

การทำนายผลของแรงกระทำด้านข้างที่มีต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มในแนวตั้ง โดยใช้ทฤษฎีคานบน  
ฐานรากยึดหยุ่น



นายชลิต อินทร์นัยกิจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1710-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREDICTION OF HORIZONTAL MOVEMENT DUE TO LATERAL LOAD ACTING ON VERTICAL PILE  
USING BEAM ON ELASTIC FOUNDATION THEORY



Mr. Chalit Intraratchaiyakit

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1710-3



ชลิต อินทร์นชัยกิจ : การทำนายผลของแรงกระทำด้านข้างที่มีต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มในแนวดิ่ง โดยใช้ทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่น (PREDICTION OF HORIZONTAL MOVEMENT DUE TO LATERAL LOAD ACTING ON VERTICAL PILE USING BEAM ON ELASTIC FOUNDATION THEORY) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์, 232 หน้า. ISBN 974-03-1710-3.

งานออกแบบฐานรากเสาเข็มที่ต้องรับแรงกระทำด้านข้างพบได้ใน แท่นขุดเจาะในทะเลที่ต้องรับแรงลมและคลื่นอาคารสูงที่รับแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว แรงเหวี่ยงและแรงเบรกจากรถไฟลอยฟ้า เป็นต้น หลายโครงการจำเป็นต้องทราบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จะเกิดขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์กัลป์หาพารามิเตอร์ของเสาเข็มในแนวดิ่งรับแรงกระทำด้านข้างสำหรับดินกรุงเทพฯ ด้วยโปรแกรมของผู้วิจัยซึ่งเป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้ทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่น (beam on elastic foundation theory) โดยวิเคราะห์กลับจากข้อมูลที่วัดได้จากการทดสอบเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างในสนามของโครงการต่างๆ ในกรุงเทพฯ รวมทั้งการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Com624P ซึ่งเป็นโปรแกรมใช้การวิเคราะห์แบบวิธี p-y curve สำหรับการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้างและใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Group 4.0 (Student Version) ในการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทั้งสองกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบในสนาม

จากการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์กลับด้วยทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่นสำหรับเสาเข็มเดี่ยวได้ผลค่อนข้างดีกล่าวคือทุกโครงการให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_s / S_u$  กับ  $\text{Pile Head Deflection/Pile Diameter}$  (กรณี  $E_s = k$ ) จากข้อมูลเสาเข็มเดี่ยว 8 ต้นอยู่ในแนวโน้มเดียวกัน สำหรับกรณีเสาเข็มกลุ่มไม่สามารถวิเคราะห์กลับหาค่า Group Reduction Factor ได้ เนื่องจากไม่ทราบการกระจายของแรงในกลุ่มเสาเข็มและผลของ pile cap

ทั้งนี้ผลที่ได้ส่วนใหญ่ได้จากผลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาด 1.5 m, % เหล็กเสริม 1.493% ถึง 2%, Static Loading โดยในช่วง 0 – 8D เป็นดิน Soft – Medium Clay มีค่า  $PI \sim 44.9\%$ ,  $LI \sim 0.748$ ,  $w \sim 60.4\%$  ซึ่งกราฟ  $E_s / S_u$  avg กับ  $Y_t / D$  สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางในกรุงเทพฯ ที่ได้จากการวิเคราะห์กลับด้วยทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่นเป็น Semi – Empirical ซึ่งหมายความว่าค่า  $E_s$  เป็นค่าที่ขึ้นกับ  $E_p, I_p$ , Pile Diameter, Shape of Pile, Soil Type and Soil properties, Load Type (Cyclic or Static or Sustain Loading) และขนาดของ load ดังนั้นการนำกราฟของผู้วิจัยไปใช้งานออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาลักษณะนี้ด้วย ข้อมูลเสาเข็มแบบเจาะขนาด 0.8 เมตรมีเพียง 2 ต้น,  $PI \sim 56\%$  ดังนั้นการนำกราฟของผู้วิจัยไปใช้งานกับเสาเข็มขนาด 0.8 เมตรย่อมมีความเสี่ยงสูง

การวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Com624P (ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้การวิเคราะห์แบบวิธี p-y curve) สำหรับโครงการที่ 1,2,4 (Bored pile, Diameter 1.5 m) ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็มมากกว่าค่าที่วัดได้ในสนามเฉลี่ยแล้วประมาณ 33.2% (-33.1% ถึง 113.6%) ส่วนผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Com624P สำหรับโครงการที่ 3 (Bored pile, Diameter 0.8 m) เสาเข็ม BPL1 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็มมากกว่าค่าที่วัดได้ในสนามเฉลี่ยแล้วประมาณ 204.9% (64.3% ถึง 308%) ส่วนเสาเข็ม BPL2 (Bored pile, Diameter 0.8 m) โปรแกรมสำเร็จรูป Com624P ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็มน้อยกว่าค่าที่วัดได้ในสนามเฉลี่ยแล้วประมาณ -45.8% (-20.3% ถึง -66.4%)

ส่วนผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Group 4.0 (Student Version) โดยสำหรับกรณีกลุ่มเสาเข็มสองต้นได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็มมากกว่าค่าที่วัดได้ในสนามเฉลี่ยแล้วประมาณ 27.6% (-33.5% ถึง 62%) และกรณีกลุ่มเสาเข็มสามต้นเฉลี่ยแล้วประมาณ 37.4% (2.7% ถึง 58.5%) (ทั้งหมดเป็น Bored pile, Diameter 1.5 m, spacing between pile = 3D)

ภาควิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....ชลิต อินทร์นชัยกิจ  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....อ.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์  
ปีการศึกษา..... 2544.....

## 4270274421: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: LATERAL PILE / BEAM ON ELASTIC FOUNDATION THEORY / SUBGRADE MODULUS

CHALIT INTRARATCHAIYAKIT: PREDICTION OF HORIZONTAL MOVEMENT  
DUE TO LATERAL LOAD ACTING ON VERTICAL PILE USING BEAM ON  
ELASTIC FOUNDATION THEORY. THESIS ADVISOR: ASST. PROF.SURACHAT  
SAMBHANDHARAKSA, Sc.D., 232 pp. ISBN 974-03-1710-3.

Soil parameters for the vertical pile design, which subject to horizontal load and moment are developed in this thesis. The study involves the collection of lateral pile load test data at four locations, and the back analyses for obtaining soil parameters comes from eight single vertical piles and two pile groups. The analyses were done from three computer programs, which include the writer program, developed from the theory of beam on elastic foundation. Com624P, developed based on p-y curve concept (Reese 1977), and Group 4.0 (Student Version, Reese and Van Impe 2001) for analyses of piles group. The writer program is used for the back analyses for obtaining the normalized soil parameters for the design, based on the behavior of mostly 1.5 m diameter bored piles having the 1.5 to 2.0 percents of reinforced steel. The program Com624P is also used for single pile analysis for comparing result of the writer program, Group 4.0 (Student Version) for pile group analyses for yielding the result with measured data from full-scale lateral load test.

The soft clay layer from four locations approximately have the PI of 45%, LI ~ 0.8 and 60% water content. The results of the back analyses show that the yield point of the load deformation plot is resulted from the tension crack occurred in the reinforced concrete pile, obtained from using several  $E_s$  versus depth and also with  $S_u$  relations. Analyzed results show all the back analyses using these functions are good and the differences of results are small for practical purpose, for the single pile behavior. Back analysis for pile group can not achieve because of the unknown a distribution of load data and the effect of pile cap.

Normalized parameter  $E_s/S_u$  versus  $Y_t/D$  (using  $E_s$  to be constant with depth) are developed and recommended, aimed for helping in the design of the 1.5 m diameter bored piles. The lateral movement at the pile top ( $Y_t$ ) can be obtained from knowing the average  $S_u$  value from UU tests over the soft clay depth of 8D.

Department ..... Civil Engineering ..... Student's signature..... *ชวลิต อินทรราชไยakit*.....  
Field of study ..... Civil Engineering ..... Advisor's signature..... *อ. สุรชาติ สัมพันธ์รักษ์*.....  
Academic year ..... 2001.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ ต้องขอแสดงความขอบคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ ในฐานะ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ชี้แนะ  
แนวทางในการทำวิจัยและวิธีการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลา และให้คำแนะนำ รวมทั้งให้ข้อคิดเห็น ที่เป็นประโยชน์ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

บริษัท โสภเวลต์และการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยที่อนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆ เพื่อใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี และบริษัท STS Engineering Consultant ด้วยที่ช่วยในการหาข้อมูลเพิ่มเติม

บิดา-มารดา และครอบครัว สำหรับ แรงกาย แรงใจ และทุนทรัพย์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในวิทยานิพนธ์ ผู้จัดทำขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

ชลิต อินทร์นัยกิจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

## บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	2
1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยว.....	4
2.1.1 วิธีคานบนฐานรากยืดหยุ่น ( Beam on elastic foundation, BEF).....	4
2.1.2 วิธี p-y curve.....	18
2.1.2.1 วิธีการสร้าง p-y curve สำหรับดินเหนียวอ่อน (soft clay method).....	19
2.1.2.2 วิธีการสร้าง p-y curve สำหรับดินเหนียวแข็ง (stiff clay method).....	21
2.1.2.3 วิธีการสร้าง p-y curve สำหรับทราย.....	22
2.2 การทดสอบหาค่า soil modulus สำหรับเสาเข็มที่รับแรงกระทำด้านข้าง.....	25
2.2.1 Full scale lateral load test on instrumented piles.....	25
2.2.2 Full scale lateral load test on uninstrumented piles.....	27
2.2.3 In situ test.....	28
2.2.4 Laboratory tests.....	29
2.3 การหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มกลุ่ม.....	30
3 ขั้นตอนการวิเคราะห์กลับสำหรับเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้าง.....	34
3.1 รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างและข้อมูลดิน.....	34
3.1.1 ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำทางด้านข้าง, ข้อมูลดินในแต่ละโครงการ..	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.1.1.1 ข้อมูลโครงการที่ 1 (คลองตัน) .....	36
3.1.1.2 ข้อมูลโครงการที่ 2 (ซอยศูนย์วิจัย).....	41
3.1.1.3 ข้อมูลโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) .....	45
3.1.1.4 ข้อมูลโครงการที่ 4 (บางซื่อ) .....	52
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดพฤติกรรมเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้าง .....	61
3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ก่กลับ,วิเคราะห์สำหรับเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้าง.....	62
3.2.1 การวิเคราะห์ก่กลับหาค่า $E_s$ โดยใช้ทฤษฎีคานบนฐานรากยึดหยุ่น โดยใช้โปรแกรม ของผู้วิจัย .....	62
3.2.1.1 การกำหนดฟังก์ชัน $E_s$ ต่อความลึก(x).....	62
3.2.1.2 วิธีการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้ในสนาม.....	63
3.2.1.3 พิจารณาการลดลงของค่า $E_p I_p$ ของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	64
3.2.1.4 รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ก่กลับ .....	64
3.2.1.5 ความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ก่กลับ .....	65
3.2.2 การวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้างด้วยโปรแกรม Com624P .....	67
3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ก่กลับสำหรับเสาเข็มกลุ่มรับแรงกระทำด้านข้าง .....	68
3.3.1 การวิเคราะห์ก่กลับหาค่า Group Reduction Factor .....	68
3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Group Version 4.0 (Student Version) .....	71
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ .....	72
4.1 ผลการวิเคราะห์ก่กลับและผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป.....	72
4.1.1 ผลสำหรับโครงการที่ 1 (คลองตัน).....	74
4.1.2 ผลสำหรับโครงการที่ 2 (ซอยศูนย์วิจัย) .....	94
4.1.3 ผลสำหรับโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง).....	111
4.1.4 ผลสำหรับโครงการที่ 4 (บางซื่อ).....	127
4.1.4.1 ผลสำหรับโครงการที่ 4 (บางซื่อ) เสาเข็มเดี่ยว PL1, PL2.....	127
4.1.4.2 ผลสำหรับโครงการที่ 4 (บางซื่อ) เสาเข็มกลุ่มสองต้นและสามต้น .....	143
4.2 สรุปผลการวิเคราะห์ผลและข้อเสนอแนะในการใช้งาน .....	160
4.2.1 สรุปผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้างสำหรับโครงการที่ 1, 2 และ 3 .....	160



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2.2 สรุปผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มรับแรงกระทำด้านข้างสำหรับ โครงการที่ 4.....	161
4.2.3 ค่า $E_s$ ของเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำด้านข้างสำหรับการนำไปใช้ในงานออกแบบ .....	165
4.2.3.1 ตัวอย่างการนำกราฟไปใช้งาน .....	170
5 สรุปผล.....	172
รายการอ้างอิง.....	174
ภาคผนวก.....	179
ภาคผนวก ก. รายละเอียดโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์กลับของผู้วิจัย.....	180
ก.1 การพิสูจน์สมการคานบนฐานรากยึดหยุ่น โดยใช้ finite difference.....	181
ก.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง $E_p I_p$ , Bending Moment และ Axial Load .....	192
ก.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress – strain สำหรับคอนกรีตธรรมดา (normal weight concrete) และเหล็กเสริม .....	195
ก.2.3 โมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล (Effective moment of inertia ACICode, 1989)...	197
ก.3 รายละเอียดการทำงานของโปรแกรม.....	198
ก.3.1 การสร้าง node ของโปรแกรม.....	199
ก.3.2 การทำงานของโปรแกรมย่อย Sub CrackSectionBEF().....	201
ก.3.3 แสดง Source Code ของโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา Visual Basic ใน Excel (version office97) .....	203
ภาคผนวก ข. รายละเอียดของตัวอย่างการนำกราฟ $E_s / S_u$ avg vs. Pile Head Deflection / Pile Diameter ที่ได้จากการวิเคราะห์กลับไปใช้งานออกแบบเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำทางด้านข้าง..	227
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	232

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Conversion equation.....	12
2.2 Group Reduction Factor for the Coefficient of Subgrade Reaction (Davisson 1970)a .....	32
3.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในโครงการต่างๆ .....	34
3.2 ข้อมูลดินของโครงการที่ 1 (คลองตัน).....	37
3.3 ข้อมูลดินของโครงการที่ 1 (ชอยศูนย์วิจัย).....	41
3.4 ข้อมูลดินของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) – BPL1.....	45
3.5 ข้อมูลดินของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) – BPL2.....	46
3.6 ข้อมูลดินของโครงการที่ 4 - Bore Hole P5 (บางซื่อ).....	52
3.7 ข้อมูลดินของโครงการที่ 4 - Bore Hole P6 (บางซื่อ).....	53
3.8 แสดงผลลัพธ์ของโปรแกรม Lpile Plus Version 3 ของ Reese (Student Version).....	65
3.9 แสดงผลลัพธ์ของโปรแกรมของผู้วิจัย .....	66
3.10 แสดงผลลัพธ์ของโปรแกรม Lpile Plus Version 3 ของ Reese (Student Version).....	69
3.11 แสดงผลลัพธ์ของโปรแกรมของผู้วิจัย .....	70
4.1 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 1-Pile R1.....	81
4.2 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 1-Pile R2.....	88
4.3 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 2-Pile L1.....	97
4.4 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 2-Pile L2.....	105
4.5 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 3-Pile BPL1 .....	115
4.6 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 3-Pile BPL2.....	122
4.7 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 4-Pile PL1.....	130
4.8 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 4-Pile PL2.....	137
4.9 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 4-Pile PL3-4 .....	147
4.10 ผลโดยย่อสำหรับโครงการที่ 4-Pile PL5-7 .....	154
4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ห้กลับสำหรับเสาเข็มเดี่ยว PL1 .....	162
4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ห้กลับสำหรับเสาเข็มเดี่ยว PL2 .....	163
4.13 แสดงผลการวิเคราะห์ห้กลับสำหรับเสาเข็มกลุ่มสองต้น PL3-4 .....	163
4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ห้กลับสำหรับเสาเข็มกลุ่มสามต้น PL5-7 .....	163
4.15 แสดงข้อมูลต่างๆ ไปของดิน (ในช่วง 0 – 8D ของดิน Soft to medium clay) และเสาเข็มได้ แสดงสำหรับเสาเข็มเดี่ยวทุกต้นที่ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ห้กลับ .....	167

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.1 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ชาร์ตไรมิตีของ (Davisson and Gill, 1963) โดยใช้พารามิเตอร์ $E_s$ จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์กลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 35 ton.....	228
ข.2 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ชาร์ตไรมิตีของ (Davisson and Gill, 1963) โดยใช้พารามิเตอร์ $E_s$ จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์กลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 45 ton.....	228
ข.3 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ชาร์ตไรมิตี โดยใช้พารามิเตอร์ $E_s$ จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์กลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 55 ton.....	229
ข.4 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ชาร์ตไรมิตีของ (Davisson and Gill, 1963) โดยใช้พารามิเตอร์ $E_s$ จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์กลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 65 ton.....	229
ข.5 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ชาร์ตไรมิตีของ (Davisson and Gill, 1963) โดยใช้พารามิเตอร์ $E_s$ จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์กลับของผู้วิจัย กรณีแรงกระทำทางด้านข้าง 70 ton.....	230
ข.6 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้ชาร์ตไรมิตี โดยใช้พารามิเตอร์ $E_s$ จากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์กลับของผู้วิจัย กรณีกำหนดค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็มแล้วคำนวณหาค่า Lateral load ที่หัวเสาเข็ม.....	231

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พฤติกรรมของเสาเข็มตามสมมุติฐานของ Winkler (1867).....	4
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $p$ กับ $y$ .....	6
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E_s$ กับความลึก ( $x$ ).....	6
2.4 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ free-head ในดินที่มี $E_s = kx$ สำหรับกรณีที่มีแรงกระทำที่หัวเสาเข็ม (Matlock & Reese, 1956).....	9
2.5 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ free-head ในดินที่มี $E_s = kx$ สำหรับกรณีที่มีโมเมนต์กระทำที่หัวเสาเข็ม (Matlock & Reese, 1956).....	10
2.6 การเปลี่ยนแปลงค่า $E_s$ ต่อความลึกที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Davisson and Gill, 1963).....	11
2.7 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ free-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีแรงกระทำที่หัวเข็ม (Davisson and Gill, 1963).....	13
2.8 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ free-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีแรงกระทำที่หัวเข็ม, ดินชั้นบนหนา = $0.1R$ (Davisson and Gill, 1963).....	13
2.9 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ free-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีแรงกระทำที่หัวเข็ม, ดินชั้นบนหนา = $0.4R$ (Davisson and Gill, 1963).....	14
2.10 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ free-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีแรงกระทำที่หัวเข็ม, ดินชั้นบนหนา = $0.8R$ (Davisson and Gill, 1963).....	14
2.11 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ free-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีโมเมนต์ที่หัวเข็ม, ดินชั้นบนหนา = $0.1R$ (Davisson and Gill, 1963).....	15
2.12 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ free-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีโมเมนต์ที่หัวเข็ม, ดินชั้นบนหนา = $0.4R$ (Davisson and Gill, 1963).....	15
2.13 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ free-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีโมเมนต์ที่หัวเข็ม, ดินชั้นบนหนา = $0.8R$ (Davisson and Gill, 1963).....	16
2.14 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ fixed-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีแรงกระทำที่หัวเข็ม, ดินชั้นบนหนา = $0.1R$ (Davisson and Gill, 1963).....	16
2.15 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ fixed-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีแรงกระทำที่หัวเข็ม, ดินชั้นบนหนา = $0.4R$ (Davisson and Gill, 1963).....	17
2.16 สัมประสิทธิ์สำหรับเสาเข็มแบบ fixed-head ในดินที่มี $E_s$ คงที่ตลอดความลึก สำหรับกรณีที่มีแรงกระทำที่หัวเข็ม, ดินชั้นบนหนา = $0.8R$ (Davisson and Gill, 1963).....	17
2.17 แสดงการสัมพันธ์กราฟระหว่าง $E_s$ กับ $x$ และการหาค่า Stiffness factor ในกรณีของดินที่มี $E_s = kx$ .....	18

รูปที่	หน้า
2.18 แสดงการสุ่มพล็อตกราฟระหว่าง $E_s$ กับ $x$ และการสุ่มค่า Stiffness factor ในกรณีของดินที่มี $E_s$ มีค่าคงที่ตลอดความลึก .....	19
2.19 p-y curve for soft clay method (Matlock 1970).....	21
2.20 p-y curve for stiff clay method.....	22
2.21 สัมประสิทธิ์ A, B สำหรับ stiff clay method.....	22
2.22 การหา critical depth สำหรับทราย.....	23
2.23 p-y curve for sand.....	24
2.24 สัมประสิทธิ์ A', B' สำหรับ p-y curve ในทราย.....	24
2.25 Theoretical stress distributions around piles (Smith, 1987) .....	26
2.26 Pressuremeter (ช้ำย) และ Flat dilatometer (ขว) .....	29
2.27 ค่าความผิดพลาดของวิธีต่างๆในการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม (Dunnivant T.W. and O'Neill M.W., 1986) .....	31
2.28 ภาพแสดงประสิทธิภาพของกลุ่มเสาเข็มลดลงเนื่องจากการซ้อนกันของหน่วยแรง (“Shadowing”).....	32
2.29 p-y curve ในแต่ละแถวของเสาเข็มกลุ่ม (Brown et al., 1988) .....	33
3.1 ไคแกรมแสดงวิธีดำเนินงานวิจัยโดยรวม.....	35
3.2 Site Location.....	36
3.3 Test Configuration ของโครงการ 1 (คลองตัน) .....	38
3.4 Boring Log ของโครงการที่ 1 (คลองตัน) .....	39
3.5 Test Configuration ของโครงการ 2 (ชอยศูนย์วิจัย).....	42
3.6 Boring Log ของโครงการ 2 (ชอยศูนย์วิจัย).....	43
3.7 Test Configuration ของโครงการ 3 (ห้วยขวาง) .....	47
3.8 Boring Log ของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) - Pile BPL1.....	48
3.9 Boring Log ของโครงการที่ 3 (ห้วยขวาง) - Pile BPL2.....	50
3.10 ตำแหน่งหลุมเจาะและการทดสอบเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างของโครงการ 4 (บางซื่อ).....	54
3.11 สภาพชั้นดินในบริเวณที่ทำการทดสอบเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างของโครงการ 4 (บางซื่อ). 55	55
3.12 Test Configuration ของโครงการ 4 (บางซื่อ) .....	56
3.13 Test Configuration ของโครงการ 4 (บางซื่อ) หน้าตัด A-A .....	57
3.14 Test Configuration ของโครงการ 4 (บางซื่อ) หน้าตัด B-B .....	58
3.15 Pile Cap Rotation ของโครงการ 4 (บางซื่อ) .....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 Boring Log ของโครงการที่ 4 (บางซื่อ) .....	60
3.17 หลักการของเครื่องมือ Inclinator .....	61
4.1 Load – Deflection Curve และแสดงตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับโครงการที่ 1-Pile R1 .....	80
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Apply Moment กับ $E_p I_p$ ช่วงความลึก 0 – 24 m สำหรับเสาเข็มคอนกรีต เสริมเหล็กในโครงการที่ 1-Pile R1, R2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ .....	80
4.3 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R1) Dia 1.5 m at Load 35 ton .....	82
4.4 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R1) Dia 1.5 m at Load 45 ton .....	83
4.5 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R1) Dia 1.5 m at Load 55 ton .....	84
4.6 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R1) Dia 1.5 m at Load 65 ton .....	85
4.7 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R1) Dia 1.5 m at Load 70 ton .....	86
4.8 Load – Deflection Curve และแสดงตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับโครงการที่ 1-Pile R2 .....	87
4.9 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R2) Dia 1.5 m at Load 35 ton .....	89
4.10 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R2) Dia 1.5 m at Load 45 ton .....	90
4.11 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R2) Dia 1.5 m at Load 55 ton .....	91
4.12 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R2) Dia 1.5 m at Load 65 ton .....	92
4.13 Result of ProgramBEF Run for Site 1 (KlongTon R2) Dia 1.5 m at Load 70 ton .....	93
4.14 Load – Deflection Curve และแสดงตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับโครงการ ที่ 2-Pile L1 .....	96
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Apply Moment กับ $E_p I_p$ ช่วงความลึก 0 – 12 m สำหรับเสาเข็มคอนกรีต เสริมเหล็กในโครงการที่ 2-Pile L1, L2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ .....	96
4.16 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L1) Dia 1.5 m at Load 16.64 ton .....	98
4.17 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L1) Dia 1.5 m at Load 25.82 ton .....	99
4.18 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L1) Dia 1.5 m at Load 31.14 ton .....	100
4.19 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L1) Dia 1.5 m at Load 39.79 ton .....	101
4.20 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L1) Dia 1.5 m at Load 47.38 ton .....	102
4.21 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L1) Dia 1.5 m at Load 56.3 ton .....	103
4.22 Load – Deflection Curve และแสดงตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับโครงการ ที่ 2-Pile L2 .....	104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L2) Dia 1.5 m at Load 25.82 ton.....	106
4.24 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L2) Dia 1.5 m at Load 31.14 ton.....	107
4.25 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L2) Dia 1.5 m at Load 39.79 ton.....	108
4.26 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai J.2) Dia 1.5 m at Load 47.38 ton.....	109
4.27 Result of ProgramBEF for Site 2 (Soonvijai L2) Dia 1.5 m at Load 56.3 ton.....	110
4.28 Load – Deflection Curve และตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับ โครงการที่ 3- Pile BPL1 .....	114
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง Apply Moment กับ $E_p I_p$ ตลอดความยาวเสาเข็ม สำหรับเสาเข็ม คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์.....	114
4.30 Result of ProgramBEF for Site 3 (Huaykwang BPL1) Dia 0.8 m at Load 6 ton.....	116
4.31 Result of ProgramBEF for Site 3 (Huaykwang BPL1) Dia 0.8 m at Load 12 ton.....	117
4.32 Result of ProgramBEF for Site 3 (Huaykwang BPL1) Dia 0.8 m at Load 16 ton.....	118
4.33 Result of ProgramBEF for Site 3 (Huaykwang BPL1) Dia 0.8 m at Load 22 ton.....	119
4.34 Result of ProgramBEF for Site 3 (Huaykwang BPL1) Dia 0.8 m at Load 30 ton.....	120
4.35 Load – Deflection Curve และตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับ โครงการที่ 3- Pile BPL2 .....	121
4.36 Result of ProgramBEF for Site 3 (Huaykwang BPL2) Dia 0.8 m at Load 6 ton.....	123
4.37 Result of ProgramBEF for Site 3 (Huaykwang BPL2) Dia 0.8 m at Load 8 ton.....	124
4.38 Result of ProgramBEF for Site 3 (Huaykwang BPL2) Dia 0.8 m at Load 10 ton.....	125
4.39 Result of ProgramBEF for Site 3 (Huaykwang BPL2) Dia 0.8 m at Load 15 ton.....	126
4.40 Load – Deflection Curve และตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับ โครงการที่ 4- Pile PL1 .....	129
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง Apply Moment กับ $E_p I_p$ ช่วงความลึก 0 – 24 m สำหรับเสาเข็มคอนกรีต เสริมเหล็กในโครงการที่ 4 Pile PL1-PL7 ที่ได้จากการวิเคราะห์ .....	129
4.42 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL1) Dia 1.5 m at Load 25 ton.....	131
4.43 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL1) Dia 1.5 m at Load 50 ton.....	132
4.44 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL1) Dia 1.5 m at Load 75 ton.....	133
4.45 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL1) Dia 1.5 m at Load 100 ton.....	134
4.46 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL1) Dia 1.5 m at Load 125 ton.....	135

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 Load – Deflection Curve และตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับ โครงการที่ 4- Pile PL2 .....	136
4.48 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL2) Dia 1.5 m at Load 25 ton.....	138
4.49 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL2) Dia 1.5 m at Load 50 ton.....	139
4.50 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL2) Dia 1.5 m at Load 75 ton.....	140
4.51 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL2) Dia 1.5 m at Load 100 ton.....	141
4.52 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL2) Dia 1.5 m at Load 125 ton.....	142
4.53 Load – Deflection Curve และตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับ โครงการที่ 4- Pile PL3-4.....	146
4.54 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL3-4) Dia 1.5 m at Load 50 ton/pile .....	148
4.55 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL3-4) Dia 1.5 m at Load 100 ton/pile .....	149
4.56 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL3-4) Dia 1.5 m at Load 125 ton/pile .....	150
4.57 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL3-4) Dia 1.5 m at Load 150 ton/pile .....	151
4.58 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL3-4) Dia 1.5 m at Load 200 ton/pile .....	152
4.59 Load – Deflection Curve และตำแหน่งของข้อมูลที่น่าไปวิเคราะห์กลับสำหรับ โครงการที่ 4- Pile PL5-7.....	153
4.60 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL5-7) Dia 1.5 m at Load 33.3 ton/pile .....	155
4.61 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL5-7) Dia 1.5 m at Load 66.7 ton/pile .....	156
4.62 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL5-7) Dia 1.5 m at Load 83.3 ton/pile .....	157
4.63 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL5-7) Dia 1.5 m at Load 100 ton/pile .....	158
4.64 Result of ProgramBEF for Site 4 (BangSue PL5-7) Dia 1.5 m at Load 133.3 ton/pile .....	159
4.65 รูปแบบการวิบัติของเสาเข็มกลุ่มที่มี Pile cap ภายใต้อิทธิพลกระทำด้านข้าง.....	164
4.66 $E_s / S_u \text{ avg vs. Pile Head Deflection}$ กรณี $E_s = k$ สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน - ปานกลางใน กรุงเทพฯ.....	168
4.67 $E_s / S_u \text{ avg vs. Pile Head Deflection / Pile Diameter}$ กรณี $E_s = k$ สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน - ปานกลางในกรุงเทพฯ .....	168
4.68 $E_s / S_u \text{ avg vs. Pile Head Deflection}$ กรณี $E_s = kx$ สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน – ปานกลางใน กรุงเทพฯ.....	169
4.69 $E_s / S_u \text{ avg vs. Pile Head Deflection / Pile Diameter}$ กรณี $E_s = kx$ สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน - ปานกลางในกรุงเทพฯ .....	169



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.70 แสดงผลการคำนวณด้วยขารต์ไรมิตติของ Davisson and Gill, 1963 (กรณี $E_s = k$ ) โดยใช้พารามิเตอร์ $E_s$ ที่ได้จากการวิเคราะห์กลับของผู้วิจัย.....	170
ก.1 finite difference notation.....	181
ก.2 Sign Convention.....	181
ก.3 สรุปสูตรที่ใช้ในการคำนวณ.....	190
ก.4 แสดงชิ้นส่วนของคานที่ได้รับโมเมนต์.....	192
ก.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $E_p I_p$ กับ โมเมนต์ดัดที่คำนวณด้วยวิธี Analytical และวิธีของ ACI.....	195
ก.6 Stress-Strain curve สำหรับคอนกรีตธรรมดา.....	196
ก.7 Stress-Strain curve สำหรับเหล็กเสริม.....	196
ก.8 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมโดยรวม.....	198
ก.9 แสดงการสร้าง node ของโปรแกรม a) แสดงข้อมูลที่วัดได้ในสนาม b) แสดงการสร้าง node ของโปรแกรมโดยทำการย้ายแรงในทิศทาง $-x$ c) แสดงการสร้าง node ของโปรแกรมโดยกำหนดให้ node แรกตรงกับตำแหน่งที่แรงกระทำ.....	200
ก.10 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมย่อย Sub CrackSectionBEF().....	202
ก.11 แสดงเซลล์ต่างๆที่โปรแกรมใช้อ้างอิงและส่วนที่แรงเป็นส่วนที่ผู้ใช้ต้องใส่ค่า.....	226