

การแบ่งถ่าน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็มเสียดทานและต่อม่อ



นายชาติชาย พรวนพิทักษ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

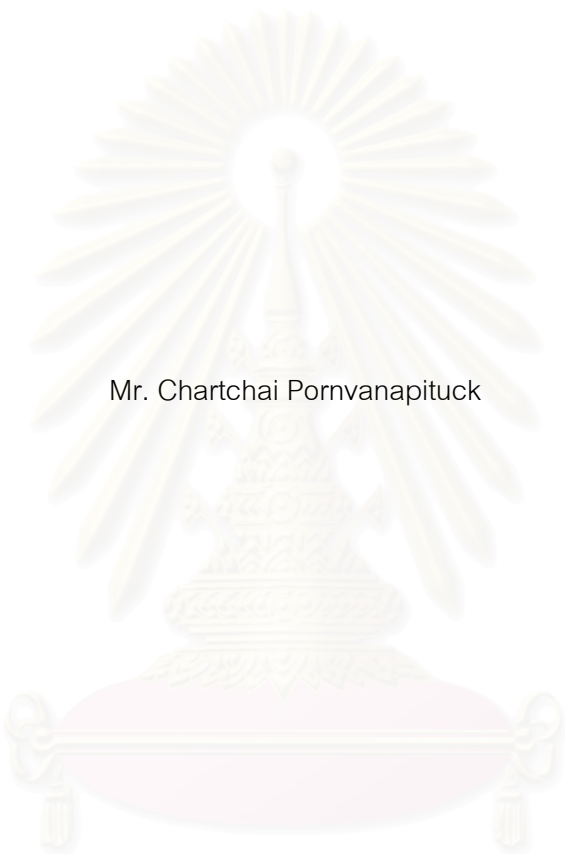
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2439-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TRANSFER OF LOAD BETWEEN FLOATING PILE AND PILE CAP



Mr. Chartchai Pornvanapituck

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic Year 2005

ISBN 974-53-2439-6

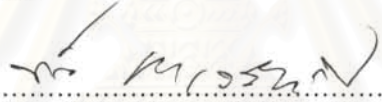
หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็มเสียดทานและตอม่อ  
โดย    นายชาติชาย พรวนพิทักษ์  
ภาควิชา                                        วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา                         รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล

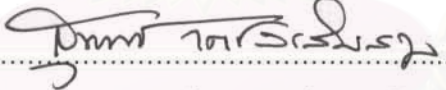
---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ณะเจริญกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏ์ชน)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ)

ชาติชาย พรวนพิทักษ์: การแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็มเสียดทานและค่อม่อ.  
(TRANSFER OF LOAD BETWEEN FLOATING PILE AND PILE CAP) อ. ที่ปรึกษา:  
รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 68 หน้า. ISBN 974-53-2439-6.

แรงปฏิกิริยา ระหว่างค่อม่อ และ เสาเข็มเสียดทาน มีความสำคัญอย่างมาก ต่อการ  
ออกแบบ โครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัว สำหรับ การก่อสร้างสะพาน ในการศึกษาครั้งนี้ได้มี  
การนำเอาเครื่องมือไปดำเนินการทดสอบจริง ในสนามซึ่งทำการทดสอบกับ เสาเข็มความยาว 4,  
6, 9, และ 12 เมตร โดยขนาดของค่อม่อคือ 1 x 1 ตารางเมตร ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้มี  
วัตถุประสงค์ เพื่อการเข้าใจถึงพฤติกรรมของปฏิกิริยาข้างต้น อย่างด่งแท้

จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่าหลังจากที่แรงเสียดทาน ของเสาเข็มมีขนาดสูงสุดแล้ว  
ค่อม่อ จึงเริ่มมีปฏิกิริยาซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจน จากกราฟน้ำหนักบรรทุก และ การเคลื่อนตัว  
ของทุกๆ น้ำหนักที่ทำการทดสอบแม้ว่า ความสามารถรับน้ำหนัก ของทั้งระบบจะเพิ่มขึ้น  
เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง ค่อม่อ และ เสาเข็มเสียดทาน แต่อย่างไรก็ตามการทรุดตัวที่เกิดจาก  
การเพิ่ม แรงเสียดทานจนมีขนาดสูงสุด นั้นมีค่าการเคลื่อนตัวค่อนข้างมาก ดังนั้นในการ  
ออกแบบจึงควรให้ความสำคัญกับทั้งเรื่องความแข็งแรง และ การเคลื่อนตัว

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

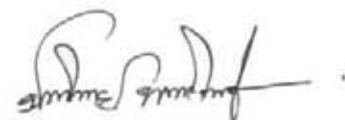
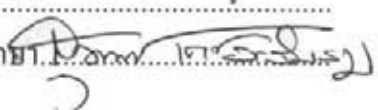
ภาควิชา .....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา .....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4570290721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : PILE / PILE CAP / PILE RAFT BEHAVIOR

CHARTCHAI PORNVANAPITUCK : TRANSFER OF LOAD BETWEEN  
FLOATING PILE AND PILE CAP. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. SUPOT  
TECHAVORASINSKUN, DR., 68 pp. ISBN 974-53-2439-6.

The interaction between pile cap and floating pile play a very important role on the design of the transition unit for bridge construction. In order to understand its mechanism, a series of in situ tools were conducted on pile with lengths of 4, 6, 9, and 12 meter with 1x1 m pile cap.

The results reveal that after the friction of the piles was fully mobilized the pile cap started to acting. This can be clearly seen from the load displacement curves of all tools. Although, the capacity of the overall system increase due to interaction effect settlement required obtain full combined capacity was pretty large. The design should be the therefore considering both strength and displacement.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department .....Civil Engineering.....Student's signature.....

Field of study.....Civil Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year 2005

*Chartchai Pornvanapituck*  
*Supot Techavorasinskun*

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง " การแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็มเสียดทาน และตอม่อ " ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ในการทำการวิจัยด้วยดีมาตลอด และ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวี ชนะเจริญกิจ, รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษชน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐิรวีตร บุญญะฐิติ ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณสุเทพ รามสูต นายช่างโยธา กรมทางหลวงที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบ รถมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ และ อำนวยความสะดวกในการรวบรวมข้อมูลการเจาะสำรวจดิน

ขอขอบคุณ เพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปฐพีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านตลอดมา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการเตรียมเครื่องมือทดสอบเสาเข็ม

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอระลึกถึงพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน และกรุณาอบรมสั่งสอนผู้เขียนจนได้สำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย .....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1.1 การหาค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม โดยวิธีการคำนวณทางทฤษฎี.....	5
2.1.2 การหาค่าลึงรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม โดยวิธีการทดสอบเสาเข็ม.....	9
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	14
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>19</b>
3.1 การเลือกสถานที่ทดสอบ.....	19
3.1.1 ลักษณะ โครงสร้างชั้นดินและคุณสมบัติบริเวณแปลงทดสอบ.....	20
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับทดสอบ.....	21
3.2.1 เครื่องมือวัดแรงดันในดิน (Ball Pressure Meter) .....	21
3.2.2 แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack).....	26
3.2.3 เครื่องมือวัดระยะการทรุดตัว (Dial Gauge).....	28
3.2.4 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ .....	29

## หน้า

3.3 คุณสมบัติของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงและคอนกรีตที่ใช้ในแผ่นพื้นคอนกรีต.....	29
3.4 ขั้นตอนการเตรียมการทดสอบและการทดสอบ.....	29
3.4.1 การขนส่งเสาเข็มและการตอกเสาเข็ม .....	29
3.4.2 การใส่เหล็กเสริมแผ่นพื้นและหล่อแผ่นคอนกรีตทับหัวเสาเข็ม.....	38
3.4.3 การเตรียมความพร้อมในแปลงทดสอบ.....	38
3.4.4 การเตรียมติดตั้งเครื่องมือต่างๆในสนามเพื่อทำการทดสอบ .....	41
3.4.5 การอ่านค่าข้อมูลต่างๆระหว่างการทำการทดสอบ .....	44
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	45
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล.....</b>	<b>46</b>
4.1. เสาเข็มต้นที่ 1 และ ต้นที่ 2 มีความยาวเสาเข็ม 4 เมตร .....	46
4.1.1 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 1 และ 2 .....	46
4.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 1 และ 2.....	48
4.2. เสาเข็มต้นที่ 3 และ ต้นที่ 4 มีความยาวเสาเข็ม 6 เมตร .....	49
4.2.1 ผลการทดสอบ ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 3 และ 4.....	49
4.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 3 และ 4.....	50
4.3 เสาเข็มต้นที่ 5 และ ต้นที่ 6 มีความยาวเสาเข็ม 9 เมตร .....	52
4.3.1 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 5 และ 6.....	52
4.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 5 และ 6.....	54
4.4 เสาเข็มต้นที่ 7 และ ต้นที่ 8 มีความยาวเสาเข็ม 12 เมตร .....	55
4.4.1 ผลการทดสอบ ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8.....	55
4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8.....	58
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>60</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	60
5.2 การนำไปใช้ประโยชน์.....	60
5.3 ข้อเสนอแนะ สำหรับการศึกษ วิจัยต่อไป .....	61
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>63</b>



ภาคผนวก.....	64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	68



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงดันในดิน .....	25
ตารางที่ 3.2 แสดงผลการสอบเทียบแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic jack).....	27
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลผลการทดสอบ การแบ่งถ่ายน้ำหนักเสาเข็มต้นที่ 1 และ 2.....	46
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลผลการทดสอบ การแบ่งถ่ายน้ำหนักเสาเข็มต้นที่ 3 และ 4.....	49
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลผลการทดสอบ การแบ่งถ่ายน้ำหนักเสาเข็มต้นที่ 5 และ 6.....	52
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลผลการทดสอบ การแบ่งถ่ายน้ำหนักเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8.....	55
ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบการแบ่งถ่ายน้ำหนัก ของเสาเข็ม และ แผ่นพื้นคอนกรีต.....	60

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	พฤติกรรมของดินรอบเสาเข็มเมื่อมีน้ำหนักภายนอกมากระทำ .....6
2.2	การรับน้ำหนักของเสาเข็ม .....6
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ .....8
2.4	รูปแบบแสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบเข็มสมอ 4 ต้น .....11
2.5	รูปด้านข้างแสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบเข็มสมอ 4 ต้น .....11
2.6	รูปแบบแสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ .....12
2.7	รูปด้านข้างแสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบ น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่.....12
2.8	ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบ ผสม ระหว่างเสาเข็มสมอและน้ำหนักบรรทุก .....13
2.9	ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบ ผสม ระหว่างเสาเข็มสมอและน้ำหนักบรรทุก .....13
2.10	ค่าปรับแก้เนื่องจากอิทธิพลของแท่นหัวเสาเข็ม Pile Cap, ( $F_R$ ) .....15
2.11	Design Chart สำหรับหาขนาด Pile Cap ของ Swedish Road Board.....16
2.12	Settlement Modification Factor, $M_s$ for Slip Effect of L/D and Adhesion Factor .....17
2.13	ค่า Settlement Modification Factor, $M_s$ for Slip Effect of K.....17
3.1	ลักษณะชั้นดิน และ คุณสมบัติบริเวณแปลงทดสอบ ทางหลวงพิเศษ ระหว่างเมือง สายกรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่) .....17
3.2	แบบจำลองเครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Meter) ในดิน .....21
3.3	เครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Meter) ในดิน .....21
3.4	การใส่ ทรายหยาบลง ในถังแล้ว นำลูกบอลวัดแรงดัน ใส่ในถังเหล็ก ขนาด กว้าง 30 ซม. ยาว 40 ซม. ลึก 30 ซม .....23
3.5	เมื่อใส่ทรายเต็มกะบะเหล็กแล้วกลบให้แน่น.....23
3.6	ปิดกะบะเหล็กโดยให้มีรูสำหรับสายยางลวดออกมาได้ 2 รู .....24
3.7	กราฟแสดงค่าการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงดันในดิน .....26
3.8	กราฟแสดงค่าการสอบเทียบแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) .....28
3.9	เกจวัดระยะการทรุดตัวของแผ่นพื้นและเสาเข็ม .....28
3.10	การขนส่งเสาเข็มด้วยรถเทเลอร์หางยาว .....29
3.11	รถปั้นจั่นสำหรับตอกเสาเข็ม .....30
3.12	แผนที่บริเวณที่ทดสอบบริเวณทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองสายกรุงเทพฯ-ชลบุรีสายใหม่..31
3.13	แผนผังการตอกเสาเข็มบริเวณแปลงทดสอบ .....31
3.14	แบบจำลองการทดสอบเสาเข็ม .....32

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.15	เสาเข็มต้นที่1ความยาว4เมตร.....33
3.16	เสาเข็มต้นที่2ความยาว4เมตร.....33
3.17	เสาเข็มต้นที่3ความยาว6เมตร.....34
3.18	เสาเข็มต้นที่4ความยาว6เมตร.....34
3.19	เสาเข็มต้นที่5ความยาว9เมตร.....35
3.20	เสาเข็มต้นที่6ความยาว9เมตร.....35
3.21	เสาเข็มต้นที่7ความยาว12เมตร.....36
3.22	เสาเข็มต้นที่8ความยาว12เมตร.....36
3.23	การตรวจสอบความเอียงโดยลูกดิ่งก่อนตอกเสาเข็ม.....37
3.24	การตอกเสาเข็มโดยใช้รถปั้นจั่นในการตอก.....37
3.25	หลังจากตอกเสาเข็มถึงระดับดินแล้ว ทำการส่งหัวเสาเข็มลงไปอีกประมาณ35เซนติเมตร ..38
3.26	หลังจากขุดหลุมแล้วนำเหล็กตะแกรงวางบนหัวเสาเข็มทุกหลุม.....39
3.27	ใส่ทรายลงในเสาเข็มให้ครบทุกต้นความหนา 15 เซนติเมตร.....39
3.28	เทคอนกรีตลงในแบบดินความกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร หนา 0.20 เมตร.....40
3.29	ทำการปรับแต่งหน้าคอนกรีตให้เรียบหลังจากเทคอนกรีตได้ระดับความหนาแล้ว.....40
3.30	ทำการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำแล้วปล่อยให้คอนกรีตรับกำลังได้สูงสุดประมาณ 28 วัน.....41
3.31	ขุดหลุมด้านข้าง2หลุมลึกลงไปประมาณ35เซนติเมตร ทั้งด้านแกนXและแกนY.....42
3.32	ฝังลูกบอลสำหรับวัดแรงดัน (Pressure) เข้าไปในแผ่นพื้นคอนกรีต.....42
3.33	หลังจากกลบดินแล้ว นำแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) มาวางที่ศูนย์กลางของแผ่นพื้นคอนกรีต.....43
3.34	การติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) และเกจวัดระยะทรุดตัว (Dial Gauge).....43
3.35	การจดข้อมูลจากเครื่องมือวัดแรงดัน(Pressure)ในดิน และ เกจวัดระยะการทรุดตัว (Dial Gauge).....44
3.36	รถบรรทุกน้ำบรรจุน้ำเต็ม เพื่อ ใช้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้กับเสาเข็ม.....45
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแบ่งถ่านน้ำหนักบรรทุก ระหว่างเสาเข็มและแผ่นพื้นคอนกรีตเสาเข็มต้นที่ 1 และ 2.....47
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มต้นที่ 1 และ 2.....47
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแบ่งถ่านน้ำหนักบรรทุก ระหว่างเสาเข็มและแผ่นพื้น

รูปที่	หน้า
คอนกรีตเสาเข็มต้นที่ 3 และ 4.....	50
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของ เสาเข็มต้นที่ 3 และ 4.....	50
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุก ระหว่าง เสาเข็มและแผ่นพื้น คอนกรีตเสาเข็มต้นที่ 5 และ 6.....	53
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มต้นที่ 5 และ 6.....	53
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็มและแผ่นพื้น คอนกรีตเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8.....	57
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8.....	57
ผ1 แรงที่กระทำต่อเสาเข็มและคุณสมบัติดินชั้นต่างๆ.....	65
ผ2 การทดสอบเสาเข็มรับน้ำหนักร่วมกับแผ่นคอนกรีต .....	65
ผ3 เกจวัดแรงดันแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) .....	66
ผ4 ลูกบอลที่ใช้ประกอบเครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Meter) .....	66
ผ5 ลักษณะการติดตั้งแม่แรงกดเสาเข็มและเกจวัดระยะการทรุดตัว.....	67
ผ6 ค่าดัชนีการอัดตัวตามแนวทางหลวง สายบางนา-บางปะกง.....	67

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พฤติกรรมของการเบี่ยงถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็ม และตอม่อ นั้นมีผลต่อการออกแบบการทรุดตัวของโครงสร้าง และพฤติกรรมทรุดตัวของโครงสร้างต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัว (Transition Structure) ระหว่างคอคะพาน ซึ่งเมื่อการออกแบบทำได้ไม่ดี หรือไม่ถูกต้องแล้ว ก็จะทำให้เกิดปัญหาการทรุดตัวไม่เท่ากันระหว่างคอคะพานกับถนน ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยของผู้ใช้ถนน โดยมีหลายเส้นทางที่เกิดปัญหาลักษณะนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บริเวณทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง สายกรุงเทพฯ-ชลบุรีสายใหม่ (Motorway) ซึ่งมีคุณสมบัติของดินที่ไม่ดี มีค่าความแข็งแรงของดินน้อยมาก และมีการทรุดตัวอยู่เป็นประจำทุกๆปี จึงต้องมีการปูผิวลาดยาง (Asphalt Concrete) เพิ่มขึ้นที่บริเวณคอคะพานอยู่เสมอๆ ทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณของประเทศในส่วนนี้ เป็นจำนวนมาก

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อทำการทดสอบ การทรุดตัวเสาเข็ม (Settlement) จำนวน 8 ต้น โดยหัวเสาเข็มทุกต้นหล่อแผ่นพื้น คอนกรีตขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร หนา 0.2 เมตร ของดินบริเวณใกล้กับทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองสายกรุงเทพฯ-ชลบุรีสายใหม่ (Motorway)
- 2) เพื่อทำการวิเคราะห์ แรงดัน (Pressure) ในดิน ของดินใต้แผ่นพื้นคอนกรีต ของเสาเข็มทั้ง 8 ต้น ในระหว่างการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้กับเสาเข็ม
- 3) เพื่อทำการวิเคราะห์ พฤติกรรมการเบี่ยงถ่ายน้ำหนักระหว่าง เสาเข็ม กับ แผ่นคอนกรีตขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร หนา 0.2 เมตร

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ทำการทดสอบเสาเข็ม สี่เหลี่ยมตันขนาด 0.22x0.22x4 เมตร จำนวน 2 ต้น
- 2) ทำการทดสอบเสาเข็ม สี่เหลี่ยมตันขนาด 0.22x0.22x6 เมตร จำนวน 2 ต้น
- 3) ทำการทดสอบเสาเข็ม สี่เหลี่ยมตันขนาด 0.22x0.22x9 เมตร จำนวน 2 ต้น
- 4) ทำการทดสอบเสาเข็ม สี่เหลี่ยมตันขนาด 0.22x0.22x12 เมตร จำนวน 2 ต้น
- 5) ทำการวิเคราะห์ แรงดัน (Pressure) ของดินใต้แผ่นคอนกรีต ที่อยู่บนหัวเสาเข็มทั้ง 8 ต้น และการทรุดตัวของเสาเข็ม ของดินบริเวณใกล้กับทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองสายกรุงเทพฯ-ชลบุรีสายใหม่ (Motorway)

## 1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

*PILE*: เสาเข็มเสียดทาน

*PILE CAP*: ตอม่อ หรือ ลักษณะเสาเข็มที่มีแผ่นพื้นคอนกรีตหรือคานคอนกรีต วางทับหรือครอบ อยู่บนหัวเสาเข็ม

*PILE RAFT FOUNDATION*: แผ่นพื้นและเสาเข็มรับน้ำหนักร่วมกัน ใช้ในกรณีการออกแบบ โครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัว บริเวณคอสะพาน แบบ เสาเข็มผ่นความยาว

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.5.1 ประโยชน์ทางด้านวิชาการ

- 1) เพิ่มความรู้ความเข้าใจการแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่าง เสาเข็มเสียดทาน และ ตอม่อ ของเสาเข็มสี่เหลี่ยม ขนาด 0.22 x 0.22 เมตร ที่ความยาวต่างๆ กัน
- 2) เพื่อที่จะทราบข้อมูลตัวเลขเพื่อนำไป นำไปใช้วิเคราะห์ ออกแบบหาค่าการทรุดตัว หรือเปรียบเทียบการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงภายใต้เงื่อนไข และคุณสมบัติดินเดียวกัน
- 3) ได้ทราบแรงดัน (Pressure) ในดิน และพฤติกรรมของแรงดัน (Pressure) ที่เกิดขึ้นใต้แผ่นพื้นคอนกรีต ในขณะที่เสาเข็มเริ่มรับน้ำหนักบรรทุก จนถึงกระทั่งเสาเข็มไม่สามารถรับน้ำหนักได้ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการนำไปวิเคราะห์การทรุดตัวและออกแบบโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัว (Transition Structure)

### 1.5.2 ประโยชน์ทางการนำไปใช้

- 1) ช่วยให้ผู้ที่จะออกแบบโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัว (Transition Structure) มีความเข้าใจในพฤติกรรมการแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุก ระหว่าง เสาเข็มกับแผ่นพื้นอย่างแท้จริง
- 2) สามารถนำข้อมูลที่ได้จาก การทดสอบมาเป็นแนวทาง ในการออกแบบเสาเข็มเพื่อป้องกันทรุดตัวบริเวณคอสะพานได้

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาวิธีวัดแรงดันที่เกิดขึ้นในดินเพื่อหาวิธีสร้างเครื่องวัดแรงดัน (Pressure) ภายในดิน
- 3) จัดเตรียมอุปกรณ์เพื่อประกอบและสร้างเครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure) ภายในดิน

- 4) ทำการสอบเทียบ เครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure) ภายในดิน
- 5) ทำการสอบเทียบ แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack)
- 6) เลือกสถานที่ที่จะทำการทดสอบให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพปัญหาการทรุดตัวของคอสะพานในปัจจุบันมากที่สุด
- 7) ทำการหล่อเสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด 0.22x0.22x4.00 ม. จำนวน 2 ต้น เสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด 0.22x0.22x6.00 ม. จำนวน 2 ต้น เสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด 0.22x0.22x9.00ม.จำนวน 2 ต้น เสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด 0.22x0.22x12.00 ม.จำนวน 2 ต้น
- 8) หลังจากบ่มคอนกรีตเสาเข็มเป็นเวลา 28 วัน แล้วทำการขนส่งเสาเข็ม ไปยังสถานที่ทดสอบ
- 9) จัดเตรียมปั้นจั่นสำหรับตอกเสาเข็ม
- 10) ทำการตอกเสาเข็มขนาดต่าง โดยส่งหัวเสาเข็มลงไปจากระดับพื้นดินอีกประมาณ 35 เซนติเมตร
- 11) ทำการขุดหลุมรอบเสาเข็มเพื่อใช้เป็นแบบในการหล่อเสาเข็มขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร ลึก 0.35 เมตร
- 12) ทำการใส่ทรายหยาบลงในหลุมทดสอบ ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร ลึก 0.15 เมตร ทั้ง 8 หลุม
- 13) จัดเตรียมเหล็กตะแกรงขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร ระยะห่างระหว่างเหล็ก 20 เซนติเมตร จำนวน 8 ชุด เพื่อวางก่อนหล่อแผ่นพื้นคอนกรีต
- 14) ทำการเทคอนกรีตเพื่อหล่อแผ่นพื้นทับหัวเสาเข็ม
- 15) ทำการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำแล้วทิ้งไว้ 28 วัน
- 16) จัดเตรียมรถบรรทุกน้ำซึ่งมีน้ำเต็มเพื่อเป็น Counter Weight ในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก
- 17) ทำการขุดหลุมลงไปใต้แผ่นพื้นเพื่อทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure) ภายในดิน
- 18) ทำการติดตั้ง Dial Gauge ใต้รถบรรทุกน้ำโดยมีแผ่นเหล็กเป็นแกนอ้างอิงอิสระ
- 19) ทำการติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) บริเวณศูนย์กลางเสาเข็มที่ทำการตอก โดยแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) อยู่บริเวณใต้ห้องรถบรรทุกน้ำ
- 20) ทำการอ่านค่าแรงดัน (Pressure) ในดิน จากเครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) และ อ่านค่าการทรุดตัวจากอุปกรณ์วัดระยะการทรุดตัว (Dial Gauge) ของเข็มทดสอบ และ เกจวัดของเครื่องไฮดรอลิก (Hydraulic Jack)



- 21) นำข้อมูล แรงดัน (Pressure) ในดิน ระยะการทรุดตัว (Settlement) และ การเพิ่ม น้ำหนักบรรทุกในแต่ละขั้นตอน มาทำการพล็อตกราฟ เพื่อทำการวิเคราะห์ ข้อมูล ในแต่ละขั้นตอนการเพิ่มน้ำหนัก ว่ามีการแบ่งถ่ายน้ำหนัก ระหว่างเสาเข็มและ แผ่นพื้นคอนกรีต



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ในการวิเคราะห์การแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็ม และแผ่นพื้นคอนกรีต นั้น หน่วยแรง ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก ลงมายัง แผ่นพื้นคอนกรีต และ เสาเข็ม นั้น สามารถหาค่า กำลังการรับน้ำหนักที่เสาเข็มและแผ่นพื้นสามารถรับ ได้ หลายวิธี

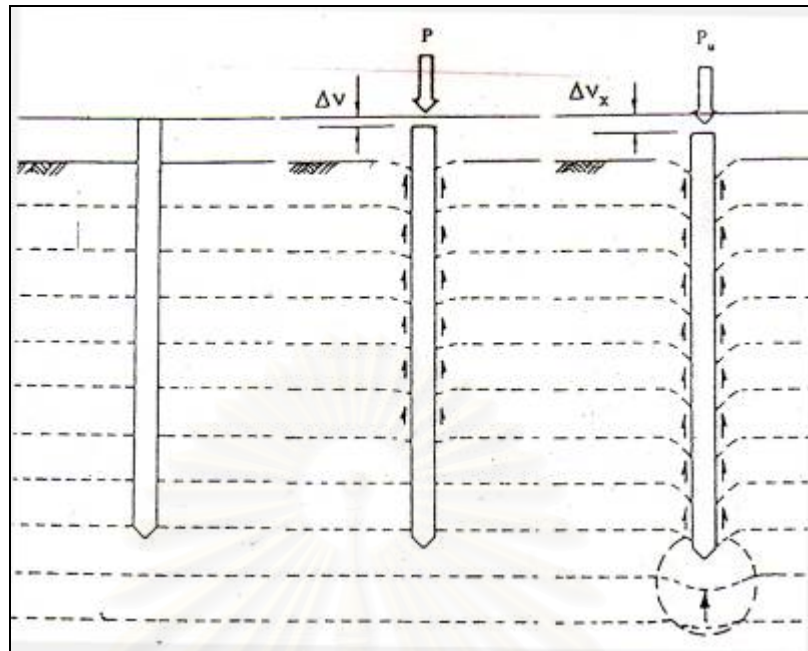
##### 2.1.1 การหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มโดยวิธีการคำนวณทางทฤษฎี

กรณีเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดนั้น กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติ และ พฤติกรรมของดิน โดยรอบเสาเข็ม โดยเมื่อเริ่มบรรทุกน้ำหนัก ลงบนเสาเข็ม เสาเข็ม จะเคลื่อน ที่ลงตามทิศทางของแรง ในขณะที่เดียวกันดิน ที่เกาะอยู่ข้างๆ ผิวเสาเข็มก็จะพยายาม ดันทานไว้ จึงมีการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดิน ชั้นดินเองก็จะเคลื่อนตามเสาเข็มลงไปด้วย การ เคลื่อนที่จะมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น และ ในช่วงหลังจะเกิดการดันทานที่ปลายเสาเข็มเข้า มาร่วมด้วย

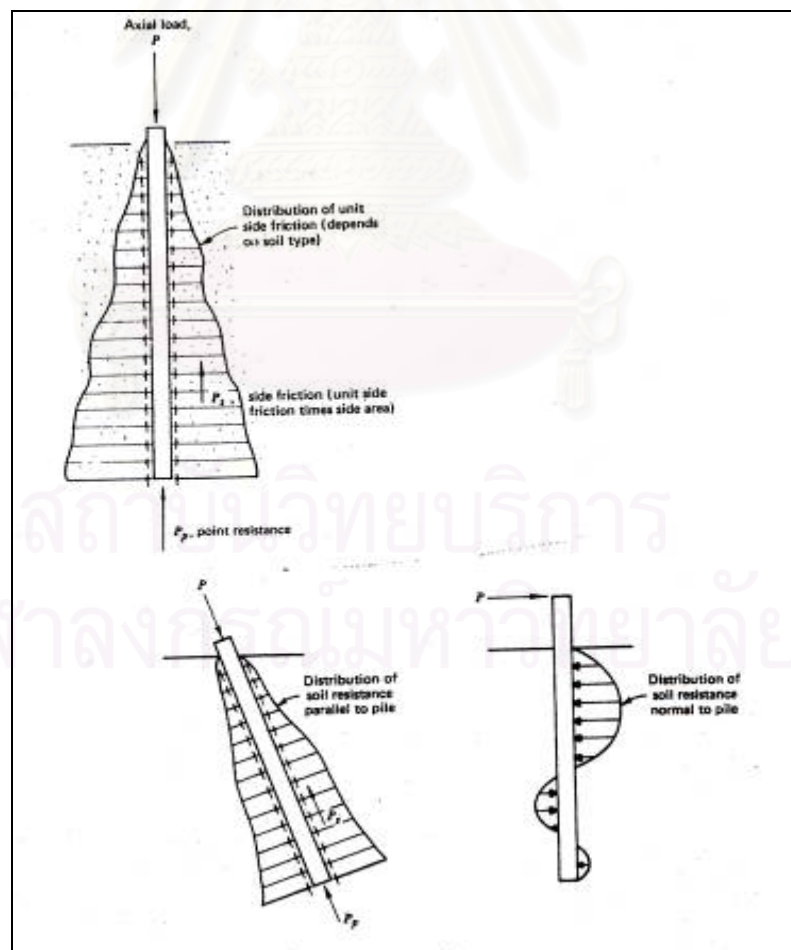
ผลสุดท้ายเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากจนชั้นดินไม่สามารถจะดันทานไว้ได้ ก็จะเกิด เป็นแนวเคลื่อนพัง (Shear Plane) โดยรอบผิวเสาเข็ม และ ที่ปลายเสาเข็ม โดยจะมีการเคลื่อนที่ของ เสาเข็มลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่า “น้ำหนักบรรทุกสูงสุด” (Ultimate Pile Capacity)

น้ำหนักบรรทุก ที่ถ่ายลงดินส่วน ใหญ่เป็นการถ่ายแรง ที่ผ่านทางผิวเสาเข็ม (Friction Resistance) ส่วนที่ปลายเสาเข็มมีน้ำหนักถ่ายลงชั้นดิน (End Bearing) สัดส่วนของการ ถ่ายแรงเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะดิน ดังนั้น ในการวิเคราะห์แรงต้านของเสาเข็ม เราจึง มักจะแบ่ง แรงต้านทานของเสาเข็ม ออกเป็น 2 ส่วนคือ

- 1) แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Friction)
- 2) แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing)



ก) เมื่อไม่มีน้ำหนัก      ข) มีน้ำหนักปานกลาง      ค) มีน้ำหนักสูงสุด  
รูปที่ 2.1 แสดงพฤติกรรมของดินรอบเสาเข็มเมื่อมีน้ำหนักภายนอกมากระทำ



รูปที่ 2.2 การรับน้ำหนักของเสาเข็ม

การหาแรงต้านทานของเสาเข็มที่นิยมใช้ในประเทศไทยมีดังนี้

- 1) วิธี Static Formula
- 2) วิธี Dynamics Formula
- 3) วิธี Pile load test

สำหรับงานวิจัยนี้ จะกล่าวถึงเพียงวิธี Static Formula และ วิธี Pile Load Test เท่านั้น การหาแรงต้านทานเสาเข็มโดยวิธี Static Formula เป็นการคำนวณหาแรงต้านทานของเสาเข็ม โดยอาศัยคุณสมบัติความแข็งแรงของชั้นดินที่อยู่โดยรอบ และที่ปลายของเสาเข็ม จากข้อมูลลักษณะชั้นดินที่จะทำการก่อสร้าง การเจาะสำรวจ และทดสอบคุณสมบัติของดิน

หลักการของการคำนวณ คือ สมมติให้เสาเข็มรับแรงต้านทานจนถึงจุดสูงสุด (Ultimate Pile Capacity) ซึ่งหมายความว่า ดินโดยรอบและที่ปลายเสาเข็มเกิดการเคลื่อนพัง (Failure) แล้ว จึงคำนวณย้อนกลับว่า จะเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกบนเสาเข็ม ( $Q_u$ ) เท่าใด

การรับน้ำหนักโดย ใช้แรงเสียดทาน ( $Q_f$ ) บริเวณผิวรอบเสาเข็ม และแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_E$ ) ลบด้วยน้ำหนักของเสาเข็ม ( $W_p$ ) ดังสมการ

$$Q_u = Q_f + Q_E - W_p \quad \text{สมการ 2.1}$$

โดย

$$Q_f = q_f \cdot A_{si}$$

$$Q_E = q_E \cdot A_p$$

$$q_f = \text{หน่วยแรงเสียดทานที่จุดวิกฤติของชั้นดินชั้นหนึ่ง (P*L)}$$

$$q_E = \text{หน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็มที่จุดวิกฤติ}$$

$$A_{si} = \text{พื้นที่ผิวของเสาเข็มในช่วงชั้นดินที่รับแรงเสียดทาน}$$

$$A_p = \text{พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม}$$

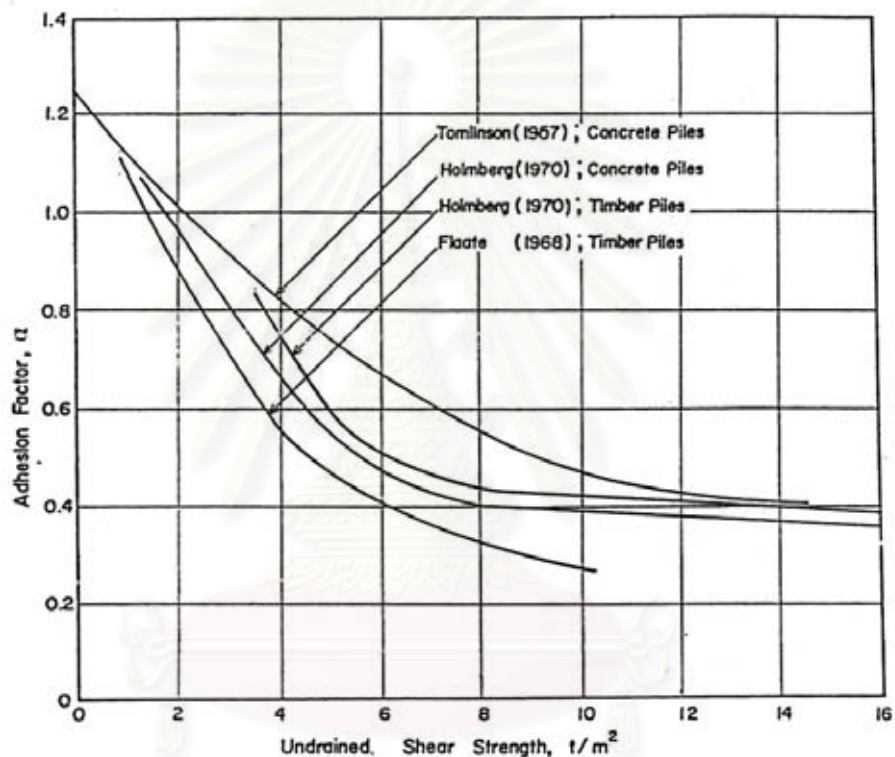
แรงต้านที่ผิวเสาเข็ม ( $q_f$ ) หน่วยแรงต้านที่ผิวเสาเข็ม เกิดจากความฝืดระหว่างผิวเสาเข็มและดินบริเวณรอบข้างของเสาเข็ม จะสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ Shear Strength ของดิน แต่ในทางปฏิบัติแล้วสมการ Shear Strength จะถูกตัดทอนให้ง่ายลง โดยมักแยกคำนวณเป็นชั้นดินเหนียวหรือดินทราย ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง ในกรณีดินเหนียวเพียงอย่างเดียว

ในดินเหนียวอิ่มตัว การเคลื่อนพังจะเกิดขึ้นรวดเร็ว ความดันน้ำโดยรอบไม่สามารถ ไหลออกได้ทัน จึงทำให้เกิดสภาวะ “Undrained” ขึ้น และทำให้ค่า  $\theta = 0$  การคำนวณกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มใช้วิธีการ  $\alpha$  - Method (Total Stress Approach) กำลังรับแรงเสียดทาน ( $Q_f$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_f = \alpha \cdot S_u \cdot A_s \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

โดย  $Q_f$  = กำลังรับแรงเสียดทานประลัย  
 $S_u$  = กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ  
 $\alpha$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Adhesion Factor)  
 $A_s$  = พื้นที่ผิวรับแรงเสียดทานของเสาเข็ม

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน,  $\alpha$  (Adhesion Factor)  
 ใช้ข้อมูลของ Holmberg, 1970 (รูป 2.3)



รูป 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_E$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_E = q_E * A_p$$

โดย  $q_E$  = หน่วยแรงต้านของชั้นดินที่ปลายเสาเข็มที่จุดวิกฤติ

$A_p$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

เมื่อปลายเสาเข็มอยู่ลึกมาก เมื่อเทียบกับฐานรากระดับดิน ในขณะที่ปลายเสาเข็ม (B) มีค่าน้อย และในดินเหนียวค่า  $\theta = 0$  จึงสามารถ คำนวณหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มได้ ดังนี้

$$q_E = S_u * N_c$$

โดย  $S_u$  = กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ  
 $N_c$  = Bearing Capacity Factor

### 2.1.2 การหาลำกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มโดยวิธีการทดสอบเสาเข็ม

การหาแรงต้านทานเสาเข็มโดยวิธี Pile load test เป็นวิธีทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกและเจาะ เพื่อหาความสามารถในการรับน้ำหนักจริงของเสาเข็ม ซึ่งใช้น้ำหนักบรรทุกจริงในการทดสอบ จึงได้ค่าที่ถูกต้องและเชื่อถือได้ นอกจากนี้ยังใช้ในการตรวจสอบเสาเข็มในกรณีที่เกิดความผิดปกติต่างๆ อีกด้วย

เสาเข็มที่จะทดสอบควรมีขนาดและความยาวเหมือนกับเสาเข็มที่ใช้จริงทุกประการ และวิธีการตอกหรือก่อสร้างก็ต้องเหมือนกันด้วย เสาเข็มทดสอบควรอยู่ในตำแหน่งที่คิดว่าแย่ที่สุดหรือทราบคุณสมบัติชั้นดินเป็นอย่างดีแล้ว และหากต้องการทดสอบเสาเข็มที่ได้ตอกไว้แล้ว ควรเลือกเสาเข็มที่มีค่า Blow Count ต่ำหรือน่าสงสัยที่สุด หรือเสาเข็มที่หนีสุนัขที่สุด หรืออยู่ในบริเวณที่คาดว่าดินแย่ที่สุด เสาเข็มที่จะทดสอบที่ตอกในดินเหนียว ต้องมีอายุอย่างน้อย 7 วัน และเสาเข็มที่ตอกในทรายควรมีอายุอย่างน้อย 3 วัน

Static pile load test แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. *Vertical compression load test* คือ การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักทางแนวดิ่งของเสาเข็ม
2. *Lateral load test* คือ การทดสอบความสามารถรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็ม ที่ออกแบบมาเพื่อรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็ม
3. *Vertical tension test* หรือ *Uplift test* คือ การทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง ในเสาแรงดึง

ในการวิจัยครั้งนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่งเท่านั้น คือ Vertical compression load test

#### เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญมีดังนี้

1. คานรับน้ำหนัก (*Reaction beam*) เป็นคานเหล็กที่ยึดติดกับเสาเข็มเสมอ หรือรองรับคานน้ำหนักบรรทุกทุกที่ ต้องมีความสามารถที่จะรับน้ำหนักทดสอบได้ไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของน้ำหนักทดสอบสูงสุด

2. แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic jack) เป็นอุปกรณ์เพิ่มน้ำหนักบรรทุกทดสอบ แก่เสาเข็ม

3. บอลแบร์ริง (Bearing ball) ใช้ลดแรงค้ำที่อาจเกิดขึ้นจากข้อผิดพลาดในการติดตั้งคานทดสอบหรือจากการตอกเสาเข็ม ทั้งนี้เพื่อให้แรงที่กระทำต่อเสาเข็มทดสอบมีเฉพาะแรงในแนวตั้ง

4. เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม (Dial gauge) มีความละเอียดถึง 0.01 มม. นิยมติดตั้งพร้อมกัน 4 ตัว ทำมุม 90 องศา รอบเสาเข็มทดสอบ

5. คานอ้างอิง (Reference beam) เป็นคานเหล็กที่ขนานกับเสาเข็มทดสอบ วางบนฐานที่มั่นคง แข็งแรง และแยกเป็นอิสระจากเสาเข็มทดสอบ

การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ การทดสอบ Static pile load test นี้แบ่งตามลักษณะของการติดตั้งไว้ 3 ลักษณะดังนี้

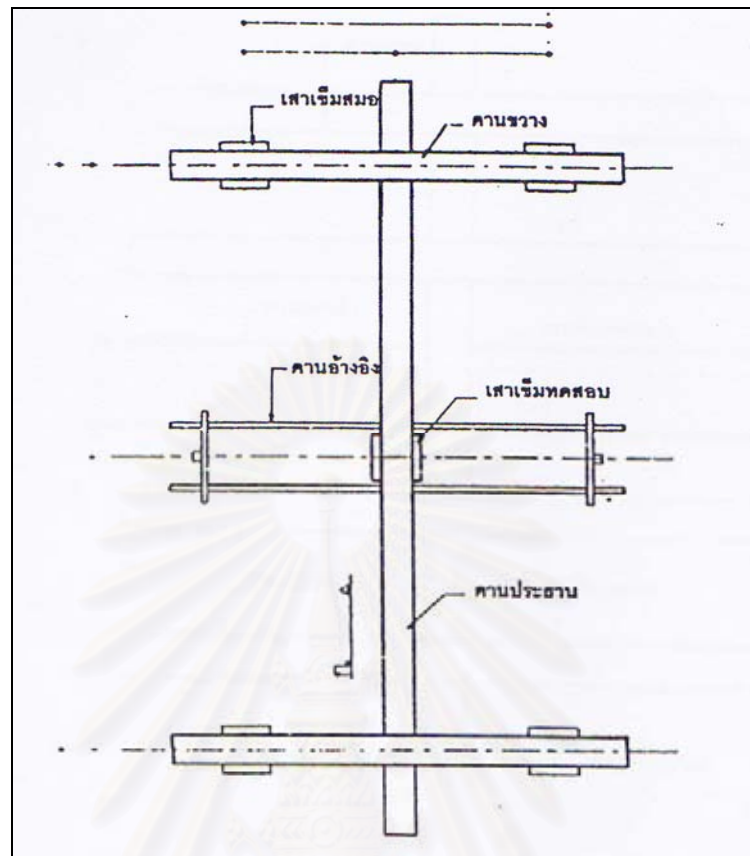
1. การติดตั้งโดยใช้เข็มสมอเป็นแรงปฏิกิริยา (Anchor pile reaction system) ในกรณีนี้คานปฏิกิริยาจะถูกยึดติดกับสมอ ซึ่งอาจจะเป็น 4,6,8 หรือ 10 ต้น แล้วแต่ความเหมาะสม

2. การทดสอบโดยใช้น้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นแรงปฏิกิริยา (Counter weight system) เป็นการใช้น้ำหนักบรรทุกคงที่ซึ่งมากกว่าน้ำหนักบรรทุกที่จะทดสอบ วางทับบนแม่แรงไฮดรอลิก เป็นแรงปฏิกิริยา

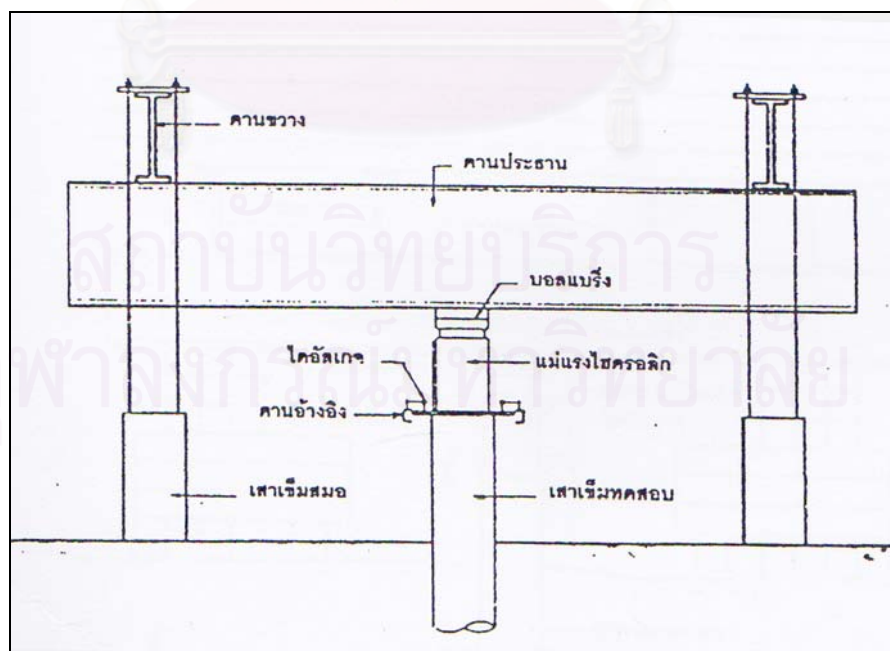
3. การทดสอบโดยนำวิธี 1 และวิธีที่ 2 มารวมกัน คือใช้ทั้งเสาเข็มสมอ และน้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นแรงปฏิกิริยา

ในการวิจัยในครั้งนี้ ใช้วิธีการทดสอบโดยใช้น้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นแรงปฏิกิริยา (Counter weight system)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

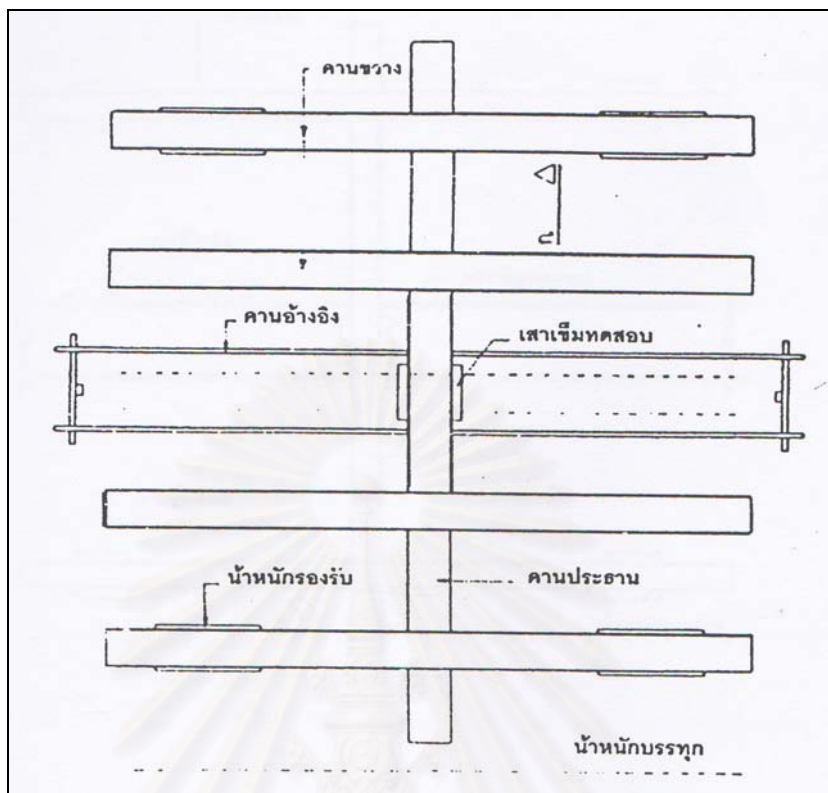


รูปที่ 2.4 รูปแปลนแสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบ เข็มสมอ 4 ต้น

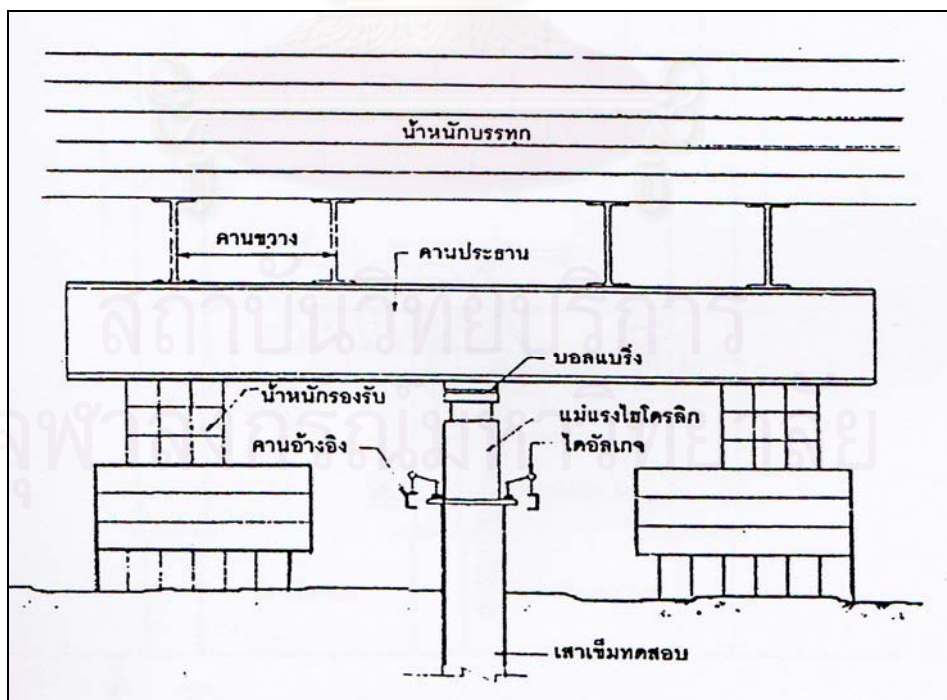


รูป 2.5 รูปด้านข้างแสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบ เข็มสมอ 4 ต้น

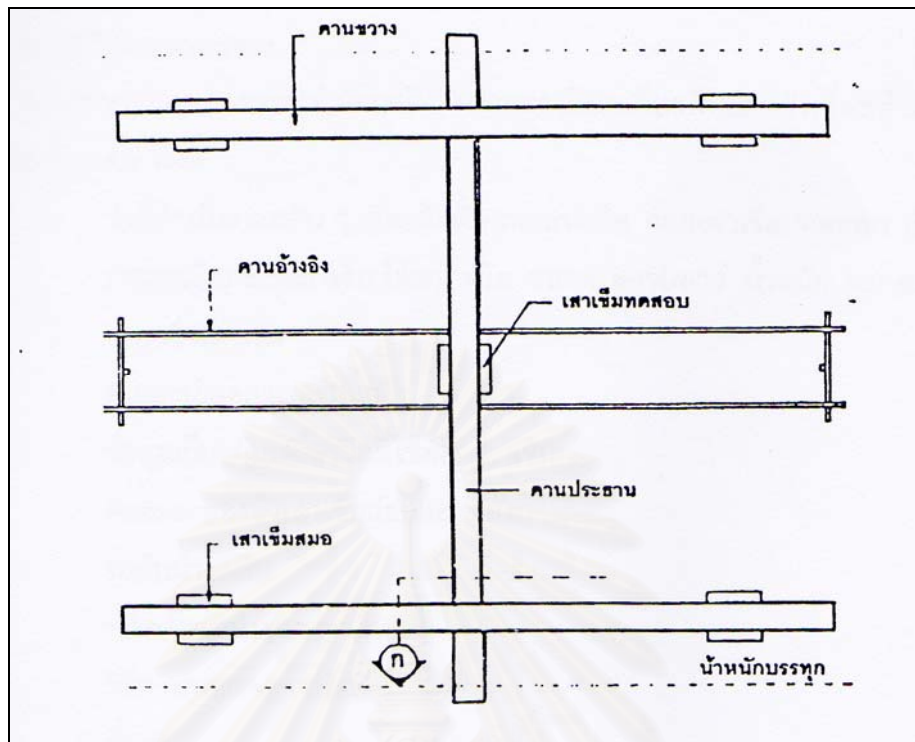




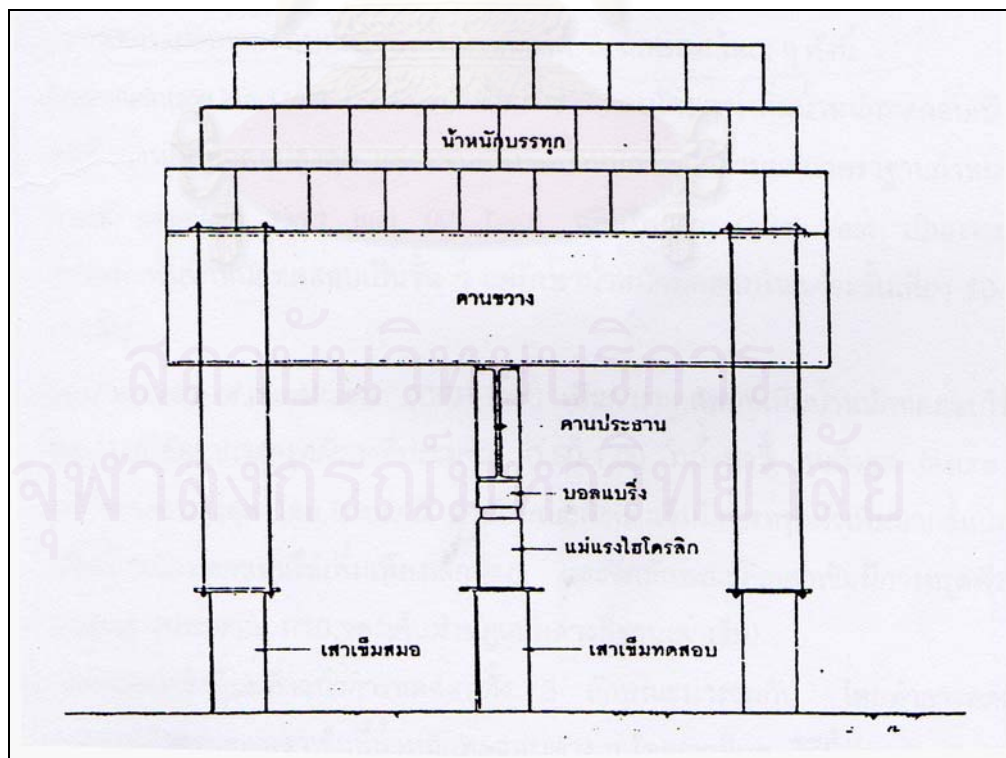
รูปที่ 2.6 รูปแปลนแสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบ น้ำหนักบรรทุกคงที่



รูป 2.7 รูปด้านข้างแสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบ น้ำหนักบรรทุกคงที่



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบ ผสม ระหว่างเสาเข็มสมอและน้ำหนักบรรทุก



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์แบบ ผสม ระหว่างเสาเข็มสมอและน้ำหนักบรรทุก

วิธีการทดสอบแบ่งตามลักษณะการเพิ่มน้ำหนักได้ 3 ลักษณะใหญ่ ๆ ดังนี้

1. *Slow maintain load test (SL-Test)* เป็นการทดสอบโดยการเพิ่มน้ำหนักทดสอบเป็นขั้นๆ จนถึงน้ำหนักสูงสุด แต่ละขั้นตอนต้องทิ้งน้ำหนักค้างไว้ตามแต่มาตรฐานกำหนด

2. *Quick maintain load test (ML-Test)* หรือเรียกว่า Quick test เป็นการทดสอบที่เพิ่มน้ำหนักทดสอบเป็นขั้นๆ แต่รักษาน้ำหนักทดสอบในแต่ละขั้นเพียง 10-15 นาทีเท่านั้น

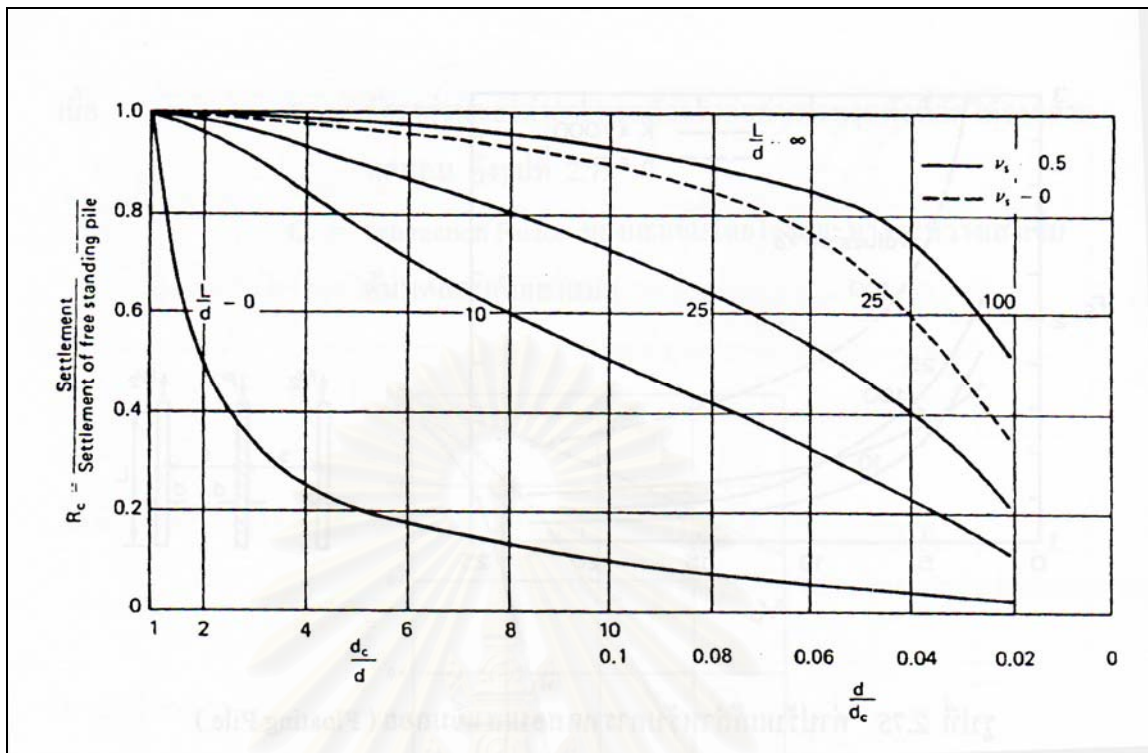
3. *Constant rate of penetration (CRP-Test)* เป็นการทดสอบที่เพิ่มน้ำหนักทดสอบให้กับเสาเข็มทดสอบโดยมีอัตราการทรุดตัวคงที่ประมาณ 0.50-1.00 มม./นาที จนถึงจุด Failure หรือน้ำหนักทดสอบสูงสุด โดย Failure มี 2 ลักษณะคือเสาเข็มมีการทรุดตัวเพิ่มมากขึ้นโดยไม่ต้องเพิ่มน้ำหนักบรรทุกหรือเพิ่มเพียงเล็กน้อย และ อีกลักษณะคือเสาเข็มมีการทรุดตัวเกินกว่าค่าที่กำหนด (ประมาณ 1/10 ของเส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานเสาเข็ม)

ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการเพิ่มน้ำหนัก แบบ Quick maintain load test (ML-Test) หรือเรียกว่า Quick test

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Poulos และ Davis (1972) ได้ทำการวิเคราะห์เสาเข็มคอนกรีต ในระบบฐานแผ่ (Pile Raft System) โดยแบ่งเป็นกลุ่มๆ ซึ่งการทรุดตัวของแต่ละกลุ่มจะสัมพันธ์กับค่า Factor ( $F_R$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาว ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มและเส้นผ่าศูนย์กลางสมมุทธ์ของ Pile Cap ( $d_c$ ) ดังแสดงในรูป 2.10

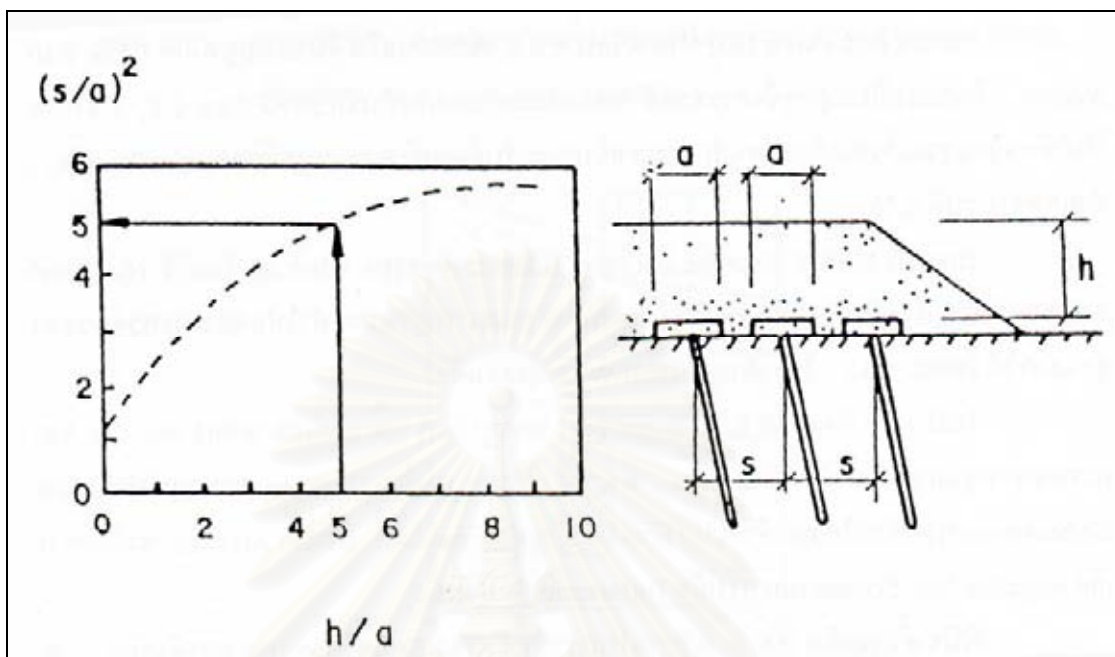
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 ค่าปรับแก้เนื่องจากอิทธิพลของแท่นหัวเสาเข็ม Pile Cap ( $F_R$ )

Butterfield และ Banarjee (1977) ทำการวิเคราะห์ผล ของ Pile Cap โดยวิธี Numerical Analysis สรุปได้ว่า Pile Cap จะเพิ่มค่า Stiffness ของระบบฐานราก ทำให้ลดค่าการทรุดตัวของฐานรากได้ ร้อยละ 5-15 โดยขึ้นอยู่กับขนาดของกลุ่มเข็มด้วย

Swedish Road Board (1974) เสนอ Chart ทำการหาขนาดของ Pile Cap จากการทดสอบรูปแบบจำลอง (Model) ดังรูปที่ 2.11 ซึ่ง Pile Cap จะทำหน้าที่ ปกป้องการทรุดตัวของ Embankment ทรุดตัวหรือแอ่น ตัวระหว่างช่องเข็ม โดย Mechanism เรียกว่า Arching ช่วยลดการเกิด Negative Skin Friction และ การเกิด Differential Settlement



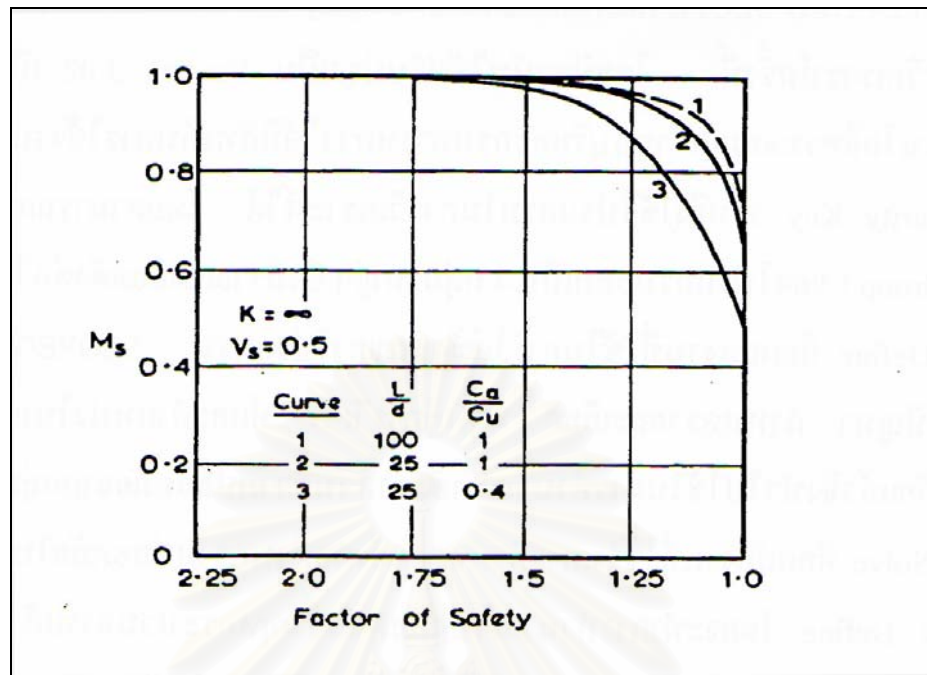
รูปที่ 2.11 Design Chart สำหรับหาขนาด Pile Cap ของ Swedish Road Board

พินิจ ตั้งบุญเติม (2541) อธิบายว่า การทรุดตัวของ Cement Column และดินเดิม จะทรุดตัวไปด้วยกันหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับ ความหนาของ Embankment ที่ส่งถ่ายน้ำหนัก หากความหนาไม่เพียงพอจะทำให้เกิด Differential Settlement โดยใช้หลักการออกแบบเดียวกันกับ Flat Slab

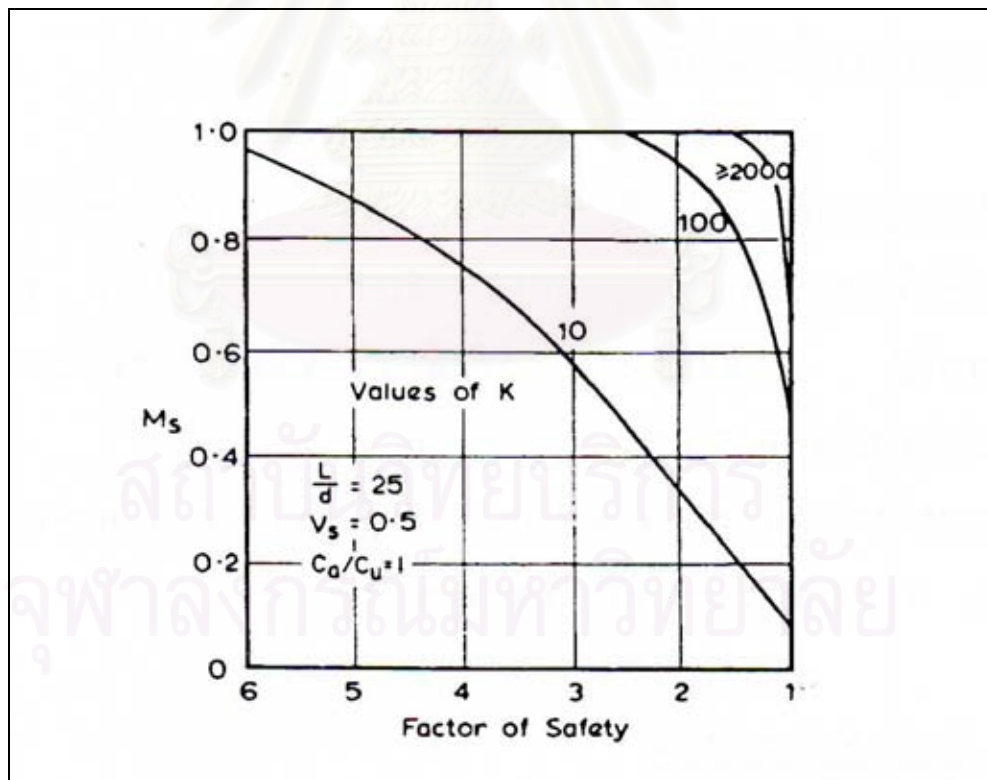
Poulos และ Mattes (1974) ได้ศึกษาถึงผลกระทบระหว่างเสาเข็มกับมวลดินโดยรอบ จะเกิดในเข็มลอย (Floating pile) ซึ่งอยู่ในชั้นดินเหนียว ที่มีการยึดเกาะคงที่ ตลอดความยาวเสาเข็ม อิทธิพลการเคลื่อนไถลที่มีต่อ การทรุดตัว แสดงเป็นค่า  $M_s$  และ ค่าความปลอดภัยในการเกิด Pile Soil Slip แบบ Undrained

จากความสัมพันธ์ผลการทรุดตัวในสมการที่ 2.2 สามารถหาค่าความปลอดภัยในการเกิด Pile Soil Slip จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.12 และ 2.13

$$M_s = \text{Elastic settlement of pile} / \text{Actual settlement of pile} \quad \text{สมการ 2.2}$$



รูปที่ 2.12 Settlement Modification Factor,  $M_s$  for Slip Effect of  $L/D$  and Adhesion Factor



รูปที่ 2.13 แสดงค่า Settlement Modification Factor,  $M_s$  for Slip Effect of  $K$

จากรูปที่ 2.12 และ 2.13 สามารถสรุปใจความได้ดังนี้

1. ผลกระทบเนื่องจาก  $L/D$  มีผลน้อยมาก
2. ถ้าค่า Adhesion Factor ,  $C_u / C_u$  มีค่าลดลงจะทำให้ผลกระทบของการลื่นไถลมีความสำคัญมาก
3. ถ้าค่า Pile – Stiffness factor (K) มีค่าต่ำมาก ทำให้ค่า  $M_u$  มีค่าลดลง
4. ผลกระทบของการลื่นไถลมีผลน้อยมากต่อการทรุดตัว ยกเว้นในกรณี Pile – Stiffness factor (K) มีค่าต่ำมาก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทำการวิเคราะห์การแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็มเสียดทานและตอม่อ โดยได้ทำการทดสอบเสาเข็มจำนวน 8 ต้นที่มีความยาวต่างๆ กันกล่าวคือเสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด  $0.22 \times 0.22 \times 4.00$  ม<sup>3</sup>. จำนวน 2 ต้นเสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด  $0.22 \times 0.22 \times 6.00$  ม<sup>3</sup>. จำนวน 2 ต้น เสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด  $0.22 \times 0.22 \times 9.00$  ม<sup>3</sup>. จำนวน 2 ต้นเสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด  $0.22 \times 0.22 \times 12.00$  ม<sup>3</sup>. จำนวน 2 ต้น รวมทั้งหมด 8 ต้น โดยเลือกสถานที่ทดสอบเป็นบริเวณใกล้ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองสายกรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่) ซึ่งทางหลวงสายนี้มีปัญหาการทรุดตัวระหว่างคอสะพานมากที่สุดสายหนึ่งของประเทศไทย

#### 3.1 การเลือกสถานที่ทดสอบ

ข้อมูลปัจจัยที่จำเป็นในการเลือกสถานที่ทดสอบ

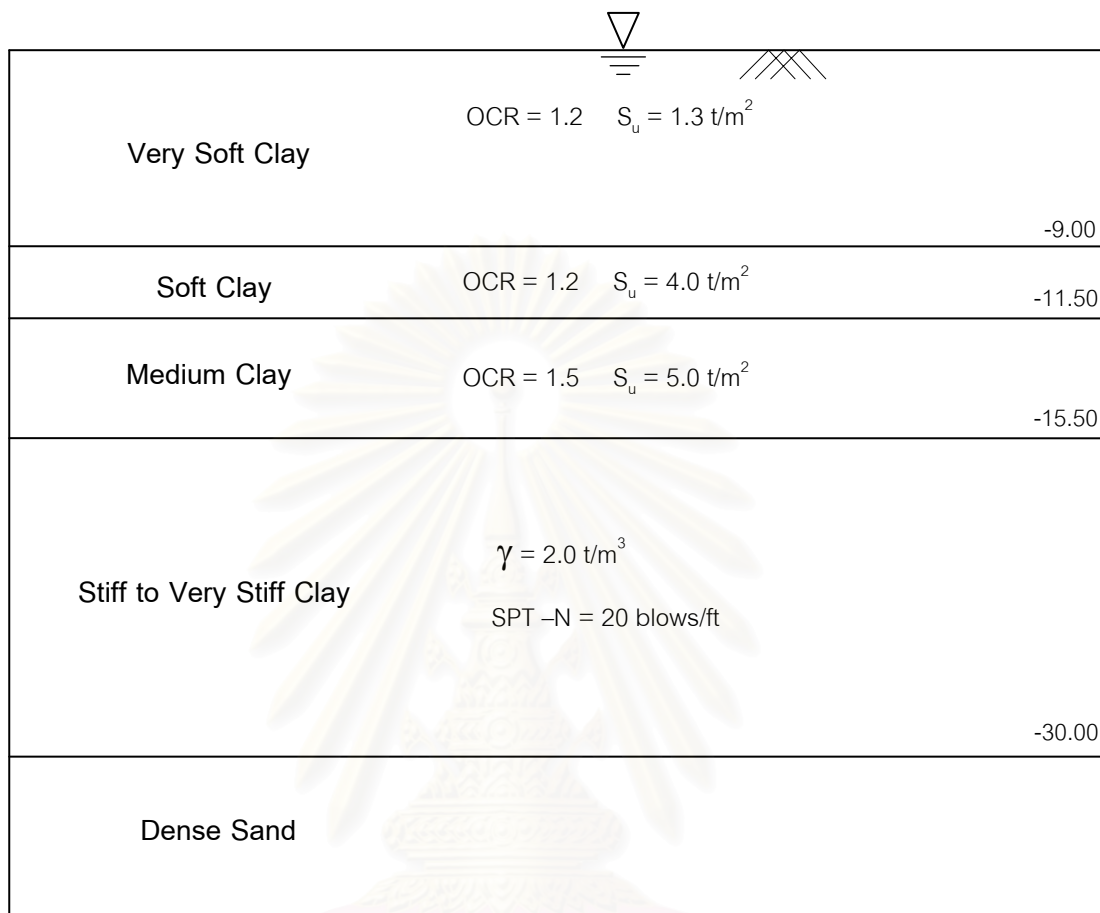
- 1) ถนนสายนั้นหรือดินบริเวณนั้นต้องมีปัญหาการทรุดตัวระหว่างคอสะพานกับถนนอยู่อย่างต่อเนื่อง
- 2) ดินบริเวณนั้นต้องเป็นดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งมีความไวตัวสูง
- 3) ดินบริเวณนั้นต้องไม่ถูกรบกวนด้วยน้ำหนักต่างๆ หลังจากทำการตอกเสาเข็มและหล่อแผ่นพื้นคอนกรีต โดยต้องปล่อยให้ดินคืนสภาพเป็นเวลา 1 ถึง 3 เดือนก่อนทำการทดสอบเพื่อหลีกเลี่ยงผลอันเกิดจากการคืนสภาพของดิน (Set-up Effect)

#### ลักษณะโดยทั่วไปของดินทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองสาย กรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่)

ดินเดิมเป็นชั้นดินอ่อนมาก (Very Soft Clay) มีความลึกประมาณ 9 ถึง 10 เมตรมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength,  $S_u$ ) ประมาณ 0.5 ถึง 2.4 ตันต่อตารางเมตร ถัดจากชั้นดินอ่อนมากลงไปจะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ที่ระดับความลึกประมาณ 10 ถึง 15 เมตร มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength,  $S_u$ ) ประมาณ 5.0 ถึง 10.0 ตันต่อตารางเมตร ถัดลงตั้งแต่ระดับความลึกประมาณ 15 เมตรจนถึงระดับความลึกประมาณ 25 ถึง 30 เมตรไปจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมากจะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength,  $S_u$ ) ประมาณ 10 ตันต่อตารางเมตรขึ้นไป ความชื้นในดินมีค่าประมาณ 20 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ค่าขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit, LL) มีค่าประมาณ 90 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีพลาสติกมีค่า 50 ถึง 80 หลังจากนั้นจึงจะเปลี่ยนเป็นระดับชั้นทราย



### 3.1.1 ลักษณะโครงสร้างชั้นดินและคุณสมบัติบริเวณแปลงทดสอบ



Very Soft Clay	OCR = 1.2	$S_u = 1.3 \text{ t/m}^2$	-9.00
Soft Clay	OCR = 1.2	$S_u = 4.0 \text{ t/m}^2$	-11.50
Medium Clay	OCR = 1.5	$S_u = 5.0 \text{ t/m}^2$	-15.50
Stiff to Very Stiff Clay	$\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$	SPT -N = 20 blows/ft	-30.00
Dense Sand			

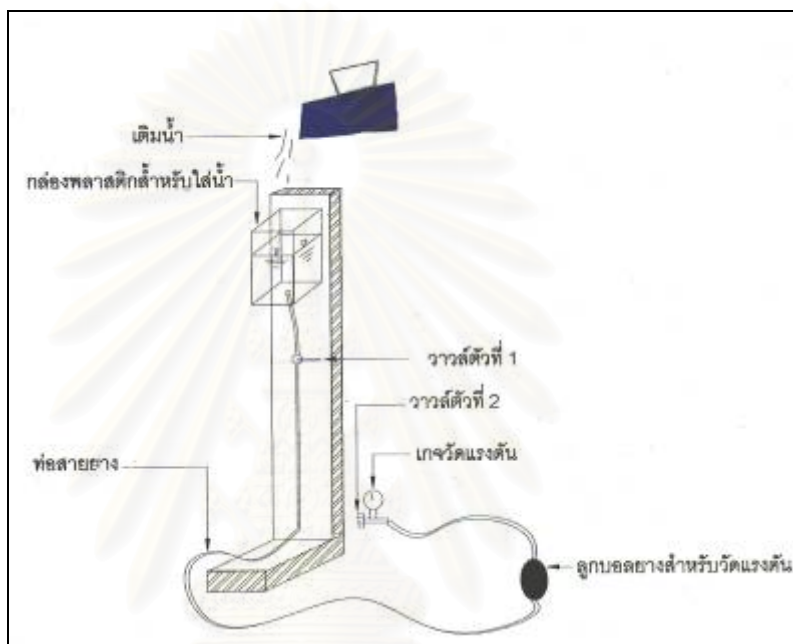
รูป 3.1 ลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติบริเวณแปลงทดสอบ ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองสาย กรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับทดสอบ

#### 3.2.1 เครื่องมือวัดแรงดันในดิน (Ball Pressure Meter)

เป็นเครื่องมือที่จัดทำขึ้นเองเพื่อใช้สำหรับวัดแรงดันในดิน(Pressure in soil) มีหลักการในการทำคือ เมื่อเริ่มมีน้ำหนักบรรทุกทุกถ่ายแรงลงมายังดินจะมีลูกบอลยางซึ่งภายในลูกบอลยาง จะบรรจุด้วยน้ำเพื่อใช้น้ำเป็นตัวดัน เกจความดันให้ เกจความดันเคลื่อนที่



รูป 3.2แบบจำลองเครื่องมือวัดแรงดัน(Pressure Meter)ในดิน



รูป 3.3เครื่องมือวัดแรงดัน(Pressure Meter)ในดิน

### ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Meter) ในดิน

- เกจ วัดความดัน ซึ่งความสามารถของ เกจวัดความดัน ต้องวัดความดันได้ละเอียด ระหว่าง 0กก./ตร.ซม. ถึง 1กก./ ตร.ซม.
- สายยางสำหรับต่อลูกบอลวัดความดันควรใช้สายที่มีความแข็งแรงพอสมควร เพราะป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้และต้องมีความยาวพอสมควรเพราะในหน้างานจริงนั้นเมื่อฝังเครื่องมือวัดแรงดันลงในดินแล้วต้องถอดตัวเกจวัดออกมาภายนอกน้ำหน้าบรทุก
- ลูกบอลสำหรับวัดแรงดันในดินมีลักษณะคล้ายรูปน้ำเต้าทำจากยางดิบธรรมชาติซึ่งมีความยืดหยุ่นตัวได้สูงมีรูสำหรับต่อสายยางวัดแรงดัน
- วาล์วน้ำสำหรับเปิดปิดน้ำเพื่อใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือและข้อต่อต่างๆ
- ก่องพลาสติกสำหรับเติมน้ำเพื่อใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือและใช้เครื่องมือ

#### 3.2.1.1 วิธีการและขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงดันในดิน

- เมื่อทำการประกอบเครื่องมือวัดแรงดันดินตามรูปที่3.2 แล้วทำการเติมน้ำเพื่อไล่อากาศออกจากสายยาง และ ลูกบอลยางโดยการเติมน้ำลงในก่องพลาสติกสำหรับใส่น้ำเมื่อมีน้ำเต็มแล้วเปิดวาล์วตัวที่ 1 ให้น้ำค่อยๆ ไหลลงไปตามสายยาง โดยตัวลูกบอลต้องอยู่ต่ำกว่าวาล์วตัวที่1 และมีการวางในลักษณะวางแนวตั้ง ให้น้ำค่อยๆ ไล่อากาศออกทีละน้อยในระหว่างนั้นต้องทำการเขย่าลูกบอลเล็กน้อยด้วยจากนั้น เปิดวาล์วตัวที่สองเพื่อให้น้ำไหลออกจากเกจความวัดความดันผ่านวาล์วน้ำตัวที่สอง เมื่อเห็นว่าน้ำเข้าไปอยู่ในลูกบอลจนเต็ม และไม่มีฟองอากาศอยู่ภายในแล้วทำการปิดวาล์วตัวที่ 2 ก่อน แล้วจึงปิดวาล์วตัวที่ 1 นำเครื่องมือวัดแรงดันภายในดินไปยังเครื่องมือ สำหรับไหลลดน้ำหนักเพื่อทำการสอบเทียบเครื่องมือเตรียมถึงเหล็กขนาดกว้าง 30 ซม. ยาว 40 ซม. ลึก 30 ซม. ในช่วงแรกใส่ทรายหยาบเปียกกลงภายในถึงเหล็กประมาณ 15 ซม. จากนั้นถึง



รูป 3.4 ใส່ทรายหยาบลงในถัง แล้ว นำลูกบอลวัดแรงดัน ใส่น้ำในถังเหล็ก

จากนั้นนำลูกบอลอย่างที่ได้ทำการไล่อากาศภายในลูกบอลออกหมดแล้วนำลงไปวางบนทรายภายในถังเหล็กหลังจากนั้นตักทรายใส่จนเต็มถึงนำฝาถังมาปิดโดยเจาะรูสำหรับสายยางออกมาจำนวน 2 รู



รูป 3.5 เมื่อใส່ทรายเต็มกระบอกเหล็กแล้วกลบให้แน่น



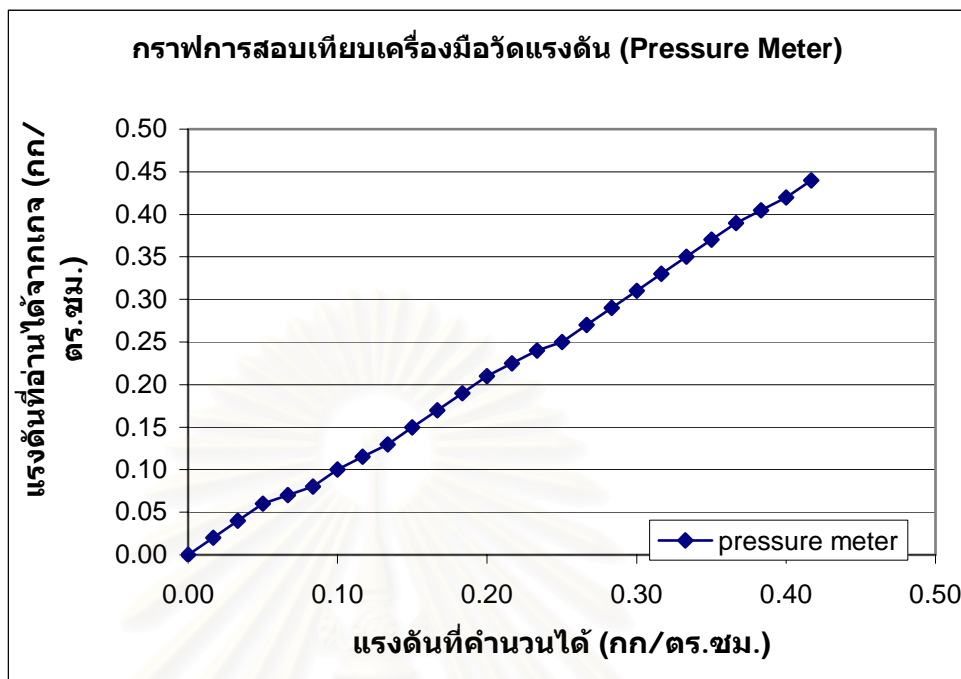
รูป 3.6 ปัดกระเบเหล็กโดยให้มีรูสำหรับสายยางลอดออกมาได้ 2 รู

จากนั้นทำการโหลดน้ำหนักโดยเริ่มต้นน้ำหนักที่ 20 กก.จนถึง 500 กก. โดยการอ่านค่าการถ่ายแรงภายในดินจะอ่านเมื่อมีการโหลดค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 20 กก. โดยได้ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 3.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 ผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงดันในดิน

ข้อมูลการทดสอบลำดับที่	น้ำหนักที่ปล่อยลง (กก.)	ค่าที่อ่านได้จากเกจวัดความดัน ครั้งที่ 1 (กก./ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้จากเกจวัดความดัน ครั้งที่ 2 (กก./ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้จากเกจวัดความดันเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
1	20	0.02	0.02	0.020
2	40	0.04	0.04	0.040
3	60	0.06	0.06	0.060
4	80	0.07	0.07	0.070
5	100	0.08	0.08	0.080
6	120	0.10	0.10	0.100
7	140	0.11	0.11	0.115
8	160	0.12	0.12	0.130
9	180	0.14	0.14	0.150
10	200	0.16	0.16	0.170
11	220	0.18	0.18	0.190
12	240	0.20	0.20	0.210
13	260	0.22	0.22	0.225
14	280	0.24	0.24	0.240
15	300	0.24	0.26	0.250
16	320	0.26	0.28	0.270
17	340	0.28	0.30	0.290
18	360	0.30	0.32	0.310
19	380	0.32	0.34	0.330
20	400	0.34	0.36	0.350
21	420	0.36	0.38	0.370
22	440	0.38	0.40	0.390
24	480	0.42	0.42	0.420
25	500	0.44	0.44	0.440



รูป 3.7 กราฟแสดงค่าการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงดันในดิน

### 3.2.2 แม่แรงไฮดรอลิก(Hydraulic Jack)

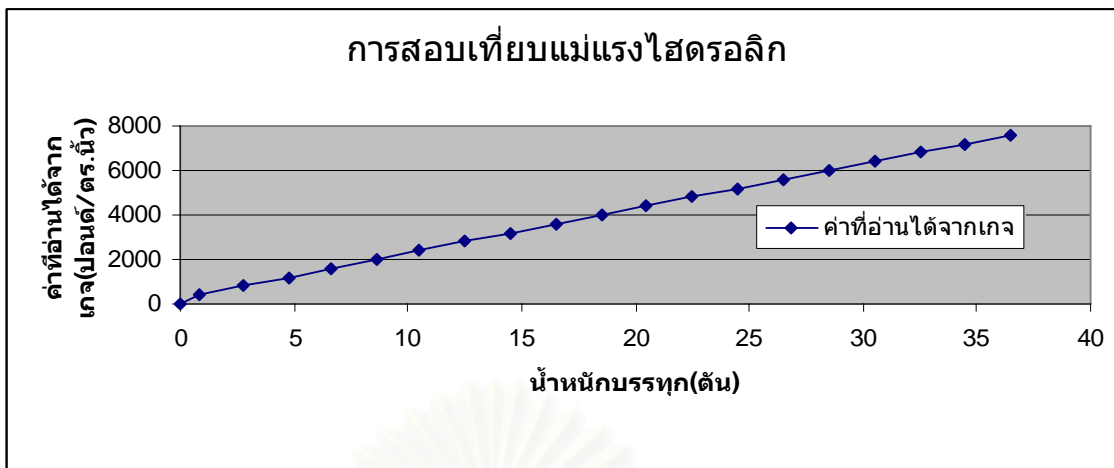
แม่แรงไฮดรอลิกใช้สำหรับยกน้ำหนักบรรทุกทุกเพื่อถ่ายน้ำหนักลงสู่เสาเข็มและแผ่นพื้นคอนกรีตผลการสอบเทียบแม่แรงไฮดรอลิกได้ผลทดสอบดังตาราง 3.3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 ผลการสอบเทียบแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack)

ข้อมูลการ ทดสอบลำดับ ที่	ค่าที่อ่านได้จากเกจ (ปอนด์/ตร.นิ้ว.)	ข้อมูลการทดสอบ		
		ค่าการสอบเทียบจากเครื่องปล่อยน้ำหนัก		
		ค่าที่อ่านได้ ค่าที่ 1 (กก.)	ค่าที่อ่านได้ ค่าที่ 2 (กก.)	ค่าเฉลี่ย (กก.)
1	400	800	800	800
2	800	2800	2800	2800
3	1200	4800	4800	4800
4	1600	6600	6600	6600
5	2000	8600	8600	8600
6	2400	10500	10500	10500
7	2800	12500	12500	12500
8	3200	14500	14500	14500
9	3600	16500	16500	16500
10	4000	18500	18500	18500
11	4400	20500	20500	20500
12	4800	22500	22500	22500
13	5200	24500	24500	24500
14	5600	26500	26500	26500
15	6000	28500	28500	28500
16	6400	30500	30500	30500
17	6800	32500	32500	32500
18	7200	34500	34500	34500
19	7600	36500	36500	36500





รูปที่ 3.8 กราฟแสดงค่าการสอบเทียบแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack)

### 3.2.3 เครื่องมือวัดระยะการทรุดตัว (Dial Gauge)

เกจวัดระยะการทรุดตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตต้องมีความละเอียดประมาณ 0.001 นิ้ว เพราะค่าการทรุดตัวของแผ่นพื้นคอนกรีตนั้นเร็วมาก และ เกิดขึ้นน้อยมาก



รูป 3.9 เกจวัดระยะการทรุดตัวของแผ่นพื้นและเสาเข็ม

### 3.2.4 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ

น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบเพื่อใช้เป็นตัวน้ำหนัก (Counter Weight) ในการใช้แม่แรงไฮดรอลิกดันขึ้นไปเพื่อให้เสาเข็มเคลื่อนตัวลงไปในน้ำใช้รถบรรทุกน้ำหนักล้อบรรทุกน้ำเต็มโดยมีน้ำหนักตัวรวมกับน้ำหนักน้ำแล้วประมาณ 30 ตัน

### 3.3 คุณสมบัติของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงและคอนกรีตที่ใช้ในแผ่นพื้นคอนกรีต

คุณสมบัติของเสาเข็มและคอนกรีตแผ่นพื้นที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้อ้างอิงตามมาตรฐานกรมทางหลวงในการก่อสร้างโครงสร้างปรับสภาพการจรดตัวระหว่างคอสพาน (Bearing Unit Structure) โดยเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงอัดแรงโดยวิธี Pre-tensioning Method ที่มีกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate Compressive Stress) ไม่น้อยกว่า 450 กก./ตร.ซม. โดยทดลองด้วยลูกบาศก์คอนกรีตขนาด 15x15x15 ซม.หรือเท่ากับ 350 กก./ตร.ซม. โดยทดลองด้วยคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 6x12 นิ้ว เมื่ออายุครบ 28 วัน ลวดอัดแรง (P.C.Wire) มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM A421 และมาตรฐาน มอก.95-2525 กำลังดึงประลัยสูงของลวดอัดแรงกำลังสูงไม่ต่ำกว่า 17,500 กก./ตร.ซม. ลวดเหล็กกำลังสูงถูกยึดออกด้วยแรงดึงไม่น้อยกว่า 70 - 75 % ของกำลังประลัยสูงสุดเพื่อใช้เป็นกำลังอัดแรงในชั้นแรกเหล็กถูกตั้งใช้เหล็ก Round Mild Steel ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร Structure Grade มีกำลังยึดหยุ่นไม่ต่ำกว่า 2,300 กก./ตร.ซม. และมีกำลังอัดประลัยสูงสุดไม่ต่ำกว่า 4,200 กก./ตร.ซม. การบ่มเสาเข็มบ่มด้วยน้ำไม่ต่ำกว่า 7 วัน ส่วนแผ่นพื้นคอนกรีตขนาด 1x1 เมตร ความหนา 0.2 เมตร มีกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate Compressive Stress) ไม่น้อยกว่า 210 กก./ตร.ซม. โดยทดลองด้วยลูกบาศก์คอนกรีตขนาด 15x15x15 ซม.

### 3.4 ขั้นตอนการเตรียมการทดสอบและการทดสอบ

#### 3.4.1 การขนส่งเสาเข็มและการตอกเสาเข็ม

การขนส่งเสาเข็มใช้รถเทรลเลอร์หางยาวเพื่อป้องกันการแตกหักระหว่างการขนส่งจากโรงงานหล่อเสาเข็มไปยังหน้างานยังแปลงทดสอบ

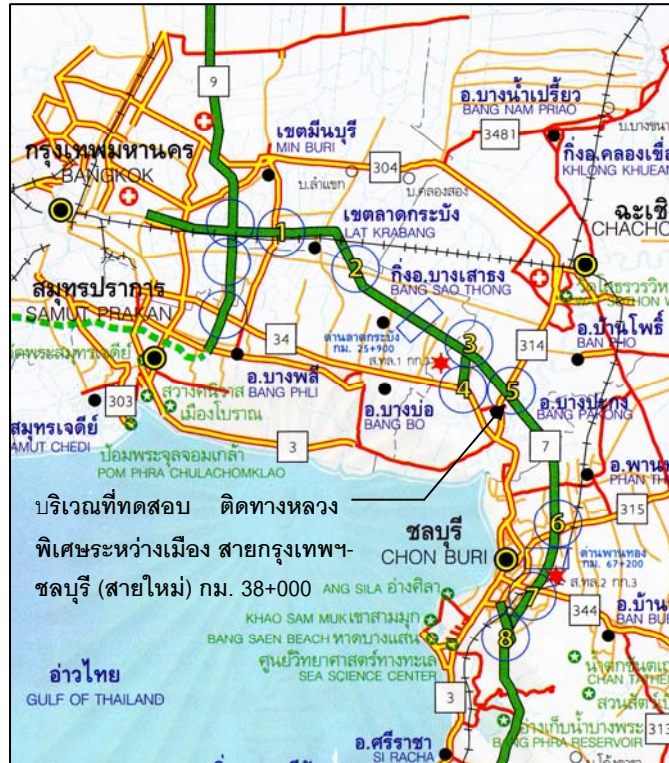


รูป 3.10 การขนส่งเสาเข็มด้วยรถเทเลอร์หางยาว

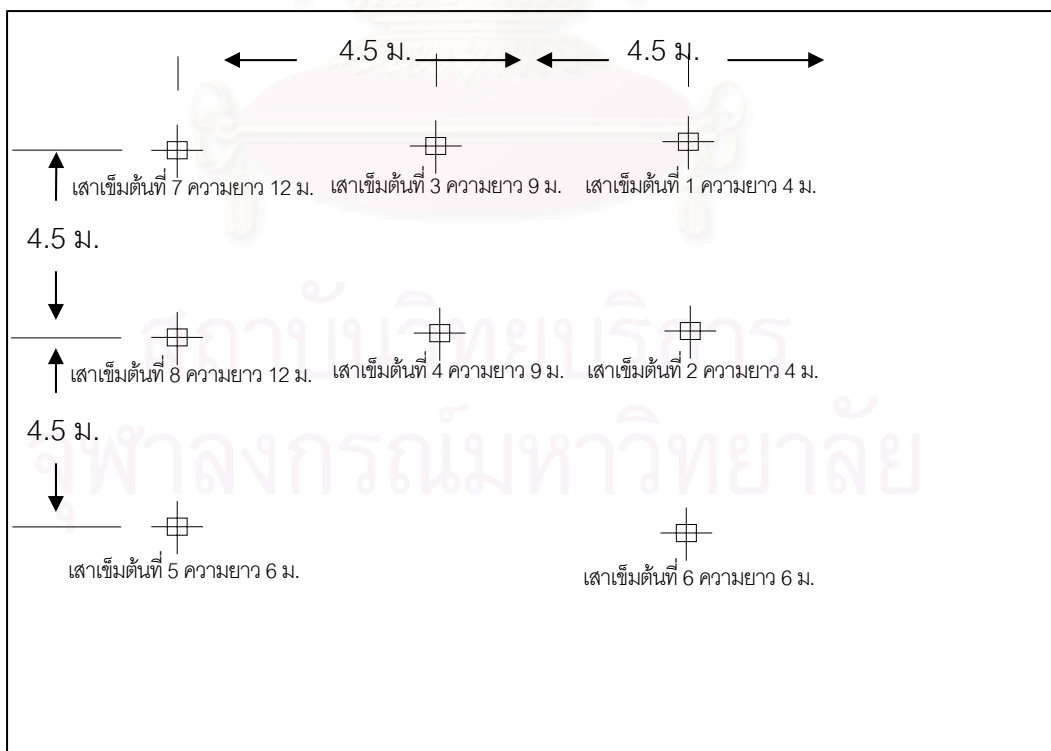


รูป 3.11 รถปั้นจั่นสำหรับตอกเสาเข็ม

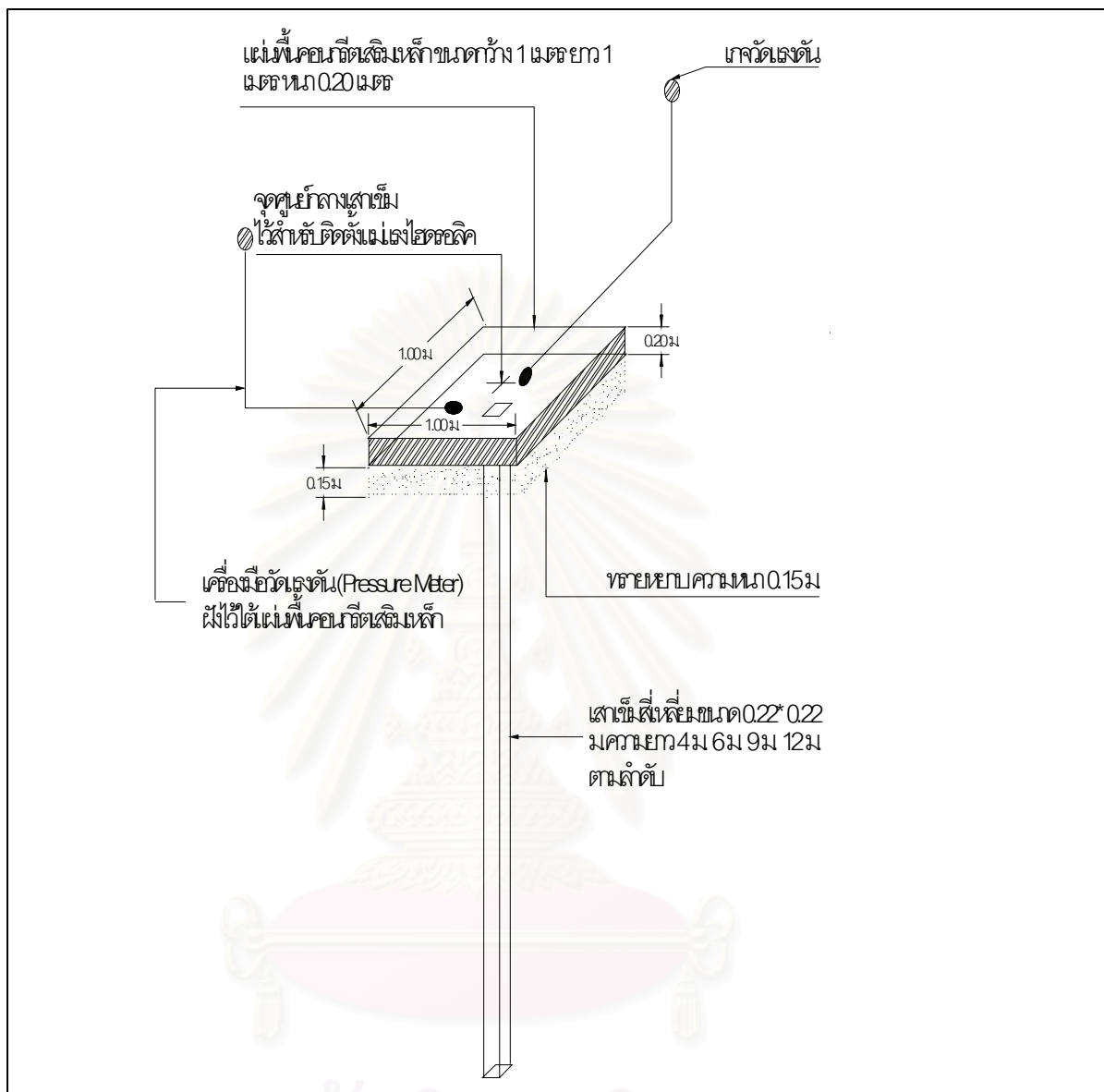
การตอกเสาเข็มนั้นใช้รถปั้นจั่นในการตอกเสาเข็มแต่ละต้น โดยเริ่มต้นตอกตั้งแต่ต้นที่มีความยาว 4 เมตร 2 ต้น / 6 เมตร 2 ต้น / 9 เมตร 2 ต้น / 12 เมตร 2 ต้น จนครบโดยในแต่ละต้นเสาเข็มมีระยะห่างระหว่างหัวเสาเข็มประมาณ 4.5 เมตร และในแต่ละต้นต้องทำการส่งหัวเสาเข็มลงไปจากระดับพื้นดินเดิมประมาณ 35 เซนติเมตร



รูป 3.12 แผนที่บริเวณที่ทดสอบ บริเวณทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง สายกรุงเทพฯ-ชลบุรีสายใหม่ (Motorway) กม. 38+000



รูป 3.13 แผนผังการตอกเสาเข็มบริเวณแปลงทดสอบ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 3.14 แบบจำลองการทดสอบเสาเข็ม



รูป 3.15 เสาเข็มต้นที่ 1 ความยาว 4 เมตร



รูป 3.16 เสาเข็มต้นที่ 2 ความยาว 4 เมตร



รูป 3.17 เสาเข็มต้นที่ 3 ความยาว 6 เมตร



รูป 3.18 เสาเข็มต้นที่ 4 ความยาว 6 เมตร



รูป 3.19 เสาเข็มต้นที่ 5 ความยาว 9 เมตร

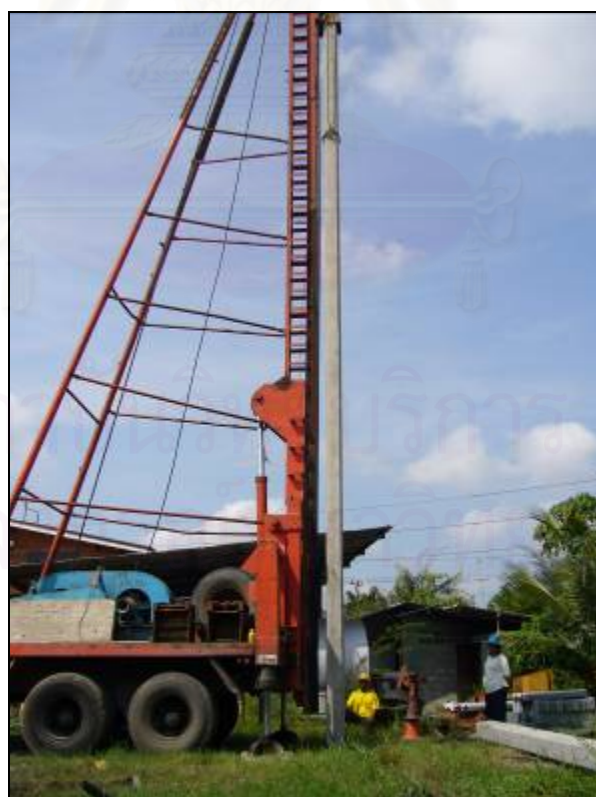


รูป 3.20 เสาเข็มต้นที่ 6 ความยาว 9 เมตร





รูป 3.21 เสาเข็มต้นที่ 7 ความยาว 12 เมตร



รูป 3.22 เสาเข็มต้นที่ 8 ความยาว 12 เมตร



รูป 3.23 การตรวจสอบความเอียง โดยลูกค้ำก่อนตอกเสาเข็ม



รูป 3.24 การตอกเสาเข็มโดยใช้รถป็นจันในการตอก



รูป 3.25 หลังจากตอกเสาเข็มถึงระดับดินแล้วทำการส่งหัวเสาเข็มลงไปอีกประมาณ 35 เซนติเมตร

### 3.4.2 การใส่เหล็กเสริมแผ่นพื้นและหล่อแผ่นคอนกรีตทับหัวเสาเข็ม

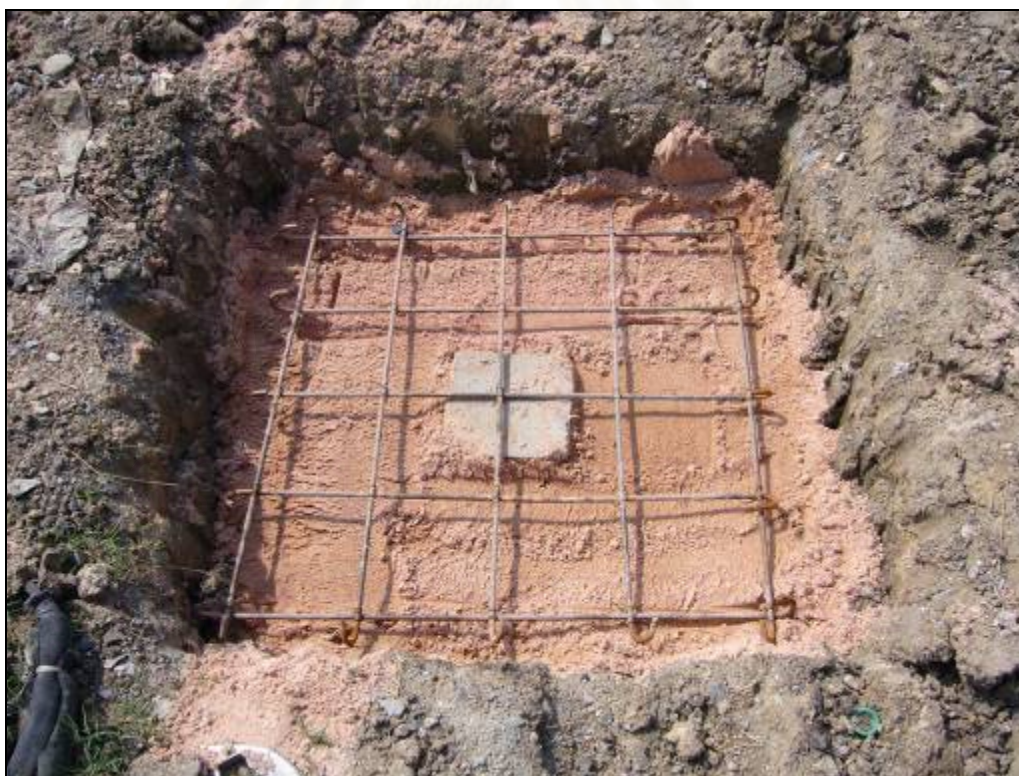
การใส่เหล็กเสริมแผ่นพื้นคอนกรีตขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร หนา 1 เมตร ยึดถือการเสริมเหล็กตามมาตรฐานกรมทางหลวงในการก่อสร้างโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัว (Bearing Unit Structure) โดยใช้เหล็กเส้นกลมขนาด 12 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม 0.30 เมตร

### 3.4.3 การเตรียมความพร้อมในแปลงทดสอบ

หลังจากทำการตอกเสาเข็มครบทุกต้นในแปลงทดสอบแล้ว ขุดดินรอบเสาเข็มออก ขนาด กว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร ลึก 0.35 เมตร และวางเหล็กตะแกรงในหลุมทดสอบให้ครบทุกหลุมหลังจากนั้นทำการเทคอนกรีตแผ่นพื้นให้ครบทุกหลุมทำการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำทิ้งไว้ให้คอนกรีตแข็งตัวรับกำลังได้เต็มที่ประมาณ 28 วันก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ 3.26 หลังจากขุดหลุมแล้วนำเหล็กตะแกรงวางบนหัวเสาเข็มทุกหลุม



รูปที่ 3.27 ใส่ทรายลงในเสาเข็มให้ครบทุกต้นความหนา 15 เซนติเมตร



รูปที่ 3.28 เทคอนกรีตลงในแบบดินความกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร หนา 0.20 เมตร



รูปที่ 3.29 ทำการปรับแต่งหน้าคอนกรีตให้เรียบหลังจากเทคอนกรีตได้ระดับความหนาแล้ว



รูปที่ 3.30 ทำการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำแล้วปล่อยให้คอนกรีตรับกำลังได้สูงสุดประมาณ 28 วัน

#### 3.4.4 การเตรียมติดตั้งเครื่องมือต่างๆในสนามเพื่อทำการทดสอบ

ทำการขุดหลุมด้านข้างแผ่นพื้นลงประมาณ 35 เซนติเมตร ให้ถึงชั้นทรายรองหัวเสาเข็ม โดยขุด 2 หลุม คือ ด้านแกน X และด้านแกน Y แล้วทำการติดตั้งเครื่องมือ วัดแรงดัน (Pressure) ภายในดินโดยลูกบอล ที่ใช้วัดแรงดัน ต้องวางลึกเข้าไปในแผ่นพื้นอีกประมาณ 25 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำทรายหยาบเปียก กลบทับปิดลงไปหลุม ให้แน่นแล้วกลบดินให้เหมือนเดิม โดยให้สายวัดแรงดัน โผล่มาเหนือพื้นดิน จากนั้นนำแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) มาวางบริเวณศูนย์กลางแผ่นพื้นคอนกรีต แล้วถอยรถบรรทุกน้ำมายังแผ่นพื้นคอนกรีต โดยให้จุดศูนย์กลางของรถบรรทุกน้ำ อยู่บริเวณศูนย์กลางของรถบรรทุกน้ำพอดี จากนั้นทำการติดตั้งเกจวัดระยะการทรุดตัว (Dial Gauge) ของเสาเข็ม โดยมีแผ่นเหล็กเป็นแกนอิสระเป็น แกนอ้างอิง



รูปที่ 3.31 จุดหลุมด้านข้าง 2 หลุมลึกลงไปประมาณ 35 เซนติเมตร ทั้งด้านแกน X และ แกน Y



รูปที่ 3.32 ฟังลูกบอลสำหรับวัดแรงดัน (Pressure) เข้าไปในแผ่นพื้นคอนกรีต



รูปที่ 3.33 หลังจากกลบดินแล้ว นำแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) มาวางที่ศูนย์กลางของแผ่นพื้นคอนกรีต



รูปที่ 3.34 การติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) และเกจวัดระยะขยับตัว (Dial Gauge)



### 3.4.5 การอ่านค่าข้อมูลต่างๆระหว่างการทำการทดสอบ

การจดข้อมูล ในระหว่างการทดสอบ ต้องทำการจดค่า ที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure) โดยจดค่าที่อ่านได้จากแกน X และ แกน Y พร้อมกับจดค่า ที่อ่านได้จากเกจวัดระยะการทรุดตัว (Dial Gauge) โดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกจะเพิ่มครั้งละ 800 กิโลกรัม และดำเนินการ เพิ่มน้ำหนักขึ้นจนกว่าเสาเข็ม และแผ่นพื้นจะไม่สามารถรับน้ำหนักได้



รูปที่ 3.35 การจดข้อมูลจาก เครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure) ในดิน และ เกจวัดระยะการทรุดตัว(Dial Gauge)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.36 รถบรรทุกน้ำบรรจุน้ำเต็ม เพื่อ ใช้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้กับเสาเข็ม

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีการตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์ดังนี้

1. การหาค่ากำลังการรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (Pile Ultimate Bearing Capacity) ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี (Theory)
2. ไม่คิดผลของแรงดูด (Negative Skin Friction) ในการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (Pile Ultimate Bearing Capacity)
3. น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดให้เสาเข็มรับก่อน น้ำหนักส่วนที่เกินจากกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มให้แผ่นคอนกรีตรับ
4. ไม่พิจารณาการหดตัวของเสาเข็มอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุก
5. ไม่คิดผลอันเกิดจากการคืบตัวของสภาพดิน (Set-up effect) รอบเสาเข็ม

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

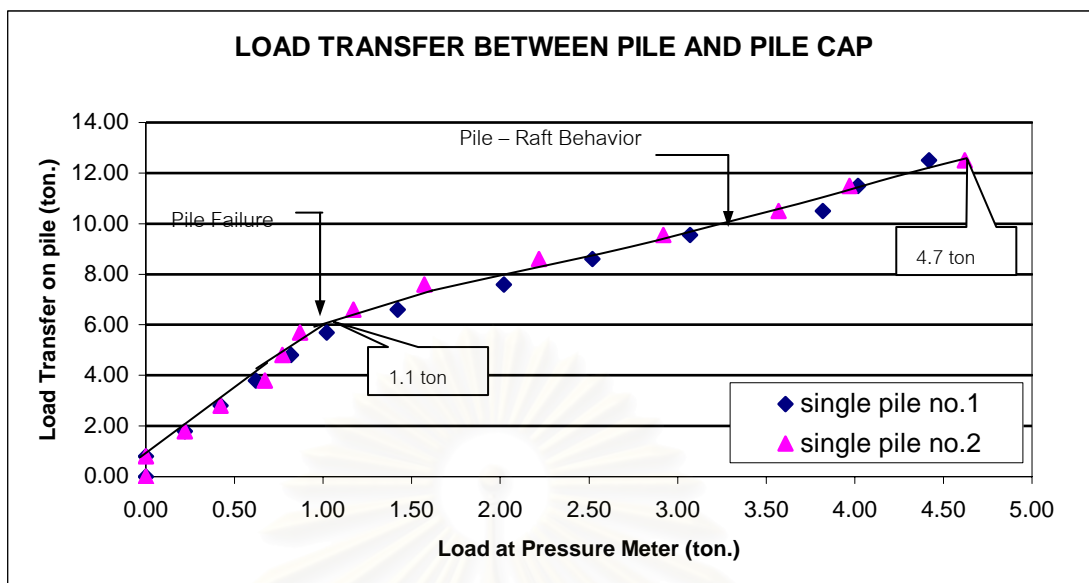
จากการทดสอบ การแบ่งถ่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ทำการทดสอบทั้ง 8 ต้น ได้ข้อมูลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์การแบ่งถ่าน้ำหนัก ของแต่ละต้นดังต่อไปนี้

#### 4.1. เสาเข็มต้นที่ 1 และ ต้นที่ 2 มีความยาวเสาเข็ม 4 เมตร

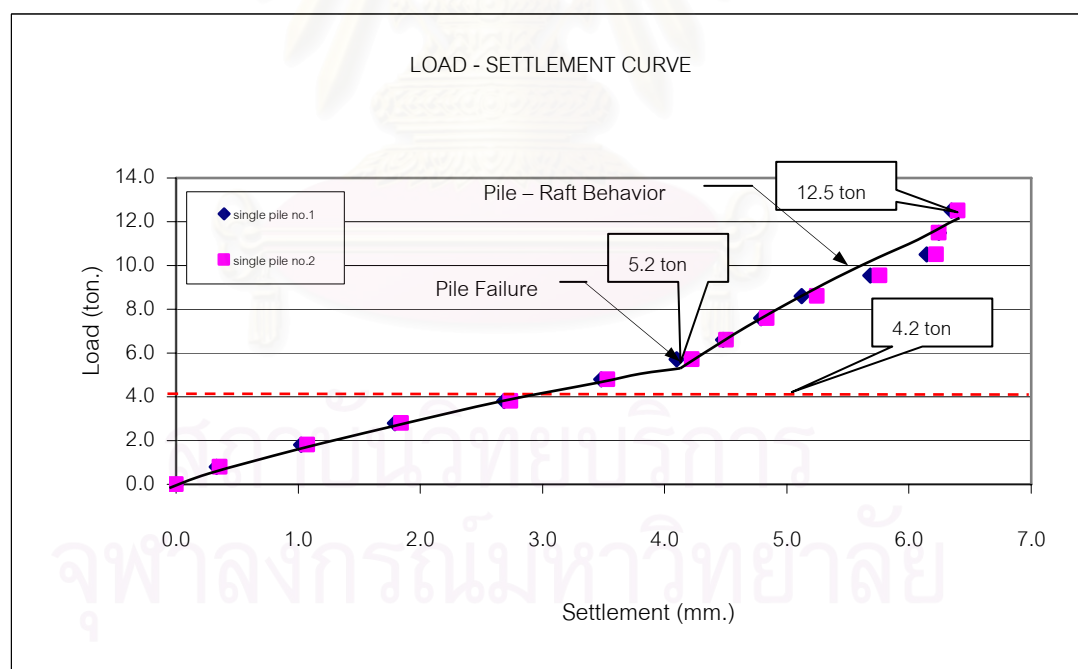
##### 4.1.1 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 1 และ 2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ การแบ่งถ่าน้ำหนักเสาเข็มต้นที่ 1 และ 2

เสาเข็มต้นที่ 1			เสาเข็มต้นที่ 2		
น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันในดินที่ได้ จากเครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)	น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันที่ได้จาก เครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)
0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000
0.80	0.33	0.010	0.80	0.36	0.010
1.80	1.02	0.030	1.80	1.08	0.030
2.80	1.79	0.050	2.80	1.84	0.050
3.80	2.69	0.070	3.80	2.74	0.075
4.80	3.48	0.090	4.80	3.53	0.085
5.70	4.10	0.110	5.70	4.22	0.095
6.60	4.48	0.150	6.60	4.51	0.125
7.60	4.79	0.210	7.60	4.84	0.165
8.60	5.12	0.260	8.60	5.25	0.230
9.55	5.68	0.315	9.55	5.76	0.300
10.50	6.14	0.390	10.50	6.22	0.365
11.50	6.25	0.410	11.50	6.25	0.405
12.50	6.35	0.450	12.50	6.40	0.470



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่าง เสาเข็ม และ แผ่นพื้นคอนกรีต เสาเข็มต้นที่ 1 และ 2



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็ม ต้นที่ 1 และ 2

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 1 และ 2

จากผลการทดสอบ เสาเข็มต้นที่ 1 และ เสาเข็มต้นที่ 2 ซึ่งเป็นเสาเข็มเดี่ยว (Single Pile) มีความยาว 4 เมตร และมีแผ่นพื้นคอนกรีต ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร หนา 0.20 เมตร วางทับอยู่บนหัวเสาเข็ม โดยมีเครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) ฝังอยู่ในทรายหยาบ ได้แผ่นพื้นคอนกรีตนั้น เมื่อเริ่มทำการใส่น้ำหนักบรรทุก เครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) เริ่มอ่านค่าได้ แต่อ่านได้ช้า และ แรงดันที่ได้ก็มีค่าน้อยมาก ส่วนการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงแรก ของการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก นั้นการทรุดตัวมีลักษณะคงที่ และ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป จนน้ำหนักบรรทุกถึงประมาณ 5.2 ตัน เกจวัดน้ำหนักที่แม่แรงเริ่มตก และ เครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) เริ่มอ่านค่าได้อย่างรวดเร็ว และ มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปอีกเครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) ก็ยังคงอ่านค่าได้มากขึ้นและรวดเร็วเช่นเดิม แสดงว่าแผ่นพื้นเริ่มแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุก หลังจากน้ำหนักบรรทุกมีมากกว่า กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม โดยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) กับ แรงดัน (Pressure) ดินที่วัดได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ด้านการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงที่เสาเข็มและแผ่นพื้นรับน้ำหนักร่วมกันนั้น กราฟในรูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็ม ต้นที่ 1 และ 2 นั้นแสดงให้เห็นว่า แนวเส้นกราฟมีลักษณะเปลี่ยนไปคือ มีลักษณะหักเบนขึ้นไปด้านบนของตัวกราฟ และ อัตราการทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุก (Load) ที่เพิ่มขึ้นเท่าเดิมมีอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น

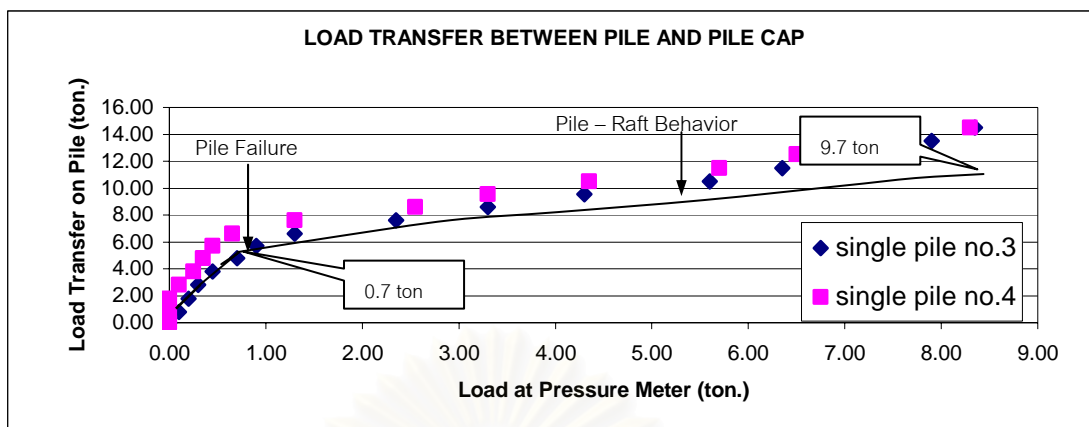
จากผลการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ของเสาเข็ม (Pile Ultimate Baring Capacity) เสาเข็มต้นที่ 1 โดยใช้ข้อมูลดิน ในบริเวณที่ทดสอบนั้น เสาเข็มต้นที่ 1 และ 2 ความยาว 4 เมตร นั้น สามารถรับกำลังน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มได้ 4.2 ตัน และ จากผลการทดสอบเสาเข็ม เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักประลัยได้ 5.2 ตัน เพราะฉะนั้นจะเห็นว่า ในช่วงแรกของการรับน้ำหนัก จนถึงจุดที่เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักประลัยได้ แผ่นพื้นคอนกรีต จะช่วยเสาเข็ม รับแรงประมาณ 1.0 ตัน ก่อนที่เสาเข็มจึงจะเริ่มทำการแบ่งถ่ายน้ำหนักเต็มที่ คือ เสาเข็มจะรับน้ำหนักเท่ากับกำลังประลัย และน้ำหนักส่วนที่เหลือแผ่นพื้นจะรับไปทั้งหมด ซึ่งเป็นลักษณะของ “Pile Raft Foundation” คือเสาเข็มและแผ่นพื้นรับน้ำหนักร่วมกัน

#### 4.2. เสาเข็มต้นที่ 3 และ ต้นที่ 4 มีความยาวเสาเข็ม 6 เมตร

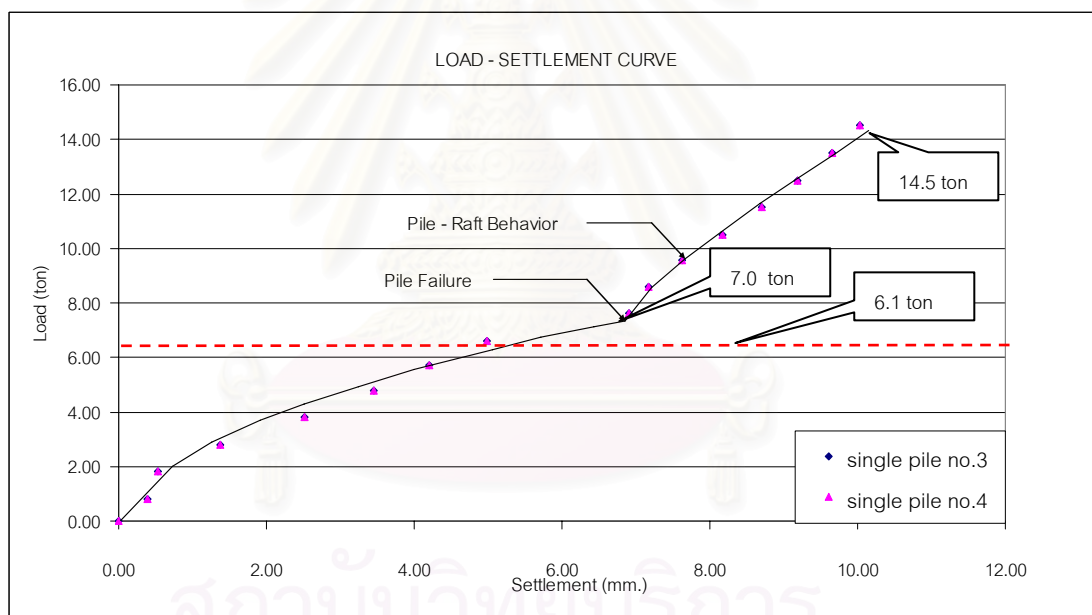
##### 4.2.1 ผลการทดสอบ ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 3 และ 4

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการแบ่งถ่ายน้ำหนักเสาเข็มต้นที่ 3 และ 4

เสาเข็มต้นที่ 3			เสาเข็มต้นที่ 4		
น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันในดินที่ได้ จากเครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)	น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันที่ได้จาก เครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)
0.00	0.00	0.000	0.0	0.00	0.000
0.80	0.38	0.010	0.80	0.33	0.000
1.80	0.54	0.020	1.80	0.61	0.000
2.80	1.38	0.030	2.80	1.43	0.010
3.80	2.51	0.045	3.80	2.59	0.025
4.80	3.46	0.070	4.80	3.51	0.035
5.70	4.20	0.090	5.70	4.25	0.045
6.60	4.99	0.130	6.60	5.04	0.065
7.60	6.91	0.235	7.60	7.01	0.130
8.60	7.17	0.330	8.60	7.73	0.255
9.55	7.63	0.430	9.55	8.19	0.330
10.50	8.17	0.560	10.50	8.73	0.435
11.50	8.70	0.635	11.50	9.27	0.570
12.50	9.19	0.715	12.50	9.75	0.650
13.50	9.65	0.790	13.50	10.21	0.750
14.50	10.04	0.830	14.50	10.62	0.835



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่าง เสาเข็ม และ แผ่นพื้นคอนกรีต เสาเข็มต้นที่ 3 และ 4



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มต้นที่ 3 และ 4

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 3 และ 4

จากผลการทดสอบ เสาเข็มต้นที่ 3 และ เสาเข็มต้นที่ 4 ซึ่งเป็นเสาเข็มเดี่ยว (Single Pile) มีความยาว 6 เมตร และมีแผ่นพื้นคอนกรีต ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตรหนา 0.20 เมตรวางทับอยู่บนหัวเสาเข็ม โดยมีเครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) ฝังอยู่ในทรายหยาบใต้แผ่นพื้นคอนกรีต เช่นเดียวกับเสาเข็มต้นที่ 1 และ ต้นที่ 2 เมื่อเริ่มทำการใส่น้ำหนักบรรทุก เครื่องมือ

วัดแรงดันดิน (Pressure Meter) เริ่มอ่านค่าได้ แต่อ่านได้ช้า และ แรงดันที่ได้ก็มีค่าน้อยมาก ส่วนการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงแรก ของการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก นั้นการทรุดตัวมีลักษณะคงที่ และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป จนน้ำหนักบรรทุกถึงประมาณ 7.0 ตัน เกจวัดน้ำหนักที่แม่แรงเริ่มตก และ เครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) เริ่มอ่านค่าได้อย่างรวดเร็ว และ มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปอีกเครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) ก็ยังคงอ่านค่าได้มากขึ้นและรวดเร็วเช่นเดิม แสดงว่าแผ่นพื้นเริ่มแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุก หลังจากน้ำหนักบรรทุกมีมากกว่า กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม โดยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) กับแรงดัน (Pressure) ดินที่วัดได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ด้านการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงที่เสาเข็มและแผ่นพื้นรับน้ำหนักร่วมกันนั้น กราฟในรูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็ม ดันที่ 1 และ 2 นั้นแสดงให้เห็นว่า แนวเส้นกราฟมีลักษณะเปลี่ยนไปคือ มีลักษณะหักเบนขึ้นไปด้านบนของตัวกราฟ และ อัตราการทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุก (Load) ที่เพิ่มขึ้นเท่าเดิมมีอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น

จากผลการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ของเสาเข็ม (Pile Ultimate Baring capacity) เสาเข็มตันที่ 1 โดยใช้ข้อมูลดิน ในบริเวณที่ทดสอบนั้น เสาเข็มตันที่ 3 และ 4 ความยาว 6 เมตร นั้น สามารถรับกำลังน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มได้ 6.04 ตัน และ จากผลการทดสอบเสาเข็ม เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักประลัยได้ 7.0 ตัน เพราะฉะนั้นจะเห็นว่า ในช่วงแรกของการรับน้ำหนัก จนถึงจุดที่เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักประลัยได้ แผ่นพื้นคอนกรีตจะช่วยเสาเข็ม รับแรงประมาณ 0.96 ตัน ก่อนที่เสาเข็มจึงจะเริ่มทำการแบ่งถ่ายน้ำหนักเต็มที่ คือ เสาเข็มจะรับน้ำหนักเท่ากับกำลังประลัย และน้ำหนักส่วนที่เหลือแผ่นพื้นจะรับไปทั้งหมด ซึ่งเป็นลักษณะของ “Pile Raft Foundation” คือเสาเข็มและแผ่นพื้นรับน้ำหนักร่วมกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

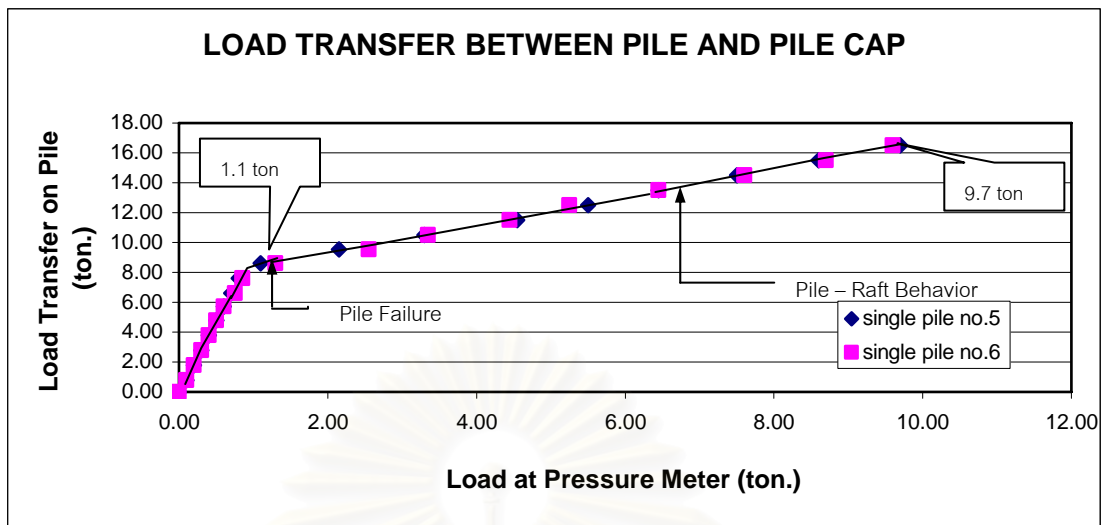


#### 4.3 เสาเข็มต้นที่ 5 และ ต้นที่ 6 มีความยาวเสาเข็ม 9 เมตร

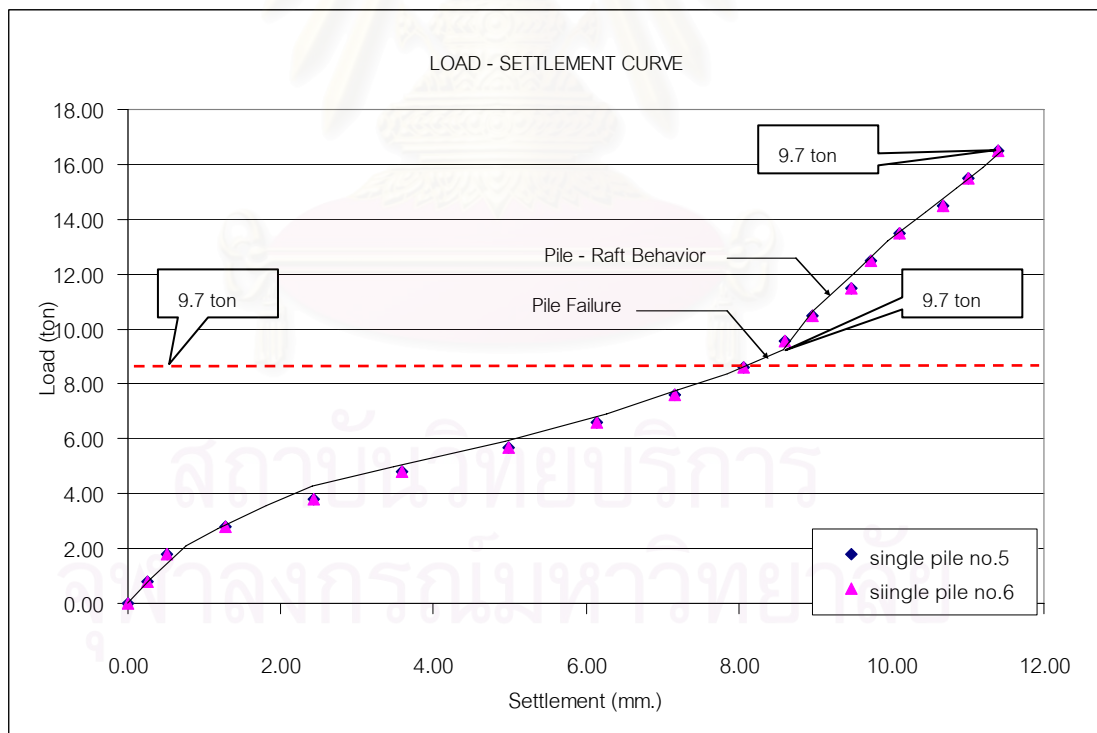
##### 4.3.1 ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 5 และ 6

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการแบ่งถ้ำน้ำหนักเสาเข็มต้นที่ 5 และ 6

เสาเข็มต้นที่ 5			เสาเข็มต้นที่ 6		
น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันในดินที่ได้ จากเครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)	น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันที่ได้จาก เครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)
0.00	0.00	0.000	0.0	0.00	0.000
0.80	0.26	0.010	0.80	0.28	0.010
1.80	0.51	0.020	1.80	0.56	0.020
2.80	1.28	0.030	2.80	1.31	0.030
3.80	2.43	0.040	3.80	2.48	0.040
4.80	3.58	0.050	4.80	3.53	0.050
5.70	4.99	0.060	5.70	5.07	0.060
6.60	6.14	0.070	6.60	6.17	0.075
7.60	7.17	0.080	7.60	7.12	0.085
8.60	8.06	0.110	8.60	8.19	0.130
9.55	8.60	0.215	9.55	8.55	0.255
10.50	8.96	0.330	10.50	9.04	0.335
11.50	9.47	0.455	11.50	9.57	0.445
12.50	9.73	0.550	12.50	9.88	0.525
13.50	10.11	0.645	13.50	10.32	0.645
14.50	10.68	0.750	14.50	10.70	0.760
15.50	11.01	0.860	15.50	11.11	0.870
16.50	11.39	0.970	16.50	11.49	0.960



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่าง เสาเข็ม และ แผ่นพื้นคอนกรีต เสาเข็มต้นที่ 5 และ 6



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก(Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มต้นที่ 5 และ 6

### 4.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 5 และ 6

จากผลการทดสอบ เสาเข็มต้นที่ 5 และ เสาเข็มต้นที่ 6 ซึ่งเป็นเสาเข็มเดี่ยว (Single Pile) มีความยาว 9 เมตร และมีแผ่นพื้นคอนกรีต ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร หนา 0.20 เมตร วางทับอยู่บนหัวเสาเข็ม โดยมีเครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) ฝังอยู่ในทรายหยาบ ใต้แผ่นพื้นคอนกรีต เช่นเดียวกันกับเสาเข็มต้นที่ 3 และ ต้นที่ 4 เมื่อเริ่มทำการใส่น้ำหนักบรรทุก เครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) เริ่มอ่านค่าได้ แต่อ่านได้ช้า และ แรงดันที่ได้ก็มีค่าน้อยมาก ส่วนการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงแรก ของการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก นั้นการทรุดตัวมีลักษณะคงที่ และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป จนน้ำหนักบรรทุกถึงประมาณ 9.3 ตัน เกจวัดน้ำหนักที่แม่แรงเริ่มตก และ เครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) เริ่มอ่านค่าได้อย่างรวดเร็ว และ มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปอีกเครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) ก็ยังคงอ่านค่าได้มากขึ้นและรวดเร็วเช่นเดิม แสดงว่าแผ่นพื้นเริ่มแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุก หลังจากน้ำหนักบรรทุกมีมากกว่า กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม โดยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) กับแรงดัน (Pressure) ดินที่วัดได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ด้านการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงที่เสาเข็มและแผ่นพื้นรับน้ำหนักรวมนั้น กราฟในรูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็ม ต้นที่ 1 และ 2 นั้นแสดงให้เห็นว่า แนวเส้นกราฟมีลักษณะเปลี่ยนไปคือ มีลักษณะหักเบนขึ้นไปด้านบนของตัวกราฟ และ อัตราการทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุก (Load) ที่เพิ่มขึ้นเท่าเดิมมีอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น

จากผลการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อกำหนดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ของเสาเข็ม (Pile Ultimate Baring capacity) เสาเข็มต้นที่ 1 โดยใช้ข้อมูลดิน ในบริเวณที่ทดสอบนั้น เสาเข็มต้นที่ 5 และ 6 ความยาว 9 เมตร นั้น สามารถรับกำลังน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มได้ 8.7 ตัน และ จากผลการทดสอบเสาเข็ม เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักประลัยได้ 9.3 ตัน เพราะฉะนั้นจะเห็นว่า ในช่วงแรกของการรับน้ำหนัก จนถึงจุดที่เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักประลัยได้ แผ่นพื้นคอนกรีต จะช่วยเสาเข็ม รับแรงประมาณ 0.6 ตัน ก่อนที่เสาเข็มจึงจะเริ่มทำการแบ่งถ่ายน้ำหนักเต็มที่ คือ เสาเข็มจะรับน้ำหนักเท่ากับกำลังประลัย และน้ำหนักส่วนที่เหลือแผ่นพื้นจะรับไปทั้งหมด ซึ่งเป็นลักษณะของ “Pile Raft Foundation” คือ เสาเข็ม และ แผ่นพื้นรับน้ำหนักร่วมกัน

#### 4.4 เสาเข็มต้นที่ 7 และ ต้นที่ 8 มีความยาวเสาเข็ม 12 เมตร

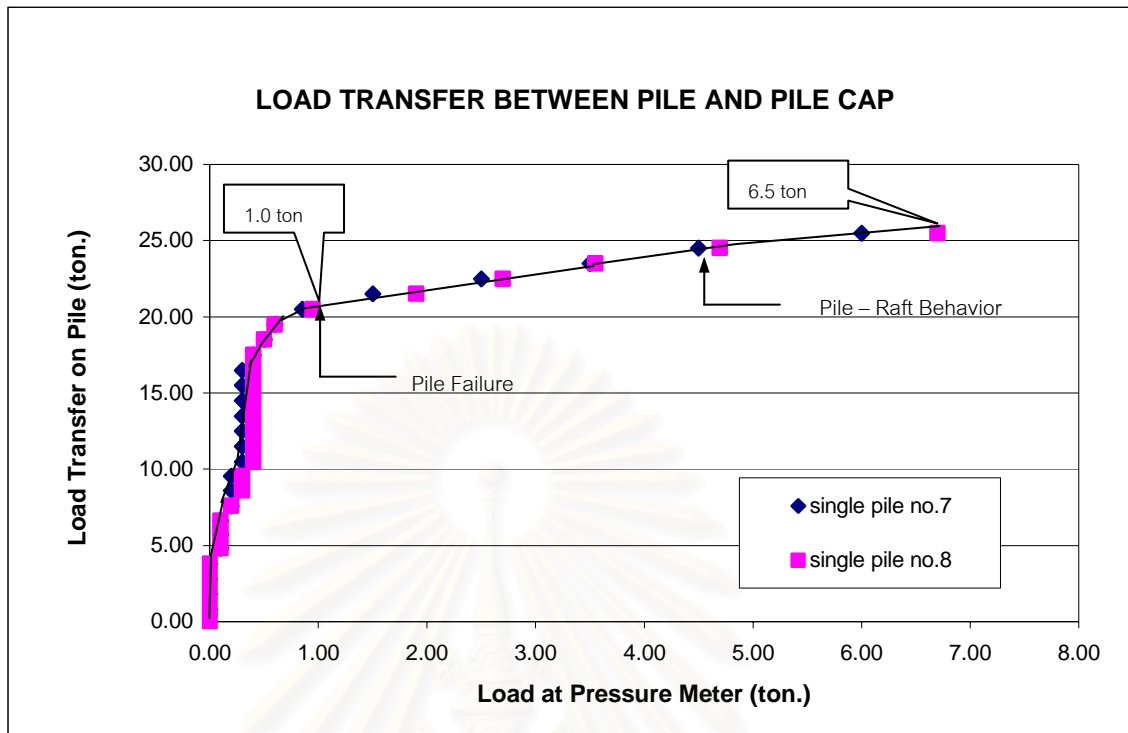
##### 4.4.1 ผลการทดสอบ ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ การแบ่งถ่วงน้ำหนักเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8

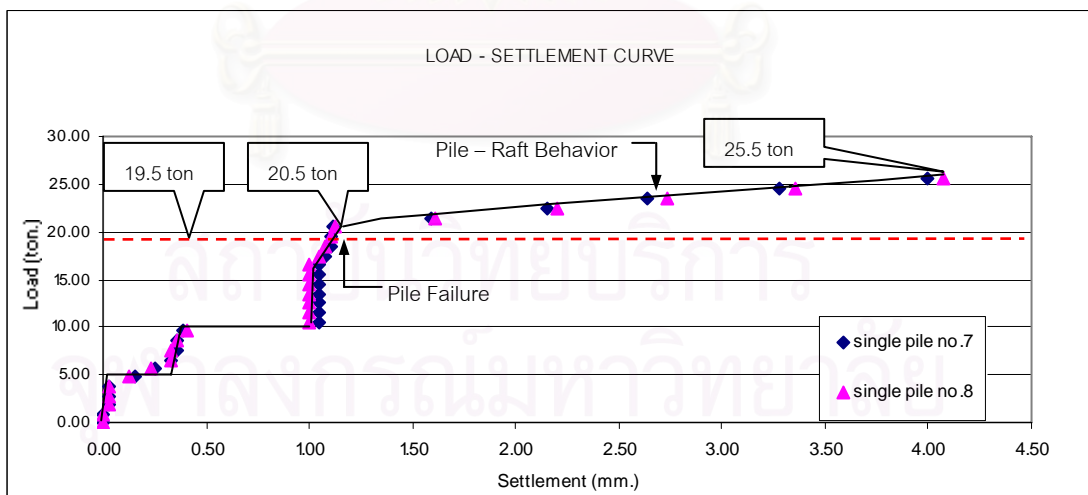
เสาเข็มต้นที่ 7			เสาเข็มต้นที่ 8		
น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันในดินที่ได้ จากเครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)	น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันที่ได้จาก เครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)
0.00	0.00	0.000	0.0	0.00	0.000
0.80	0.00	0.000	0.80	0.00	0.000
1.80	0.03	0.000	1.80	0.03	0.000
2.80	0.03	0.000	2.80	0.03	0.000
3.80	0.03	0.000	3.80	0.03	0.000
4.80	0.15	0.010	4.80	0.13	0.010
5.70	0.26	0.010	5.70	0.23	0.010
6.60	0.33	0.010	6.60	0.33	0.010
7.60	0.36	0.020	7.60	0.33	0.020
8.60	0.36	0.020	8.60	0.36	0.030
9.55	0.38	0.020	9.55	0.41	0.030
10.50	1.05	0.030	10.50	1.00	0.040
11.50	1.05	0.030	11.50	1.00	0.040
12.50	1.05	0.030	12.50	1.00	0.040
13.50	1.05	0.030	13.50	1.00	0.040
14.50	1.05	0.030	14.50	1.00	0.040
15.50	1.05	0.030	15.50	1.00	0.040
16.50	1.05	0.030	16.50	1.00	0.040
17.50	1.08	0.040	17.50	1.05	0.040
18.50	1.10	0.050	18.50	1.08	0.050

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ การแบ่งถ่าน้ำหนักเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8 (ต่อ)

เสาเข็มต้นที่ 7			เสาเข็มต้นที่ 8		
น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันในดินที่ได้ จากเครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)	น้ำหนัก บรรทุก (ตัน)	ระยะทรุดตัว ของเสาเข็ม (มม.)	แรงดันที่ได้จาก เครื่องมือวัด (กก./ตร.ซม.)
19.50	1.10	0.060	19.50	1.10	0.060
20.50	1.11	0.085	20.50	1.13	0.095
21.50	1.59	0.150	21.50	1.61	0.190
22.50	2.15	0.250	22.50	2.20	0.270
23.50	2.64	0.350	23.50	2.74	0.355
24.50	3.28	0.450	24.50	3.35	0.470
25.50	3.99	0.600	25.50	4.07	0.670



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็ม และ แผ่นพื้นคอนกรีต เสาเข็มต้นที่ 7 และ 8



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8

จากผลการทดสอบ เสาเข็มต้นที่ 7 และ เสาเข็มต้นที่ 8 ซึ่งเป็นเสาเข็มเดี่ยว (Single Pile) มีความยาว 12 เมตร และมีแผ่นพื้นคอนกรีต ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร หนา 0.20 เมตร วางทับอยู่บนหัวเสาเข็ม โดยมีเครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) ฝังอยู่ในทรายหยาบ ใต้แผ่นพื้นคอนกรีต เช่นเดียวกันกับเสาเข็มต้นที่ 5 และ ต้นที่ 6 ต่างกันเพียงแต่ ด้านปลายของเสาเข็มต้นที่ 7 และ 8 นี้อยู่ในชั้นดินที่เรียกว่าชั้น Medium Clay แล้ว เมื่อเริ่มทำการใส่น้ำหนักบรรทุก เครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) เริ่มอ่านค่าได้ แต่อ่านได้ช้า และ แรงดันที่ได้ก็มีค่าน้อยมาก ส่วนการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงแรก ของการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก นั้นค่าการทรุดตัวมีลักษณะการทรุดตัวก็มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการทดสอบเสาเข็มต้นอื่นๆ และ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป จนน้ำหนักบรรทุกถึงประมาณ 20.5 ตัน เกจวัดน้ำหนักที่แม่แรงเริ่มตก และ เครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) เริ่มอ่านค่าได้อย่างรวดเร็ว และ มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปอีกเครื่องมือวัดแรงดันดิน (Pressure Meter) ก็ยังคงอ่านค่าได้มากขึ้นและรวดเร็ว เช่นเดิม แสดงว่าแผ่นพื้นเริ่มแบ่งถ่ายน้ำหนักบรรทุก หลังจากน้ำหนักบรรทุกมีมากกว่า กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม โดยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก(Load) กับ แรงดัน (Pressure) ดินที่วัดได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ด้านการทรุดตัวของเสาเข็มในช่วงที่เสาเข็มและแผ่นพื้นรับน้ำหนักพร้อมกันนั้น กราฟในรูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็ม ต้นที่ 7 และ 8 นั้นแสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟมีลักษณะเปลี่ยนไปจากเสาเข็ม 6 ต้นแรก อัตราการทรุดตัว(Settlement)ของเสาเข็มเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุก(Load)ที่เพิ่มขึ้นเท่าเดิมมีอัตราส่วนที่น้อยลง

จากผลการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ของเสาเข็ม (Pile Ultimate Baring capacity) เสาเข็ม โดยใช้ข้อมูลดิน ในบริเวณที่ทดสอบนั้น เสาเข็มต้นที่ 7 และ 8 ความยาว 12 เมตร นั้น สามารถรับกำลังน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มได้ 19.42 ตัน และ จากผลการทดสอบเสาเข็ม เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักประลัยได้ 20.5 ตัน เพราะฉะนั้นจะเห็นว่า ในช่วงแรกของการรับน้ำหนัก จนถึงจุดที่เสาเข็มสามารถรับน้ำหนักประลัยได้ แผ่นพื้นคอนกรีต จะช่วยเสาเข็ม รับแรงประมาณ 1.08 ตัน ก่อนที่เสาเข็มจึงจะเริ่มทำการแบ่งถ่ายน้ำหนักเต็มที่ คือ เสาเข็มจะรับน้ำหนักเท่ากับกำลังประลัย และน้ำหนักส่วนที่เหลือแผ่นพื้นจะรับไปทั้งหมด ซึ่งเป็นลักษณะของ “Pile Raft Foundation” คือเสาเข็มและแผ่นพื้นรับน้ำหนักพร้อมกัน

จากผลการทดสอบสามารถ สรุปผลวิเคราะห์การแบ่งถ้ำน้ำหนัก ได้ดังต่อไปนี้

1) จากผลการทดสอบ เสาเข็มต้นที่ 1,2,3,4,5 และ 6 ซึ่งมีความยาวเสาเข็มตั้งแต่ 4 เมตร 6 เมตร และ 9 เมตร ซึ่งเสาเข็มทั้ง 6 ต้น นี้ความยาวของปลายเสาเข็มนั้นอยู่ในดินเหนียวอ่อนมาก (Very Soft Clay) จากข้อมูลการทดสอบที่ได้ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในช่วงแรก คือ ตั้งแต่เสาเข็มเริ่มรับน้ำหนักบรรทุก จนเสาเข็มรับกำลังได้สูงสุด (Pile Failure) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็ม มีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) และ การทรุดตัว (Settlement) มีลักษณะคงที่ ในช่วงที่สอง เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้ เลยจากจุดที่เสาเข็มสามารถรับกำลังได้สูงสุดแล้ว (Pile Failure) แล้ว อัตราส่วนระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ การทรุดตัว (Settlement) มีลักษณะ ที่เพิ่มมากขึ้นจากเดิมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในช่วงนี้เองที่เสาเข็มและแผ่นพื้น เริ่มทำการแบ่งถ้ำน้ำหนักเต็มที คือ เสาเข็มจะรับน้ำหนักเท่ากับกำลังประลัย และน้ำหนักส่วนที่เหลือแผ่นพื้นจะรับไปทั้งหมด ซึ่งเป็นลักษณะของ “Pile Raft Foundation” คือเสาเข็มและแผ่นพื้นรับน้ำหนักร่วมกัน

ส่วนผลการทดสอบ ของเสาเข็มต้นที่ 7,8 นั้น มีความยาวเสาเข็ม 12 เมตร ด้านปลายเสาเข็ม อยู่ในชั้นดินที่มีความแข็งแรงมากขึ้นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในช่วงแรก คือ ตั้งแต่เสาเข็มเริ่มรับน้ำหนักบรรทุก จนเสาเข็มรับกำลังได้สูงสุด (Pile Failure) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) และ ระยะทรุดตัว (Settlement) ของเสาเข็ม มีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) และ การทรุดตัว (Settlement) มีลักษณะคงที่ ในช่วงที่สอง เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้ เลยจากจุดที่เสาเข็มสามารถรับกำลังได้สูงสุดแล้ว (Pile Failure) แล้ว อัตราส่วนระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ การทรุดตัว (Settlement) มีลักษณะ ที่น้อยลงกว่าเดิม

2) จากผลการทดสอบ วัดแรงดันใต้แผ่นพื้นคอนกรีตของเสาเข็มทั้ง 8 ต้น โดยใช้เครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Meter) ภายในดินนั้น ความสัมพันธ์ ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก (Load) และ แรงดัน (Pressure) แสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรกของการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก คือ ตั้งแต่เสาเข็มเริ่มรับน้ำหนักบรรทุก จนเสาเข็มสามารถรับกำลังได้สูงสุด (Pile Failure) ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Meter) มีค่าน้อยมาก คือมีค่าโดยประมาณ 1 ตัน แต่เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้เลยจุดที่เสาเข็มสามารถรับกำลังได้สูงสุดแล้ว (Pile Failure) แล้ว เครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Meter) สามารถอ่านค่าได้อย่างรวดเร็ว และ มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในช่วงนี้เองที่เสาเข็มและแผ่นพื้น เริ่มทำการแบ่งถ้ำน้ำหนักเต็มที คือ เสาเข็มจะรับน้ำหนักเท่ากับกำลังประลัย ในช่วงนี้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับความยาวของเสาเข็ม และ คุณสมบัติของดินโดยรอบเสาเข็ม และน้ำหนักส่วนที่เหลือแผ่นพื้นจะรับไปทั้งหมด ซึ่งเป็นลักษณะของ “Pile Raft Foundation” คือเสาเข็มและแผ่นพื้นรับน้ำหนักร่วมกัน



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการทดสอบ ได้ข้อมูลการทดสอบดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบการแบ่งถ่ายน้ำหนัก ของเสาเข็ม และ แผ่นพื้นคอนกรีต

NO.	ความยาว เสาเข็ม (ม.)	กำลังรับ น้ำหนักทั้งหมด ( $Q_{total}$ )(ตัน.)	กำลังรับ น้ำหนักเสาเข็ม ( $Q_{pile}$ )(ตัน.)	กำลังรับน้ำหนัก แผ่นพื้นคอนกรีต ( $Q_{pile\ cap}$ )(ตัน.)	ระยะการทรุด ตัวทั้งหมด ( $\Delta_{total}$ )(มม.)
1	4.0	12.5	5.2	7.3	6.4
2	6.0	14.5	7.0	7.5	10.3
3	9.0	16.5	9.3	7.2	11.4
4	12.0	25.5	20.5	5.0	4.0

จากผลการทดสอบ ทำให้ทราบว่า เสาเข็มจะทำการรับน้ำหนักก่อน จนเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักถึงจุด Pile Failure แล้วจากนั้นเสาเข็มจะทำการรับน้ำหนักร่วมกับ Pile cap ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางประกอบการ ออกแบบโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน (Transition Structure) โดยใช้เสาเข็มผ่นความยาว

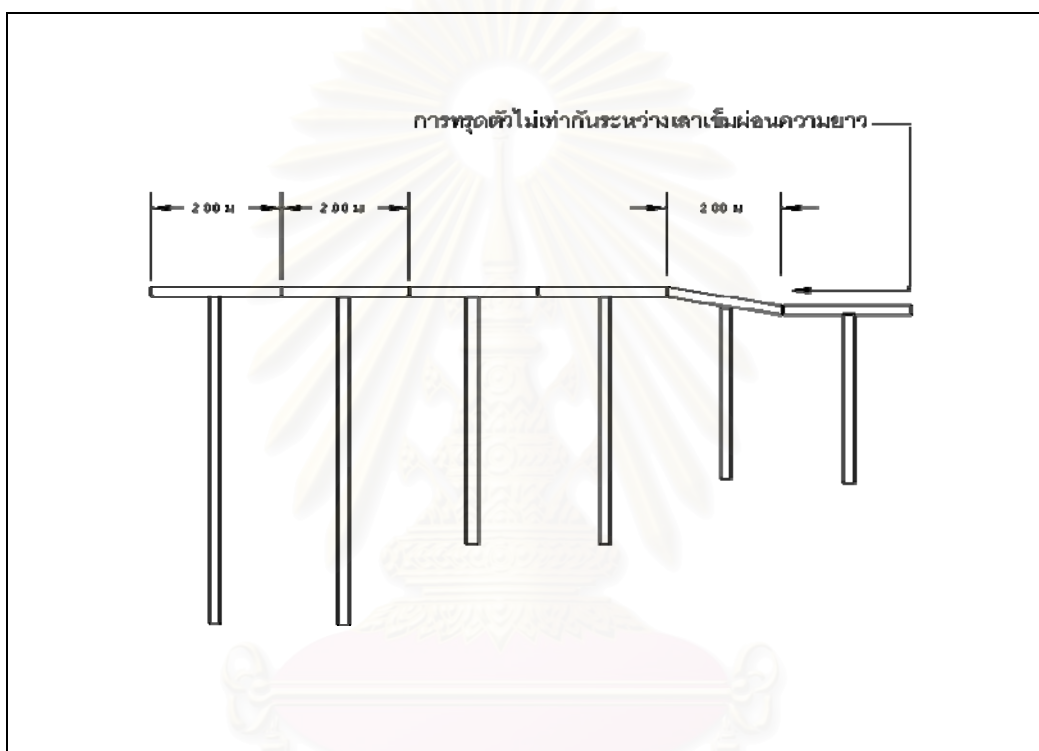
#### 5.2 การนำไปใช้ประโยชน์

เราสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบโครงสร้างปรับสภาพการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน (Transition Structure) ได้ดังตัวอย่างแนะนำตาม สมการที่ 5.1 และ สมการที่ 5.2

$$Q_{total} = Q_{pile} + Q_{pile\ cap} \quad \text{สมการ 5.1}$$

$$Q_{all} = [Q_{pile} / (F.S.=1.5)] + [Q_{pile\ cap} / (F.S.=2.5)] \quad \text{สมการ 5.2}$$

ซึ่งในการออกแบบค่า Factor of Safety ของสมการนั้น ค่า Factor of Safety เสาเข็ม (Pile) ( $Q_{pile}$ ) ควรจะมีค่าน้อยกว่า ตอม่อ (Pile Cap) ( $Q_{pile\ cap}$ ) เนื่องจากในช่วงแรก เสาเข็ม (Pile) จะทำการรับน้ำหนักก่อนจนถึงช่วง Pile Failure เสาเข็มและตอม่อ (Pile Cap) จึงจะทำการรับน้ำหนักร่วมกัน ซึ่งจะทำให้ผลการออกแบบออกมาได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด โดยสามารถกำหนดค่า Factor of Safety ได้ตามความเหมาะสมของคุณสมบัติของดิน และ การใช้ประโยชน์



รูปที่ 5.1 การออกแบบที่ไม่เหมาะสมของเสาเข็มชนิดผ่านความยาว ของโครงสร้างปรับสภาพการหลุดตัวบริเวณคอสะพาน (Transition Structure) ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการใช้ถนน

### 5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยต่อไป

1) ควรมีการทดสอบ โดยใช้จำนวนเสาเข็มในปริมาณที่มากกว่านี้ เพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลมากขึ้น และ ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

2) ควรทำการทดสอบ โดยใช้เสาเข็มที่มีความยาวมากขึ้นกว่านี้ เพื่อดูพฤติกรรมการแบ่งถ่ายน้ำหนักระหว่างเสาเข็มกับแผ่นพื้นคอนกรีต ในชั้นดินเหนียวที่มีค่าความแข็งแรงมากกว่านี้ ว่าจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนไปหรือไม่อย่างไร

3) ควรทำการทดสอบในพื้นที่ที่เป็นดินบริเวณอื่นบ้าง เพื่อ ดูแนวโน้มการแบ่งถ่าย น้ำหนักระหว่างเสาและแผ่นพื้นว่ามีความแตกต่างหรือเหมือนกันอย่างไรบ้าง

4) ควรจะมีการนำข้อมูลที่ได้ไป ทำวิเคราะห์หาวิธีการออกแบบ โครงสร้างปรับสภาพ การทรุดตัว บริเวณคอสะพานแล้วมีทดสอบพร้อมเก็บข้อมูล ดูว่าผลการทรุดตัวที่ได้ออกแบบโดยใช้วิธีการวิจัยนี้เปรียบเทียบกับ การออกแบบโดยวิธีเดิมว่า การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงเป็นอย่างไรบ้าง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- พินิจ ตั้งบุญเติม. 2541. การปรับปรุงคุณภาพดิน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี: 10-25.
- สันติ กวินวงศ์ไพบุลย์ . 2543. วิศวกรรมฐานราก. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร: 5-30.
- สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์. 2540. วิศวกรรมปฐพี. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย: 128-201.
- วิชาญ ภูพัฒน์ . 2540. ประสบการณ์ การสำรวจออกแบบ และ ก่อสร้างทาง สายบางนา - บางปะกง. กองวิเคราะห์ และ วิจัยกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม: 3-24.
- วันชัย เทพรักษ์ . 2546. วิศวกรรมฐานรากเสาเข็ม. คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: 68-96.
- อรุณ ชัยเสรี . 2524. การทำเสาเข็ม เจาะขนาดใหญ่. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย: 1-54.

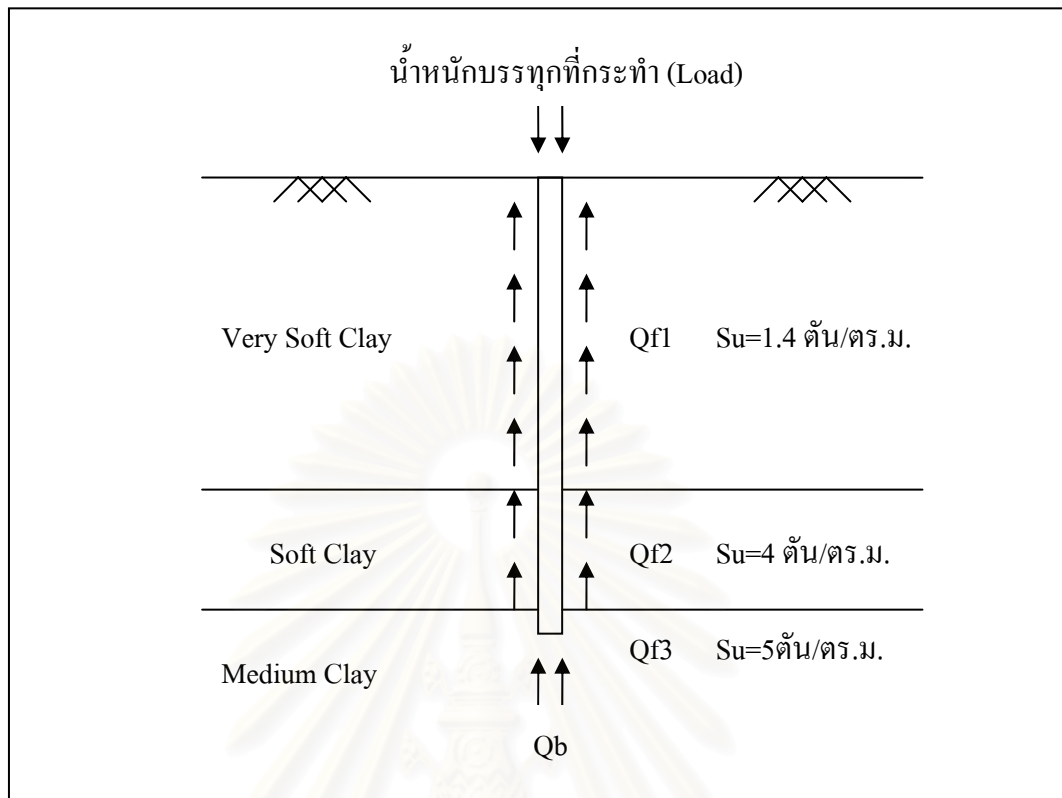
### ภาษาอังกฤษ

- Butterfield, R.B. 2002. The Problem of Pile Group - Pile cap Interaction. Journal of Australasia Geomechs. 21(2), pp 135-142.
- Poulos, H.G.1980. Settlement of PileGroups Bearing on Stiffer Strata. Journal of Geotechnical Engineering Division .100(2), pp 185-190.
- Poulos, H.G. and Davis, E.S. 1980. The Analysis of Pile Raft System. Journal of Australasia Geomechs. 2(1), pp 21-27.
- Liew, S.S. 2002. Pile Design with Negative Skin Friction. Tripartite Meeting and Technical Courses - Geotechnical Engineering .pp 7-21.
- Robert, V.W. 1979. Soil Mechanics. Massachusetts Insitute of Technology .pp 151-227.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



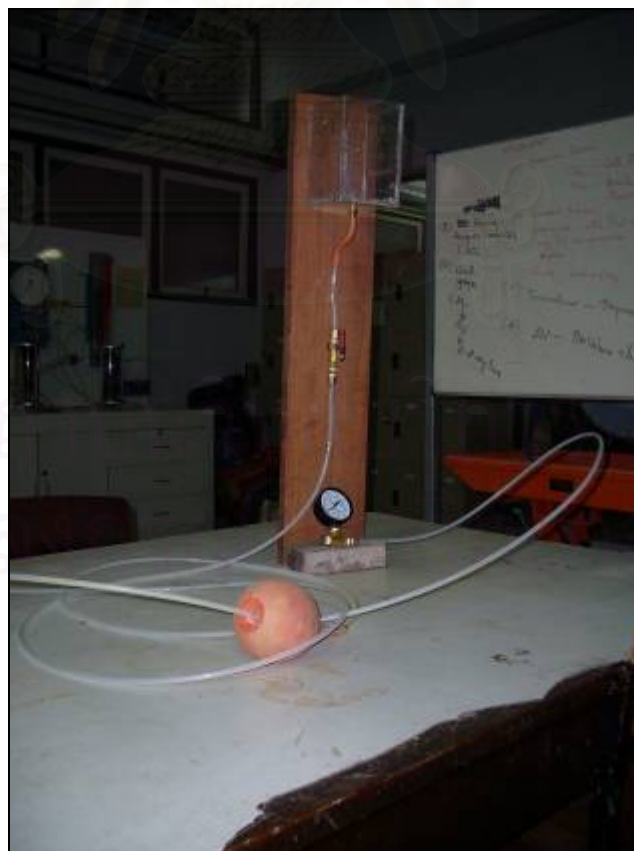
รูป ผ1 แรงที่กระทำต่อเสาเข็ม และ คุณสมบัติชั้นดินชั้นต่างๆ



รูป ผ2 การทดสอบเสาเข็มรับน้ำหนักร่วมกับแผ่นคอนกรีต



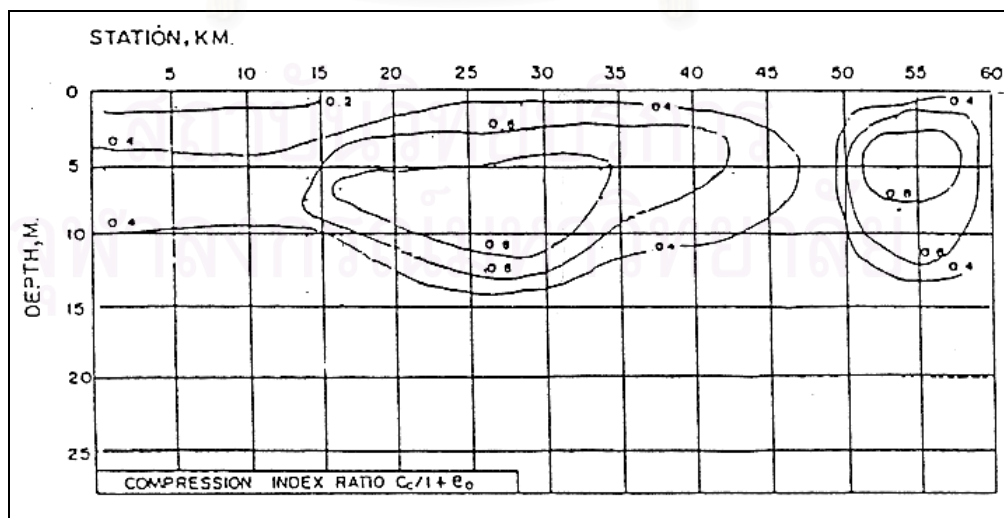
รูป ผ3 เกจวัดแรงดันแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack)



รูป ผ4 ลูกบอลที่ใช้ประกอบเครื่องมือวัดแรงดัน (Pressure Meter)



รูป ผ5 ลักษณะการติดตั้งแม่แรงกดเสาเข็ม และ เภจวัคระยะการทรุดตัว



รูป ผ6 ค่าดัชนีการอัดตัวตามแนวทางหลวง สายบางนา-บางปะกง



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชาติชาย พรวนพิทักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน 2519 สำเร็จการศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545 ปัจจุบันรับราชการ ในตำแหน่ง วิศวกรโยธา สำนักงานหลวงที่ 9 กองบำรุงและรักษาทางหลวง กรมทางหลวง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย