

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีต

#### 2.1 ระบบกำแพงกันดินสำหรับงานขุด

ในงานขุดดินสำหรับงานก่อสร้างใต้ดินในกรุงเทพมหานครนั้นจำเป็นต้องพิจารณาปัญหาการพังทลายและการเคลื่อนตัวของดินไม่เฉพาะในบริเวณที่ทำการก่อสร้างเท่านั้น ยังต้องคำนึงถึงความเสียหายที่อาจเกิดกับโครงสร้างข้างเคียงซึ่งอาจจะได้รับผลกระทบเนื่องจากการขุดดินอีกด้วย ดังนั้นการคัดเลือกและออกแบบระบบกำแพงกันดินที่เหมาะสมจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับวิศวกรที่จะต้องคำนึงถึง

ระบบกำแพงกันดินเป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับงานขุดดินที่มีความลึกมากและมีพื้นที่จำกัดในการก่อสร้าง โดยสามารถจำแนกตามความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของระบบกำแพงกันดินออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

##### 2.1.1 ระบบกำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall)

เป็นระบบกำแพงกันดินที่นิยมใช้สำหรับการก่อสร้างห้องใต้ดินในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เนื่องจากราคาถูกและใช้เวลาในการก่อสร้างน้อย แต่เนื่องจากเป็นระบบที่มีค่า Stiffness ต่ำจึงทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ในงานขุดดินที่มีความลึกมากกว่า 11.50 เมตร (วันชัย, 2539) ซึ่งระบบกำแพงกันดินชนิดนี้ได้แก่ ระบบกำแพงกันดินเข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile Bracing System)

##### 2.1.2 ระบบกำแพงกันดินแบบแข็ง (Rigid Wall)

เป็นระบบกำแพงกันดินที่มีค่า Stiffness สูง จึงทำให้มีความสามารถในการควบคุมปริมาณการเคลื่อนตัวของดินให้มีปริมาณน้อยได้ ดังนั้นจึงเหมาะสมกับงานขุดดินที่ลึกมากและงานที่ไม่ต้องการให้เกิดผลเสียต่อโครงสร้างข้างเคียง นอกจากนี้ระบบกำแพงกันดินชนิดนี้ยังสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างใต้ดินถาวรเช่นการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินอีกด้วย สำหรับระบบกำแพงกันดินชนิดนี้ได้แก่ Diaphragm Wall, Secant Pile Wall และ Contiguous Bored Pile Wall

## 2.2 การคำนวณแรงดันดินด้านข้าง (Lateral Earth Pressure)

หน่วยแรงดันดินด้านข้าง (Earth Pressure) คือแรงดันดินด้านหลังกำแพง โดยมีขนาดขึ้นอยู่กับปริมาณและทิศทางของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพง ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้หลักการของหน่วยแรงประสิทธิผล (Principal of Effective Stress) จากสมการ

$$\sigma_h = \sigma'_h + u \quad (2.1)$$

โดยที่  $\sigma_h$  คือหน่วยแรงดันดินด้านข้างรวม  
 $\sigma'_h$  คือหน่วยแรงดันดินด้านข้างในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล  
 $u$  คือความดันน้ำในโพรงดิน (Pore Water Pressure)

เมื่อกำแพงเกิดการเคลื่อนตัวออกไปโดยที่ปลายอยู่กับที่ หน่วยแรงดันดินด้านข้างรวม ( $\sigma_h$ ) จะลดลงจากหน่วยแรงดันดินด้านข้างแบบสถิต ( $\sigma_{ho}$ ) ในขณะที่หน่วยแรงรวมในแนวตั้ง ( $\sigma_v$ ) มีค่าคงที่ จนกระทั่งดินอยู่ในสภาพวิบัติซึ่ง  $\sigma_h$  จะมีค่าต่ำสุด หน่วยแรงดันดินในสภาวะนี้เรียกว่า Active Earth Pressure ( $\sigma_{hA}$ ) ซึ่งเป็นหน่วยแรงดันดินแบบผลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.1

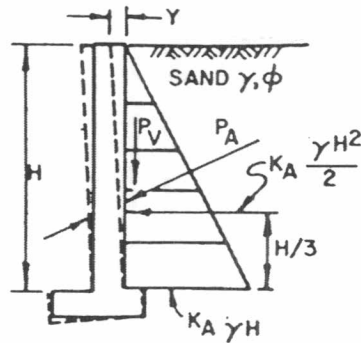
เมื่อกำแพงดันเข้าหาดินในลักษณะแบบ Tilt ค่า  $\sigma_h$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $\sigma_{ho}$  จนกระทั่งดินอยู่ในสภาพวิบัติ ความดันดินในสภาวะเช่นนี้เรียกว่า Passive Earth Pressure ( $\sigma_{hP}$ ) ซึ่งเป็นหน่วยแรงดันดินแบบดัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

DM7.2 (1982) ได้ให้ปริมาณการ Tilt ของกำแพงสำหรับดินชนิดต่าง ๆ กันที่ทำให้เกิดสภาพวิบัติในสภาวะ Active และ Passive ดังแสดงในตารางที่ 2.1

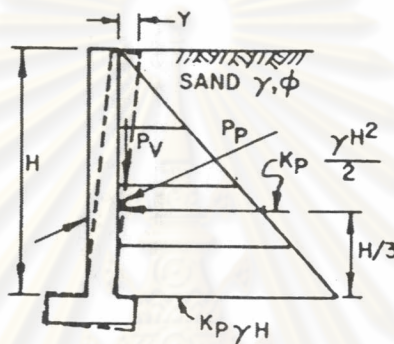
ตารางที่ 2.1 ค่า Tilt ของกำแพงที่ทำให้เกิดสภาพวิบัติในสภาวะ Active และ Passive (DM7.2, 1982)

ชนิดของดิน	$\gamma/H$	
	Active	Passive
ทรายแน่น	.0005	.002
ทรายหลวม	.002	.006
ดินเหนียวแข็ง	.01	.02
ดินเหนียวอ่อน	.02	.04

หมายเหตุ  $\gamma$  คือการเคลื่อนตัวในแนวราบที่หัวกำแพง  
 $H$  คือความสูงของกำแพง



รูปที่ 2.1 ลักษณะของหน่วยแรงดันดินด้านข้างในสถานะ Active  
เมื่อกำแพงเคลื่อนที่ออกจากดินหลังกำแพง (DM7.2, 1982)



รูปที่ 2.2 ลักษณะของแรงดันดินด้านข้างในสถานะ Passive  
เมื่อกำแพงเคลื่อนที่เข้าหาดินหลังกำแพง (DM7.2, 1982)

การคำนวณหาแรงกระทำด้านข้างที่กระทำกับโครงสร้างของระบบมีวิธีคำนวณดังนี้

### 2.2.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินด้านข้างแบบสถิต (At Rest Pressure)

ใช้ในกรณีที่ระบบกำแพงกันดินมี Stiffness และ Rigidity สูงมากจนทำให้กำแพงไม่เกิดการเคลื่อนตัวเลย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยคำนวณได้จาก

$$\sigma_{ho} = \sigma'_{ho} + u \quad (2.2)$$

โดย  $\sigma_{ho}$  คือหน่วยแรงดันดินด้านข้างรวมแบบสถิต

$\sigma'_{ho}$  คือหน่วยแรงดันดินด้านข้างในรูปหน่วยแรงประสิทธิผลแบบสถิต โดยที่

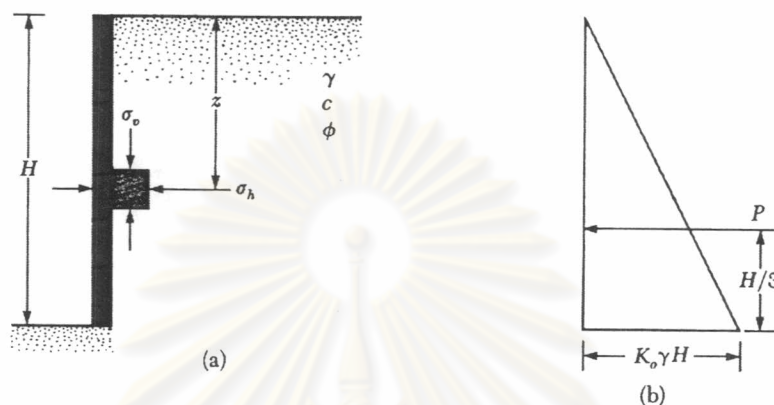
$$\sigma'_{ho} = K_0 \sigma'_{vo} \quad (2.3)$$

$K_0$  คือสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต (Coefficient of Earth Pressure at Rest)

$\sigma'_{vo}$  คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ โดยที่

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - u \quad (2.4)$$

$\sigma_{vo}$  คือหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง



รูปที่ 2.3 ลักษณะของหน่วยแรงดันดินด้านข้างในสถานะ At Rest (Das, 1998)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต ( $K_o$ ) ของดินเหนียวขึ้นอยู่กับค่าพลาสติกซิตี (PI) และประวัติหน่วยแรงของดินที่แสดงอยู่ในรูปของสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (Over Consolidation Ratio, OCR) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

โดยที่สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_o$  กับ  $\phi'$  และ  $K_o$  กับ PI ของดินเหนียวในสถานะอัดแน่นปกติ (Brooker & Ireland, 1965) เป็นดังนี้

$$K_o = 0.95 - \sin \phi' \quad (2.5)$$

$$K_o = 0.4 + 0.007(PI) \quad ; PI = 0-40\% \quad (2.6)$$

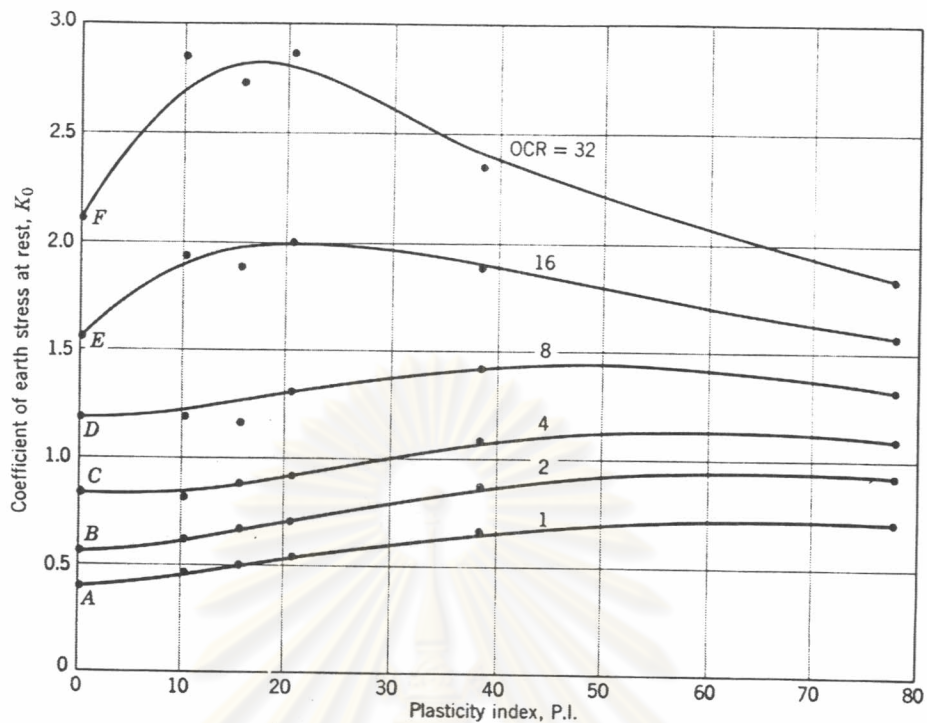
$$K_o = 0.64 + 0.001(PI) \quad ; PI = 40-80\% \quad (2.7)$$

โดยที่ค่า  $\phi'$  เป็นค่ามุมต้านทานแรงเฉือนในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผลของดินเหนียวในสถานะอัดแน่นปกติ ซึ่งมีค่าระหว่าง  $20^\circ - 30^\circ$

สำหรับดินเม็ดหยาบ ค่า  $K_o$  ขึ้นอยู่กับสถานะความแน่นและสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว ในกรณีที่ทรายมีค่าความแน่นปานกลาง (Medium Dense) หรือแน่น (Dense) และ OCR = 1 ค่า  $K_o$  สามารถประเมินได้จากสมการ (Jaky, 1944 cited in Terzaghi, Peck, and Mesri, 1996:104) ดังนี้

$$K_o = 1 - \sin \phi' \quad (2.8)$$





รูปที่ 2.4 ค่า  $K_0$  เป็นฟังก์ชันของดัชนีพลาสติกซิตี (PI) และ OCR

(After Brooker & Ireland, 1965)

### 2.2.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินด้านข้างโดยหลักการของ Rankine

Rankine ได้เสนอทฤษฎีของการวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินด้านข้าง โดยมีสมมติฐานดังนี้

- การวิบัติของมวลดินเป็นไปตามกฎของ Mohr และ Coulomb
- พื้นผิวดินหลังกำแพงต้องอยู่ในแนวราบ
- การวิบัติเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในแนวนอน ( $\sigma_h$ ) ในขณะที่หน่วยแรงในแนวตั้ง ( $\sigma_v$ ) คงที่
- ระนาบการวิบัติของดินเป็น Planar Surface โดยระนาบของการวิบัติทำมุม  $45 + \frac{\phi}{2}$  กับระนาบของหน่วยแรงหลักสูงสุด (Major Principal Stress Plane)
- ผิวผนังกำแพงเรียบไม่มีความเสียดทานและอยู่ในแนวตั้ง
- ทิศทางของหน่วยแรงหลักที่เกิดขึ้นทุกจุดในมวลดินภายในระนาบของการวิบัติอยู่เฉพาะในแนวตั้งและแนวนอน
- ทุกจุดในมวลดินภายในขอบเขตระหว่างกำแพงกับระนาบของการวิบัติจะเกิดการวิบัติพร้อม ๆ กัน

### 2.2.2.1 Rankine Active Earth Pressure

เมื่อกำแพงเกิดการเคลื่อนตัวออกจากดินหลังกำแพงจนกำแพงอยู่ในลักษณะ Tilting จะทำให้เกิดการลดลงของค่าหน่วยแรงในแนวนอนดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในขณะที่หน่วยแรงในแนวตั้งคงที่และเมื่อการเคลื่อนที่ของกำแพงมีระยะมากขึ้นจนถึงสภาพพังทลายของดิน (Failure) แล้ว ค่าหน่วยแรงในแนวนอนในสถานะเช่นนี้เรียกว่า Active Earth Pressure ( $\sigma_{hA}$ )

จากความสัมพันธ์ของ Mohr's Circle ในสภาพวิบัติสัมผัสกับ Mohr-Coulomb Envelope หน่วยแรงดันดินในสถานะ Active สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma_{hA} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \sigma_v - 2c \sqrt{\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \quad (2.9)$$

สำหรับกรณีดินทรายและดินเหนียวเมื่อพิจารณาในปัญหาระยะยาว จะวิเคราะห์ค่าของหน่วยแรงประสิทธิผลได้จากสมการ

$$\sigma'_{hA} = K_A (\sigma_v - u) - 2c' \sqrt{K_A} \quad (2.10)$$

โดยที่  $K_A = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}$  หรือเรียกว่า Coefficient of Active Earth Pressure

$\phi'$  และ  $c'$  คือค่ามุมด้านในรูปหน่วยแรงประสิทธิผลและความเชื่อมั่นที่ปรากฏในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล

ซึ่งหน่วยแรงความดันรวมหาได้จาก

$$\sigma_{hA} = \sigma'_{hA} + u \quad (2.11)$$

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สำหรับกรณีของ Saturated Clay ( $\phi = 0$  Concept) ค่าหน่วยแรงดันดินในสภาวะ Active หาได้จาก

$$\sigma_{hA} = \sigma_v - 2c \quad (2.12)$$

จากสมการข้างต้น พบว่าจะเกิด Tensile Stress ซึ่งลดลงตามระยะที่ลึกลงไปจากผิวดิน จนมีค่าเป็นศูนย์ที่ระยะ  $Z_c$  ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$Z_c = \frac{2c}{\gamma_t} \quad (2.13)$$

โดยที่  $Z_c$  คือความลึกที่เกิด Tension Crack  
 $\gamma_t$  คือหน่วยน้ำหนักรวมของดิน

กรณีที่มี Surcharge ( $q$ ) กระทำที่ผิวดิน ความลึกที่เกิด Tension Crack หาได้จาก

$$Z_c = \frac{2c + q}{\gamma_t} \quad (2.14)$$

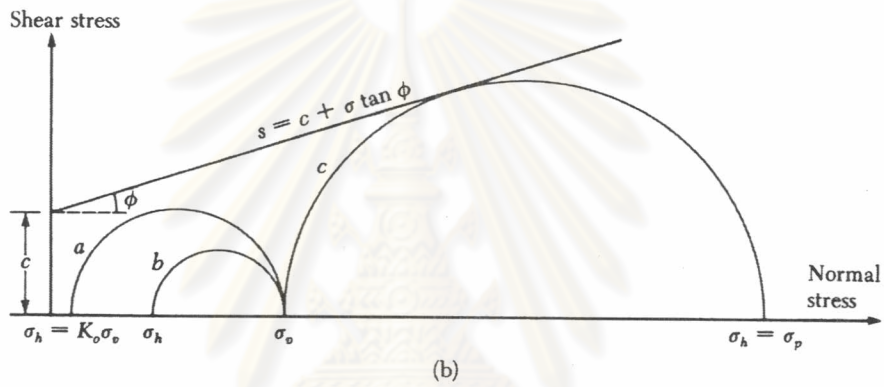
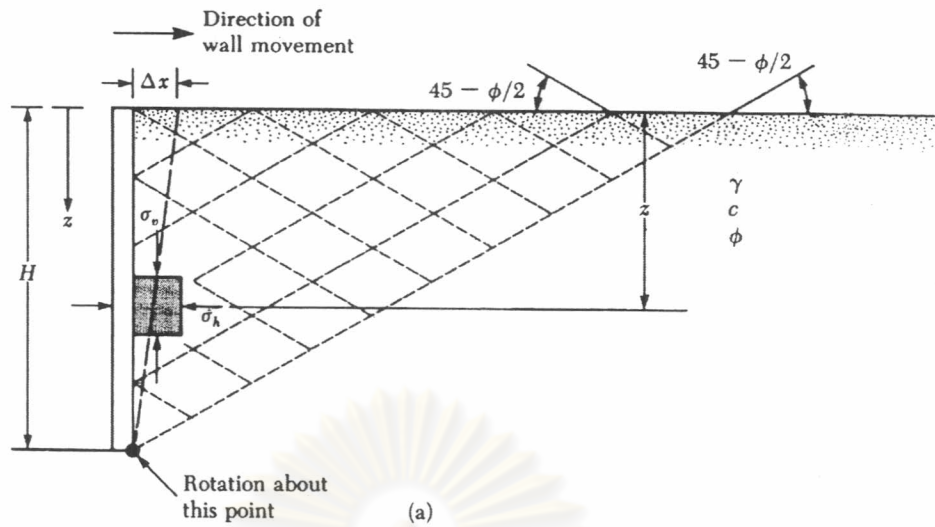
#### 2.2.2.2 Rankine Passive Earth Pressure

กรณีที่กำแพงเกิดการเคลื่อนตัวเข้าหากำแพงกันดิน จนหน่วยแรงดันดินในแนวนอนเพิ่มขึ้นจนถึงสภาพพังทลาย ในขณะที่หน่วยแรงในแนวตั้งคงที่ เรียกสภาวะของหน่วยแรงดันดินในแนวนอนที่เกิดขึ้นเช่นนี้ว่า Passive Earth Pressure ( $\sigma_{hP}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

จากหลักการทางเรขาคณิตของ Mohr's Circle ในสภาพวิบัติสัมพันธ์กับ Mohr-Coulomb Envelope หน่วยแรงดันดินในสภาวะ Passive เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma_{hP} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_v + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (2.15)$$





รูปที่ 2.6 Rankine Passive Earth Pressure (Das, 1999)

- (a) ลักษณะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในสภาวะ Passive ของ Rankine
- (b) Mohr's Circle ของหน่วยแรงดันดินในสภาวะ Passive ของ Rankine
- (c) หน่วยแรงดันดินในสภาวะ Passive ของ Rankine

กรณีดินทรายและดินเหนียวเมื่อพิจารณาในปัญหาระยะยาว จะวิเคราะห์ค่าของหน่วยแรงประสิทธิผลได้จากสมการ

$$\sigma'_{hp} = K_p (\sigma_v - u) + 2c' \sqrt{K_p} \quad (2.16)$$

โดยที่  $K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$  หรือเรียกว่า Coefficient of Passive Earth Pressure

ซึ่งหน่วยแรงความดันรวมหาได้จาก

$$\sigma_{hp} = \sigma'_{hp} + u \quad (2.17)$$

สำหรับกรณีของ Saturated Clay ( $\phi = 0$  Concept) ค่าหน่วยแรงดันดินในสภาวะ Passive หาได้จาก

$$\sigma_{hp} = \sigma_v + 2c \quad (2.18)$$

ในกรณีที่ดินอยู่ใต้น้ำและมี Surcharge เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกของเครื่องจักร อุปกรณ์การก่อสร้าง การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินในแนวดิ่งต้องคำนึงถึงหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นด้วย

$$\sigma_v = \gamma_t Z + \gamma_w * h + q \quad (2.19)$$

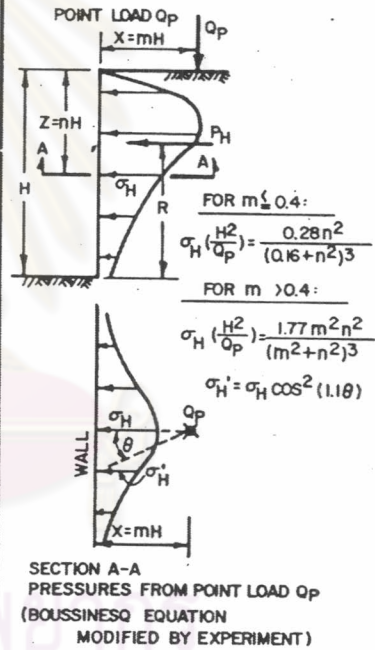
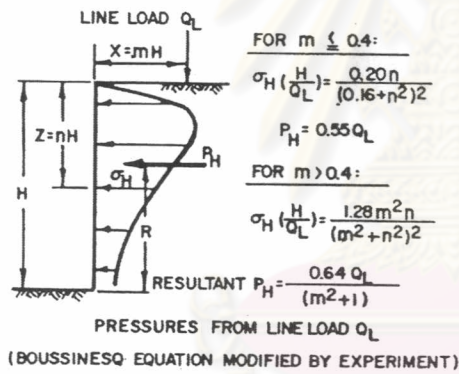
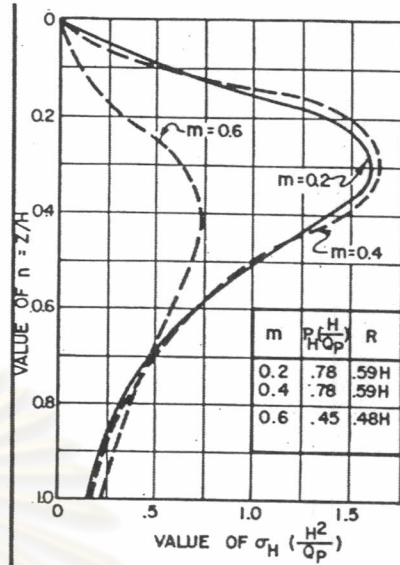
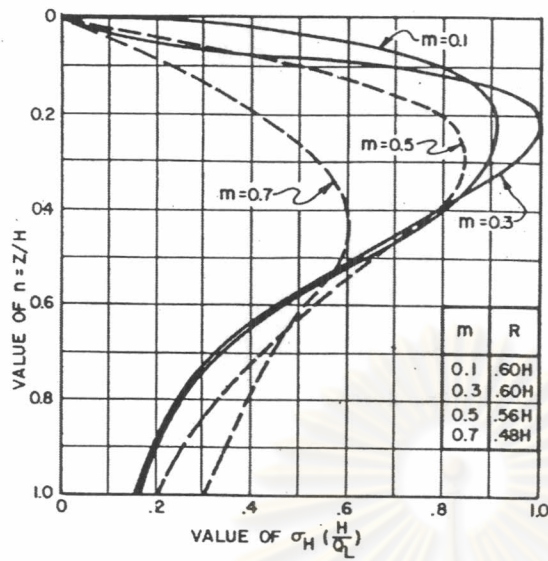
โดยที่  $Z$  คือความลึกของดินที่จุดที่พิจารณาจากผิวดิน  
 $\gamma_w$  คือหน่วยน้ำหนักของน้ำ  
 $h$  คือความลึกของน้ำที่จุดที่พิจารณาจากผิวน้ำ  
 $q$  คือ Surcharge ที่กระทำที่ผิวดิน

โดย Surcharge ดังกล่าวต้องมีความกว้างและยาวครอบคลุมมวลดินที่เกิดการวิบัติ ในกรณีที่ Surcharge กระทำในรูปลักษณะอื่น ๆ เช่น Line Load, Concentrated Load (รูปที่ 2.7), Uniform Load (รูปที่ 2.8) และหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นจากการบดอัดดิน (รูปที่ 2.9) การคาดคะเนหน่วยแรงดันดินด้านข้างทำโดยใช้ Elasticity Theory โดยการเพิ่มของหน่วยแรงจะอยู่ในรูปของหน่วยแรงรวมซึ่งแสดงได้โดยสมการ

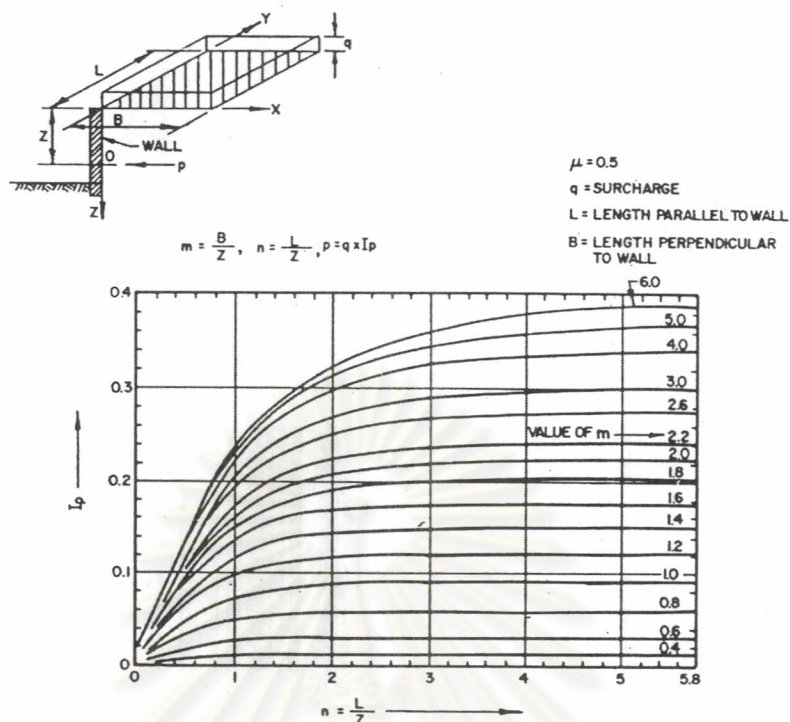
$$\text{กรณี Active Case;} \quad \sigma_h = \sigma_{hA} + \Delta \sigma_h \quad (2.20)$$

$$\text{กรณี Passive Case;} \quad \sigma_h = \sigma_{hP} + \Delta \sigma_h \quad (2.21)$$

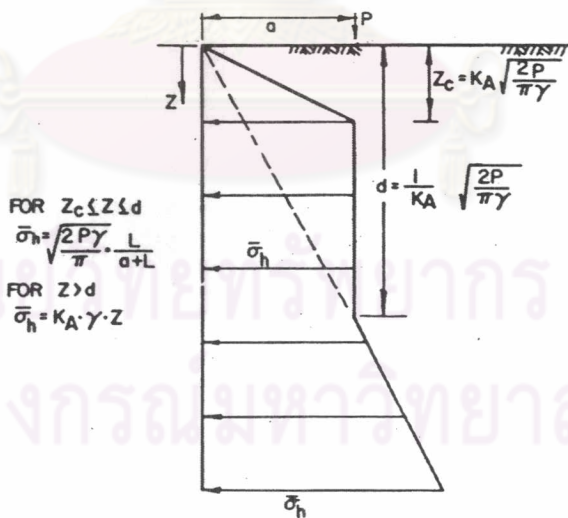
โดยที่  $\Delta \sigma_h$  คือหน่วยแรงดันดินด้านข้างที่เพิ่มขึ้นที่คาดคะเนโดยใช้ Elasticity Theory



รูปที่ 2.7 การคาดคะเนค่า  $\Delta\sigma_h$  เนื่องจากผลของ Line Load และ Concentrated Load กระทำที่ผิวดินด้านหลังกำแพง โดยทฤษฎี Elasticity (DM 7.2, 1982)



รูปที่ 2.8 การคาดคะเนค่า  $\Delta\sigma_h$  เนื่องจากผลของ Uniform Load กระทำที่ผิวดินด้านหลังกำแพง โดยทฤษฎี Elasticity (DM 7.2, 1982)



$P$  (ROLLER LOAD) =  $\frac{\text{DEAD WT. OF ROLLER} + \text{CENTRIFUGAL FORCE}}{\text{WIDTH OF ROLLER}}$

$a$  : DISTANCE OF ROLLER FROM WALL

$L$  : LENGTH OF ROLLER

รูปที่ 2.9 การคาดคะเนค่า  $\Delta\sigma_h$  เนื่องจากผลของของแรงบดอัด กระทำที่ผิวดินด้านหลังกำแพง (DM 7.2, 1982)



## 2.3 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินในงานขุด

ตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ซึ่งเป็นสาเหตุของการวิบัติของโครงสร้างกำแพงกันดินมีดังนี้

- 1) สภาพของชั้นดินและน้ำใต้ดิน
- 2) การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน
- 3) ขนาดและลักษณะของพื้นที่ขุด
- 4) ชนิดและค่าสถิติเฟนสของกำแพงกันดินรวมถึงระยะห่างของค้ำยัน
- 5) น้ำหนักบรรทุกทุกข้างพื้นที่งานขุด
- 6) วิธีและขั้นตอนการก่อสร้าง
- 7) คุณภาพของผู้รับเหมาในการก่อสร้าง (Workmanship)
- 8) ระยะเวลาที่ใช้ในการขุด

ซึ่งในที่นี้จะมุ่งเน้นเฉพาะการเคลื่อนตัวเนื่องจากงานขุดและระบบค้ำยันเท่านั้น

### 2.3.1 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินเนื่องจากงานขุด

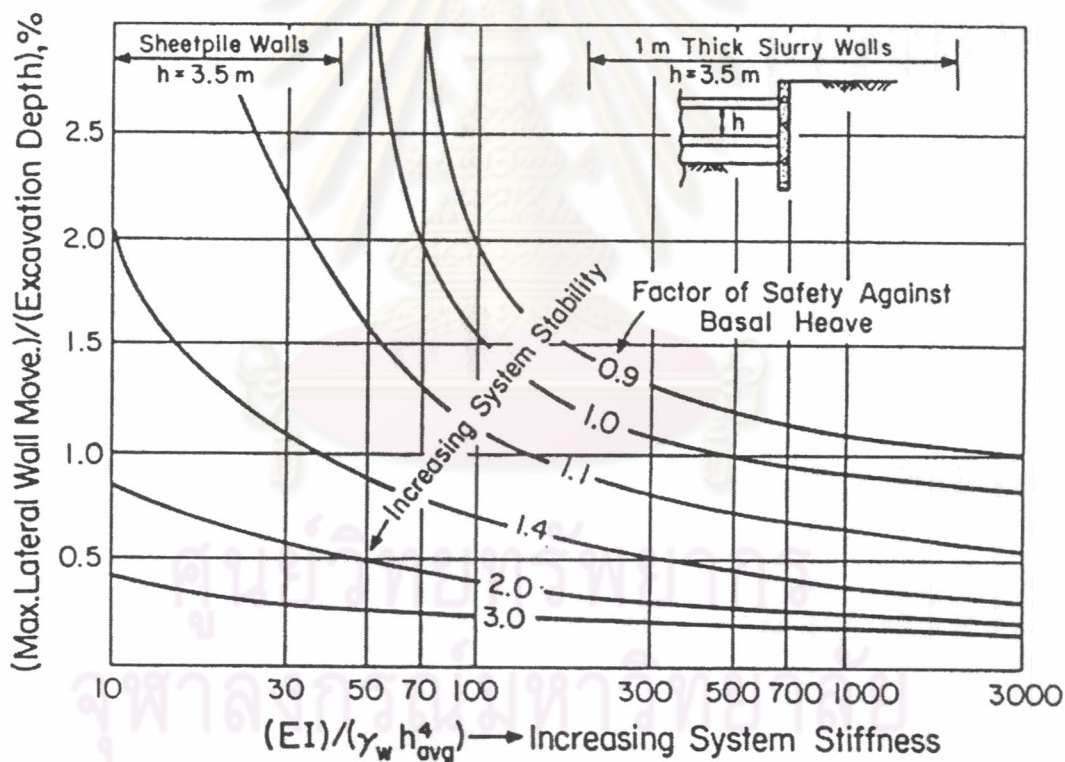
จากการศึกษาของ Clough, Smith and Sweeney (1989) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดินต่อความลึกของการขุดกับ System Stiffness และ Factor of Safety Against Basal Heave (F.S.) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จากความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปนั้นจะเห็นว่าเมื่อค่า F.S. ต่ำกว่า 1.5 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับกรณีที่ F.S. มีค่ามากกว่า 1.5 นอกจากนี้รูปที่ 2.10 ยังแสดงถึงความสำคัญของ Stiffness ของกำแพงกันดินและระยะห่างของระบบค้ำยันต่อการเคลื่อนตัวอีกด้วย คือในกรณีที่ F.S. มีค่าต่ำคือมีค่าเข้าใกล้ 1 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินอาจเกิดขึ้นในปริมาณที่มากกว่า 2% ของงานขุดแม้จะดำเนินการก่อสร้างอย่างถูกต้องหรือมีคุณภาพเพียงใดก็ตาม แต่ในทางกลับกันเมื่อ F.S. มีค่ามากกว่า 2 การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณน้อยกว่า 0.5% ของความลึกงานขุดเท่านั้น

### 2.3.2 การทรุดตัวของดินหลังกำแพงกันดินเนื่องจากงานขุด

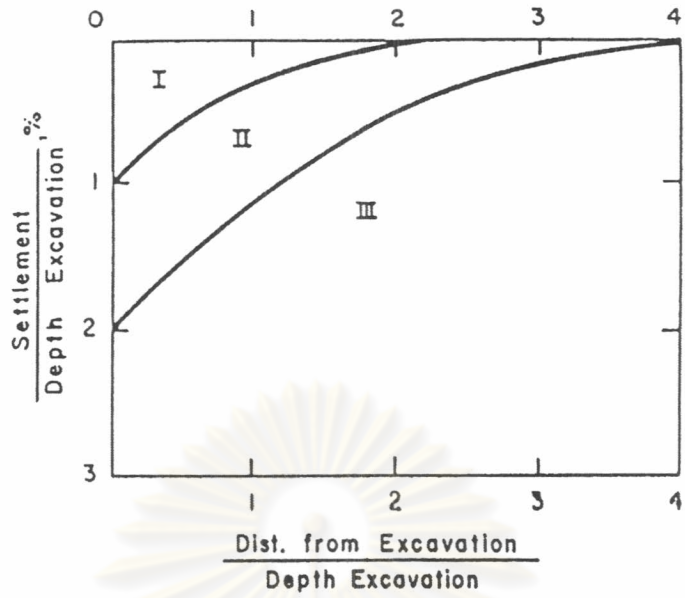
Peck (1969) ได้ทำการศึกษาปริมาณการทรุดตัวของดินหลังกำแพงกันดินชนิด Braced Sheet Pile และ Soldier Pile Wall และได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวต่อความลึกของงานขุดกับระยะทางจากกำแพงกันดินต่อความลึกงานขุดดังรูปที่ 2.11 โดยแบ่งข้อมูลที่ได้ออกเป็น 3 ส่วน คือ ในส่วนที่ I ดินในบริเวณงานขุดเป็นดินจำพวกดินทราย ดินเหนียวแข็งและดินเหนียวอ่อนที่มีความหนาของชั้นดินน้อย ซึ่งในส่วนที่ I นี้จะมีการเคลื่อนตัวของดินเกิดขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทั้ง 3

ส่วน โดยการเคลื่อนตัวที่มากที่สุดคือ 0.1% ของความลึกงานขุดและเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กำแพงกันดิน ส่วนที่ II และ III ดินในบริเวณงานขุดเป็นดินเหนียวอ่อนทั้งสองส่วน แต่ในส่วนที่ II จะใช้กับดินที่อยู่จนสุดความลึกของงานขุดและส่วนที่ III เป็นดินที่อยู่ลึกมากจากระดับขุด ซึ่งการเคลื่อนตัวของดินในทั้ง 2 ส่วนนี้เกิดขึ้นมากเนื่องจาก Plastic Yielding ที่เกิดขึ้นใต้งานขุด

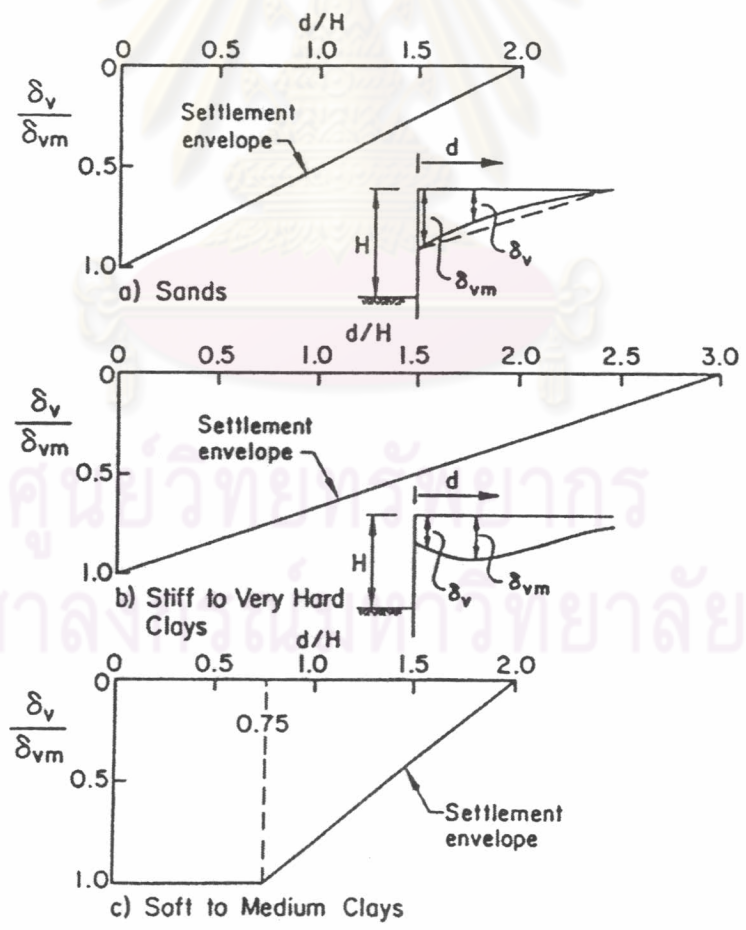
Clough and O'Rourke (1990) ได้เสนอแผนผังในการประมาณการทรุดตัวหลังกำแพงกันดิน โดยแบ่งตามประเภทของดินในงานขุดดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยให้ข้อแนะนำในการใช้แผนผังว่าเป็นการประมาณการทรุดตัวในระหว่างการขุดและการติดตั้งระบบค้ำยันเท่านั้น ไม่รวมถึงในส่วนองงานอื่นๆ ที่ทำในพื้นที่ขุดเช่น Dewatering, งานก่อสร้างหรือรื้อถอนเสาเข็มและงานติดตั้งกำแพงกันดิน ในส่วนของแผนผังสำหรับงานขุดในดินเหนียวแข็งจะใช้ได้ในกรณีกำแพงกันดินมีความมั่นคงและได้รับการก่อสร้างอย่างถูกต้องเท่านั้น



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของกำแพงกันดิน ต่อความลึกของการขุดกับ System Stiffness และ Factor of Safety Against Basal Heave (Clough, Smith and Sweeney, 1989)



รูปที่ 2.11 การทรุดตัวที่ผิวดินที่ระยะห่างจากกำแพงกันดินต่างๆ โดย Peck (1969)



รูปที่ 2.12 การทรุดตัวที่ผิวดินที่ระยะห่างจากกำแพงกันดินต่างๆ แบ่งตามชนิดของดินโดย Clough and O'Rourke (1990)

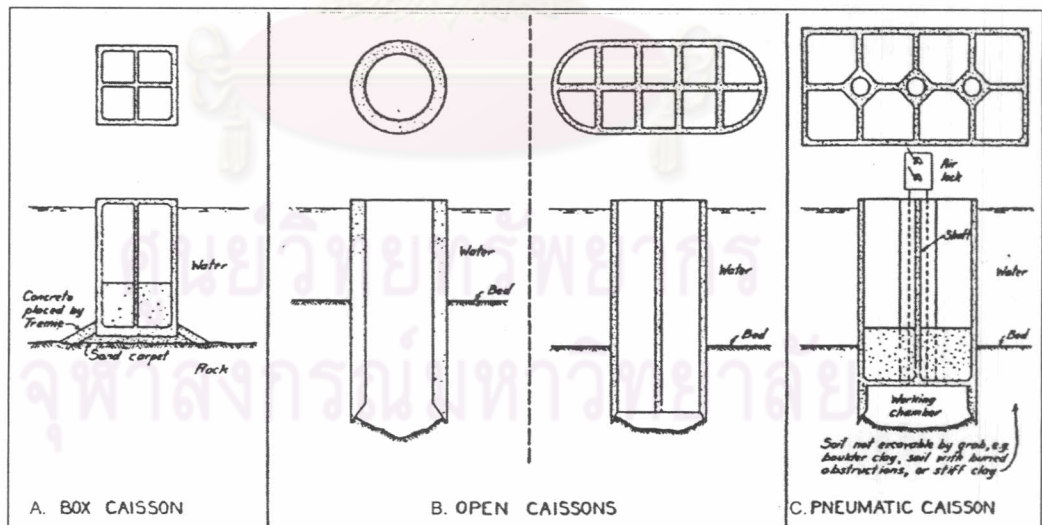


## 2.4 ระบบการจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking Reinforced Concrete Caisson)

เทคนิคการจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปมักนิยมเลือกใช้ในการก่อสร้างฐานรากสำหรับถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างลงสู่ดินระดับลึกที่มีกำลังรับน้ำหนักเพียงพอเหมือนกับฐานรากเสาเข็ม แต่เนื่องจากการก่อสร้างฐานรากโดยเทคนิควิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าฐานรากเสาเข็มมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้เทคนิคการก่อสร้างฐานรากโดยระบบจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กเฉพาะในกรณีดังต่อไปนี้

- 1) การก่อสร้างฐานรากโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกสูงและไม่สามารถใช้วิธีการก่อสร้างฐานรากเสาเข็มในการถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ชั้นดินที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ เนื่องจากมีอุปสรรคในการก่อสร้างเช่นในชั้นดินมีหินขนาดใหญ่ (Boulders) กีดขวางอยู่
- 2) การก่อสร้างฐานรากใต้น้ำ เช่นการทำฐานรากของสะพานข้ามแม่น้ำหรือท่าเทียบเรือ เป็นต้น ซึ่งในการออกแบบต้องคำนึงถึงแรงกระทำต่อฐานรากเนื่องจากกระแสน้ำรวมทั้งการกัดเซาะที่อาจเกิดขึ้นด้วย
- 3) ฐานรากของโครงสร้างที่ต้องมีความสามารถในการรับแรงในแนวราบสูง เช่น เสาไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น

รูปแบบของระบบการจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแบ่งตามวิธีการก่อสร้างมี 3 ชนิด ดังนี้



รูปที่ 2.13 รูปแบบของระบบการจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 ชนิด (Lee, 1961)

- (a) Box Caisson
- (b) Open Caisson
- (c) Pneumatic Caisson



#### 2.4.1 ระบบจมน้ำบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดปลายด้านล่างปิด (Box Caisson)

เป็นระบบจมน้ำบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในกรณีที่ต้องทำการก่อสร้างใต้น้ำและระดับดินที่มีกำลังเหมาะสมในการรองรับน้ำหนักที่ถ่ายจากบ่อคอนกรีตฯ (Bearing Surface) จะต้องอยู่ไม่ลึกมากนัก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดินไหลเข้าในพื้นที่ขณะทำการปรับระดับพื้นดินบริเวณที่เป็นฐานรองรับบ่อคอนกรีตฯ โดยลักษณะของบ่อคอนกรีตฯ เป็นแบบปลายล่างปิดดังแสดงในรูปที่ 2.13A

การก่อสร้างเริ่มจากการทำโครงสร้างผนังของบ่อบนพื้นดิน หลังจากบ่อคอนกรีตจนได้กำลังเพียงพอแล้วจึงทำการลากจูงบ่อคอนกรีตฯ ไปติดตั้งในพื้นที่ทำการก่อสร้าง แล้วจึงทำการจมน้ำบ่อคอนกรีตฯ ด้วยการเพิ่มน้ำหนักของบ่อคอนกรีตฯ ให้จมลงไปยังระดับ Bearing Surface โดยการเทวัสดุถ่วงน้ำหนักลงไปภายในบ่อ เช่นทราย, น้ำ, กรวด หรือคอนกรีต เป็นต้น หลังจากทำการจมน้ำบ่อฯ จนถึงระดับที่ต้องการแล้วต้องทำการป้องกันการกัดเซาะดินที่บริเวณปลายล่างของบ่อจากกระแสการถล่มทรายหรือกรวดแล้วเทคอนกรีตปิดทับหน้า

#### 2.4.2 ระบบจมน้ำบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดปลายทั้ง 2 ด้านเปิด (Open Caisson)

ระบบ Open Caisson สามารถใช้ในการถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างลงสู่ดินที่มีระดับลึกมากได้และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างค่อนข้างต่ำ โดยลักษณะของบ่อคอนกรีตฯ ชนิดนี้ปลายบนและล่างของบ่อจะเปิดตลอดเวลาที่ทำการก่อสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.13B

ในการก่อสร้างบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กโดยระบบนี้จะทำการก่อสร้างผนังบ่อทีละชั้น (Lift) แล้วจึงทำการจมน้ำบ่อลงไปด้วยน้ำหนักของตัวเอง โดยเริ่มแรกของการก่อสร้างนั้นจะต้องทำการปรับพื้นที่ที่ทำการก่อสร้างก่อนแล้วจึงสร้างขอบตัด (Cutting Shoe) ซึ่งเป็นส่วนล่างสุดของบ่อคอนกรีตฯ บนพื้นที่ที่จะทำการก่อสร้าง หลังจากนั้นจึงทำการหล่อผนังคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนปลายล่างขึ้น เมื่อบ่อคอนกรีตได้ที่แล้วจึงเริ่มขุดดินภายในบ่อเพื่อลดแรงเสียดทาน (Skin Friction) ระหว่างดินและผนังด้านในบ่อ ซึ่งแรงด้านนี้จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินในพื้นที่ก่อสร้าง โดยในขณะที่ทำการขุดดินนั้นตัวบ่อคอนกรีตฯ จะค่อยๆ จมลงไปในพื้นดิน นอกจากวิธีการขุดดินเพื่อลดแรงต้านทานภายในแล้ว การลดแรงต้านทานที่เกิดขึ้นจากดินภายนอกบ่อคอนกรีตฯ ยังสามารถทำได้โดยใช้วัตถุหล่อลื่น (Lubricant) เช่นน้ำหรือสารละลาย Bentonite ช่วยลดแรงเสียดทานของดินที่กระทำต่อผนังด้านนอกของบ่อควบคู่กันไปด้วย ซึ่งจะช่วยให้บ่อคอนกรีตฯ มีอัตราการจมที่เร็วขึ้นกว่าการขุดดินภายในบ่อเพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นทำการก่อสร้างผนังบ่อส่วนบนชั้นต่อไป ใช้วิธีการเช่นเดิมในการลดแรงเสียดทานภายในและภายนอกของบ่อ ทำเช่นนี้ซ้ำๆ กันจนกระทั่งปลาย Cutting Shoe ฝังลึกถึงระดับที่ต้องการ ชั้นสุดท้ายจึงเท

Concrete Plug ที่กันบ่อฯ โดยใช้ท่อ Tremie ในกรณีที่ส่วนปลายล่างบ่อจมอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน แล้วจึงทำการสูบน้ำภายในบ่อออกก่อนทำการเทคอนกรีตหรือทรายจนเต็ม ซึ่งในระหว่างการจมนบ่อคอนกรีตฯ นั้นต้องทำการตรวจสอบและควบคุมความเอียงของบ่อ (Tilting) ตลอดเวลาที่ทำการจมนด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้บ่อคอนกรีตฯ เกิดการหนีศูนย์กลางมากเกินไปกว่าค่าที่ยอมให้ ภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการจมนบ่อคอนกรีตฯ แล้ว

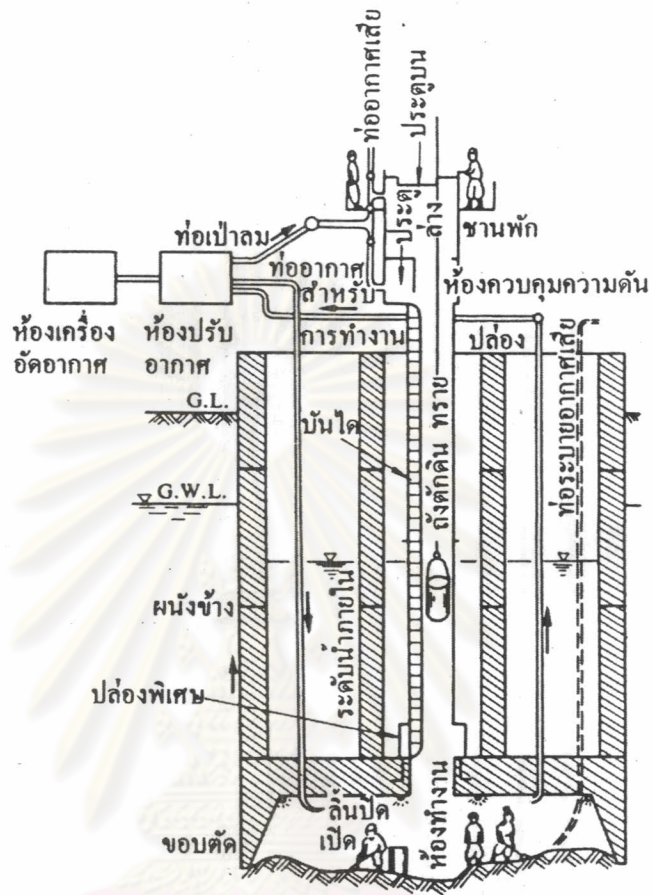
#### 2.4.3 ระบบจมนบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดอัดลม (Pneumatic Caisson)

ระบบ Pneumatic Caisson ดังแสดงในรูปที่ 2.13C เป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างค่อนข้างสูงและมีวิธีการที่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับระบบอื่น แต่ในขณะเดียวกันก็เป็นระบบที่สามารถควบคุมคุณภาพของงานได้ดีกว่าระบบอื่นๆ เนื่องจากสามารถควบคุมไม่ให้น้ำไหลเข้ามาภายในบ่อในขณะที่ทำการก่อสร้างได้โดยการปรับความดันอากาศที่ปลายล่างของบ่อคอนกรีตฯ ที่เรียกว่าห้องทำงาน (Working Chamber) ให้มากพอที่จะต้านแรงดันจากน้ำใต้ดิน และจากการที่ต้องปรับความดันนี้เองระบบ Pneumatic Caisson จึงมักใช้สำหรับการจมนบ่อที่มีความลึกไม่เกิน 120 ฟุต (50 psi.) จากระดับน้ำใต้ดิน (Teng, 1981) เนื่องจากอาจเกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์จากการทำงานภายใต้ความกดดันสูงภายในห้องทำงานได้

ลักษณะของบ่อคอนกรีตฯ ชนิดนี้เป็นแบบปลายบนปิด ส่วนปลายล่างของบ่อจะใช้เป็นห้องทำงานซึ่งมีความสูงจากเพดานถึงปลาย Cutting Shoe เพียงพอที่จะให้คนงานเข้าไปปฏิบัติการขุดดินภายในห้องทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.14 ส่วนลักษณะภายในของบ่อคอนกรีตฯ จะมีช่องปรับความดันที่บริเวณกลางบ่อ ใช้สำหรับการลำเลียงวัสดุและดินที่ขุดออกมา รวมทั้งเป็นช่องทางให้คนงานเข้าออกอีกด้วย

วิธีการก่อสร้างโดยทั่วไปมีหลักการและวิธีการที่คล้ายกับระบบ Open Caisson คือจะทำการก่อสร้างผนังบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กทีละชั้น โดยให้บ่อคอนกรีตฯ จมลงไปในดินด้วยน้ำหนักของตัวเอง ทำการขุดดินภายในห้องทำงานที่ปลายล่างของบ่อเพื่อลดแรงเสียดทานภายในบ่อคอนกรีตฯ แต่ในระบบการจมน Pneumatic Caisson นั้นสามารถใช้การควบคุมความกดดันอากาศภายในห้องทำงานเพื่อช่วยในการจมนบ่อในช่วงแรกซึ่งปลาย Cutting Shoe ยังอยู่ในดินเหนียวซึ่งมีอัตราการไหลซึมของน้ำในดินต่ำได้ โดยการลดความดันอากาศในห้องทำงานภายหลังจากที่ให้คนงานออกจากห้องทำงานแล้ว หลังจากทำการจมนบ่อคอนกรีตฯ จนถึงระดับดินที่ต้องการแล้วจึงทำการเท Concrete Plug ที่กันบ่อฯ โดยใช้ท่อ Tremie แล้วจึงทำการสูบน้ำภายในบ่อออกก่อนทำการเทคอนกรีตหรือทรายจนเต็ม สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการก่อสร้างด้วยระบบการจมน Pneumatic Caisson นั้นคือเรื่องความปลอดภัยในการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องระบบการ

ควบคุมความกดดันอากาศและระบบหมุนเวียนอากาศภายในห้องทำงานที่ต้องทำการดูแลให้อยู่ในสภาพที่สามารถทำงานได้ตลอดเวลา



รูปที่ 2.14 ลักษณะของบ่อคอนกรีตๆ ที่ก่อสร้างโดยระบบ Pneumatic Caisson (ชัย, 2540)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย