

พฤติกรรมของระบบงานเพ่งกันคืนชนิด เข็มทิศแบบใช้ลำแสง  
สำหรับงานชุกชนาคสีในคืน เหนียวอ่อนกรุง เทพ



นายพิพัฒน์ ศรีวัฒนพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2535


ISBN 974-581-571-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018090

I15191436

BEHAVIOR OF BRACED SHEET PILE WALL SYSTEM  
FOR DEEP EXCAVATION IN BANGKOK SOFT CLAY



Mr. Pipat Sriwattanasong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering  
Department of Civil Engineering  
Graduate School  
Chulalongkorn University

1992



หัวข้อวิทยานิพนธ์      พฤติกรรมของระบบงานเพ่งกันคืนชนิด เชื่อมพีคแบบบเข้าค้ำยันสำหรับงานชุก  
 ขนาดสีกันในคืนเหนียวอ่อนกรุงเทพ  
 โดย                              นายพิพัฒน์ ศรีวัฒนพงศ์  
 ภาควิชา                        วิศวกรรมโยธา  
 อาจารย์ที่ปรึกษา        คร. วันชัย เทพรักษ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคาม  
 หลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย  
 (ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรามัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล จิวาลักษณ์)

.....กรรมการ  
 (ดร. วันชัย เทพรักษ์)

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ประจักษ์ จิรัปภา)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวี ธนะเจริญกิจ)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

พิพัฒน์ ศรีวัฒนพงศ์ : พฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดแบบใช้ค้ำยัน สำหรับงานขุดขนาดลึก  
ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (BEHAVIOR OF BRACED - SHEET PILE WALL SYSTEM FOR DEEP EXCAVATION IN  
BANGKOK SOFT CLAY) อ. ที่ปรึกษา : ดร. วันชัย เทพรักษ์, 180 หน้า. ISBN 974-581-571-3

งานขุดขนาดลึกในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯโดยใช้ระบบกำแพงกันดินชนิดเข็มพืดเป็นที่นิยมมากที่สุดสำหรับงานขุด  
เพื่อก่อสร้างฐานรากและห้องใต้ดิน การวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและหาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัว  
ด้านข้างของเข็มพืดกับการทรุดตัวของผิวดินในระหว่างการก่อสร้างพร้อมทั้งศึกษาถึงผลของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผล  
ต่อปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างของเข็มพืดและเสนอแนะวิธีการก่อสร้างที่เหมาะสม นอกจากนี้ได้เสนอวิธีการคาดคะเนปริมาณ  
การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มพืดโดยวิธี Simplified method.

ผลการวิจัยพบว่า : เข็มพืดมีพฤติกรรมการโก่งตัวเป็นแบบ Rotation about bottom (fixed end) โดย  
ในช่วงแรกของการขุดดินก่อนที่จะมีการค้ำยันการโก่งตัวเป็นแบบคานยื่น ปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างของเข็มพืดขึ้นอยู่กับ  
สภาพน้ำหนักบรรทุกบนผิวดินและระยะเวลาในการติดตั้งค้ำยันเป็นสำคัญ การทรุดตัวของผิวดินมีขอบเขตอยู่ใน Settlement  
envelope ที่เสนอโดย Peck (1969) และ Mana & Clough (1981) ความสัมพันธ์ของการทรุดตัว สูงสุดที่ผิวดิน ( $\delta V_{max}$ )  
ต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มพืด ( $\delta H_{max}$ ) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1.94 ถึง 2.13 สำหรับบริเวณที่มีมวดยานจรรยา  
หรือมีน้ำหนักบรรทุกที่ผิวดิน และ 0.83 ถึง 1.62 สำหรับบริเวณที่ไม่มีมวดยานจรรยา ผลของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มี  
ต่อค่า  $\delta H_{max}$  นั้น พบว่า : การลดค่าสติฟเนสของค้ำยันลงเท่าตัว และการติดตั้งตัวค้ำยันล่าช้าอาจทำให้เกิด  $\delta H_{max}$  มากขึ้น  
เกือบ 3 เท่าตัว การอัดแรงในค้ำยันช่วยลดค่า  $\delta H_{max}$  ลงได้มาก ในช่วงการขุดไม่ลึกมากนักหรือในช่วง 2 ชั้นแรกของ  
การขุดเท่านั้น ความลึกของการขุด (H) ทำให้ค่า อัตราส่วน ( $\delta H_{max}/H, \%$ ) ลดลง ความหนาของชั้นดินจากระดับขุดถึงชั้น  
ดินแข็ง (T) ทำให้ค่าอัตราส่วน ( $\delta H_{max}/H, \%$ ) เพิ่มขึ้น การเว้นคันดินช่วยลดค่า  $\delta H_{max}$  ลงได้ในช่วง 3 ชั้นแรกของการขุด  
เท่านั้น อัตราส่วน ( $\delta H_{max}/H, \%$ ) ให้ค่าที่ต่ำกว่าที่เสนอโดย Mana และ Clough (1981) เมื่อเปรียบเทียบที่ค่า Factor of  
safety against basal heave เดียวกัน สำหรับการคาดคะเนปริมาณ  $\delta H_{max}$  โดยวิธี Simplified method ที่เสนอโดย Wong  
และ Broms (1989) นั้นสามารถใช้ได้ดีในการขุดช่วงสุดท้ายเท่านั้น ซึ่งไม่นำผลของน้ำหนักบรรทุกบนผิวดินมาเกี่ยวข้อง ส่วน  
วิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมนั้นควรมีการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดินไว้โดยรอบสถานที่ก่อสร้าง การติดตั้งค้ำยันและการ  
อัดแรงควรรีบดำเนินการโดยเร็ว มวดยานต่าง ๆ ในการก่อสร้างควรใช้ Platform เป็นเส้นทางขนส่ง และการขุดดินควรมีการ  
เว้นคันดินไว้โดยรอบบ่อขุดโดยเฉพาะการขุดดินในช่วงแรก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาควิชา .....วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา .....วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา ..... 2534

ลายมือชื่อนิสิต ..... *ms ๙*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *อ.วันชัย เทพรักษ์*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## CO15186 : MAJOR CIVIL ENGINEERING.



KEY WORK : BEHAVIOR/BRACED SHEET PILE WALL/DEEP EXCAVATION/BANGKOK  
SOFT CLAY

PIPAT SRIWATTANAPONG : BEHAVIOR OF BRACED SHEET PILE WALL SYSTEM  
FOR DEEP EXCAVATION IN BANGKOK SOFT CLAY. THESIS ADVISOR: DR.  
WANCHAI TEPARAKSA Eng.D. 180 PP ISBN 974-581-571-3

Sheet pile bracing system is the most wellknown system for deep excavation in Bangkok soft clay. This research aims to study the behavior and correlation of lateral sheet pile wall movement with ground surface settlement, the influence of factors affected to the lateral wall movement, to suggest the appropriate method of construction, and compare the measured lateral wall movement with the simplified method proposed by Wong and Broms (1989).

Results of this study lead for the following conclusions: the mode of sheet pile wall deformation is the type of wall rotation about bottom (fixed end type). Delaying in installation of the first strut and traffic loading leads to an induce large wall movements. The measured ground surface settlements are within the settlement envelopes proposed by Peck (1969) and Manas Clough (1981). The correlations of the maximum surface settlement ( $\delta_{vmax}$ ) to the maximum lateral wall movement ( $\delta_{Hmax}$ ) are in the order of 1.94 to 2.13 and 0.83 to 1.62 for traffic and non-traffic area, respectively. Half reduction of strut stiffness and delay in installation of the first strut may increase  $\delta_{Hmax}$  of three times. The preloading of strut com reduce  $\delta_{Hmax}$  for only shallow excavation or for the first and second bracing layers. The deflection ratio ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ ) decreases with increasing of excavation depth (H), while increases with increasing of clay thickness below the bottom of the excavation (T). Berm width can reduce  $\delta_{Hmax}$  for only the first three stages of excavation. For the study of factor of safety against basal heave (F.S), found that the deflection ratio tends to lower than those proposed by Mana & Clough (1981). The prediction of the maximum lateral wall movement by the simplified method proposed by Wong and Broms (1989), show reasonable agreement with the field measurement only at the final stage of excavation without consideration of surcharge load. The proposed appropriate methods of construction are : the ground surface settlement points should be installed around the site, struts should be immediately preloaded after reach the excavation depth, loading trucks or traffic load should be transported on platform to reduced large movement. During excavation berm should be provided around excavation area specially for the first stage of excavation.

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา ..... 2534

ลายมือชื่อนิสิต .....   
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....   
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....





กิตติกรรมประกาศ

ในการทบทวนนิพนธ์เรื่อง "พฤติกรรมของระบบกำแพงกันดินชนิด เข็มทิศแบบใช้ค้ำยัน  
สำหรับงานชุกชนาคสีในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ" ผู้เขียนขอขอบพระคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบพระคุณท่าน อาจารย์ ดร. วันชัย  
เทพรักษา อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด  
พร้อมกันนี้ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ  
รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่เคยอบรมสั่งสอนให้ความรู้มาจนถึงทุกวันนี้

ท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณสุวรรณี เคียงสกุล ผู้ช่วยเหลื่อมในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์จน  
แล้วเสร็จสมบูรณ์.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ช
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ต
สารบัญรูป .....	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	พ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
2. ทฤษฎีและทบทวนงานในอดีต.....	7
2.1 ระบบกำแพงกันดินในงานชุกขนาดลึกแบบใช้ค้ำยัน.....	7
2.2.1 ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall).....	7
2.1.2 ระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid Wall).....	7
2.2 แบบของการเสียรูปของกำแพงกันดินแบบเข็มพืด (Mode of sheetpile wall deformation).....	7
2.3 พฤติกรรมการโก่งตัวของเข็มพืด.....	10
2.4 พฤติกรรมการทรุดตัวของผิวดินหลัง เข็มพืด.....	12
2.5 ความสัมพันธ์ของการ เคลื่อนตัวด้านข้างของ เข็มพืดกับการทรุดตัวของผิวดิน.....	16
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการ เคลื่อนตัวด้านข้างของ เข็มพืดกับทรุดตัวของผิวดิน.....	18
2.6.1 พารามิเตอร์ของดิน.....	18

2.6.1.1	กำลังรับแรงเฉือนของดิน.....	18
2.6.1.2	โมเมนต์ของดิน.....	22
2.6.2	ระบบโครงสร้างค้ำยัน.....	23
2.6.2.1	สติฟเนสของเข็มทึด (Sheetpile Stiffness, EI).....	23
2.6.2.2	สติฟเนสของค้ำยัน (Strut Stiffness, S).....	26
2.6.2.3	ระยะห่างในแนวตั้งของค้ำยัน (Vertical Strut Spacing, h).....	26
2.6.2.4	การอัดแรงในค้ำยัน (Preloading of Strut).....	26
2.6.3	ขนาดของงานขุด (Geometric Conditions).....	28
2.6.3.1	ความลึกของการขุด (Depth of excavation, H).....	28
2.6.3.2	ความกว้างของการขุด (Width of excavation, B).....	28
2.6.3.3	ความหนาของชั้นดินจากระดับขุดถึง ชั้นดินแข็ง (Thickness of Soil below The bottom of excavation to hard Stratum, T).....	30
2.6.4	วิธีการก่อสร้าง (Method of Construction).....	30
2.6.4.1	ช่วงความลึกที่ขุดเพิ่มในแต่ละขั้นตอน (Excavation Step Size, $\Delta H$ ).....	31
2.6.4.2	ขนาดการเว้นค้ำยัน (Beam width, W).....	31



3. วิธีการวิจัยและการทดสอบ.....	33
3.1 สถานที่ทำการวิจัย.....	33
3.1.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสถานที่ทำการวิจัย.....	33
3.1.2 ลักษณะโดยทั่วไปของชั้นดิน.....	33
3.2 การก่อสร้างระบบกำแพงกันดิน.....	36
3.2.1 ระบบกำแพงกันดิน (Retaining wall system).....	38
3.2.2 ขั้นตอนและวิธีการก่อสร้าง (Sequence and Method of construction).....	44
3.2.3 สภาพและปริมาณการจราจรในสถานที่ก่อสร้าง.....	48
3.2.4 สภาพและปริมาณน้ำหนักบรรทุกบนผิวดิน (Surcharge Load)	
3.3 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการ.....	48
3.3.1 วิธีการเก็บตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบ.....	49
3.3.2 การทดสอบหาค่าสมบัติขั้นพื้นฐานของดิน.....	49
3.3.3 การทดสอบหาค่าสมบัติทางวิศวกรรมของดิน.....	50
3.3.3.1 การทดสอบหาค่าลึรับแรงเฉือนของดินโดยวิธี (unconfied compression test).....	50
3.3.3.2 การทดสอบ Consolidation Test.....	52
3.4.1 การทดสอบหาค่าลึรับแรงเฉือนของดินโดย (Field vane shear test).....	53
3.4.1.1 ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ.....	53
3.4.1.2 วิธีการทดสอบ.....	53
3.4.2 การทดสอบ (Pressuremeter test).....	56
3.4.2.1 ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ.....	56
3.4.2.2 วิธีการทดสอบ.....	56

3.5	การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบในสนาม.....	64
3.5.1	การติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน (Settling element points).....	64
3.5.1.1	แนวทดสอบตามขวาง (Test sections)...	66
3.5.1.2	แนวทดสอบตามยาว (Test alignments)...	67
3.5.2	การติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของเข็มปัก (Sheet Pile) โดย Inclinator.....	73
3.5.2.1	ชนิดของอุปกรณ์.....	73
3.5.2.2	วิธีการติดตั้งอุปกรณ์.....	73
3.5.3	การติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับน้ำใต้ดินโดย Piezometer.....	77
3.5.3.1	ชนิดของอุปกรณ์.....	77
3.5.3.2	วิธีการวัดระดับน้ำใต้ดิน.....	77
3.6	โปรแกรมของการทดสอบในการวิจัย	
3.6.1	การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงแบบเข็มปัก (Sheet Pile) กับการทรุดตัวที่ผิวดิน	
3.6.1.1	การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการขยับตัวของเข็มปัก	
3.6.1.2	การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวที่ผิวดิน	
3.6.1.3	การทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มปัก กับการทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดิน	
3.6.2	การทดสอบผลของพารามิเตอร์ข้อริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มปัก	

4.	ผลการทดสอบที่ได้และการวิเคราะห์.....	82
4.1	การวิเคราะห์พฤติกรรมและความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวด้านข้างของ เข็มทิศ.....	82
4.1.1	พฤติกรรมการโก่งตัวของ เข็มทิศ.....	82
4.1.2	พฤติกรรมการทรุดตัวที่ผิวดิน.....	83
4.1.3	ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของ เข็มทิศกับการทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดินเทียบกับเวลา.....	83
4.2	การวิเคราะห์ผลของระบบโครงสร้างค้ำยันที่มีผลต่อปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างของ เข็มทิศ.....	84
4.2.1	การเปรียบเทียบปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของ เข็มทิศจากผลของสติฟเนสของค้ำยัน (Strut stiffness).....	84
4.2.2	พฤติกรรมของ เข็มทิศจากผลของการอัดแรงในค้ำยัน (Preloading of strut).....	84
4.3	การวิเคราะห์ผลของขนาดของงานขุดที่มีผลต่อปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างของ เข็มทิศ.....	84
4.3.1	การเปรียบเทียบปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของ เข็มทิศจากผลของความลึกของการขุด (Depth of excavation).....	85
4.3.2	การเปรียบเทียบปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของ เข็มทิศจากผลความหนาของชั้นดินจากระดับขุดถึงชั้นดินแข็ง (Depth of wall penetration below final excavation depth).....	85
4.4	การวิเคราะห์ผลของวิธีการก่อสร้างที่มีผลต่อปริมาณการเคลื่อน	



	หน้า
ตัวด้านข้างของ เข็มพิก.....	85
4.4.1 การเปรียบเทียบปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด ที่เปลี่ยนแปลงไปจากผลของช่วงความลึกที่ขุดเพิ่ม ในแต่ละชั้นคอน (Excavation step size).....	85
4.4.2 การเปรียบเทียบปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด ของเข็มพิกจากผลของการเว้นคั่นดิน (Berm width)....	85
4.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของบ่อขุด.....	86
4.6 การคาดคะเนปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของ เข็มพิก.....	86
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104
5.1 ผลสรุป.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม.....	106
เอกสารอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก ก. การทดสอบ Pressuremeter test.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	132

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่

หน้า

2.1	Critical Stability number (Clough, Hansen และ Mana, 1979).....	19
2.2	เปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณการเคลื่อนตัวด้านข้าง ของกำแพงกันดินและแรงดันค้ำยัน (Palmer และ Kenney, 1971).....	24
3.1	รายละเอียดระบบค้ำยันของ (ก) ไรชนแรก (ขุดค้ำลึก 9.5 เมตร) และ (ข) ไรชนที่ 2 (ขุดค้ำลึก 11.3 เมตร).....	41
3.2	รายละเอียดข้อมูลของ King Post, Strut, Raker และ Wale ที่ท่าทหารวิชัย...	43
3.3	หน่วยแรงรวมแนวตั้ง (Total vertical stress, $\sigma_v$ ) ถึงระดับ ความลึก 21 เมตร.....	51
3.4	พารามิเตอร์ของดินที่ได้จากการทดสอบ Pressuremeter test.....	63
3.5	โปรแกรมการคิดตั้งมุมวัดการทรุดตัวพื้นดินและ Inclinator วัดการร้งตัวของ เข็มพิค. (ก) สำหรับไรชนแรก, ขุดค้ำลึก 9.5 เมตร และ (ข) สำหรับไรชนที่ 2 ขุดค้ำลึก 11.3 เมตร.....	69

3.6 สาเหตุของการผิดพลาดในการวัด Piezometer(Hvorslev,1951).....80

ก.1 การเพิ่มความดันเป็นช่วง ๆ (Stepwise pressuring) โดยวิธีของ OYO Corporation(1979)..... 128

ก.2 ตัวอย่างการบันทึกระเบียบข้อมูลของการทดสอบ Pressuremeter test.....131



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





2.1	ข้อดี-ข้อเสียของกำแพงกันดินชนิดต่าง ๆ .....	8
2.2	แบบของการเสียรูปของกำแพงกันดินแบบเข็มค้ำ (Mode of sheet pile wall deformations).....	9
2.3	พฤติกรรมการงอตัวของเข็มค้ำ (Bjerrum, Clausen และ Duncan, 1972)...	9
2.4	ขอบเขตของนอร์มัลไลซ์การทรุดตัวของผิวดินหลังกำแพงกันดินเนื่องจาก (ก) การขุดในชั้นดินชนิดต่าง ๆ (Peck, 1969) และ (ข) การขุดในชั้นดินเหนียว อ่อนถึงแข็งปานกลาง (Manal และ Clough, 1981).....	14
2.5	ความสัมพันธ์ของ Stability Number (N) กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ ระบายน้ำ (Su) ของงานขุดแบบใช้ค้ำยันในดินเหนียว (Clough และ Schmidt, 1977).....	15
2.6	วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของบ่อขุด (Factor of Safety against basal heave, FS.).....	15

- 2.7 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวทางค้ำข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ ) กับ Factor of Safety against basal heave, FS. (Manal และ Clough, 1981).....20
- 2.8 ผลของสลิปเนสของกำแพงกันดินที่มีต่อปริมาณการเคลื่อนตัวค้ำข้างสูงสุดของกำแพง (Clough, Hansen และ Mana, 1979).....25
- 2.9 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวค้ำข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ ) กับ นอร์มัลไลซ์สลิปเนสของกำแพง  $EI/h^4 \cdot r$  (Manal และ Clough, 1981).....25
- 2.10 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวค้ำข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ ) กับ นอร์มัลไลซ์สลิปเนสของค้ำยัน  $s/h \cdot r$  (Manal และ Clough, 1981).....27
- 2.11 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวค้ำข้างสูงสุดของกำแพงกันดินกับนอร์มัลไลซ์การอัดแรงในค้ำยัน (Manal และ Clough, 1981).....27
- 2.12 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวค้ำข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ ) กับ ความลึกของการขุด, H (Wong และ Broms, 1989).....29
- 2.13 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวค้ำข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ ) กับ

อัตราส่วนความหนาของชั้นดินจากระดับชุกถึงชั้นดินแข็ง, T/B (Wong และ Bross, 1989).....	32
2.14 ผลของช่วงความลึกที่ชุก เจาะขึ้นในแต่ละชั้นคอนกรีตต่อการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน (Clough, Hansen และ Mana, 1979) ..	32
3.1 แผนที่แสดงบริเวณที่ทำการวิจัย.....	34
3.2 ผังบริเวณแสดงสภาพพื้นที่ทำการวิจัยและตำแหน่งการติดตั้ง เครื่องมือทดสอบสนาม.....	35
3.3 ลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดินที่ทำการวิจัย.....	37
3.4 รายละเอียดข้อมูลของ เข็มปัก(ก)ชนิด JSP-4 สำหรับโซนแรกที่ยุคลึก 9.5 เมตร และ (ข)ชนิด PU-20 สำหรับโซนที่ 2 ที่ยุคลึก 11.3 เมตร.....	39
3.5 ลักษณะการคำนวณของโซนแรกและโซนที่ 2.....	40
3.6 ขั้นตอนการชุกดินของ(ก)โซนแรกและ (ข)โซนที่ 2.....	46



3.7 ลักษณะรอยหัวบนในการคิกตั้งระบบค้ำยัน.....47

3.8 ผลการทดสอบ Field vane shear test (FVT).....54

3.9 ค่าความไวตัวของดิน (Sensitivity) จากการทดสอบ FVT.....55

3.10 ผลทดสอบ Pressuremeter test ที่ระดับความลึก (ก)3เมตร (ข)6เมตร  
 ยาว9เมตร (ง)12เมตร (จ)15เมตร (ฉ)18เมตรและ(ช)21เมตร.....58

3.11 ผนวกลึกลับของดินจากการทดสอบ Pressuremeter test.....62

3.12 ลักษณะการคิกตั้งหมุดวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน (Settlement Points) ของแนว  
 ทดสอบตามขวาง (Test Sections) ๑ค ๗.....65

3.13 รายละเอียดของหมุดวัดการทรุดชนิด (ก)Ground Surface Settlement  
 Point, GS)และ(ข)Pavement Surface Settlement Point, PS).....65

3.14 Inclinator (ก)ชุดของInclinator (ข)จอแสดงผล (ค)ท่อวัดความ  
 เอียง และ(ง)อุปกรณ์ช่วย.....74

3.15	รายละเอียดของ Piezometer.....	79
3.16	ผลการทดสอบ Piezometer.....	81
4.1	พฤติกรรมการร่งตัวของเข็มพิคในระหว่างการก่อสร้าง (ก)I1,(ข)I2,(ค)I3 และ(ง)I4.....	87
4.2	พฤติกรรมการทรุดตัวที่ผิวดินหลัง เข็มพิคในระหว่างการก่อสร้างของแนวทดสอบ ตามขวาง (ก)Test section no.1 (ข)Test section no.2 (ค)Test section no.3 และ(ง)Test section no.4.....	91
4.3	การทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดิน ( $\delta_{Vmax}$ ) และการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มพิค ( $\delta_{Hmax}$ ) กับเวลา (day no.) ในระหว่างการก่อสร้างสำหรับ (ก)หมายเลข เลข14กับI1 (ข)หมายเลขเลข2bกับI2 (ค)หมายเลขเลข3bกับI3 และ(ง) หมายเลขเลข11กับI4.....	95
4.4	ความสัมพันธ์ของการทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดิน ( $\delta_{Vmax}$ ) กับการเคลื่อนตัวด้านข้าง สูงสุดของเข็มพิค ( $\delta_{Hmax}$ ) ในระหว่างการก่อสร้าง.....	97
4.5	อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มพิค ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ )กับ (ก)ความ	

- ลักษณะของการซุก (H) และ(ช) อัตราส่วนความลึกของการซุก (H/B,%). . . . . 98
- 4.6 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มพิค ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ ) กับ (ก) ความหนาของชั้นดินจากระดับซุกถึงชั้นดินแข็ง (T) และ(ข) อัตราส่วนความหนาของชั้นดินจากระดับซุกถึงชั้นดินแข็ง (T/B). . . . . 99
- 4.7 นอร์มัลไลซ์การเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มพิค ( $\delta_{Hmax}/H_c, \%$ ) กับนอร์มัลไลซ์ช่วงความลึกที่ซุกเพิ่มขึ้น ( $\Delta H/\Delta H_c$ ). . . . . 100
- 4.8 นอร์มัลไลซ์การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มพิค ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ ) กับการเว้นคันดิน (พ) ที่ความลึกของการซุก, H. (ก)H=4.5เมตร (ข)H=7.0เมตร (ค)H=9.5เมตร และ(ง)H=11.3เมตร. . . . . 101
- 4.9 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มพิค ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ ) กับ Factor of Safety against basal heave (FS.) . . . . . 102
- 4.10 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเข็มพิคจากการวัดค่าในสนาม ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ )<sub>meas.</sub> กับจากการคาดคะเนและจากวิธีของ Wong & Broms (1989), ( $\delta_{Hmax}/H, \%$ )<sub>Calculated</sub>. . . . . 103

ก.1	ระบบการทำงานและส่วนประกอบ Pressuremeter test	.....127
ก.2	ส่วนประกอบของ Probe ที่ใช้ใน Pressuremeter test.....	128
ก.3	การแสดงผลการทดสอบและการแปลความหมายข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ.....	129
ก.4	ตัวอย่างแสดงผลการทดสอบ Pressuremeter test.....	130



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สัญลักษณ์



W

- A = พื้นที่หน้าตัดของค้ำยัน (Section Area of Strut)
- B = ความกว้างของการขุด (Width of Excavation)
- CR = อัตราส่วนการอัดตัวได้ (Compression ratio)
- CV = ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation)
- D = ระยะห่างจากหลังคาเพงกันดินออกมานอกบ่อขุด
- E = โมดูลัสยืดหยุ่นของระบบโครงสร้างค้ำยัน (Elastic modulus of bracing system)
- $E_i$  = Initial tangent modulus ของดิน
- $E_p$  = โมดูลัสการเสียรูปของดิน (Modulus of deformation) จากการทดสอบ Pressuremeter test
- $E_s$  = Secant modulus ของดิน
- $E_t$  = Tangent modulus ของดิน
- $E_u$  = โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained soil modulus)
- FEA = Finite Element Analysis
- FS. = Factor of Safety against basal heave
- $H, H'$  = ความสูงของน้ำในหลอด Standpipe ณ เวลาใดจากการทดสอบ Pressuremeter test
- H = ความลึกของการขุด (Depth of Excavation)
- $H_c$  = ความลึกวิกฤติ (Critical height)
- $H_o$  = ความลึกจากผิวดินถึงชั้นดินแข็ง (Depth of firm layer)
- $H_I$  = ความลึกอิทธิพล (Depth of influence)

- $H_G$  = ความสูงของ Cell pressure gauge จากระดับดินเดิมในการทดสอบ Pressuremeter test  
 $H_O$  = ความสูงของน้ำในหลอด Standpipe ที่สภาพความดันบรรยากาศทดสอบ Pressuremeter test  
 $H_w$  = ระดับน้ำในหลุมเจาะ จากการทดสอบ Pressuremeter test  
 $h$  = ระยะห่างในแนวตั้งของค้ำยัน (Vertical strut spacing)  
 $I$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียของระบบโครงสร้างค้ำยัน (Moment Inertia of bracing system)  
 $K_o$  = สัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันดินข้างในสภาพสถิตย์ (Coefficient of lateral Earth Pressure at Rest)  
 $L$  = ความยาวของค้ำยันที่เว้นมีการยึดค้ำยัน (Unbraced length of Strut)  
 $LI$  = ดัชนีความเป็นของเหลว (Liquidity Index)  
 $M$  = อัตราส่วนของโมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ ( $M = E_u / S_u$ )  
 $N$  = Stability number  
 $N$  = SPT-N value  
 $N_c$  = Bearing capacity factor  
 $OCR$  = overconsolidated ratio  
 $P$  = ค่าความดันที่ใช้ทดสอบ Pressuremeter test  
 $P$  = ค่าแรงอัดเฉลี่ยในค้ำยัน  
 $PI$  = ดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index)  
 $P_c$  = ความดันกษาน Probe จากการทดสอบ Pressuremeter test  
 $p_e$  = ความดันประสิทธิผล (Effective Pressure) จากการทดสอบ Pressuremeter test

- $P_G$  = ความดันค้ำทานของแผ่นยางของ Probe (Rubber reaction)  
 $P_g$  = ความดันก๊าซจากการทดสอบ Pressuremeter test  
 $P_s$  = ความดันน้ำสถิตย์ (Hydrostatic pressure) จากการทดสอบ Pressuremeter test  
 $P_L$  = หน่วยแรงที่สภาวะสุดท้าย (Limit Pressure) จากการทดสอบ Pressuremeter test  
 $P_{L^*}$  = หน่วยแรงสุทธิที่สภาวะสุดท้าย (Net limit pressure)  
 $P_o$  = หน่วยแรงรวมในแนวราบในสภาพอยู่นิ่ง (Horizontal total Pressure at rest)  
 $P_Y$  = หน่วยแรงที่จุดคลาก (Yield Pressure)  
 $q$  = น้ำหนักกระทำที่ผิวดิน (Surcharge Pressure)  
 $RR$  = อัตราส่วนการอัดตัวซ้ำ (Recompression ratio)  
 $R_f$  = Failure Ratio ของดิน  
 $r$  = หน่วยน้ำหนักรวมของดิน  
 $r_m$  = รัศมีกึ่งกลาง (Mean radius) ของ Probe  
 $S$  = สติเฟนของค้ำยัน (Strut Stiffness= $EI$ (Struts))  
 $S_L$  = Stress level ของดิน  
 $S_u$  = กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)  
 $S_{up}$  = กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Pressuremeter test  
 $S_{uv}$  = กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบ Field vane shear test  
 $T$  = ความหนาของชั้นดินจากระดับชุดถึงชั้นดินแข็ง  
 $TSA$  = Total Stress Analysis  
 $u$  = ความดันน้ำในพรงดิน (Pore pressure)  
 $W$  = ความกว้างของการเว้นคันดิน (Berm width)



- $\Delta H$  = การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเสียรูปของดิน (Change of deformation velocity) จากการทดสอบ Pressuremeter test
- $\Delta H$  = ช่วงความลึกที่ขุดเพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นคอน (Excavation Step Size)
- $\Delta H_c$  = ความลึกวิกฤติที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากการขุดดินลึก เพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นคอน
- $\Delta S$  = ค่าการหดตัวรอยเฉลี่ยของค้ำยันเนื่องจากการอัดแรง
- $\delta$  = มุมเสียดทานหลังกำแพงกันดิน
- $\delta_H$  = ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดิน
- $\delta_{Hmax}$  = ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน
- $\delta_v$  = ค่าการทรุดตัวผิวพื้น (Ground Surface Settlement)
- $\delta_{Vmax}$  = ค่าการทรุดตัวสูงสุดที่ผิวพื้น (Maximum Ground Surface Settlement)
- $\beta$  = ค่าปรับแก้ของ Buttom(1953)
- $\phi$  = มุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction)
- $\sigma_H$  = หน่วยแรงคั้นดินรวมด้านข้างในสนาม (Total lateral In-Situ Stress)
- $\sigma_V$  = หน่วยแรงคั้นดินรวมแนวตั้งในสนาม (Total vertical In-Situ Stress)
- $\bar{\sigma}_H$  = หน่วยแรงคั้นดินประสิทธิผลด้านข้างในสนาม (Effective Rateral In-Situ Stress)
- $\bar{\sigma}_V$  = หน่วยแรงคั้นดินประสิทธิผลแนวตั้งในสนาม (Effective Vertical In-Situ Stress)
- $\bar{\sigma}_{vm}$  = หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ (Maximum-Past Pressure)
- $\epsilon$  = ความเครียด (Strain)
- $\nu$  = Poisson's ratio
- $\mu$  = ค่าปรับแก้ของ Bjerrum และ Eide (1956)
- $r$  = หน่วยน้ำหนักรวมของดิน (Total unit weight)