภายใต้สิ่งก่อสร้างต้องไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน

โดยทั่วไปแล้วฐานรากลึก (Deep foundation) ประเภทเสาเข็ม (Piles) มักถูกพิจารณาเลือกใช้ เป็นโครงสร้างฐานรากแทนฐานรากตื้น (Shallow foundation) ในกรณีที่ชั้นดินในระดับตื้นมีคุณสมบัติในการรับแรงต่ำและมีการยุบตัวสูง ส่งผลทำให้ไม่สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างได้อย่างมีเสถียรภาพ นอกจากนี้เสาเข็มยังถูกเลือกใช้เป็นฐานรากของโครงสร้างประเภทต่างๆ เพื่อวัตถุประสงค์อื่นด้วย เช่น เมื่อโครงสร้างมีการรับแรงในแนวนอน เช่น กำแพงกันดิน โครงสร้างสูงที่ต้องรับแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว หรือเมื่อเสาเข็มต้องรับแรงดึงเพื่อต้านทานการพลิกตัวของอาคาร (Tension-uplift pile) เช่น โครงสร้างในทะเล และงานใต้ดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น เสาเข็มที่นิยมก่อสร้างในประเทศไทยมีด้วยกันหลายชนิด เช่น เสาเข็มตอก (Driven pile) ซึ่งอาจทำมาจากเหล็ก (Steel pile) คอนกรีตอัดแรง (Prestressed concrete pile) และคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast concrete pile) และเสาเข็มเจาะ (Bored pile) เป็นต้น

นอกเหนือไปจากชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็มและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มแล้ว ยังสามารถจำแนกประเภทของเสาเข็มตามลักษณะการรับกำลังได้เป็น 2 ประเภท คือ (i) เสาเข็มรับแรงแบกทานส่วนปลาย (End bearing pile) คือเมื่อตอกเสาเข็มผ่านชั้นดินอ่อนและปลายของเสาเข็มยังถึงชั้นหินหรือจมลงไปในชั้นดินแข็ง การรับน้ำหนักของเสาเข็มลักษณะนี้มี 2 ส่วนคือ แรงต้านที่ปลายเสาเข็มและแรงต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากเสียดทานระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มและดินโดยรอบ (เสาเข็มที่ก่อสร้างในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่มักเป็นเสาเข็มประเภทนี้) (ii) เสาเข็มเสียดทาน (Skin friction pile) คือ เมื่อตอกเสาเข็มผ่านชั้นดินอ่อนแต่ปลายของเสาเข็มไม่ยังถึงระดับชั้นหินหรือชั้นดินแข็ง การรับน้ำหนักของเสาเข็มลักษณะนี้ส่วนใหญ่จะมาจากแรงต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มและดินโดยรอบเป็นหลัก

การออกแบบและประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มสามารถทำได้ 3 วิธี คือ (i) วิธีสถิตยศาสตร์ (Statics method) เป็นวิธีการประเมินโดยอาศัยข้อมูลจากผลการเจาะสำรวจดินและใช้หลักการทฤษฎีกลศาสตร์ของดินในการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม (ii) วิธีพลศาสตร์ (Dynamics method) เป็นวิธีการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มตอก ซึ่งอาศัยหลักการคำนวณโดยใช้กฎงาน-พลังงาน (Work-Energy theory) และข้อมูลของการตอกเสาเข็มในสนาม เช่น ชนิดของตุ้มตอก ระยะตก ระยะฝังจมของเสาเข็มต่อจำนวนครั้งของการตอก เป็นต้น อย่างไรก็ตามการคำนวณโดยวิธีนี้มีตัวแปรหลายตัวจึงทำให้ผลการคำนวณมีค่าความน่าเชื่อถือค่อนข้างต่ำ (iii) วิธีทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนาม (Pile load test) เป็นวิธีที่นิยมใช้เพราะการทดสอบนี้สามารถทราบถึงพฤติกรรมของเสาเข็มภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักบรรทุกจริง รวมทั้งสามารถประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มและค่าการทรุดตัวของเสาเข็มได้โดยตรง ซึ่งวิธีนี้มีความน่าเชื่อถือมากกว่าสองวิธีแรก

จากการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มแต่ละวิธีที่มีหลักการแตกต่างกันนี้เองส่งผลทำให้ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์และวิธีพลศาสตร์มักมีค่าแตกต่างไปจากค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจริงในสนาม ซึ่งสาเหตุความแตกต่างนี้อาจเกิดจาก 2 ปัจจัยหลัก คือ ความไม่แน่นอนของคุณสมบัติดินที่ใช้ในการคำนวณ (Tang, 1984; Phoon and Kulhawy, 1999; Whitman, 2000) และความไม่แน่นอนของสมการที่ใช้ในการคำนวณ (Dithinde et al., 2011) จากงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่วิเคราะห์ได้จากการทดสอบจริงในสนามมักมีค่ามากกว่าผลที่วิเคราะห์ได้จากวิธีสถิตยศาสตร์และวิธีพลศาสตร์ รวมถึงค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่วิเคราะห์ได้จากการทดสอบจริงในสนามมักมีค่าน้อยกว่าวิธีสถิตยศาสตร์และวิธีพลศาสตร์ด้วย (Daping and Hong, 2011; Meyerhof, 1956; Dithinde et al., 2011; Briaud and Tucker, 1988)

อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ที่มีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบจริงจะเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบที่ปลอดภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีเงื่อนไขการออกแบบที่ซับซ้อนและไม่มีความแน่นอน หรือกรณีที่ขาดแคลนข้อมูลการเจาะสำรวจดินที่น่าเชื่อถือ แต่การวิเคราะห์ที่อนุรักษ์นิยมเกินไปเช่นนี้จะส่งผลทำให้เสาเข็มที่ถูกออกแบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ความยาวของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้มีราคาค่าก่อสร้างสูงเกินจริงซึ่งไม่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมอย่างยิ่ง ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแม่นยำและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์และผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธีการทดสอบ Static pile load test และเสนอแนวทางสำหรับวิศวกรและผู้ออกแบบในการเลือกใช้วิธีการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนัก

บรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีการคำนวณทางสถิตยศาสตร์ที่เหมาะสมปลอดภัยตามหลักวิศวกรรมและประหยัดค้ำค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาความแม่นยำและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์และผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธีการทดสอบ Static pile load test
2. เพื่อวิเคราะห์และเสนอแนวทางสำหรับวิศวกรและผู้ออกแบบในการเลือกใช้วิธีการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีการคำนวณทางสถิตยศาสตร์ที่เหมาะสมปลอดภัยตามหลักวิศวกรรมและประหยัดค้ำค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มทั้งสองวิธีในโครงการวิจัยนี้ ใช้ข้อมูลผลการเจาะสำรวจชั้นดิน (boring log) และผลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนาม (Static pile load test) จากโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ และจังหวัดระยอง อย่างน้อย 30 โครงการ โดยพิจารณาปัจจัยในการวิเคราะห์ คือพิจารณาผลความแตกต่างของประเภทของเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ
2. การประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ อาศัยการนำผลการเจาะสำรวจชั้นดินมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการออกแบบ เช่น ค่าคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength,  $s_u$ ) โดยใช้สูตรการคำนวณของ Stroud (1974) และมุมเสียดทาน (friction angle,  $\phi$ ) โดยใช้สูตรการคำนวณของ Peck, Hanson and Thornburn (1974) และคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยสูตรการคำนวณต่างๆ คือ แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_p$ ) คำนวณโดยใช้สมการการคำนวณของ Meyerhof (1976) Vesic (1977) และ Janbu (1976) แรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม ( $Q_f$ ) คำนวณโดยใช้สมการการคำนวณของ Meyerhof (1976) ในกรณีที่ผ่านมาชั้นดินทราย และ วิธี  $\lambda$  วิธี  $\alpha$  และ วิธี  $\beta$  ในกรณีที่ผ่านมาชั้นดินเหนียว
3. การหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามวิเคราะห์โดยใช้ 2 วิธี คือ Mazurkiewicz method (1972) และ Chin method (1970)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงความแม่นยำและความแตกต่างระหว่างผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์และผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธีการทดสอบ Static pile load test
2. สามารถทราบถึงแนวทางในการเลือกใช้วิธีการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ที่เหมาะสมปลอดภัยในการออกแบบตามหลักวิศวกรรมและประหยัดค้ำค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เสาค้ำ

เสาค้ำเป็นโครงสร้างลักษณะแท่งที่ทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างและถ่ายทอดไปยังชั้นดินที่วางตัวอยู่ภายใต้โครงสร้างในระดับลึก เนื่องจากชั้นดินในระดับตื้นไม่มีกำลังรับแรงเพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างตั้งอยู่ได้อย่างปลอดภัย นอกจากนั้นเสาค้ำยังถูกเลือกใช้เป็นฐานรากของโครงสร้างต่างๆ เพื่อวัตถุประสงค์อื่นด้วย เช่น เมื่อโครงสร้างมีการรับแรงในแนวนอน เช่น กำแพงกันดิน โครงสร้างสูงที่ต้องรับแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว หรือเมื่อเสาค้ำต้องรับแรงดึงเพื่อต้านทานการพลิกตัวของอาคาร (Tension-uplift pile) เช่น โครงสร้างในทะเล และงานใต้ดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น

#### 2.2 ประเภทของเสาค้ำ

- จำแนกตามชนิดของวัสดุ ได้แก่ เสาค้ำไม้ เสาค้ำคอนกรีต เสาค้ำคอนกรีตเสริมเหล็ก เสาค้ำคอนกรีตเสริมเหล็กและลวดอัดแรง
- จำแนกตามวิธีการผลิต ได้แก่ เสาค้ำหล่อในที่ และเสาค้ำสำเร็จรูป
- จำแนกตามวิธีการก่อสร้าง ได้แก่ เสาค้ำเจาะ (Bored Piles) เสาค้ำตอก (Driven Piles) เสาค้ำเจาะเสียบ
- จำแนกตามการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างการติดตั้งเสาค้ำ ได้แก่ เสาค้ำเคลื่อนตัวมาก (Very large displacement pile) เสาค้ำเคลื่อนตัวน้อย (Small displacement pile) และเสาค้ำไม่มีการเคลื่อนตัว (displacement pile)

##### 2.2.1 เสาค้ำตอก

เสาค้ำตอกส่วนใหญ่จะเป็นเสาค้ำคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete pile) หรือคอนกรีตอัดแรง (Pre-Stressed Pile) การติดตั้งจะกระทำโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก เสาค้ำตอกเป็นเสาค้ำที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากการติดตั้งกระทำได้อย่างง่ายดายและมีราคาต่ำ

##### ข้อดีของเสาค้ำตอก

- ตรวจสอบคุณภาพของเสาค้ำได้ก่อนตอก
- การตอกเสาค้ำจะทำให้ความหนาแน่นของดินเม็ดหยาบเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น
- ระดับน้ำใต้ดินไม่มีผลกระทบต่อตอกเสาค้ำ

##### ข้อเสียของเสาค้ำตอก

- ทำให้เกิดความสั่นสะเทือนขณะตอกเสาค้ำ และทำให้เกิดการยกตัวสูงขึ้นของดินบริเวณนั้น

ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อโครงสร้างบริเวณนั้นได้

- ทำให้เสาเข็มเกิดความเสียหายถ้าตอกเสาเข็มแรงเกินไป

ระบบของตัมน์น้ำหนัที่ใช้ตอกเสาเข็ม แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด

- 1) Drop Hammer
- 2) Single-Acting Hammer
- 3) Double-Acting Hammer
- 4) Diesel Hammer

### 2.2.2 เสาเข็มเจาะแห้ง

เสาเข็มประเภทนี้มีความแตกต่างจากเสาเข็มตอกตรงที่เสาเข็มที่หล่อในที่ เสาเข็มเจาะแห้งเหมาะสำหรับชั้นดินที่มีระดับน้ำใต้ดินต่ำมาก และเป็นดินเชื่อมแน่นที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูง

ข้อดีของเสาเข็มเจาะแห้ง

- ขั้นตอนการทำงานไม่ทำให้เกิดมลพิษทางเสียง และการสั่นสะเทือนแก่บ้านเรือนที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณก่อสร้าง

- สามารถสังเกตเห็นลักษณะชั้นดิน และการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินขณะที่เจาะหลุม
- สามารถเปลี่ยนขนาดและความยาวของเสาเข็ม

ข้อเสียของเสาเข็มเจาะแห้ง

- การก่อสร้างและควบคุมงานที่ไม่ดีจะทำให้ได้เสาเข็มที่มีคุณภาพต่ำ
- เสาเข็มเจาะจะมีความเสียดทานระหว่างดินและเสาเข็มน้อยกว่าเสาเข็มตอก
- แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มเจาะจะมีค่าน้อยกว่าเสาเข็มตอก

## 2.3 แรงต้านทานของเสาเข็ม (Load capacity of pile)

ลักษณะการรับน้ำหนักและความยาวของเสาเข็มสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

### 2.3.1 เสาเข็มรับแรงแบกทานส่วนปลาย (End bearing pile)

เมื่อตอกเสาเข็มผ่านชั้นดินอ่อนและปลายของเสาเข็มยังถึงชั้นหินหรือจมลงไปชั้นดินแข็ง การรับน้ำหนักของเสาเข็มลักษณะนี้มี 2 ส่วนคือ บริเวณส่วนปลายของเสาเข็มและแรงต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากเสียดทานระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มและดินโดยรอบ นั่นคือแรงต้านทานสูงสุดของเสาเข็มมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงต้านที่ปลายเสาเข็มและแรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม ดังสมการที่ )2.1(

$$Q_u = Q_b + Q_f \quad (2.1)$$

### 2.3.2 เสาเข็มเสียดทาน (Skin friction pile)

เมื่อตอกเสาเข็มผ่านชั้นดินอ่อนแต่ปลายของเสาเข็มไม่ยังถึงระดับชั้นหินหรือชั้นดินแข็ง การรับน้ำหนักของเสาเข็มลักษณะนี้ส่วนใหญ่จะมาจากแรงต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มและดินโดยรอบ ดังสมการที่ (2.2)

$$Q_u = Q_f \quad (2.2)$$

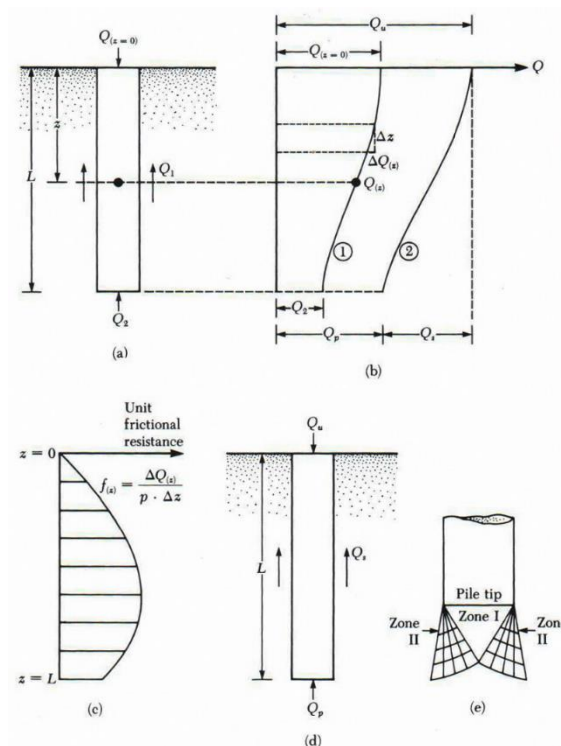
เมื่อ  $Q_u$  = แรงต้านทานสูงสุดของเสาเข็ม

$Q_b$  = แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

$Q_f$  = แรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม

### 2.4 กลไกการรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Load transfer mechanism)

กลไกการรับน้ำหนักของเสาเข็มจะพิจารณาจากเสาเข็มยาว  $L$  ดังรูปที่ 2.1(a) เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกที่ผิวดิน  $Q_{(z=0)}$  มากระทำต่อเสาเข็ม เสาเข็มจะต้านทานน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวด้วยแรงต้าน 2 ส่วนดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น คือแรงต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากแรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม ( $Q_1$ ) และแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_2$ ) รูปที่ 2.1(b) แสดงค่าแรงต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับความลึก



รูปที่ 2.1 กลไกการรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Das, 2004)



เมื่อน้ำหนักบรรทุกที่ผิวดินเพิ่มมากขึ้นค่าหน่วยแรงเสียดทาน  $f_{(z)}$  ก็จะเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าสูงสุด ( เมื่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและดินมีค่าประมาณ 5-10 มิลลิเมตร โดยไม่ขึ้นอยู่กับขนาดและความยาวของเสาเข็ม ในขณะที่เดียวกันแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจะเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าสูงสุดเมื่อปลายของเสาเข็มเคลื่อนตัวประมาณ 10-25% ของความกว้างหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม โดยการเคลื่อนตัวประมาณ 10% ใช้สำหรับเสาเข็มตอก (Driven pile) และ 25% ใช้สำหรับเสาเข็มเจาะ (Bored pile)

เมื่อน้ำหนักบรรทุกที่ผิวดินมีค่ามากกว่าแรงต้านทานสูงสุดที่เสาเข็มจะรับได้ เสาเข็มจะเกิดการเสียกำลังและวิบัติในลักษณะ Punching shear failure คือมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมที่ปลายของเสาเข็ม (Triangular zone) ในกรณีที่เสาเข็มอยู่ในชั้นทรายแน่นหรือชั้นดินเหนียวแข็ง แรงเฉือนตามแนวรัศมี (Radial shear zone) อาจเกิดขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.1(e)

## 2.5 การคำนวณหากำลังรับแรงของเสาเข็ม (Pile capacity estimation)

การคำนวณหากำลังรับแรงของเสาเข็มสามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี คือ (i) วิธีสถิตยศาสตร์ (Statics method) (ii) วิธีทดสอบในสนามโดย Pile load test และ (iii) วิธีพลศาสตร์ (Dynamics method) ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวิธีที่ (i) และ (ii) เท่านั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.5.1 การคำนวณหากำลังรับแรงของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (Statics method)

#### 2.5.1.1 แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (End bearing load capacity)

การคำนวณหาหน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มใช้หลักการการวิเคราะห์โดยสมดุลของแรง (Equilibrium analysis) เช่นเดียวกันกับการคำนวณหาหน่วยแรงต้านทานสูงสุดของชั้นดินภายใต้ฐานรากตื้น สามารถเขียนรูปทั่วไปของสมการการคำนวณหาหน่วยแรงต้านทานสูงสุดได้ดังนี้คือ

$$q_u = cN_c^* + qN_q^* + \frac{1}{2} \gamma BN_\gamma^* \quad (2.3)$$

แต่เนื่องจากขนาดความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ( $B$ ) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวของเสาเข็ม ( $L$ ) ดังนั้นพจน์สุดท้ายของสมการที่ (2.3) จึงไม่ถูกพิจารณา จะได้สมการที่ (2.4) และ (2.5) แสดงสมการทั่วไปของการคำนวณหาหน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มและค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

$$q_p = cN_c^* + qN_q^* \quad (2.4)$$

$$Q_p = A_p q_p = A_p (cN_c^* + qN_q^*) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $c$  = ค่าความเชื่อมแน่นของดิน (Cohesion of soil)

$\gamma$  = หน่วยน้ำหนักของดิน (Unit weight of soil)

$q$  = หน่วยแรงกดของดินส่วนที่อยู่บนฐานราก (Surcharge pressure,  $q = \gamma D_f$ )

$B$  = ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานรากตื้นหรือเสาเข็ม

$A_p$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

$N_c^*$ ,  $N_q^*$  และ  $N_\gamma^*$  = ค่าตัวประกอบหน่วยแรงต้านของดิน (Bearing capacity factors)

อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้มีนักวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอสมการการคำนวณหาค่าหน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มภายใต้เงื่อนไขข้อสมมติฐานที่แตกต่างกันดังนี้

### 1. สมการการคำนวณของ Meyerhof (1976)

#### (1) ดินทราย

เมื่อดินทรายมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และระยะฝังตัวของเสาเข็มมีค่าเท่ากับ (ความลึกแบกทาน (Bearing stratum,  $L=L_b$ ) หน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มที่ฝังตัวอยู่ในชั้นดินทรายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของชั้นแบกทานจนกระทั่งจะมีค่าสูงสุด ( $q = q_p$ ) เมื่ออัตราส่วนฝังตัว ( $L_b/D$ ) มีค่าวิกฤติ คือ  $L_b/D = (L_b/D)_{cr}$  และเมื่อผ่านจุดวิกฤติแล้วค่าหน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจะมีค่าคงที่ ( $q_p = q_l$ ) แรงต้านที่ปลายเสาเข็มสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$Q_p = A_p q_p \leq A_p q_l \quad (2.6)$$

และ

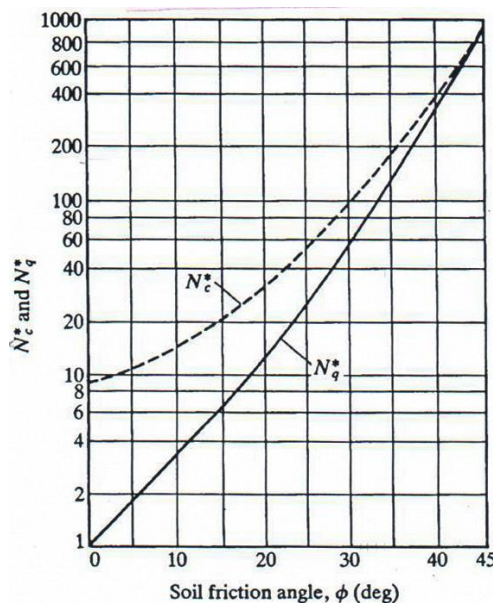
$$q_p = cN_c^* + qN_q^* \quad (2.7)$$

$$q_l = 0.5 p_a N_q^* \tan \phi \quad (2.8)$$

#### (2) ดินเหนียว

แรงต้านที่ปลายเสาเข็มที่ฝังตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอิมตัว ( $\phi=0$ :  $N_c^*=9$  และ  $N_q^*=0$ )

$$Q_p = cN_c^* A_p = 9cA_p \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.2 ค่าตัวประกอบหน่วยแรงต้านของดิน  $N_c^*$  และ  $N_q^*$  ของสมการ Meyerhof (1976)

## 2. สมการการคำนวณของ Vesic (1977)

Vesic (1977) นำเสนอสมการการคำนวณหาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มโดยใช้ทฤษฎี Expansion of cavities ดังนี้

### (1) ดินทราย

$$Q_p = A_p q_p = A_p (cN_c^* + \bar{\sigma}_o N_\sigma^*) \quad (2.10)$$

$$\bar{\sigma}_o = \frac{1+2K_o}{3} q \quad (2.11)$$

$$K_o = 1 - \sin \phi' \quad (2.12)$$

โดย  $N_c^* = f(I_{rr}, \phi')$  และ  $N_\sigma^* = f(I_{rr}, \phi')$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta}$$

$$I_r = \frac{E_s}{2(1+\nu)(c + q' \tan \phi')} = \frac{G_s}{c + q' \tan \phi'}$$

$$\nu = 0.1 + 0.3 \left( \frac{\phi' - 25}{20} \right) \quad \text{สำหรับ } 25^\circ \leq \phi' \leq 45^\circ$$

$$\Delta = 0.005 \left( 1 - \frac{\phi' - 25}{20} \right) \frac{q'}{p_a}$$

โดยปกติแล้ว ค่า  $I_r$  เป็นค่าที่ได้มาจากการทำการทดสอบอัดตัวคาน้ำและแรงอัดสามแกนในของปฏิบัติการซึ่งค่า  $I_r$  โดยประมาณของดินแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่า  $I_r$  ของดินแต่ละชนิด

ชนิดของดิน	$I_r$
ดินทราย	70-150
ดินตะกอนและดินเหนียว (สภาวะระบายน้ำ)	50-100
ดินเหนียว (สภาวะไม่ระบายน้ำ)	100-200

### (2) ดินเหนียว ( $\phi' = 0^\circ$ )

$$Q_p = A_p q_p = A_p c N_c^* \quad (2.13)$$

$$I_{rr} = I_r \quad (\text{ดินเหนียวอัดตัว } \Delta = 0) \quad (2.14)$$

$$I_r = 347 \left( \frac{c_u}{p_a} \right) - 33 < 300 \quad (2.15)$$

### 3. สมการการคำนวณของ Janbu (1976)

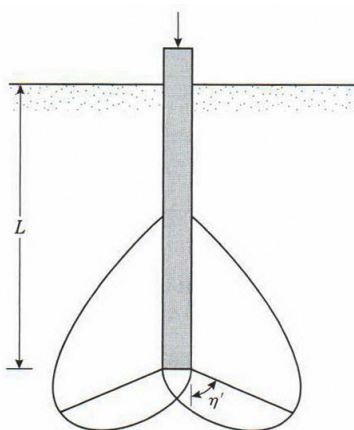
Janbu (1976) นำเสนอสมการการคำนวณหาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มภายใต้เงื่อนไขลักษณะการวิบัติดังรูปที่ 2.3

$$Q_p = A_p q_u = A_p (cN_c^* + qN_q^*) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $N_q^* = (\tan \phi + \sqrt{1 + \tan^2 \phi})^2 (e^{2\eta' \tan \phi})$

$$N_c^* = (N_q^* - 1) \cot \phi$$

$\eta'$  มีค่าอยู่ระหว่าง  $60^\circ$  สำหรับดินเหนียวอ่อนถึง  $105^\circ$  สำหรับดินทรายแน่น



รูปที่ 2.3 ลักษณะการวิบัติของเสาเข็มโดยสมมติฐานของ Janbu (1976)

#### 2.5.1.2 แรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม (Skin friction)

แรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_s = p\Delta Lf \quad (2.17)$$

เมื่อ  $p$  = ความยาวรอบรูปเสาเข็ม

$\Delta L$  = ช่วงความยาวของเสาเข็มที่พิจารณา

$f$  = หน่วยแรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม (Unit skin frictional resistance)

#### 1. ดินทราย

หน่วยแรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มในทราย ( $f$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ระดับวิกฤติ ( $L'$ ) ซึ่งมีค่าประมาณ 15-20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็ม จากนั้นจะมีค่าคงที่ตลอดความลึก ระดับความลึกวิกฤติจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ค่าแรงเสียดทานภายในของดิน ความยืดหยุ่นของดิน (Compressibility) และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน (Relative density) ในการคำนวณโดยทั่วไปมักใช้ค่าระดับความลึกวิกฤติที่ 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็ม ( $L' = 15D$ )

ที่ระดับ  $z = 0$  ถึง  $L'$

$$f = K\sigma'_v \tan \delta \quad (2.18)$$

ตารางที่ 2.2 ค่า  $K$  ของเสาเข็มแต่ละชนิด

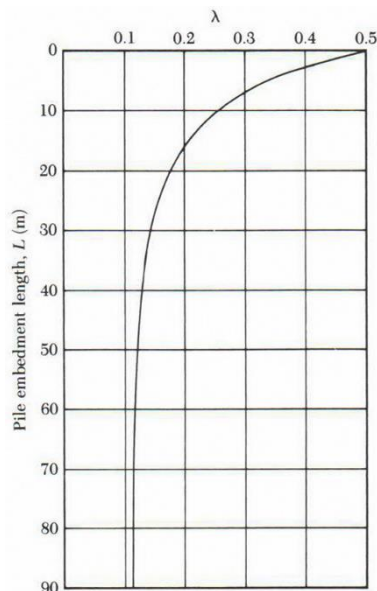
ชนิดของเสาเข็ม	$K$
เสาเข็มเจาะ	$K_o; (K_o = 1 - \sin \phi)$
เสาเข็มที่มีการเคลื่อนตัวน้อย (Small displacement pile)	$K_o - 1.4K_o$
เสาเข็มที่มีการเคลื่อนตัวมาก (Large displacement pile)	$K_o - 1.8K_o$

## 2. ดินเหนียว

### (1) วิธี $\lambda$

Vijayvergiya และ Focht (1972) นำเสนอสมการการคำนวณหาแรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มภายใต้สมมติฐานที่ว่า การเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากเสาเข็มส่งผลต่อแรงดันด้านข้างเชิงรับที่ระดับต่างๆ

$$f_{av} = \lambda(\bar{\sigma}_v + 2c_u) \quad (2.19)$$



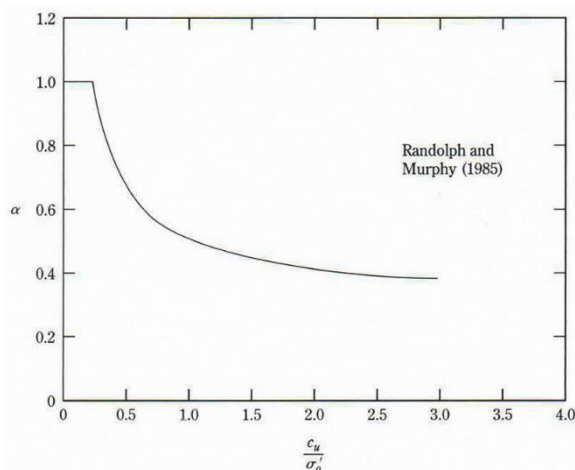
รูปที่ 2.4 ค่า  $\lambda$  ที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความลึก

### (2) วิธี $\alpha$

การคำนวณโดยวิธีนี้เหมาะสำหรับดินเหนียวอิ่มตัวในสภาวะไม่ระบายน้ำ

$$f = \alpha c_u \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\alpha$  = Empirical adhesion factor มีค่าแปรผันตาม  $c_u$  อ่านค่าได้จากรูปที่ 5



รูปที่ 2.5 ค่า  $\alpha$  (Empirical adhesion factor)

### (3) วิธี $\beta$

Burland (1973) นำเสนอสมการการคำนวณหาแรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็มดังนี้

$$f = \beta \sigma'_v \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$\beta = K \tan \phi_R$$

$\phi_R$  = drained friction angle of remolded clay

$$K = 1 - \sin \phi_R \quad \text{กรณีดินเหนียวอัดตัวแน่นปกติ (NC-Clay)}$$

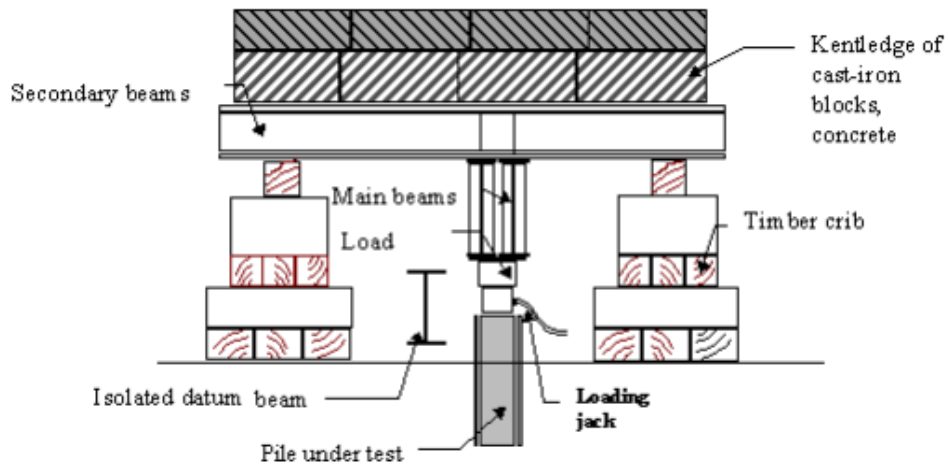
$$K = (1 - \sin \phi_R) \sqrt{OCR} \quad \text{กรณีดินเหนียวอัดตัวแน่นเกินปกติ (OC-Clay)}$$

### 2.5.2 การคำนวณกำลังรับแรงของเสาเข็มโดยวิธี Pile load test

Pile load test เป็นวิธีการทดสอบในสนามที่นิยมใช้ในการประเมินค่ากำลังรับแรงของเสาเข็ม ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม รวมถึงการคาดคะเนการทรุดตัวของเสาเข็มอีกด้วย การทดสอบเริ่มต้นจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็มทีละขั้นด้วยแม่แรง จนกระทั่งถึงค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ต้องการทดสอบหรือจนกระทั่งเสาเข็มเกิดการวิบัติ ข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็มและการทรุดตัวของเสาเข็ม ในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในแต่ละขั้นนี้จะทิ้งระยะเวลาให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนกการทดสอบได้เป็น 4 ลักษณะ คือ (i) Slow maintained load test (ii) Quick load test (iii) Constant rate of penetration test และ (iv) Cyclic load test

ในการทดสอบเสาเข็มส่วนใหญ่จะอ้างอิงมาตรฐาน ASTM ซึ่งจำแนกตามลักษณะของแรงกระทำต่อเสาเข็มได้ 3 ประเภทได้แก่

- ASTM D 1143-81 มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสาเข็มด้วยแรงกด
- ASTM D 3689-83 มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสาเข็มด้วยแรงดึง
- ASTM D 3966-81 มาตรฐานสำหรับการทดสอบเสาเข็มด้วยแรงดันด้านข้าง

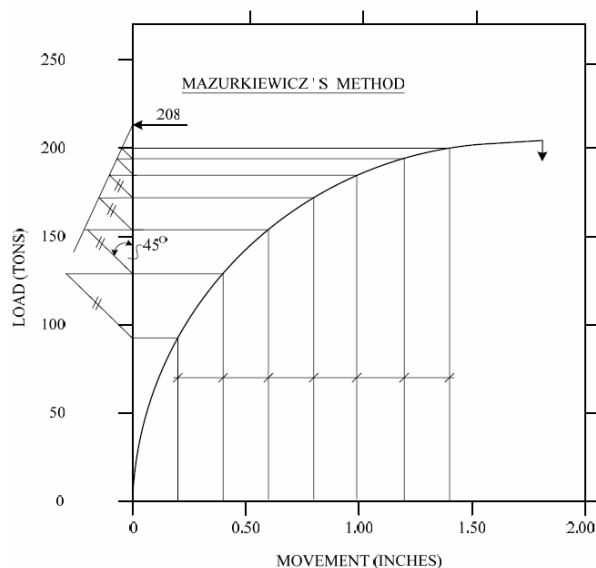


รูปที่ 2.6 การติดตั้งชุดทดสอบเสาเข็มรับแรงอัด (Static Load Test)

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ Static Pile load test สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

### 2.5.2.1 วิธีของ Mazurkiewicz (1972)

วิเคราะห์โดยการแบ่งการทรุดตัวของเสาเข็มบนแกน  $x$  ให้เท่ากัน และหาน้ำหนักบรรทุกที่แต่ละการทรุดตัว โดยการลากเส้นตัดกับเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการทรุดตัวและน้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็ม จากนั้นลากเส้นขนานแนวนอนของแต่ละน้ำหนักบรรทุกตัดแกน  $y$  จากจุดตัดบนแกน  $y$  นี้ ลากเส้น 45 องศา เข้าตัดกับเส้นขนานแนวนอนของน้ำหนักบรรทุกถัดไปและลากเส้นเชื่อมต่อดังกล่าวที่เกิดขึ้นทั้งหมด ค่าตัดแกน  $y$  คือค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม



รูปที่ 2.7 การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Mazurkiewicz

2.5.2.2 วิธีของ Chin (1970)

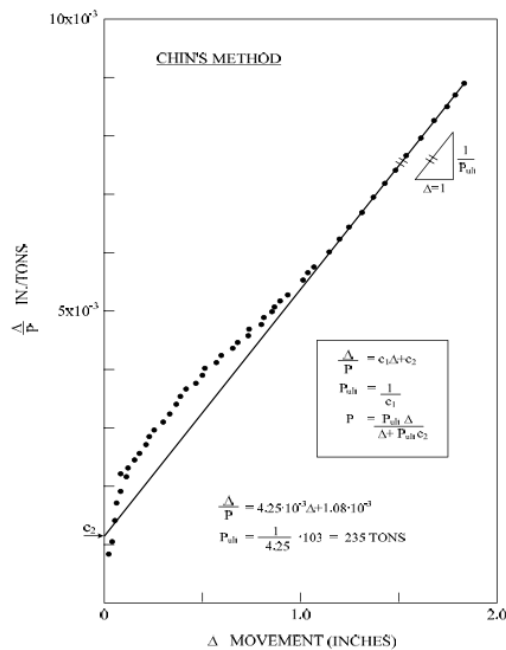
วิธีการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีของ Chin ทำได้โดยการสมมติว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการทรุดตัวและน้ำหนักบรรทุกทุกบนเสาเข็มเป็นแบบไฮเปอร์โบลิก (Hyperbolic shape) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$P = \frac{\Delta}{c_1\Delta + c_2} \tag{2.22}$$

- เมื่อ  $P$  = น้ำหนักบรรทุก
- $\Delta$  = ปริมาณการทรุดตัว
- $c_1$  และ  $c_2$  = ค่าคงที่

จากสมการที่ 22 ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดคือ น้ำหนักบรรทุกซึ่งการทรุดตัวมีค่าอนันต์ ( $\Delta = \infty$ ) ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{c_1}$  และเพื่อความสะดวกในการหาค่าคงที่  $c_1$  และ  $c_2$  ในสมการที่ 22 สามารถจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังสมการที่ 23

$$\frac{\Delta}{P} = c_1\Delta + c_2 \tag{2.23}$$

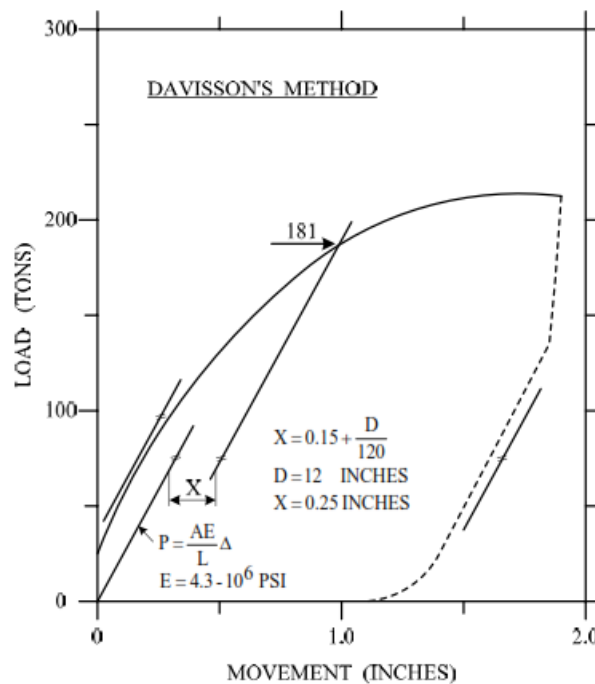


รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Chin



### 2.5.2.3 วิธีของ Davission (1972)

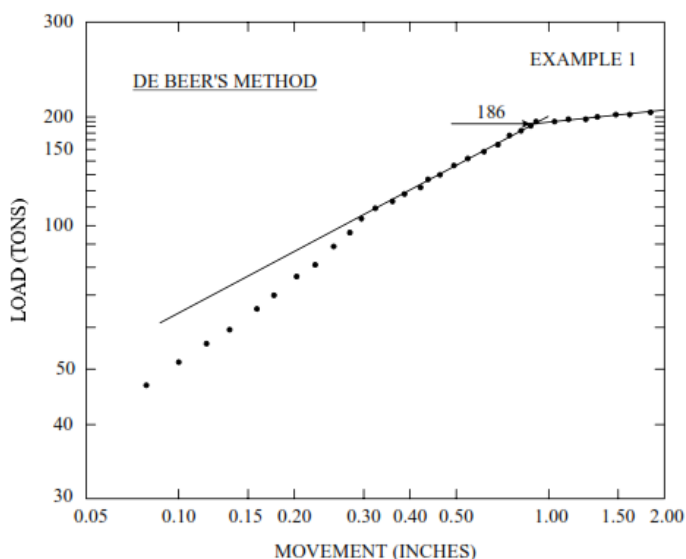
วิธีการหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธี Davission ทำได้โดยการลากเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $AE/L$  ผ่านจุดเริ่มต้น และลากเส้นขนาน ซึ่งมีระยะห่างจากเส้นตรงเส้นแรกเท่ากับ  $0.15 + D/120$  จุดตัดระหว่างเส้นขนานนี้กับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม คือ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด



รูปที่ 2.9 การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Davission

### 2.4.1.3 วิธีของ De Beer (1972)

วิธีการหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธี De Beer ทำได้โดยการหาค่าจุดตัดของส่วนของเส้นตรงสองเส้น ที่ได้จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log P$  และ  $\log \Delta$



รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี De Beer

## 2.6 การทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

ในการออกแบบและก่อสร้างฐานรากเสาเข็มจะต้องทราบลักษณะของชั้นดินและพฤติกรรมของดินแต่ละชั้น ซึ่งการที่จะทราบลักษณะของชั้นดินและพฤติกรรมได้นั้น จะต้องมีการสำรวจชั้นดิน เก็บตัวอย่างดินและทดสอบคุณสมบัติของดินทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ วิศวกรที่ทำการออกแบบจะต้องกำหนดรายละเอียดการสำรวจอย่างชัดเจนว่าจะเจาะทั้งหมดกี่หลุม ระยะห่างระหว่างหลุมเป็นเท่าใด เจาะที่ตำแหน่งไหน ใช้เครื่องมือชนิดใดในการเก็บตัวอย่าง และเก็บที่ความลึกเท่าใดบ้าง จะทดสอบคุณสมบัติอะไรของดินบ้าง โดยส่วนใหญ่แล้วการเจาะสำรวจและการเก็บตัวอย่างจะนิยมใช้วิธีการทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT)

การทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐานได้ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1927 และเป็นที่ยอมรับใช้ในเวลาต่อมาจนถึงปัจจุบัน ข้อดีของการทดสอบนี้ ได้แก่

1) เป็นการทดสอบที่สามารถเก็บตัวอย่างดินได้ระหว่างการทดสอบ ซึ่งตัวอย่างดินดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการจำแนกประเภทดินและทดสอบหาคุณสมบัติอื่นๆ ที่สำคัญในห้องปฏิบัติการได้ ในขณะที่การทดสอบอื่นโดยส่วนใหญ่ไม่สามารถเก็บดินตัวอย่างได้ จึงต้องจำแนกประเภทของดินโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างผลทดสอบและประเภทของดิน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงประสบการณ์

- 2) เป็นการทดสอบที่กระทำได้อย่างรวดเร็วและมีค่าใช้จ่ายต่ำ
- 3) เป็นการทดสอบที่สามารถกระทำได้ควบคู่กับการเจาะสำรวจชั้นดิน

ค้อนน้ำหนักที่นิยมใช้ในการทดสอบมีด้วยกัน 3 ประเภท คือ Pin weight hammer Donut hammer และ Safety hammer

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลทดสอบทะเลหุลุมมาตรฐาน ได้แก่ ประสิทธิภาพการทำงานของคนงาน ชนิดของตุ้มน้ำหนัก ขนาดของหลุมเจาะ วิธีการเจาะสำรวจ จำนวนรอบที่คล้องผ่านรอกเพื่อยกตุ้มน้ำหนัก น้ำหนักของแท่นรับตุ้มน้ำหนัก ความตรงของแกนเหล็กเจาะ และอัตราเร็วของการปล่อยตุ้มหนัก เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ Seed (1985) จึงเสนอหลักเกณฑ์ในการทดสอบไว้ดังนี้

- 1) ใช้วิธีการเจาะเปียก (Wash boring) เพื่อเจาะหลุมสำรวจให้มีขนาด 200-250 มิลลิเมตร
- 2) ใช้ระบบตุ้มน้ำหนักที่มีประสิทธิภาพในการให้พลังงานเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์
- 3) ปล่อยตุ้มน้ำหนักกระทบแท่นรับตุ้มน้ำหนักด้วยอัตราเร็ว 30-40 ครั้งต่อนาที

ในบางพื้นที่อาจมีความจำเป็นบางประการที่ทำให้ไม่สามารถปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ข้างต้นได้ จึงต้องมีการปรับแก้ค่าตัวเลขทะเลหุลุมมาตรฐานที่ประสิทธิภาพผล 60 เปอร์เซ็นต์ ( $N_{60}$ ) เพื่อใช้ในการปรับแก้ผลทดสอบในสนาม ดังนี้

$$N_{60} = \frac{N\eta_H\eta_B\eta_S\eta_R}{60} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$N_{60}$  คือ ค่าฝั่งจุมมาตรฐานที่ถูกปรับแก้เนื่องจากเงื่อนไขในสนาม

$N$  คือ ค่า  $N$  ที่วัดได้ในสนาม

$\eta_H$  คือ ค่าปรับแก้ประสิทธิภาพของตุ้มตอก

$\eta_B$  คือ ค่าปรับแก้ขนาดของหลุมเจาะ

$\eta_S$  คือ ค่าปรับแก้ระบอบอกเก็บตัวอย่าง

$\eta_R$  คือ ค่าปรับแก้ระยะตกกระทบ

### ตารางที่ 2.3 ค่าปรับแก้ $\eta_H$

ประเทศ	ชนิดตุ้มตัก	การปล่อยตุ้มตัก	$\eta_H$
ญี่ปุ่น	โดนต์	อิสระ	78
	โดนต์	ใช้เชือกและรอก	67
สหรัฐอเมริกา	ปลอดภัย	ใช้เชือกและรอก	60
	โดนต์	ใช้เชือกและรอก	45
จีน	โดนต์	อิสระ	60
	โดนต์	ใช้เชือกและรอก	50

### ตารางที่ 2.4 ค่าปรับแก้ $\eta_B$

ขนาดของหลุมเจาะ (มิลลิเมตร)	$\eta_B$
60-120	1.0
150	1.05
200	1.15

ตารางที่ 2.5 ค่าปรับแก้  $\eta_s$

ลักษณะของการเก็บตัวอย่าง	$\eta_s$
ไม่ใช้โคลนป้องกันดินพัง (Liner)	1.0
ใช้โคลนโดยที่ดินเป็นทรายแน่นหรือดินเหนียว	0.8
ใช้โคลนโดยที่ดินเป็นทรายหลวม	0.9

ตารางที่ 2.6 ค่าปรับแก้  $\eta_R$

ความยาวของก้านเหล็ก (เมตร)	$\eta_R$
>10	1.0
6-10	0.95
4-6	0.85
0-4	0.75

### 2.6.1 การประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจากผลการทดสอบ SPT

สามารถประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

Stroud (1974)

$$S_u = kN_{60} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $S_u$  คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

$k$  คือค่าคงที่ 3.5-6.5 kN/m<sup>3</sup>

$N_{60}$  คือค่า  $N$  ที่ปรับแก้แล้ว

Hara et al. (1971)

$$S_u = 29N_{60}^{0.72} \quad (2.26)$$

หมายเหตุ ค่า  $k$  โดยวิธีของ Stroud (1974) เลือกใช้เท่ากับ 5 kN/m<sup>3</sup>

### 2.6.2 การประเมินค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินทรายจากผลการทดสอบ SPT

การประเมินค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล และค่า  $N$  ที่ได้จากการทดสอบฝั่งจมแบบมาตรฐานในดินทรายจำเป็นต้องปรับแก้ค่า  $N_{60}$  อันเนื่องมาจากค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของชั้นดิน ( $\sigma'_0$ )

$$(N_{60})_{corr} = C_N N_{60} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $C_N$  คือค่าปรับแก้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของชั้นดิน

โดยมีผู้เสนอค่าปรับแก้  $C_N$  ไว้แตกต่างกัน ดังนี้

Liao and Whitman's (1986):

$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma'_0}{P_a}\right)}} \quad (2.28)$$

Skempton(1986):

$$C_N = \frac{2}{1 + \left(\frac{\sigma'_0}{P_a}\right)} \quad (2.29)$$

Seed et al. (1975)

$$C_N = 1 - 1.25 \log\left(\frac{\sigma'_0}{P_a}\right) \quad (2.30)$$

Peck et al. (1974)

$$C_N = 0.77 \log \frac{20}{\left(\frac{\sigma'_0}{P_a}\right)} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $P_a$  คือค่าความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure, 100 kPa or 2000 lb/ft<sup>2</sup>)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายในและค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินทรายกับค่า  $N$  ที่ได้จากการทดสอบพินจมแบบมาตรฐานมีผู้นำเสนอไว้หลายความสัมพันธ์ดังนี้

Mercusion and Mayne (1977)

$$D_r (\%) = 11.7 + 0.76(222N_{60} + 1600 - 53\sigma'_0 - 50S_u^2)^{0.5} \quad (2.32)$$

Kulhawy and Mayne (1990)

$$D_r (\%) = 12.2 + 0.75 \left[ 222N_{60} + 2311 - 711ORC - 779 \left( \frac{\sigma'_0}{P_a} \right) - 50S_u^2 \right]^{0.5} \quad (2.33)$$

Peck, Hanson and Thornburn (1974)

$$\phi' (\text{deg}) = 27.1 + 0.3(N_{60})_{corr} - 0.00054[(N_{60})_{corr}]^2 \quad (2.34)$$

Schmertman (1975)

$$\phi' = \tan^{-1} \left[ \frac{N_{60}}{12.2 + 20.3 \left( \frac{\sigma'_0}{P_a} \right)} \right]^{0.34} \quad (2.35)$$

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

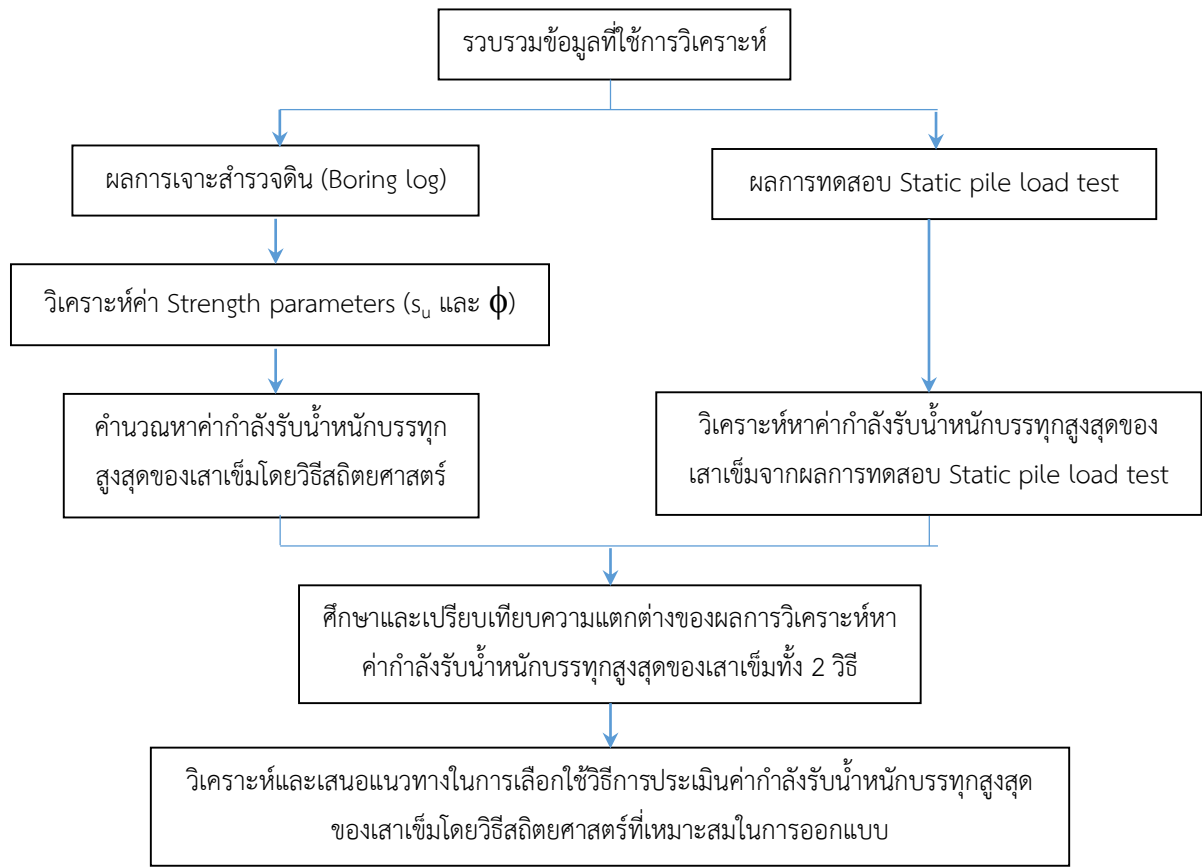
จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยออกแบบระเบียบวิธีการวิจัยของโครงการวิจัยโดยเป็นวิเคราะห์ความแม่นยำและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์และผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธีการทดสอบ Static pile load test จากโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ และระยอง อย่างน้อย 30 โครงการ และสามารถแบ่งงานได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้ (รูปที่ 3.1)

**ส่วนที่ 1** การประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ อาศัยการนำผลการเจาะสำรวจชั้นดิน มาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับคำนวณออกแบบ ได้แก่ ค่าคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength,  $s_u$ ) โดยใช้สูตรการคำนวณของ Stroud (1974) และมุมเสียดทาน (friction angle,  $\phi$ ) โดยใช้สูตรการคำนวณของ Peck, Hanson and Thornburn (1974) และคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยสูตรการคำนวณต่างๆ คือ แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_b$ ) คำนวณโดยใช้สมการการคำนวณของ Meyerhof (1976) Vesic (1977) และ Janbu (1976) แรงเสียดทานบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของเสาเข็ม ( $Q_f$ ) คำนวณโดยใช้สมการการคำนวณของ Meyerhof (1976) ในกรณีที่ผ่านมาชั้นดินทราย และ วิธี  $\lambda$  วิธี  $\alpha$  และ วิธี  $\beta$  ในกรณีที่ผ่านมาชั้นดินเหนียว รายละเอียดสมการการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.2

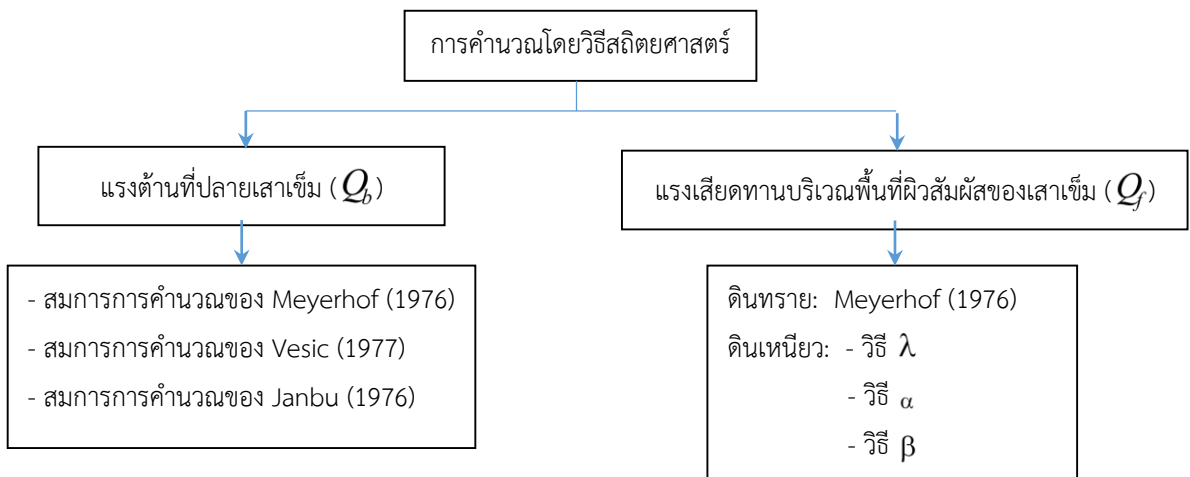
**ส่วนที่ 2** การหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนาม Static pile load test ชนิด compression test วิเคราะห์โดยใช้ 2 วิธี คือ Mazurkiewicz method (1972) และ Chin method (1970)

**ส่วนที่ 3** ศึกษาและเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีสถิตยศาสตร์ทุกสมการ (ส่วนที่ 1) และค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนาม (ส่วนที่ 2) โดยพิจารณาปัจจัยในการวิเคราะห์คือพิจารณาผลความแตกต่างของประเภทของเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ

เพื่อวิเคราะห์และเสนอแนวทางสำหรับวิศวกรและผู้ออกแบบในการเลือกใช้วิธีการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีการคำนวณทางสถิตยศาสตร์ที่เหมาะสมปลอดภัยตามหลักการทางวิศวกรรมและประหยัดคุ่มค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม



รูปที่ 3.1 ระเบียบวิธีวิจัย



รูปที่ 3.2 สมการคำนวณโดยวิธีสถิตยศาสตร์

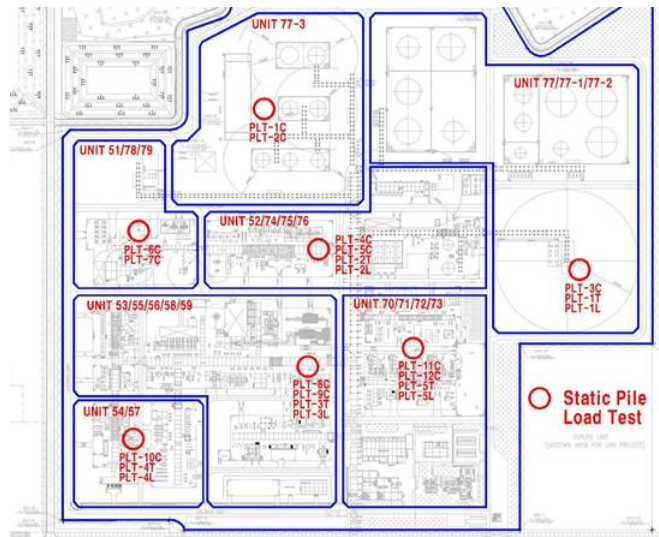
### 3.2 รายละเอียดของโครงการที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ในโครงการนี้ประกอบด้วยข้อมูลจากโครงการก่อสร้างใน 2 จังหวัดคือ ระยองและกรุงเทพฯ โดยโครงการก่อสร้างในระยอง ประกอบด้วย 4 โครงการ และโครงการก่อสร้างในกรุงเทพฯ ประกอบด้วย 20 โครงการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1 โครงการก่อสร้างในจังหวัดระยอง

##### (1) โครงการ UHV plant project

เป็นโครงการก่อสร้างแพลนท์ผลิตไฟฟ้าเสาเชื่อมในโครงการนี้เป็นเสาเชื่อมตอกทั้งหมด 2 ขนาด ได้แก่ 0.40x0.40m ยาว 20 เมตร และ 0.45x0.45m ยาว 30 เมตร และมีผลการทดสอบ Static pile load test ชนิด compression 12 ต้น tension 5 ต้น และ lateral 5 ต้น รายละเอียดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.3 ตารางที่ 3.1 และ 3.2 ในโครงการนี้จะพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของเสาเชื่อมโดยวิเคราะห์จากการทดสอบ Static pile load test ชนิด compression เท่านั้น



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการทดสอบ Static pile load test โครงการ UHV plant project

ตารางที่ 3.1 จำนวนเสาเชื่อมที่มีการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ UHV plant project

Pile Size	Pile Length (m)	Static load Tests		
		Compression	Tension	Lateral
Sq.0.40x0.40m	20	7	2	2
Sq.0.45x0.45m	30	5	3	3
รวม		12	5	5



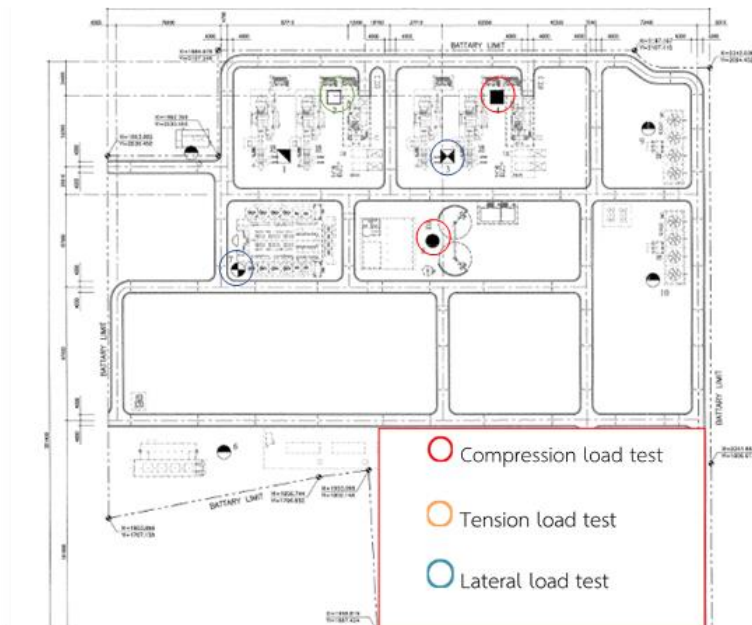
ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ UHV plant project

Location	Pile No.	Pile Size	Boring log No.
Unit 77-3	PLT-1C	Sq.0.45x0.45x30m	BH-533
	PLT-2C	Sq.0.40x0.40x20m	BH-533
Unit 77,77-1,77-2	PLT-3C	Sq.0.40x0.40x20m	BH-505
	PLT-1T	Sq.0.40x0.40x20m	BH-505
	PLT-1L	Sq.0.40x0.40x20m	BH-505
Unit 52,74,75,76	PLT-4C	Sq.0.45x0.45x30m	BH-105,106
	PLT-5C	Sq.0.40x0.40x20m	BH-105,106
	PLT-2T	Sq.0.45x0.45x30m	BH-105,106
	PLT-2L	Sq.0.45x0.45x30m	BH-105,106
Unit 51,78,79	PLT-6C	Sq.0.45x0.45x30m	BH-504,528
	PLT-7C	Sq.0.40x0.40x20m	BH-504,528
Unit 53,55,56,58,59	PLT-8C	Sq.0.45x0.45x30m	BH-122,145
	PLT-9C	Sq.0.40x0.40x20m	BH-122,145
	PLT-3T	Sq.0.45x0.45x30m	BH-122,145
	PLT-3L	Sq.0.45x0.45x30m	BH-122,145
Unit 54,57	PLT-10C	Sq.0.40x0.40x20m	BH-126,128
	PLT-4T	Sq.0.40x0.40x20m	BH-126,128
	PLT-4L	Sq.0.40x0.40x20m	BH-126,128
Unit 70,71,72,73	PLT-11C	Sq.0.45x0.45x30m	BH-522,541
	PLT-12C	Sq.0.40x0.40x20m	BH-522,541
	PLT-5T	Sq.0.45x0.45x30m	BH-522,541
	PLT-5L	Sq.0.45x0.45x30m	BH-522,541

## (2) โครงการ CHP II PROJECT

เป็นโครงการผลิตพลังไอน้ำและไฟฟ้ารวม โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เสาเข็มในโครงการนี้เป็นเสาเข็มตอกทั้งหมด 2 ขนาด ได้แก่ 0.35x0.35m ยาว 21 เมตร และ 0.45x0.45m ยาว 21 เมตร และมีผลการทดสอบ Static pile load test ชนิด compression 2 ต้น tension 1 ต้น และ lateral 2 ต้น รายละเอียดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.4 ตารางที่ 3.3 และ 3.4 ในโครงการนี้จะพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลัง

รับแรงกดสูงสุดของเสาเข็มโดยวิเคราะห์จากการทดสอบ Static pile load test ชนิด compression เท่านั้น



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการทดสอบ Static load Tests โครงการ CHP II PROJECT

ตารางที่ 3.3 จำนวนเสาเข็มที่มีการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ CHP II PROJECT

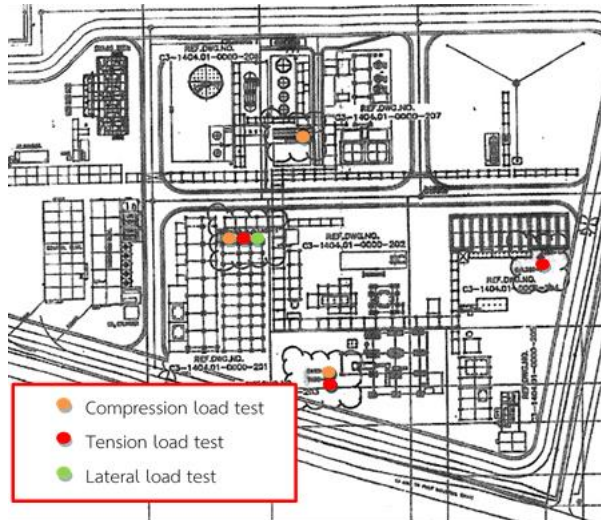
Pile Size	Pile Length (m)	Static load Tests		
		Compression	Tension	Lateral
Sq.0.35x0.35m	21	1	1	1
Sq.0.45x0.45m	21	1	-	1
รวม		2	1	2

ตารางที่ 3.4 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ CHP II PROJECT

Pile No.	Pile Size	Boring log No.
2T	Sq.0.45x0.45x21m	BH-04
3L	Sq.0.45x0.45 x21m	BH-06
4C	Sq.0.45x0.45 x21m	BH-08
7L	Sq.0.35x0.35 x21m	BH-06
8C	Sq.0.35x0.35 x21m	BH-014

(3) โครงการ LLDPE EXPANSION AND HEXENE-1 PROJECT

เป็นโครงการก่อสร้างแพลตฟอร์มผลิตโพลีเมอร์ เส้าเคมีในโครงการนี้เป็นเส้าเคมีตอกทั้งหมด 2 ขนาด ได้แก่ 0.40x0.40m ยาว 15 เมตร และ 18 เมตร และมีผลการทดสอบ Static pile load test ชนิด compression 3 ต้น tension 3 ต้น และ lateral 1 ต้น รายละเอียดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.5 ตารางที่ 3.5 และ 3.6 ในโครงการนี้จะพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของเส้าเคมีโดยวิเคราะห์จากการทดสอบ Static pile load test ชนิด compression เท่านั้น



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการทดสอบ Static load Tests โครงการ LLDPE EXPANSION AND HEXENE-1 PROJECT

ตารางที่ 3.5 จำนวนเส้าเคมีที่มีการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ LLDPE EXPANSION AND HEXENE-1 PROJECT

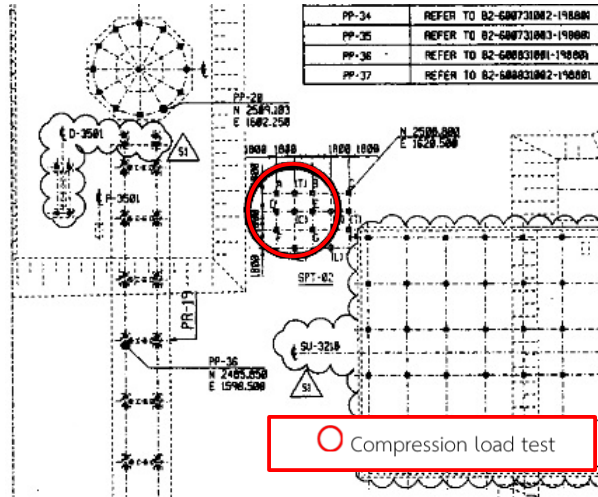
Pile Size	Pile Length (m)	Static load Tests		
		Compression	Tension	Lateral
Sq.0.40x0.40m	18	2	2	-
Sq.0.40x0.40m	15	1	1	1
รวม		3	3	1

ตารางที่ 3.6 ตำแหน่งและขนาดของเส้าเคมีในการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ LLDPE EXPANSION AND HEXENE-1 PROJECT

Location	Pile No.	Pile Size	Boring log No.
Pelletizer	C400-1	Sq.0.40x0.40x18m	BH-14
Hexene	C/T400-1	Sq.0.40x0.40x18m	BH-2
CCB	C400-2	Sq.0.40x0.40x15m	BH-4

(4) โครงการ PUI PROJECT

เสาเข็มในโครงการนี้เป็นเสาเข็มตอกทั้งหมด 2 ขนาด ได้แก่ 0.45x0.45m และ 0.30x0.30m ยาว 15 เมตร มีผลการทดสอบ Static pile load test ชนิด compression 2 ต้น รายละเอียดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.6 ตารางที่ 3.7 และ 3.8 ในโครงการนี้จะพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของเสาเข็มโดยวิเคราะห์จากการทดสอบ Static pile load test ชนิด compression



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการทดสอบ Static load Tests โครงการ PUI PROJECT

ตารางที่ 3.7 จำนวนเสาเข็มที่มีการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ PUI PROJECT

Pile Size	Pile Length (m)	Static load Tests		
		Compression	Tension	Lateral
Sq.0.45x0.45m	15	1	-	-
Sq.0.30x0.30m	15	1	-	-
รวม		2	-	-

ตารางที่ 3.8 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในโครงการ PUI PROJECT

Pile No.	Pile Size	Boring log No.
SPT-02(C-300)	Sq.0.45x0.45x21m	BH-49
SPT-02(C-450)	Sq.0.45x0.45 x21m	BH-49

### 3.2.2 โครงการก่อสร้างในจังหวัดกรุงเทพมหานคร

เสาเข็มในกรุงเทพฯ เป็นเสาเข็มเจาะและเสาเข็มตอกรวมกันทั้งหมด 20 ต้น ซึ่งเสาเข็มเจาะมี 10 ต้น มีผลการทดสอบ 10 ต้น และเสาเข็มตอกมี Static pile load test ชนิด compression 20 ต้น รายละเอียดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.9 และ 3.10 ในโครงการก่อสร้างในกรุงเทพฯ นี้จะพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดของเสาเข็มโดยวิเคราะห์จากการทดสอบ Static pile load test ชนิด compression

**ตารางที่ 3.9** ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในบริเวณ กรุงเทพมหานคร ประเภทเสาเข็มเจาะ

ชื่อโครงการ	Pile No.	Pile Size	Boring log No.
อาคารศูนย์นวัตกรรมการเรียนรู้เพื่อการ ออกแบบ มพระจอมเกล้าธนบุรี.	53	φ 1200 mmx50m	BH-1
NOBLE REVENT	26	φ 900 mmx50m	BH-1
AIA – CMC PROJECT	189	φ 1500mmx70m	BH-1
HAUS 23 CONDOMINIUM	62	φ 800mmx55m	BH-1
อาคารเอนกประสงค์กองบัญชาการกองทัพ ภาคที่1	139	φ 500mmx19.5m	BH-1
ศุภาลัย พรีเมียร์ อโศก	P39	φ 1000mmx60m	BH-1
CIRCLE LIVING PROTOTYPE PROJECT	21-2000	φ 2000mmx60m	BH-1
ก่อสร้างทางเดินยกระดับเพื่อเชื่อมต่อระหว่าง สถานีรถไฟฟ้ามีกะสันของ รฟท .กับสถานี รถไฟฟ้าเพชรบุรีของ รฟม.	20	φ 600mmx25m	BH-1
ชื่อโครงการ	Pile No.	Pile Size	Boring log No.
อาคารสำนักงาน 7 ชั้น	86	φ 600mmx19.3m	BH-1
CONSTRUCTION OF RESERVOIRS FOR PHETKASEM AND RATBURANA DISTRIBUTION PUMPING STATION AND RELATED WORKS PROJECT	B95	φ 800mmx15.5m	BH-2

ตารางที่ 3.10 ตำแหน่งและขนาดของเสาเข็มในการทดสอบ Static pile load test ในบริเวณ

กรุงเทพมหานคร ประเภทเสาเข็มตอก

ชื่อโครงการ	Pile No.	Pile Size	Boring log No.
สถานีวิทยุ พล.ม.2 รอ เกียกกาย.1	36	Sq.0.26x0.26x21m	BH-2
สถานีวิทยุ พล.ม.2 รอเกียกกาย. 2	17	Sq.0.30x0.30x21m	BH-2
EXPANSION OF BANGKHEN WATER TREATMENT PLANT AND RELATED WORKS PROJECT	21	Sq.0.35x0.35x24m	BH-5
EXPANSION OF BANGKHEN WATER TREATMENT PLANT AND RELATED WORKS PROJECT	5	φ 500mmx24m	BH-3
ก่อสร้างสะพานต่างระดับถนนจรรัษฎุสนิหงศ์ 1	E5-37	Sq.0.40x0.40x26m	BH-5
ก่อสร้างสะพานต่างระดับถนนจรรัษฎุสนิหงศ์ 2	P.13	φ 600mmx24m	BH-5
CONSTRUCTION OF RESERVOIRS FOR PHETKASEM AND RATBURANA DISTRIBUTION PUMPING STATION AND RELATED WORKS PROJECT	TP2	Sq.0.35x0.35x22m	BH-2
MRT BLUE LINE EXTENSION PROJECT	Point 6	φ600mmx23.25m	BH-6
ก่อสร้างอาคารศูนย์มะเร็งและสิ่งอำนวยความสะดวก โรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช	Line G.8	φ 800mmx33m	BH-1
ก่อสร้างทางต่างระดับ ถนนพัฒนาการ-ถนนอ่อนนุช	Ramp5 01	Sq.0.40x0.40x24m	BH-1

## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการศึกษา

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธี Static pile load test

การหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนาม Static pile load test ชนิด compression test ถูกวิเคราะห์โดยใช้วิธี Mazurkiewicz (1972) และวิธี Chin (1970) โดยวิธี Mazurkiewicz สามารถทำได้โดยการแบ่งค่าการทรุดตัวของเสาเข็มให้เท่ากัน และหาน้ำหนักบรรทุกที่แต่ละการทรุดตัวโดยการลากเส้นในแนวตั้งตัดกับเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว จากนั้นลากเส้นขนานแนวนอนของแต่ละน้ำหนักบรรทุกตัดแกน Y จากจุดตัดบนแกน Y นี้ ลากเส้น 45 องศา เข้าตัดกับเส้นขนานแนวนอนของน้ำหนักบรรทุกถัดไป และลากเส้นเชื่อมต่อดังกล่าวที่เกิดขึ้นทั้งหมด ค่าตัดแกน Y คือ ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด และวิธี Chin สามารถทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าการเคลื่อนตัวและแรงกับค่าการเคลื่อนตัว โดยค่าความชันของกราฟเส้นตรงนี้คือ ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ผลการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มแต่ละต้นแสดงดังตารางที่ 4.1

ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่วิเคราะห์จากผลการทดสอบ Static pile load test ระหว่างวิธี Mazurkiewicz และวิธี Chin วิเคราะห์โดยจำแนกตามชนิดของเสาเข็ม คือ เสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่วิเคราะห์โดยวิธี Chin มีค่ามากกว่าวิเคราะห์โดยวิธี Mazurkiewicz (1972) ประมาณ 1.39 เท่า ( $R^2=0.758$ ) และ 1.60 เท่า ( $R^2=0.972$ ) สำหรับกรณีเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะตามลำดับ

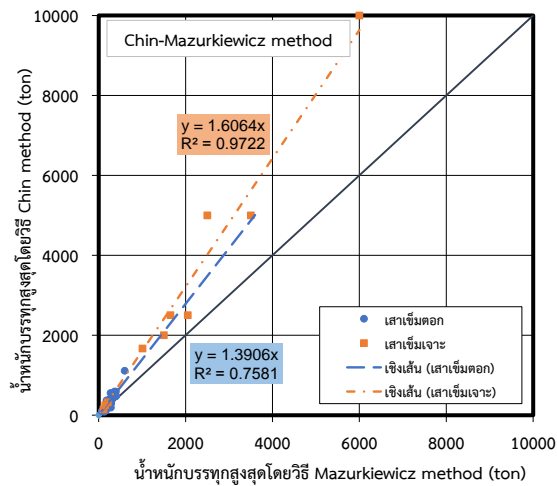
ตารางที่ 4.1 คำนวณน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Static pile load test

ชื่อโครงการ		Pile size	ประเภท เสาเข็ม	Mazurkiewicz method (ton)	Chin method (ton)
UHV plant project	PLT-1C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	395	588.24
	PLT-2C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	375	476.19
	PLT-3C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	250	312.5
	PLT-4C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	350	476.19
	PLT-4C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	350	476.19
	PLT-5C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	270	400
	PLT-5C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	270	400
	PLT-6C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	400	476.19
	PLT-6C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	400	476.19
	PLT-7C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	315	526.32
	PLT-7C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	315	526.32
	PLT-8C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	375	476
	PLT-8C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	375	476
	PLT-9C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	260	312.5
	PLT-9C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	260	312.5
	PLT-10C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	265	322.58
	PLT-10C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	265	322.58
	PLT-11C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	335	454.54
	PLT-11C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	335	454.54
	PLT-12C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	285	294.12
PLT-12C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	285	294.12	
CHP II PROJECT	4C	Sq.0.45x0.45 x21m	ตอก	250	384.62
	8C	Sq.0.35x0.35 x21m	ตอก	180	370.37
LLDPE PROJECT	C400-1	Sq.0.40x0.40x18m	ตอก	275	555.56
	C400-2	Sq.0.40x0.40x15m	ตอก	260	400
	C/T400-1	Sq.0.40x0.40x18m	ตอก	268	312.5
PUI PROJECT	C-300	Sq.0.45x0.45x21m	ตอก	165	112.31
	C-450	Sq.0.45x0.45x21m	ตอก	362	588.25
อาคารศูนย์นวัตกรรม เรียนรู้เพื่อการออกแบบ ม.พระ จอมเกล้าธนบุรี	53	φ 1200 mm x50m	เจาะ	2050	2500



ชื่อโครงการ		Pile size	ประเภท เสาเข็ม	Mazurkiewicz method (ton)	Chin method (ton)
NOBLE REVENT	26	φ 900 mm x50m	เจาะ	2500	5000
AIA – CMC PROJECT	189	φ 1500mm x70m	เจาะ	3500	5000
HAUS 23 CONDOMINIUM	62	φ 800mm x55m	เจาะ	1500	2000
สถานีวิทยุ พล.ม.2 รอ. เกียกกาย 1	36	Sq.0.26x0.26x21m	ตอก	70	99.01
สถานีวิทยุ พล.ม.2 รอ. เกียกกาย 2	17	Sq.0.30x0.30x21m	ตอก	128	86.21
EXPANSION OF BANGKHEN WATER TREATMENT PLANT AND RELATED WORKS PROJECT	21	Sq.0.35x0.35x24m	ตอก	248	344.83
EXPANSION OF BANGKHEN WATER TREATMENT PLANT AND RELATED WORKS PROJECT	5	φ 500mm x24m	ตอก	280	188.68
ก่อสร้างสะพานต่างระดับ ถนนจรัญสนิทวงศ์ 1	E5-37	Sq.0.40x0.40x26m	ตอก	290	344.82
ก่อสร้างสะพานต่างระดับ ถนนจรัญสนิทวงศ์ 2	P13	φ 600mm x24m	ตอก	350	500
อาคารเอนกประสงค์ กองบัญชาการกองทัพภาคที่ 1	139	φ 500mm x19.5m	เจาะ	110	142.86
ศุภาลัย พรีเมียร์ อโศก	P39	φ 1000mm x60m	เจาะ	1650	2500
CONSTRUCTION OF RESERVOIRS FOR PHETKASEM PROJECT	TP.2	Sq.0.35x0.35x22m	ตอก	175	263.16
CIRCLE LIVING PROTOTYPE PROJECT	20-2000	φ 2000mm x60m	เจาะ	6000	10000
MRT BLUE LINE EXTENSION PROJECT	NBH-02	φ 600mm x23.25m	ตอก	300	416.67
ก่อสร้างอาคารศูนย์แม่เรียงและ สิ่งอำนวยความสะดวก โรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช	LINE G.8	φ 800mm x33m	ตอก	600	1111.11
ก่อสร้างทางต่างระดับ ถนน พัฒนาการ-ถนนอ่อนนุช	Ramp501	Sq.0.40x0.40x24m	ตอก	200	227.27

ชื่อโครงการ		Pile size	ประเภท เสาเข็ม	Mazurkiewicz method (ton)	Chin method (ton)
ก่อสร้างทางเดินยกระดับเพื่อ เชื่อมต่อระหว่างสถานีรถไฟฟ้า มักกะสันของ รฟท. กับสถานี รถไฟฟ้าเพชรบุรีของ รฟม.	20	φ 600mm x25m	เจาะ	210	322.58
อาคารสำนักงาน 7 ชั้น	86	φ 600mm x19.3m	เจาะ	150	250
CONSTRUCTION OF RESERVOIRS FOR PHETKASEM PROJECT	B95	φ 800mm x15.5m	เจาะ	1010	1666.67



รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีการทดสอบในสนาม

## 4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธีสถิตยศาสตร์

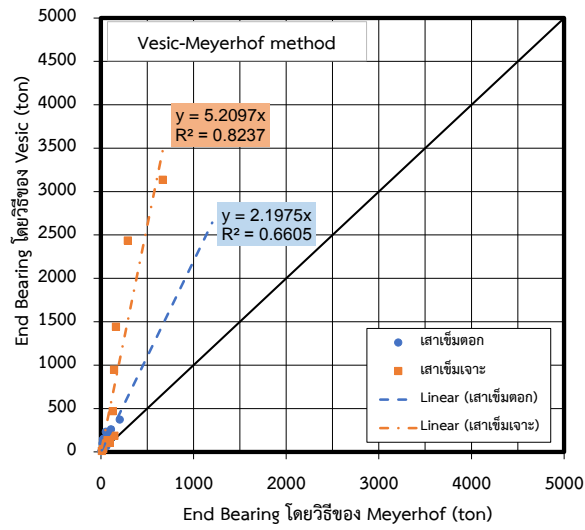
### 4.2.1 ผลการคำนวณหาค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

ค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มในการศึกษานี้ถูกคำนวณมาจากสูตรดังสมการที่ (1) โดยมีค่าส่วนประกอบหน่วยแรงต้านของดิน  $N_c^*$  และ  $N_q^*$  แตกต่างกันตามวิธีของ Meyerhof, Vesic, และ Janbu (ตารางที่ 4.2)

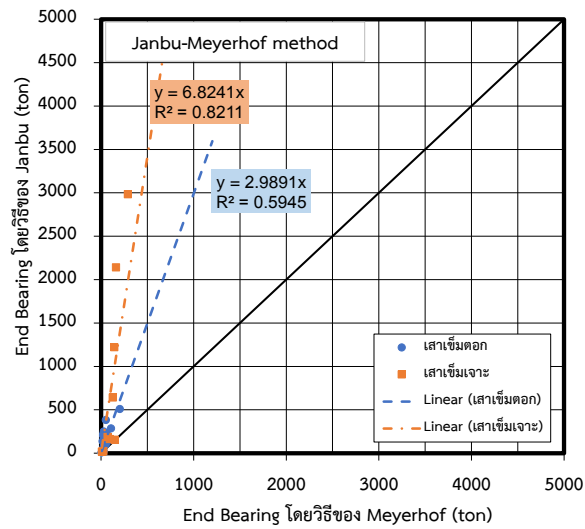
$$Q_b = A_p (cN_c^* + qN_q^*) \quad (4.1)$$

- เมื่อ  $Q_b$  = แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม  
 $A_p$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม  
 $q$  = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งที่ระดับปลายเสาเข็ม  
 $c$  = ค่าความเชื่อมแน่นของดิน  
 $N_c^*$  และ  $N_q^*$  = ค่าตัวประกอบหน่วยแรงต้านของดิน

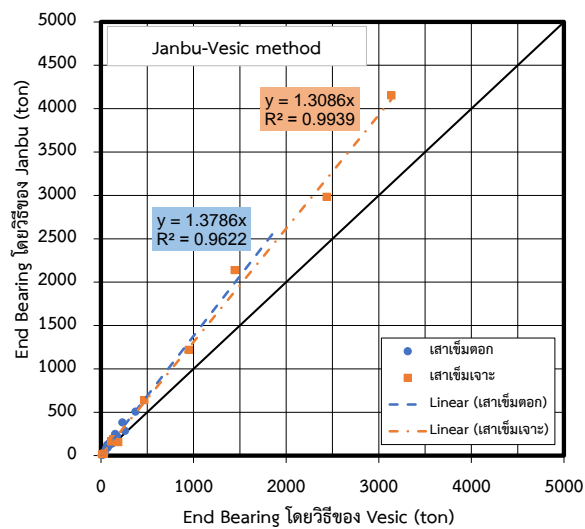
ผลการคำนวณและเปรียบเทียบค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มระหว่างวิธีของ Meyerhof, Vesic, และ Janbu วิเคราะห์โดยจำแนกตามชนิดของเสาเข็ม คือ เสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ผลการคำนวณหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มทั้งกรณีเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ การคำนวณโดยวิธีของ Janbu จะให้ค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มสูงสุด รองลงมาคือวิธีของ Vesic และ Meyerhof ตามลำดับ โดยกรณีเสาเข็มตอก วิธีของ Janbu จะให้ค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มมากกว่าวิธีของ Vesic และ Meyerhof ประมาณ 1.4 เท่า ( $R^2 = 0.9622$ ) และ 3 เท่า ( $R^2 = 0.5945$ ) ตามลำดับ และกรณีเสาเข็มเจาะ วิธีของ Janbu จะให้ค่ามากกว่าวิธีของ Vesic และ Meyerhof ประมาณ 1.3 เท่า ( $R^2 = 0.9939$ ) และ 6.8 เท่า ( $R^2 = 0.8211$ ) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์นี้ ข้อมูลของเสาเข็มเจาะมีจำนวนน้อยอาจจะทำให้มีความแม่นยำน้อย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

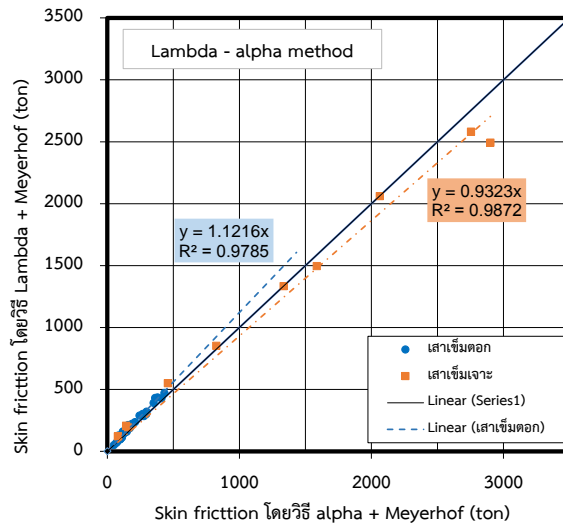
ชื่อโครงการ	Pile No.	Pile size	ประเภทเสาเข็ม	End bearing		
				Meyerhof Method (ton)	Vesic Method (ton)	Janbu Method (ton)
UHV plant project	PLT-1C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	29.18	152.52	250.24
	PLT-2C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	23.29	118.16	140.00
	PLT-3C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	9.69	12.39	12.59
	PLT-4C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	42.05	130.81	180.09
	PLT-4C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	28.44	91.31	140.77
	PLT-5C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	10.57	13.52	13.09
	PLT-5C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	22.02	28.16	20.53
	PLT-6C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	28.39	84.57	130.00
	PLT-6C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	21.93	140.82	203.29
	PLT-7C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	32.98	72.22	94.24
	PLT-7C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	31.95	115.39	141.25
	PLT-8C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	11.15	14.26	19.84
	PLT-8C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	36.37	121.41	158.02
	PLT-9C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	8.37	10.70	11.41
	PLT-9C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	11.01	14.08	12.69
	UHV plant project	PLT-10C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	22.90	29.29
PLT-10C		Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	14.53	18.58	15.20
PLT-11C		Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	37.40	120.40	158.00
PLT-11C		Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	22.23	141.99	215.11
CHP II PROJECT	PLT-12C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	19.82	25.34	18.51
	PLT-12C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	11.45	14.64	13.89
CHP II PROJECT	4C	Sq.0.45x0.45 x21m	ตอก	51.46	101.47	139.38
	8C	Sq.0.35x0.35 x21m	ตอก	25.42	49.09	65.91
LLDPE PROJECT	C400-1	Sq.0.40x0.40x18m	ตอก	47.94	60.87	93.67
	C400-2	Sq.0.40x0.40x15m	ตอก	60.49	66.55	121.18
	C/T400-1	Sq.0.40x0.40x18m	ตอก	48.42	80.40	127.53
PUI PROJECT	C-300	Sq.0.45x0.45x21m	ตอก	60.16	169.83	224.62
	C-450	Sq.0.45x0.45x21m	ตอก	60.16	169.83	224.62
อาคารศูนย์นวัตกรรม เรียนรู้เพื่อการออกแบบ ม. พระจอมเกล้าธนบุรี	53	φ 1200 mm x50m	เจาะ	162.22	1443.56	2140.12

ชื่อโครงการ	Pile No.	Pile size	ประเภท เสาเข็ม	End bearing		
				Meyerhof Method (ton)	Vesic Method (ton)	Janbu Method (ton)
NOBLE REVENT	26	φ 900 mm x50m	เจาะ			
AIA – CMC PROJECT	189	φ 1500mm x70m	เจาะ	289.57	2435.47	2983.29
HAUS 23 CONDOMINIUM	62	φ 800mm x55m	เจาะ	126.99	468.54	640.28
สถานีวิทยุ พล.ม.2 รอ. เกียกกาย1	36	Sq.0.26x0.26x21m	ตอก	15.50	19.83	12.87
สถานีวิทยุ พล.ม.2 รอ. เกียกกาย2	17	Sq.0.30x0.30x21m	ตอก	20.64	26.40	17.13
EXPANSION OF BANGKHEN WATER TREATMENT PLANT	21	Sq.0.35x0.35x24m	ตอก	16.86	96.74	137.41
EXPANSION OF BANGKHEN WATER TREATMENT PLANT	5	φ 500mm x24m	ตอก	52.11	231.60	382.31
ก่อสร้างสะพานต่างระดับ ถนนจรัญสนิทวงศ์ 1	E5-37	Sq.0.40x0.40x26m	ตอก	42.48	83.47	121.01
ก่อสร้างสะพานต่างระดับ ถนนจรัญสนิทวงศ์ 2	P13	φ 600mm x24m	ตอก	57.40	87.99	140.07
อาคารเอนกประสงค์ กองบัญชาการกองทัพภาคที่ 1	139	φ 500mm x19.5m	เจาะ	25.22	32.25	23.18
ศุภาลัย พรีเมียร์ อโศก	P39	φ 1000mm x60m	เจาะ	142.50	948.03	1219.91
CONSTRUCTION OF RESERVOIRS FOR PHETKASEM PROJECT	TP.2	Sq.0.35x0.35x22m	ตอก	28.10	35.93	21.90
CIRCLE LIVING PROTOTYPE PROJECT	20-2000	φ 2000mm x60m	เจาะ	668.31	3135.89	4152.72
MRT BLUE LINE EXTENSION PROJECT	NBH-02	φ 600mm x23.25m	ตอก	107.88	259.21	285.99
ก่อสร้างอาคารศูนย์มะเร็ง และสิ่งอำนวยความสะดวก โรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดช	LINE G.8	φ 800mm x33m	ตอก	202.51	371.96	507.93

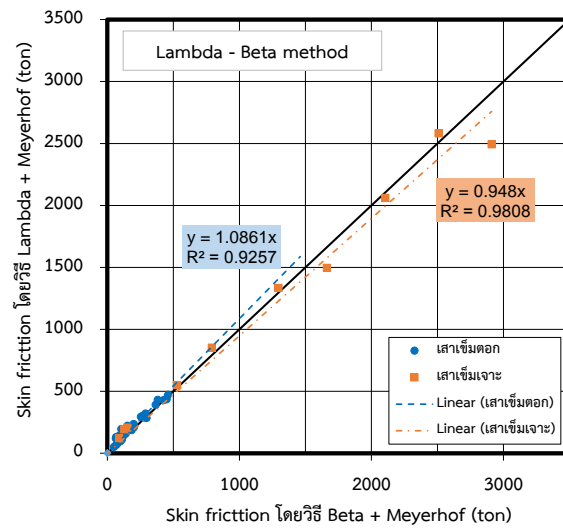
ชื่อโครงการ	Pile No.	Pile size	ประเภท เสาเข็ม	End bearing		
				Meyerhof Method (ton)	Vesic Method (ton)	Janbu Method (ton)
ก่อสร้างทางต่างระดับ ถนน พัฒนาการถนนอ่อนนุช-	Ramp501	Sq.0.40x0.40x24m	ตอก	43.63	79.74	124.45
ก่อสร้างทางเดินยกระดับ เพื่อเชื่อมต่อระหว่างสถานี รถไฟฟ้ามีกาะสันของ รพทกับสถานีรถไฟฟ้า . เพชรบุรีของรฟม.	20	φ 600mm x25m	เจาะ	70.82	135.16	186.78
อาคารสำนักงาน 7 ชั้น	86	φ 600mm x19.3m	เจาะ	94.21	107.59	162.25
CONSTRUCTION OF RESERVOIRS FOR PHETKASEM PROJECT	B95	φ 800mm x15.5m	เจาะ	9.05	11.57	17.45

#### 4.2.2 ผลการคำนวณหาค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม

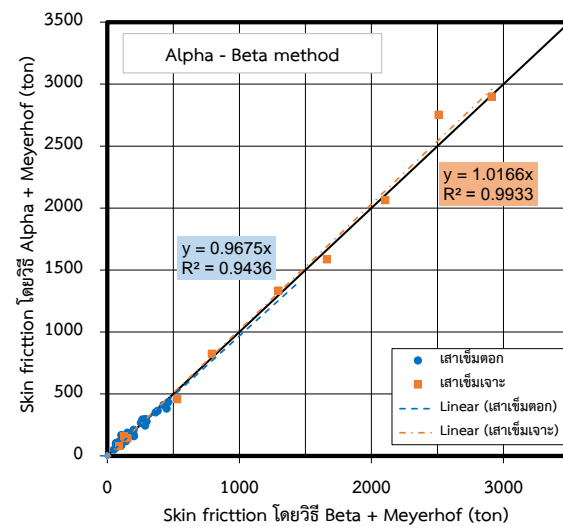
ค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มสามารถคำนวณได้จาก ส่วนรวมกัน คือ 2(1) แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นดินเหนียว คำนวณโดยวิธีของ  $\lambda$  Method,  $\alpha$  Method, และ  $\beta$  Method (2) แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นดินทราย คำนวณโดยวิธีของ Meyerhof ผลการคำนวณและเปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มระหว่างวิธีของ  $\lambda$  Method,  $\alpha$  Method, และ  $\beta$  Method ในดินเหนียว บวกกับดินทรายโดยวิธี Meyerhof แสดงดังรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์โดยจำแนกตามชนิดของเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะทั้ง วิธี ให้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดที่ใกล้เคียงกันโดยมีความแตกต่างเฉลี่ยไม่ 3 5 เกิน%



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยวิธีต่างๆ



ตารางที่ 4.3 ค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม

ชื่อโครงการ	Pile No.	Pile size	ประเภทเสาเข็ม	Skin friction		
				Qs ( $\lambda$ + sand) (ton)	Qs ( $\alpha$ + sand) (ton)	Qs ( $\beta$ + sand) (ton)
UHV plant project	PLT-1C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	470.99	432.61	460.95
	PLT-2C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	235.20	210.15	199.80
	PLT-3C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	142.73	124.55	123.82
	PLT-4C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	301.67	267.79	275.34
	PLT-4C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	320.66	296.68	288.58
	PLT-5C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	161.92	129.42	126.42
	PLT-5C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	168.00	145.27	125.63
	PLT-6C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	294.26	265.97	254.45
	PLT-6C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	428.04	409.83	426.18
	PLT-7C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	150.25	125.06	114.86
	PLT-7C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	185.24	169.05	183.58
	PLT-8C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	287.81	243.59	285.94
	PLT-8C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	284.16	277.68	296.20
	PLT-9C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	152.61	130.60	126.32
	PLT-9C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	110.63	110.46	110.63
	PLT-10C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	190.66	156.99	129.60
	PLT-10C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	157.72	147.27	124.49
	UHV plant project	PLT-11C	Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	298.63	294.04
PLT-11C		Sq.0.45x0.45x30m	ตอก	435.57	380.44	449.20
UHV plant project	PLT-12C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	155.67	137.34	124.95
	PLT-12C	Sq.0.40x0.40x20m	ตอก	205.78	176.18	197.52
CHP II PROJECT	4C	Sq.0.45x0.45 x21m	ตอก	158.87	117.77	141.08
	8C	Sq.0.35x0.35 x21m	ตอก	127.00	83.82	105.36
LLDPE PROJECT	C400-1	Sq.0.40x0.40x18m	ตอก	75.69	75.69	75.69
	C400-2	Sq.0.40x0.40x15m	ตอก	49.58	49.58	49.58
	C/T400-1	Sq.0.40x0.40x18m	ตอก	66.51	66.51	66.51

ชื่อโครงการ	Pile No.	Pile size	ประเภทเสาเข็ม	Skin friction		
				Qs ( $\lambda$ + sand) (ton)	Qs ( $\alpha$ + sand) (ton)	Qs ( $\beta$ + sand) (ton)
PUI PROJECT	C-300	Sq.0.45x0.45x21m	ตอก	97.51	97.51	97.51
	C-450	Sq.0.45x0.45x21m	ตอก	97.51	97.51	97.51
อาคารศูนย์นวัตกรรม การเรียนรู้เพื่อการ ออกแบบ มพระจอม. เกล้าธนบุรี	53	$\phi$ 1200 mm x50m	เจาะ	2060.22	2062.57	2105.16
NOBLE REVENT	26	$\phi$ 900 mm x50m	เจาะ	1495.98	1585.91	1662.67
AIA – CMC PROJECT	189	$\phi$ 1500mm x70m	เจาะ	2492.73	2900.15	2909.89
HAUS 23 CONDOMINIUM	62	$\phi$ 800mm x55m	เจาะ	851.07	824.53	791.58
สถานีวิทยุ พล.ม.2 รอ. เกียกกาย1	36	Sq.0.26x0.26x21m	ตอก	130.75	103.77	66.05
สถานีวิทยุ พล.ม.2 รอ. เกียกกาย2	17	Sq.0.30x0.30x21m	ตอก	195.43	168.28	105.33
EXPANSION OF BANGKHEN WATER TREATMENT PLANT	21	Sq.0.35x0.35x24m	ตอก	390.85	349.78	365.28
EXPANSION OF BANGKHEN WATER TREATMENT PLANT	5	$\phi$ 500mm x24m	ตอก	212.53	157.91	202.08
ก่อสร้างสะพานต่าง ระดับถนนจรัญสนิทวงศ์ 1	E5-37	Sq.0.40x0.40x26m	ตอก	221.29	186.49	153.07
ก่อสร้างสะพานต่าง ระดับถนนจรัญสนิทวงศ์ 2	P13	$\phi$ 600mm x24m	ตอก	143.53	117.42	92.67
อาคารเอนกประสงค์ กองบัญชาการกองทัพ ภาคที่1	139	$\phi$ 500mm x19.5m	เจาะ	192.69	156.96	127.21
ศุภาลัย พรีเมียร์ อโศก	P39	$\phi$ 1000mm x60m	เจาะ	1332.99	1334.22	1295.59
CONSTRUCTION OF RESERVOIRS FOR PHETKASEM PROJECT	TP.2	Sq.0.35x0.35x22m	ตอก	118.83	96.97	63.70

ชื่อโครงการ	Pile No.	Pile size	ประเภทเสาเข็ม	Skin friction		
				Qs ( $\lambda$ + sand) (ton)	Qs ( $\alpha$ + sand) (ton)	Qs ( $\beta$ + sand) (ton)
CIRCLE LIVING PROTOTYPE PROJECT	20-2000	$\phi$ 2000mm x60m	เจาะ	2580.51	2753.41	2508.35
MRT BLUE LINE EXTENSION PROJECT	NBH-02	$\phi$ 600mm x23.25m	ตอก	151.39	121.75	113.32
ก่อสร้างอาคารศูนย์ มะเร็งและสิ่งอำนวยความสะดวก ความสะอาด โรงพยาบาลภูมิพล ดุสิต	LINE G.8	$\phi$ 800mm x33m	ตอก	430.35	362.38	381.96
ก่อสร้างทางต่างระดับ ถนนพัฒนาการถนน- อ่อนนุช	Ramp5 01	Sq.0.40x0.40x24m	ตอก	170.58	135.18	132.97
ก่อสร้างทางเดิน ยกระดับเพื่อเชื่อมต่อ ระหว่างสถานีรถไฟฟ้า มักกะสันของ รฟทกับ สถานีรถไฟฟ้าเพชรบุรี ของ รฟม	20	$\phi$ 600mm x25m	เจาะ	206.31	142.03	152.64
อาคารสำนักงาน 7 ชั้น	86	$\phi$ 600mm x19.3m	เจาะ	120.57	79.01	88.83
CONSTRUCTION OF RESERVOIRS FOR PHETKASEM PROJECT	B95	$\phi$ 800mm x15.5m	เจาะ	550.52	457.59	527.99

### 4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Mazurkiewicz และวิธีสถิตยศาสตร์

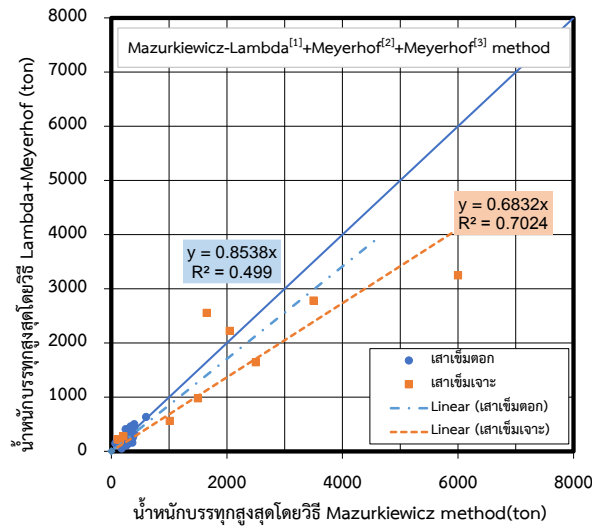
ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ถูกระบุโดยวิธี Mazurkiewicz จากการทดสอบ Static pile load test ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ด้วยสูตรต่างๆ ทั้งหมด วิธี ดังนี้ 9(1)  $\lambda^{[1]} + \text{Meyerhof}^{[2]} + \text{Meyerhof}^{[3]}$ , (2)  $\lambda^{[1]} + \text{Meyerhof}^{[2]} + \text{Vesic}^{[3]}$ , (3)  $\lambda^{[1]} + \text{Meyerhof}^{[2]} + \text{Janbu}^{[3]}$ , (4)  $\alpha^{[1]} + \text{Meyerhof}^{[2]} + \text{Meyerhof}^{[3]}$ , (5)  $\alpha^{[1]} + \text{Meyerhof}^{[2]} + \text{Vesic}^{[3]}$ , (6)  $\alpha^{[1]} + \text{Meyerhof}^{[2]} + \text{Janbu}^{[3]}$ , (7)  $\beta^{[1]} + \text{Meyerhof}^{[2]} + \text{Meyerhof}^{[3]}$ , (8)  $\beta^{[1]} + \text{Meyerhof}^{[2]} + \text{Vesic}^{[3]}$ , และ (9)  $\beta^{[1]} + \text{Meyerhof}^{[2]} + \text{Janbu}^{[3]}$

หมายเหตุ<sup>[1]</sup> แรงต้านทานที่ผิวของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

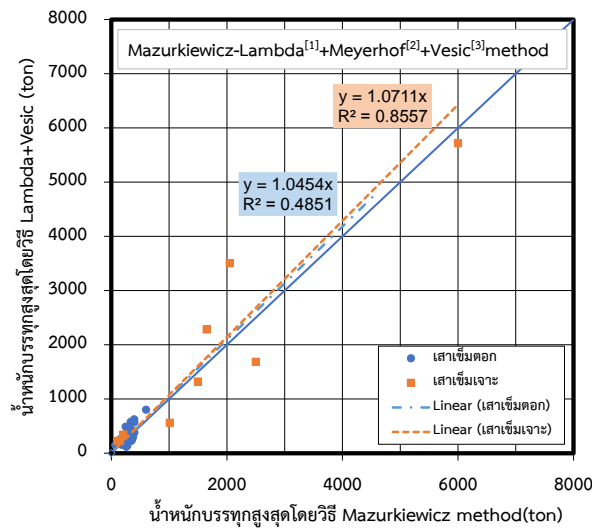
<sup>[2]</sup> แรงต้านทานที่ผิวของเสาเข็มในชั้นดินทราย

<sup>[3]</sup> แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

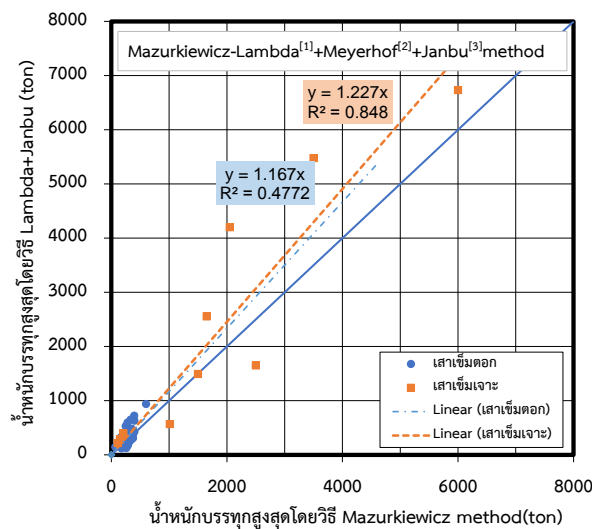
ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Mazurkiewicz และโดยวิธีสถิตยศาสตร์แสดงรูปที่ 4.4 เมื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบพบว่าการคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ไม่ว่าจะพิจารณาจากการคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยวิธีใดๆ เมื่อนำมารวมกับการคำนวณแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีของ Meyerhof จะให้ค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์ผลการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธี Mazurkiewicz เสมอ คือประมาณ 0.8 เท่า สำหรับเสาเข็มตอก และ 0.68 เท่า สำหรับเสาเข็มเจาะ แต่เมื่อนำมารวมกับการคำนวณแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีของ Janbu จะให้ค่ามากกว่าการวิเคราะห์ผลการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธี Mazurkiewicz คือ ประมาณ 1.12 เท่า และ 1.25 เท่า สำหรับเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลรวมของการคำนวณโดยวิธีของ Vesic จะให้ค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ผลการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธี Mazurkiewicz มากที่สุด



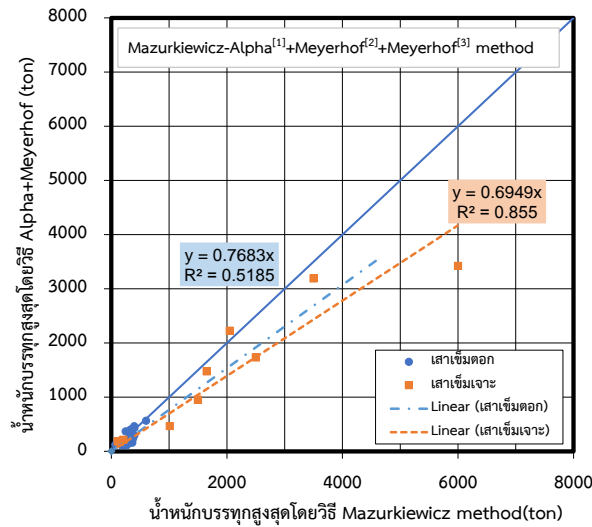
(ก)



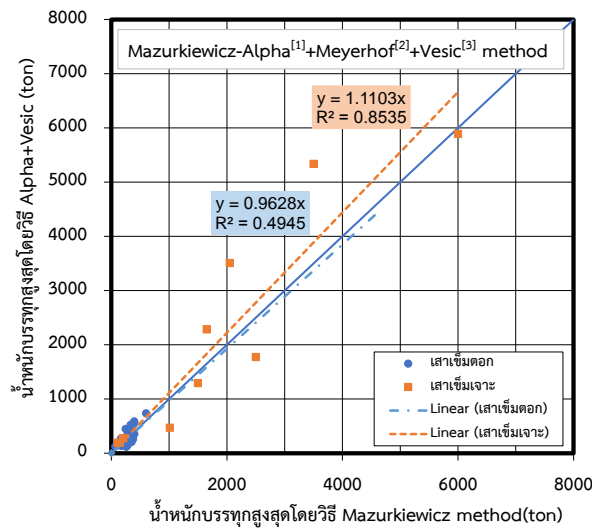
(ข)



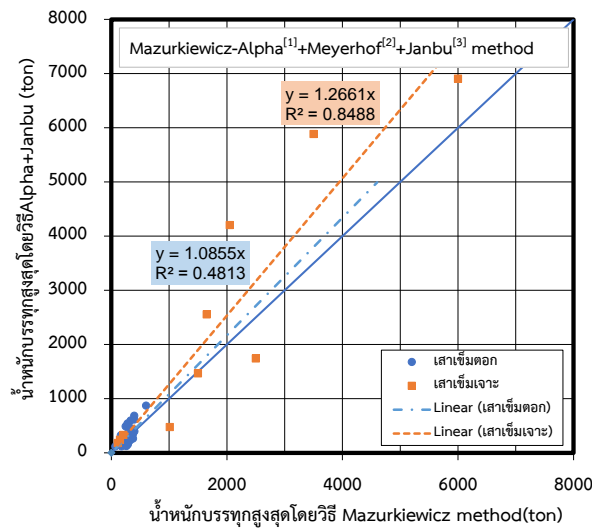
(ค)



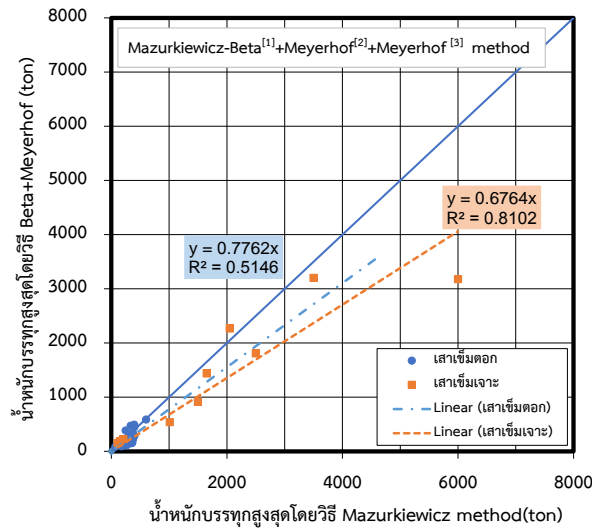
(ง)



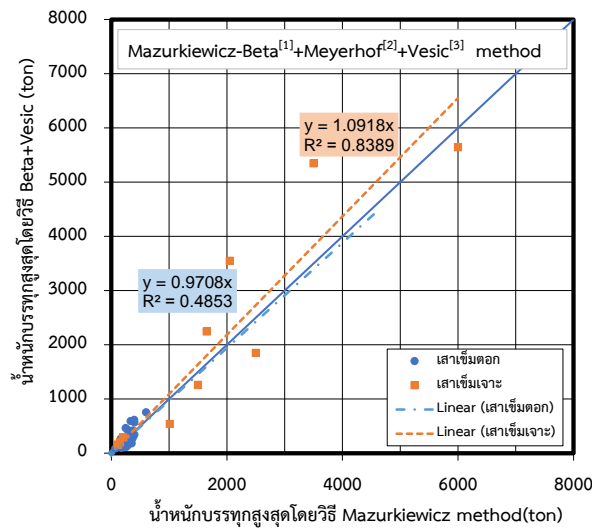
(จ)



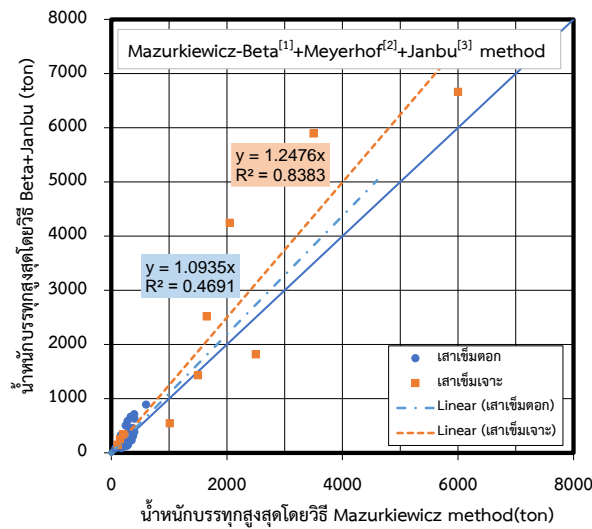
(ฉ)



(ข)



(ค)



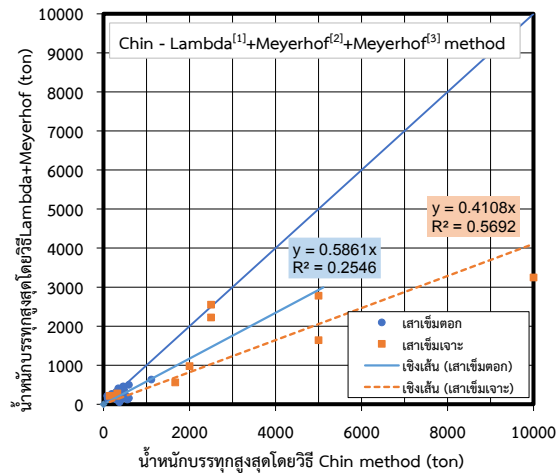
(ง)

รูปที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Mazurkiewicz และวิธีสถิตยศาสตร์

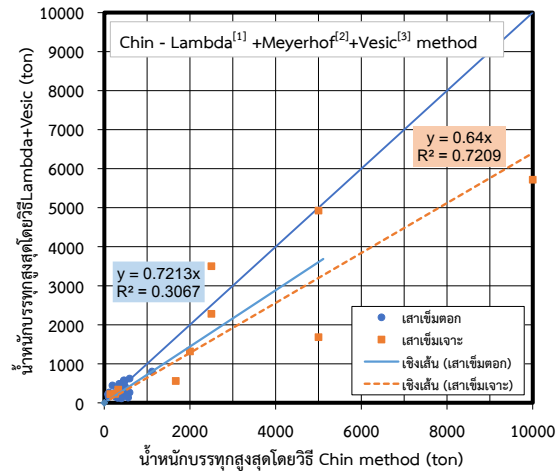
#### 4.4 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Chin และวิธีสถิตยศาสตร์

ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Chin และโดยวิธีสถิตยศาสตร์แสดงรูปที่ 4.5 เมื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบพบว่าการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ไม่ว่าจะพิจารณาจากการคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยวิธีใดๆ เมื่อนำมารวมกับการคำนวณแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีของ Meyerhof Janbu และ Vesic จะให้ค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์ผลการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธี Chin เสมอ คือ ประมาณ 0.55 เท่า และ 0.41 เท่า สำหรับเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะโดยวิธีของ Meyerhof, ประมาณ 0.77 เท่า และ 0.74 สำหรับเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะโดยวิธีของ Janbu, และประมาณ 0.68 เท่า และ 0.65 สำหรับเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะโดยวิธีของ Vesic

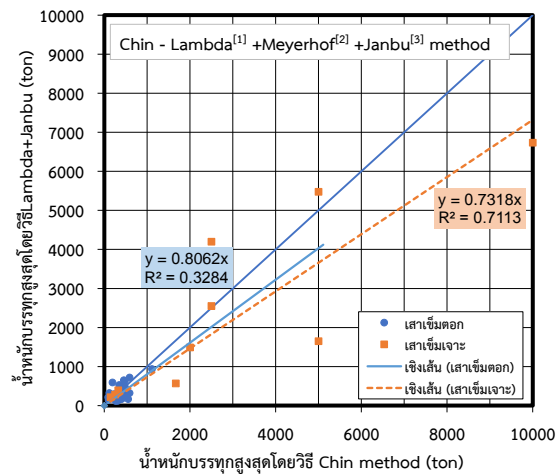




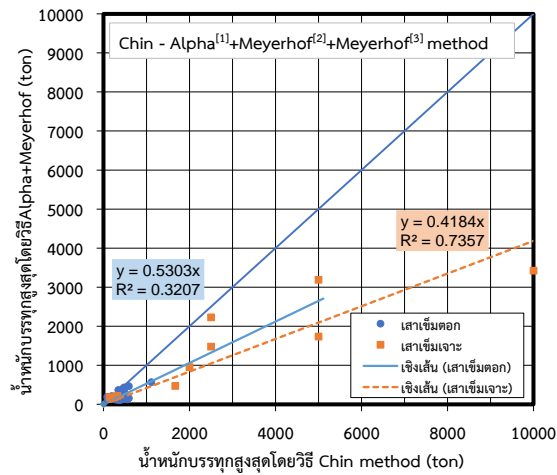
(ก)



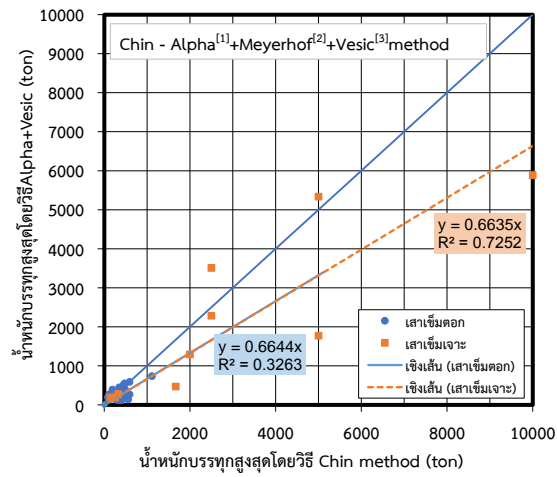
(ข)



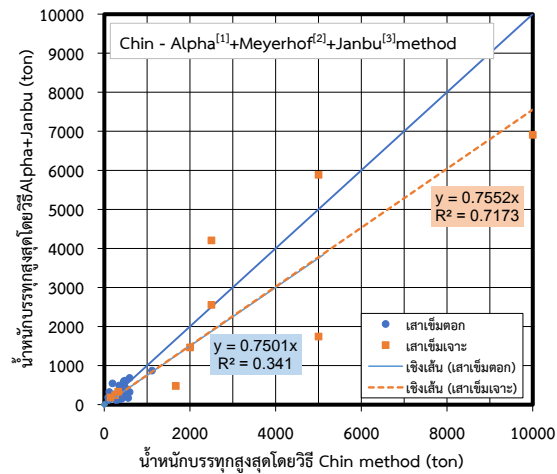
(ค)



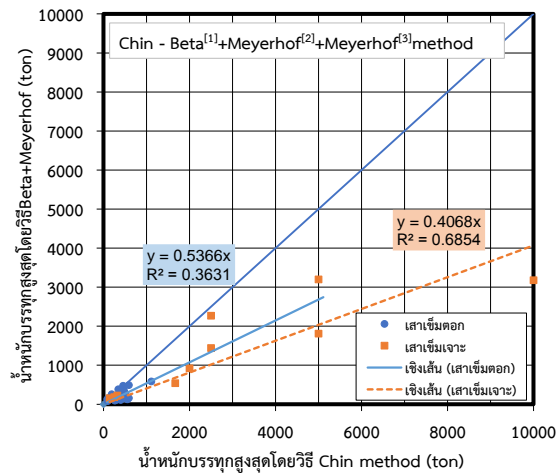
(ง)



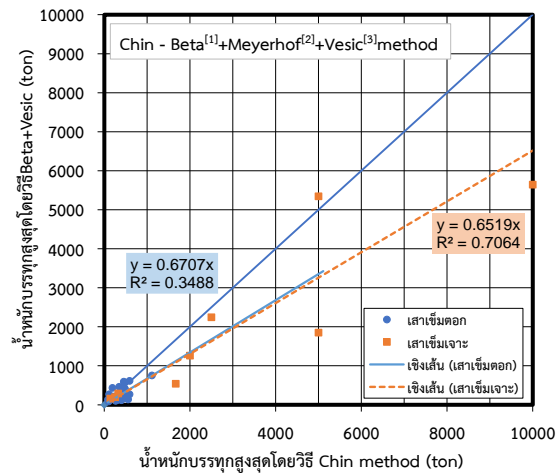
(จ)



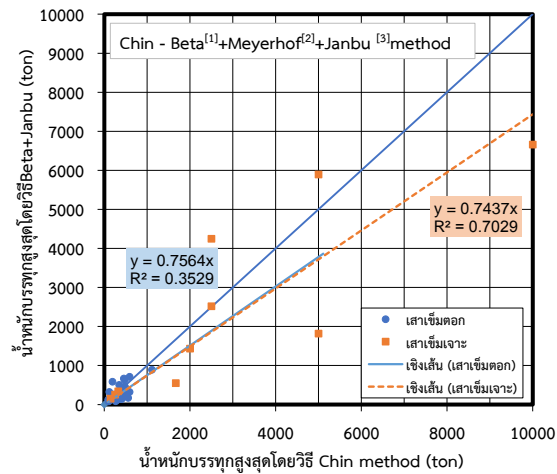
(ฉ)



(จ)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธี Chin และวิธีสถิตยศาสตร์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ต่างๆ และผลการประเมินหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธีการทดสอบ Static pile load test สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่วิเคราะห์โดยวิธี Chin มีค่ามากกว่าวิเคราะห์โดยวิธี Mazurkiewicz (1972) ประมาณ 1.39 เท่า ( $R^2=0.758$ ) และ 1.60 เท่า ( $R^2=0.972$ ) สำหรับกรณีเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะตามลำดับ

2. ผลการคำนวณหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มทั้งกรณีเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ การคำนวณโดยวิธีของ Janbu จะให้ค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มสูงสุด รองลงมาคือวิธีของ Vesic และ Meyerhof ตามลำดับ

3. ค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยวิธี  $\lambda$  Method,  $\alpha$  Method, และ  $\beta$  Method ในดินเหนียวบวกกับดินทรายโดยวิธี Meyerhof มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีความแตกต่างเฉลี่ยไม่เกิน 5%

4. การคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ไม่ว่าจะพิจารณาจากการคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยวิธีใดๆ เมื่อนำมารวมกับการคำนวณแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีของ Meyerhof Janbu และ Vesic จะให้ค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์ผลการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยวิธี Chin เสมอ

5. ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ไม่ว่าจะพิจารณาจากการคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยวิธีใดๆ เมื่อนำมารวมกับแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีของ Vesic จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธี Mazurkiewicz มากที่สุด ทั้งกรณีเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ

6. การคำนวณหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีของ Meyerhof ให้การประมาณค่าต่ำกว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธี Mazurkiewicz ประมาณ 0.8 เท่า สำหรับเสาเข็มตอก และ 0.68 เท่า สำหรับเสาเข็มเจาะ

7. การคำนวณหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มโดยวิธีของ Janbu (1976) ให้การประมาณค่าสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจริงในสนามโดยวิธี Mazurkiewicz ประมาณ 1.12 เท่า สำหรับเสาเข็มตอก และ 1.25 เท่า สำหรับเสาเข็มเจาะ วิธีนี้จึงไม่เหมาะสมในการออกแบบ

## บรรณานุกรม

- Briaud, J. L., and Tucker, L. M. (1988), "Measured and predicted response of 98 piles", *Journal of Geotechnical Engineering*, No. 114, Vol. 9, pp. 984–1001.
- Chin, F. K. (1970), "Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure", *Proceedings of the Second Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, pp. 83-91.
- Daping X. and Hong Y. (2011), "Back analysis of static pile load test for SPT-based pile design: a Singapore experience", *Geotechnical Special Publication*, No. 220, pp. 144-152.
- Das, B. M. (2004), "Principles of foundation engineering", Thomson Brooks/cole.
- Davissou, M. T. (1972), "High capacity piles", *Proceedings, Lecture Series, Innovations in foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, 52 pp.
- De Beer, E. E. and Wallays, M. (1972), "Franki piles with overexpanded bases", *La Technique des Travaux*, No. 333, 48 pp.
- Dithinde M., Phoon, K.K., De Wet M. and Retiel, J.V. (2011), "Characterization of model uncertainty in the static pile design formula", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No.1, pp. 70-85.
- Janbu, N. (1976), "Static bearing capacity of friction piles", *Proceeding 6<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1.2, pp. 479-482.
- Mazurkiewicz, B. K. (1972), "Test loading of piles according to polish regulations", Preliminary report no. 35, Commission on Pile Research, Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, Stockholm.
- Meyerhof G. G. (1956), "Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 82, SM 1, pp. 1-19.
- Meyerhof, G. G. (1976), "Bearing capacity and settlement of pile foundations", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 102, No. GT3, pp. 197-228.
- Phoon, K.K. and Kulhawy, F.H. (1999), "Characterisation of geotechnical variability", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 612–624.
-

- Peck, R. B., Hanson, W. and Thornburn, T.H. (1974), *Foundation engineering*, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, New York.
- Stroud, M. (1974). “SPT in insensitive clays”, *Proceedings, European Symposium on Penetration Testing*, Vol. 2.2, pp. 367-375.
- Tang, W. H. (1984), “Principles of probabilistic characterisation of soil properties.” *Proc. Probabilistic Characterization of Soil Properties: Bridge between Theory and Practice*, ASCE, New York, 74–89.
- Vesic, A. S. (1977), “Design of pile foundations”, *National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Practice No. 42*, Transportation Research Board, Washington DC.
- Vijayvergiya, V. N. and Focht, J. A. Jr. (1972), “A new way to predict capacity of piles in clay”, *Offshore Technology Conference Paper 1718*, 4<sup>th</sup> Offshore Technology Conference, Houston.
- Whitman, R. V. (2000), “Organising and evaluating uncertainties in geotechnical engineering”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No.7, pp. 583-593.
-

## ประวัตินักวิจัย

ชื่อ	ดร.วรรณวรางค์ รัตนานิคม
หน่วยงาน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
การศึกษา	Ph.D. (Civil Engineering), Chulalongkorn University
ความเชี่ยวชาญ	Geotechnical Engineering