

การส่งถ่ายน้ำหนักสถิตและการคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก
ของเสาเข็มเจาะ

นายสุวรรณ เขียวชาญศิลป์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2531

ISBN 974-568-740-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014169

STATIC LOAD TRANSFER AND PREDICTIONS OF CARRYING CAPACITY
OF BORED PILES

Mr. Suwun Cheiwchansilp

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1988

ISBN 974-568-740-5

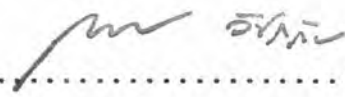
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การส่งถ่ายน้ำหนักสถิติและการคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนัก
 บรรทุกของเสาเข็มเจาะ

โดย นายสุวรรณ เชี่ยวชาญศิลป์

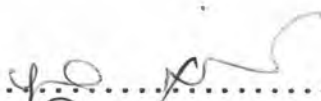
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ วิเชียร เต็งจำนวย

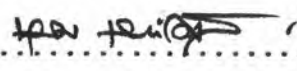
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

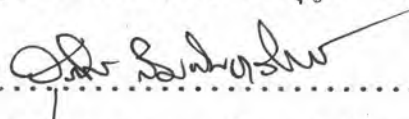

 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
 (ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรากัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


 ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพหล จิวาลักษณ์)


 อาจารย์ที่ปรึกษา
 (รองศาสตราจารย์ วิเชียร เต็งจำนวย)


 กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรดวงศ์)


 กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์)



สุวรรณ เขียวชาญศิลป์ : การส่งถ่ายน้ำหนักสถิตและการคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ (STATIC LOAD TRANSFER AND PREDICTIONS OF CARRYING CAPACITY OF BORED PILES) อ.ที่ปรึกษา : รศ.วิเชียร เต็งอำนวยการ, 266 หน้า

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการส่งถ่ายน้ำหนักสถิต และการคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ

การศึกษาพฤติกรรมการส่งถ่ายน้ำหนักสถิตของเสาเข็มนั้น วิธีที่ใช้ศึกษา ได้แก่ Distribution Function Approach และ Elastic Solid Approach ผลจากการศึกษาโดยวิธี Distribution Function Approach เมื่อเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง s และ $C K_s \tan \phi'_a$ และ $\phi' N_q$ และ ϕ' ปรากฏว่า มีแนวโน้มเดียวกับผลการศึกษาของผู้ศึกษารายอื่น ส่วนการศึกษาโดยวิธี Elastic Solid Approach พบว่า น้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเสาเข็มเจาะไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ จะเพิ่มขึ้นตามความลึกของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาการคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะนั้น วิธีที่ใช้ศึกษา ได้แก่ Soil Mechanics Method และวิธีวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ ซึ่งเสนอโดย Bullen (1958) Chin (1970) และ Mazurkiewicz (1972) น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธีต่าง ๆ ดังกล่าวนี จะเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการทดสอบในสนาม จากการศึกษาพบว่า การคาดคะเนโดยวิธี Soil Mechanics ให้ผลมีแนวโน้มอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ สำหรับการคาดคะเนโดยวิธีวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะนั้น วิธีที่เสนอโดย Bullen ยังไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ได้ทางปฏิบัติ ส่วนในการวิเคราะห์ตามวิธีที่เสนอโดย Chin และ Mazurkiewicz นั้น การวิเคราะห์ที่ได้วิเคราะห์โดยแบ่งออกเป็นสามกรณี คือ สองกรณีแรก วิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ เฉพาะแต่ที่อยู่ในช่วงประมาณ 0.3 และ 0.6 เท่าของ plunging failure load ส่วนกรณีที่สาม วิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ ตั้งแต่แรกเริ่มรับน้ำหนักจนถึงเข้าใกล้ plunging failure load ผลการศึกษาปรากฏว่า วิธีของ Chin ให้ผลการคาดคะเนที่ยอมรับได้ ต่อเมื่อข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในกรณีที่สามเท่านั้น และวิธีของ Mazurkiewicz ให้ผลการคาดคะเนที่ยอมรับได้ ต่อเมื่อการวิเคราะห์อยู่ในสองกรณีหลังดังกล่าว

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
 สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
 ปีการศึกษา 2530.....

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

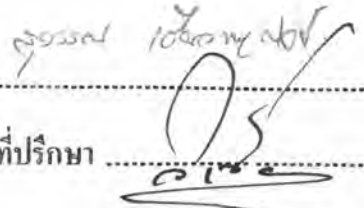
SUWUN CHEIWCHANSILP : STATIC LOAD TRANSFER AND PREDICTIONS OF CARRYING CAPACITY OF BORED PILES. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. VICHEAN TANGAMNUAY, 266 PP.

The objective of this study is to investigate the behavior of static load transfer of bored piles. In addition, the predictions of carrying capacity of bored piles are also of interest.

The study on the behavior of static load transfer of bored piles is emphasized on the two methods as the Distribution Function Approach and the Elastic Solid Approach. The relationship between α and C , $K \tan \phi'$ and ϕ' , N and ϕ' obtained from the Distribution Function Approach are in the same tendency as the result of the previous researchers. For the Elastic Solid Approach, the study reveals that the load transfer increases with depth of pile.

The other purpose of this study on the predictions of the carrying capacity of bored piles will use the Soil Mechanics Method and methods of analyzing the load settlement characteristic presented by the specified previous researcher as Bullen (1958) Chin (1970) and Mazurkiewicz (1972). The ultimate carrying capacity of bored piles obtained from the above mentioned methods are compared to the observed failure load of piles from the insitu test. The study reveals that the prediction by using the Soil Mechanics Method gives the result of ultimate carrying capacity of which a tendency within the acceptable limit. For other methods presented, ie, Bullen's method is not appropriate method in practice, the methods of Chin and Mazurkiewicz are analyzed by using each pile load test data keeping into three cases. The first two cases use the data in the range of about 0.3 and 0.6 of plunging failure load. The last case use all of the data from the beginning to approach the plunging failure load. The study reveals that the prediction by Chin's method yeilds the result to be an over estimation tendency within the acceptable limit which is restricted to only in case three. Finally, the prediction by Mazurkiewicz's method gives an acceptable good estimation only in case two and three.

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2530

ลายมือชื่อผู้จัดทำ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา


กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อท่านที่ให้ความช่วยเหลืออย่างค้ำประกันในการทำวิจัย
จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ดังนี้

รศ. วิเชียร เต็งอำนวยการ และ ผศ. ดร. สุรพล จิวาลักษณ์ ท่านทั้งสอง
ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ และ ผศ. ดร. สุรจักร สัมพันธ์รักษ์ ได้
กรุณาช่วยเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

เจ้าหน้าที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
บริษัท เอส.ที.เอส. ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลประกอบการวิจัย

ท่านอื่น ๆ ที่มีได้กล่าวนามไว้ในที่นี้

ท้ายนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งได้อุปการะและสนับสนุน
ในการศึกษาของผู้เขียนตลอดมา.

สุวรรณ เขียวชาญศิลป์

สารบัญ

หน้า

หน้าอนุมัติ.....
 บทคัดย่อภาษาไทย.....
 บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....
 กิตติกรรมประกาศ.....
 สารบัญตาราง.....
 สารบัญภาพ.....
 คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....
 บทที่

1. บทนำ..... 1
 1.1 ความเป็นมาของปัญหา..... 1
 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2
 1.3 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย..... 2
 1.4 ขั้นตอนและวิธีการศึกษา..... 3
 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
 2. ทบทวนวรรณคดี..... 5
 2.1 การคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม
 2.1.1 วิธีการสมมูลย์ทางกลศาสตร์ (Static Approach)... 5
 2.1.2 การคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก
 ของเสาเข็ม โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบการรับน้ำหนัก
 บรรทุกของเสาเข็ม..... 19
 2.1.2.1 วิธีของ Bullen..... 21
 2.1.2.2 วิธีของ Chin..... 21
 2.1.2.3 วิธีของ Mazurkiewicz..... 23

2.2 กลไกระหว่างดินและเข็ม (Mechanicsm of soil-pile interaction).....	25
2.2.1 Distribution Function Approach.....	26
2.2.2 Elastic Solid Approach.....	32
3. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ และลักษณะของชั้นดิน.....	39
3.1 ลักษณะของชั้นดินกรุงเทพ.....	39
3.2 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินบริเวณโรงผลิตไฟฟ้า อ.แม่เมาะ	
จ. ลำปาง.....	40
3.3 การรวบรวมข้อมูล.....	40
4. การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
4.1 การศึกษาเรื่องการส่งถ่ายน้ำหนัก (load transfer) จากเข็มไปสู่ดินรอบ ๆ ตัวเข็ม.....	42
4.1.1 การคำนวณหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในเนื้อตัวเข็มตามแนวความยาวของเข็ม เมื่อเข็มรับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนที่หัวเข็ม.....	42
4.1.2 พฤติกรรมการส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ดินโดยทั่วไป...	45
4.1.3 การคำนวณหาค่าน้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ	50
4.1.3.1 Distribution Function Approach.....	50
4.1.3.2 Elastic Solid Approach.....	66
4.2 การคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ.....	82

	หน้า
4.2.1 วิธีทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม.....	84
4.2.2 การนิยามน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม.....	85
4.2.3 การคาดคะเนน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะ โดยวิธีสมคูลย์ทางกลศาสตร์ (Static Approach) หรือวิธีทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics method).....	86
4.2.3.1 parameter ที่ใช้ในการวิเคราะห์....	86
4.2.3.2 ผลการวิเคราะห์.....	87
4.2.4 การคาดคะเนน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะ โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบความสามารถในการรับน้ำ หนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ.....	92
4.2.4.1 วิธีของ Bullen (1958).....	92
4.2.4.2 วิธีของ Chin (1970) และ Mazurkiewicz (1972).....	97
4.2.4.2.1 วิธีของ Chin (1970)..	97
4.2.4.2.2 วิธีของ Mazurkiewicz (1972).....	103
5. สรุปผลการวิจัย.....	108
การส่งถ่ายน้ำหนัก.....	108
การคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ..	108
เอกสารอ้างอิง	110

	หน้า
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์.....	116
ภาคผนวก ข. ตารางการคำนวณและรูปการวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ของการศึกษาวิจัย.....	141
ภาคผนวก ค. การคำนวณหาค่า modulus of elasticity ของคาน	257
ประวัติผู้เขียน.....	266

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

ก.1	รายการเข็มที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	117
ข.1	Modulus of elasticity ของคอนกรีตที่ใช้ทำเข็ม.....	142
ข.2	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มของเข็ม TP ₁ (TH)...	143
ข.3	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มของเข็ม TP ₂ (TH)...	146
ข.4	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มของเข็ม TP ₃ (TH)...	148
ข.5	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มของเข็ม TP ₅ (BKK)...	150
ข.6	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มของเข็ม T ₈₁	153
ข.7	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มของเข็ม T ₈₈	154
ข.8	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มของเข็ม TP ₃ (BKK) คำนวณจาก tell tale rod	155
ข.9	การเคลื่อนตัวลงที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP ₁ (TH).....	156
ข.10	การเคลื่อนตัวลงที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP ₂ (TH).....	157
ข.11	การเคลื่อนตัวลงที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP ₃ (BKK).....	158
ข.12	การเคลื่อนตัวลงที่ความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP ₅ (BKK).....	159
ข.13	การส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ ของเข็ม TP ₁ (TH) โดยวิธีของ Coyle and Reese	161
ข.14	การส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ ของเข็ม TP ₂ (TH) โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	163
ข.15	การส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ ของเข็ม TP ₃ (BKK) โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	164

ตารางที่ ๔

หน้า

ข.16	การส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ ของเข็ม TP ₅ (BKK) โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	165
ข.17	การส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ ของเข็ม T ₈₁ โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	167
ข.18	การส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ ของเข็ม T ₈₈ โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	168
ข.25	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม TP ₁ (TH) โดยวิธีของ D'Appolonia and Romualdi.....	175
ข.26	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม TP ₂ (TH) โดยวิธีของ D'Appolonia and Romualdi.....	176
ข.27	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม TP ₃ (BKK) โดยวิธีของ D' Appolonia and Romualdi.....	177
ข.28	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม TP ₅ (BKK) โดยวิธีของ D' Appolonia and Romualdi.....	178
ข.29	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม T ₈₁ โดยวิธีของ D'Appolonia and Romualdi.....	179
ข.30	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม T ₈₈ โดยวิธีของ D'Appolonia and Romualdi...	179
ข.31	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม TP ₁ (TH) โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	180
ข.32	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม TP ₂ (TH) โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	181
ข.33	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม TP ₃ (BKK) โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	182

ตารางที่ ๕

	หน้า	
ข.34	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม TP ₅ (BKK) โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	183
ข.35	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม T ₈₁ โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	184
ข.36	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม T ₈₈ โดยวิธีของ Coyle and Reese.....	184
ข.38	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเข็มของเข็ม TP ₃ (BKK) โดยวิธีของ D'Appolonia and Romualdi ($\mu = 0.2$).....	186
ข.39	การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะ โดยวิธี Soil Mechanics.....	187
ข.40	การคาดคะเนน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม โดยวิธี ของ Chin.....	190

สารบัญภาพ

หน้า

รูป

2.1	Bearing capacity factor สำหรับฐานรากในชั้น clay (Skempton, 1951).....	8
2.4	Adhesion factor สำหรับ clay (Ng kim cheng 1981).....	13
2.5	ค่าของ Z_c/d และ $K_s \tan \phi'_a$ สำหรับเข็มในชั้นทราย (Poulos and Davis 1980).....	15
2.6	Bearing capacity factos for circular deep foundation in sand.....	
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง N_q และ ϕ'	17
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT N value และ angle of shearing resistance ϕ (Peck,Hanson and Thornburn 1974).....	18
2.9	Correction factor เนื่องจาก effective overburden pressure ที่มีต่อ SPT N value	18
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of earth pressure K_s และ angle of internal friction ϕ (Meyerhof 1976)....	20
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load-Settlement (Bullen 1958).....	22
2.12	การหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม (Bullen 1958).....	22
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง Sett./Load และ Sett. จากการทดสอบ การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Chin 1970).....	24
2.14	การหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม (Mazurkiewicz 1972)..	24
2.15	Distribution function approach สำหรับเข็มเดี่ยว.....	28

รูป

4.1	การเคลื่อนตัวของความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP ₁ (TH).....	46
4.2	การเคลื่อนตัวของความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP ₂ (TH).....	47
4.3	การเคลื่อนตัวของความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP ₃ (BKK).....	47
4.4	การเคลื่อนตัวของความลึกต่าง ๆ ของเข็ม TP ₅ (BKK).....	48
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายด้านข้างและการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม สำหรับเข็ม TP ₁ (TH).....	53
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายด้านข้างและการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม สำหรับเข็ม TP ₂ (TH).....	54
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายด้านข้างและการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม สำหรับเข็ม TP ₃ (BKK).....	55
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายด้านข้างและการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม สำหรับเข็ม TP ₅ (BKK).....	53
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มและการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม.....	56
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มและการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเข็ม TP ₃ (BKK).....	57
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มและการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเข็ม TP ₅ (BKK).....	57
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัวของเสาเข็มและน้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเสาเข็มไปสู่ดินของเข็ม T ₈₁	58
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัวของเสาเข็มและน้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเสาเข็มไปสู่ดินของเข็ม T ₈₈	58
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง α และ C เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของผู้ศึกษารายอื่น.....	65

รูป

หน้า

4.15	ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_s \tan \theta'_a$ และ θ' (Meyerhof 1976).....	67
4.16	Relationship between θ and N_q for bored pile in Bangkok subsoil with Considered pore water pressure declined (Ng Kim Cheng 1981)...	68
4.17	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเสาเข็มของเข็ม TP ₁ (TH).....	71
4.18	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเสาเข็มของเข็ม TP ₂ (TH).....	72
4.19	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเสาเข็มของเข็ม TP ₃ (BKK).....	73
4.20	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเสาเข็มของเข็ม TP ₅ (BKK).....	74
4.21	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเสาเข็มของเข็ม TP ₅ (BKK).....	75
4.22	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเสาเข็มของเข็ม T ₈₁ โดยวิธีของ D'Appolonia and Romualdi.....	76
4.23	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเสาเข็มของเข็ม T ₈₈ โดยวิธีของ D'Appolonia and Romualdi.....	77
4.24	น้ำหนักส่งถ่ายที่ความลึกต่าง ๆ ตามแนวลำตัวเสาเข็มของเข็ม TP ₃ (BKK) โดยวิธีของ D'Appolonia and Romualdi.....	81
4.25	การหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม (Fellenius 1975, 1980).....	83
4.26	การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธี Soil Mechanics กับที่ได้จากการทดสอบ.....	93

รูป

4.27	การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธีของ Bullen กับที่ได้จากการทดสอบ.....	96
4.28	การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธีของ Chin เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะเฉพาะแต่ที่อยู่ในช่วงประมาณ 0.3 เท่า ของ plunging failure load กับที่ได้จากการทดสอบ.....	98
4.29	การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธีของ Chin เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะเฉพาะแต่ที่อยู่ในช่วงประมาณ 0.6 เท่า ของ plunging failure load กับที่ได้จากการทดสอบ.....	100
4.30	การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธีของ Chin เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ จนถึงเข้าใกล้ plunging failure load กับที่ได้จากการทดสอบ.....	102
4.31	การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธีของ Mazurkiewicz เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ เฉพาะแต่ที่อยู่ในช่วงประมาณ 0.3 เท่า ของ plunging failure load กับที่ได้จากการทดสอบ.....	104

4.32	การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธีของ Mazurkiewicz เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ เฉพาะแต่ที่อยู่ในช่วงประมาณ 0.6 เท่า ของ plunging failure load กับที่ได้จากการทดสอบ.....	106
4.33	การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธีของ Mazurkiewicz เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ จนถึงเข้าใกล้ plunging failure load กับที่ได้จากการทดสอบ.....	107
ข.2	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อตัวเข็มของเข็ม TP ₁ (TH) เมื่อเข็มรับน้ำหนักบรรทุกที่หัวเข็ม.....	196
ข.3	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อตัวเข็มของเข็ม TP ₂ (TH) เมื่อเข็มรับน้ำหนักบรรทุกที่หัวเข็ม.....	197
ข.4	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อตัวเข็มของเข็ม TP ₃ (BKK) เมื่อเข็มรับน้ำหนักบรรทุกที่หัวเข็ม.....	198
ข.5	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อตัวเข็มของเข็ม TP ₅ (BKK) เมื่อเข็มรับน้ำหนักบรรทุกที่หัวเข็ม.....	199
ข.6	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อตัวเข็มของเข็ม T ₈₁ เมื่อเข็มรับน้ำหนักบรรทุกที่หัวเข็ม.....	200
ข.7	แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อตัวเข็มของเข็ม T ₈₈ เมื่อเข็มรับน้ำหนักบรรทุกที่หัวเข็ม.....	201
ข.8	Load-Settlement curve ของเข็ม TP ₁ (TH).....	202
ข.9	Load-Settlement curve ของเข็ม TP ₂ (TH).....	202

รูป

หน้า

ข.10	Load-Settlement curve ของเข็ม	TP ₃ (BKK).....	203
ข.11	Load-Settlement curve ของเข็ม	TP ₅ (BKK).....	204
ข.12	Load-Settlement curve ของเข็ม	T _A	205
ข.13	Load-Settlement curve ของเข็ม	T ₂	205
ข.14	Load-Settlement curve ของเข็ม	T ₆	206
ข.15	Load-Settlement curve ของเข็ม	T ₈₁	206
ข.16	Load-Settlement curve ของเข็ม	T ₈₈	207
ข.17	Load-Settlement curve ของเข็ม	T ₁	207
ข.18	Load-Settlement curve ของเข็ม	T _O	208
ข.19	Load-Settlement curve ของเข็ม	T ₃	208
ข.20	Load-Settlement curve ของเข็ม	T _R	209
ข.21	Load-Settlement curve ของเข็ม	T _G	209
ข.22	Load-Settlement curve ของเข็ม	T _E	210
ข.23	Load-Settlement curve ของเข็ม	T _B	210
ข.24	Load-Settlement curve ของเข็ม	T _C	211

สัญลักษณ์

- Q_u = ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม
- Q_{su} = ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกหรือความต้านทานสูงสุดของดินที่อยู่รอบ ๆ ลำตัวเสาเข็ม
- Q_{bu} = ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกหรือความต้านทานสูงสุดของดินที่อยู่ปลายเสาเข็ม
- W = น้ำหนักของเสาเข็ม
- q_s = ความต้านทานของดินรอบ ๆ ลำตัวเสาเข็ม คิดต่อพื้นที่ด้านข้างของเสาเข็มหนึ่งหน่วย
- A_s = พื้นที่ด้านข้างของเสาเข็ม
- q_b = ความต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็ม คิดต่อพื้นที่ที่ปลายเข็มหนึ่งหน่วย
- A_b = พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม
- C_a = adhesion ระหว่างเข็มและดินรอบ ๆ ลำตัวเสาเข็ม
- σ_v = vertical stress
- K_s = coefficient of lateral pressure
- θ_a = angle of friction ระหว่างเข็มและดิน
- α = adhesion factor
- C = cohesion ของดิน
- σ_{vb} = vertical stress ในดินที่ระดับปลายเข็ม
- d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเข็ม
- θ = Angle of shearing resistance ของดินในเทอม Total stress
- θ' = effective angle of shearing resistance
- σ'_v = effective vertical stress
- σ'_{vb} = effective vertical stress ที่ระดับปลายเข็ม
- L = ความยาวของเสาเข็ม
- K_a = coefficient of active earth pressure
- K_p = coefficient of passive earth pressure