

## บทที่ 4

### การทรุดตัวของฐานราก (Settlement of Foundation)

#### 4.1 คำนำ (Introduction)

การทรุดตัวของฐานราก หมายถึงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของฐานรากตามการเสียรูปของดิน เนื่องจากความดันที่ฐานรากนั้นกระทำต่อดิน ซึ่งอาจทำให้อาคารเกิดความเสียหายได้

สำหรับอาคารทั่วไปที่ไม่ได้ออกแบบเพื่อสำหรับแผ่นดินไหว และไม่ได้ก่อสร้างบนดินที่มีปัญหาคือดินยุบตัว (Collapsible Soil) และดินเหนียวขยายตัว (Expansive Clay) ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 แล้ว การทรุดตัวของฐานรากเกิดจากพฤติกรรมของดิน 3 ประเภทคือ

1) การเสียรูปจากการยืดหยุ่น (Elastic Deformation) หรือการเสียรูปทันทีทันใด (Immediate Deformation) เป็นการเสียรูปเนื่องปรับตัวของเม็ดดินในทำนองเดียวกับเหล็กหรือคอนกรีตเสียรูปเมื่อมีแรงกระทำ เกิดขึ้นทั้งในดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil) และดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil) ทำให้เกิดการทรุดตัวทันทีที่มีความดันกระทำต่อดิน

2) การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) เป็นกระบวนการที่เมื่อดินอิ่มตัวได้รับความดัน น้ำจะรับความดันนั้นในทันทีที่ถูกกระทำ เมื่อเวลาผ่านไปน้ำที่มีความดันสูงกว่าปกติจะไหลออกจากดินทำให้ปริมาตรของดินลดลง จึงเกิดการทรุดตัวซึ่งระยะเวลาของการทรุดตัวจะขึ้นอยู่กับประเภทของดิน ดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) สูง เช่นกรวดและทราย จะเกิดขึ้นเร็วมากจนไม่สามารถแยกการทรุดตัวนี้ออกจากการทรุดตัวเนื่องจากการเสียรูปทันทีทันใดได้ แต่ดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านต่ำ เช่นดินเหนียว จะใช้เวลาในการทรุดตัวนานกว่ากระบวนการนี้จะเสร็จสิ้น

3) การอัดตัวระยะที่สองและการด้า (Secondary Compression and Creep) เป็นการเสียรูปโดยที่ปริมาณน้ำในดินคงที่ เกิดในดินเม็ดละเอียด เช่นดินเหนียวและดินตะกอนทราย ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดหลังจากการอัดตัวคายน้ำเสร็จสิ้นแล้ว ดังนั้น การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวระยะที่สองและการด้านี้ จึงเกิดหลังจากการก่อสร้างอาคารเสร็จจึ้นแล้วและการทรุดตัวก็มีค่าน้อย

#### 4.2 ขีดจำกัดของการทรุดตัว (Limitation of Settlement)

อาคารอาจเกิดการทรุดตัวเฉลี่ยของทั้งหลังได้มากที่สุดดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.1 (ASCE, 1994) โดยที่อาคารส่วนใหญ่ไม่ควรให้การทรุดตัวมากเกินไปเกิน 2.5 เซนติเมตร อย่างไรก็ตาม อาคารบางประเภทเช่น ไซโลและหอ อาจยอมให้ทรุดตัวได้มากถึง 30 ซม.

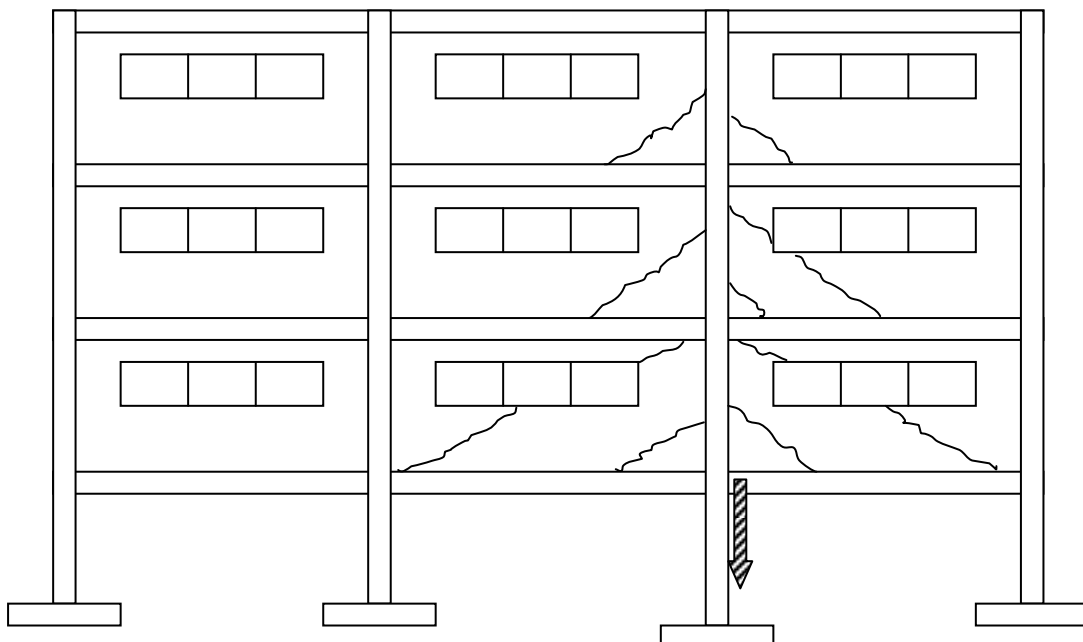
ตารางที่ 4.1 ค่าการทรุดตัวเฉลี่ยสูงสุดที่ยอมให้ของอาคาร

ประเภทของอาคาร	ค่าการทรุดตัว, ซม.
อาคารที่ใช้กำแพงอิฐ มีอัตราส่วนความยาวต่อความสูงเกิน 2.5	7.5
อาคารที่ใช้กำแพงอิฐ มีอัตราส่วนความยาวต่อความสูงไม่เกิน 1.5	10.0
โครงสร้างที่เป็นโครงข้อแข็ง	10.0
อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กำแพงอิฐ	15.0
ไซโล หอ และอาคารที่ใช้งานในลักษณะเดียวกัน และใช้ฐานรากแผ่ พื้นรวมคอนกรีตเสริมเหล็ก	30.0

การทรุดตัวที่ยอมให้ของอาคารทั้งหลังนั้น อาจพิจารณาจากเหตุผลอื่นๆ อีก เช่น ความเสียหายของระบบสาธารณูปโภค การระบายน้ำ และการเชื่อมต่อกับถนนที่เข้าสู่อาคาร เป็นต้น

#### 4.3 การทรุดตัวไม่เท่ากัน (Differential Settlement)

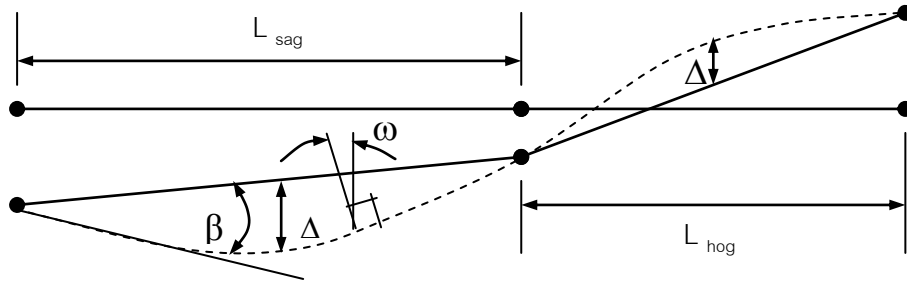
อาคารโดยทั่วไป จะมีฐานรากหลายตัว หากฐานรากแต่ละตัวทรุดไม่เท่ากันแล้ว อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 อาคารที่มีปัญหานี้จะทำให้ประตูหน้าต่างใช้งานไม่ได้ ระบบประปาเสียหาย และถ้ารุนแรงมากก็อาจทำให้อาคารพังทลายได้



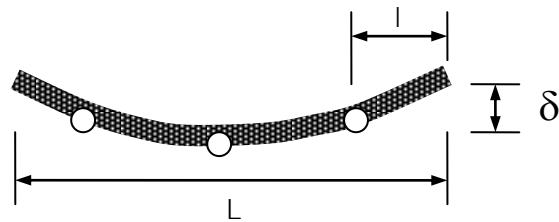
รูปที่ 4.1 ความเสียหายของโครงสร้างเนื่องจากการทรุดตัวไม่เท่ากันของฐานราก

การพิจารณาความรุนแรงของปัญหาการทรุดตัวไม่เท่ากันนั้น อาจพิจารณาจากอัตราส่วนการแอ่นตัว (Deflection Ratio) หรือมุมของการบิด (Angular Distortion) ดังแสดงในรูปที่ 4.2

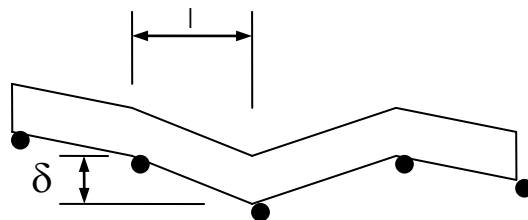
และในสมการที่ 4.1 และ 4.2 สำหรับค่าการแอ่นตัวและค่ามุมของการบิดที่ยอมให้ แสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ สำหรับค่ามุม  $\omega$  นั้นเป็นมุมของการเอียงของอาคาร (Tilt) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ถ้ามีค่ามากกว่า 1/250 ขีดจำกัดของค่าการเอียงนี้ ขึ้นอยู่กับการรบกวนต่ออาคารข้างเคียง (ASCE, 1994)



ก. การทรุดตัวแบบผสม (Combination Settlement)



ข. การทรุดตัวแบบสม่ำเสมอ (Regular Settlement)



ค. การทรุดตัวแบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular Settlement)

รูปที่ 4.1 การทรุดตัวไม่เท่ากัน

$$\chi = \Delta/L \quad (4.1)$$

$$\beta = \delta/l \quad (4.2)$$

โดย  $\chi$  = อัตราส่วนการแอ่นตัว เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะเคลื่อนตัวสูงสุด ( $\Delta$ ) กับช่วงความยาว ( $L_{\text{sag}}$  หรือ  $L_{\text{hog}}$ ) ซึ่งอาจเป็นช่วงระหว่างเสา 2 ต้น

$\beta$  = มุมของการบิด เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะเคลื่อนตัว ( $\delta$ ) กับช่วงความยาว ( $l$ )

$L_{\text{sag}}$  = ความยาวที่แอ่นลง

$L_{\text{hog}}$  = ความยาวที่โก่งขึ้น

ตารางที่ 4.2 ค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ของอาคาร

ประเภทของอาคาร	ค่าการแอ่นตัว ( $\Delta/L$ )	
	ทรายและดินเหนียวแข็ง	ดินเหนียวพลาสติก
อาคารที่ใช้กำแพงอิฐ มีอัตราส่วนความยาวต่อความสูงเกิน 3	1/3333	1/2500
อาคารที่ใช้กำแพงอิฐ มีอัตราส่วนความยาวต่อความสูงเกิน 5	1/2000	1/1500
โรงงานชั้นเดียว	1/1000	1/1000
โครงข้อแข็งเหล็กหรือคอนกรีต	1/500	1/500

ตารางที่ 4.3 ค่ามุมของการบิดที่ยอมให้ของอาคาร

ลักษณะโครงสร้าง	ความยาวต่อความสูง	ค่ามุมของการบิด ( $\delta/l$ )
การโก่งตัวของกำแพงไม่เสริมเหล็กที่ใช้น้ำหนักบรรทุก	-	1/2000
กำแพงอิฐหรืออิฐบล็อกที่ใช้น้ำหนักบรรทุก	$\geq 5$	1/1250
กำแพงอิฐหรืออิฐบล็อกที่ใช้น้ำหนักบรรทุก	$\leq 3$	1/2500
การแอ่นตัวของกำแพงไม่เสริมเหล็กที่ใช้น้ำหนักบรรทุก	-	1/1000
เครื่องจักรที่อาจเสียหายจากการเคลื่อนที่	-	1/750
โครงข้อแข็งที่มีชิ้นส่วนในแนวทแยงมุม	-	1/600
อาคารทั่วไปที่ไม่มีรอยแตกร้าว อาคารสูงเช่นถังน้ำ ไฮโด ที่มีฐานรากแผ่พื้นรวม	-	1/500
อาคารเหล็กหรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐฉาบปูน	$\geq 5$	1/500
อาคารเหล็กหรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐฉาบปูน	$\leq 3$	1/1000
เมื่อพิจารณาการเอียงของอาคารสูงทั้งหลาย	-	1/250

#### 4.4 การทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate Settlement)

การประมาณค่าการทรุดตัวทันทีทันใดของฐานรากนั้น แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ ฐานรากอยู่บนดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว กับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว

##### 4.4.1 ฐานรากในดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesionless Soil)

การทรุดตัวของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวนั้น เกิดขึ้นไม่มากและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การทรุดตัวในระยะเวลายาวมีน้อยมาก การประมาณค่าการทรุดตัวใช้สมการที่ได้จากการศึกษาข้อมูลตรงจากสนาม (Empirical and Semiempirical Method) เนื่องจากยากที่จะเก็บตัวอย่างคงสภาพมาทดสอบหาคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ

จากการทดลอง พบว่าค่าการทรุดตัวที่ได้อยู่ระหว่าง 1/4 ถึง 2 เท่าของค่าที่เกิดขึ้นจริง นั่นคือมีแนวโน้มจะคาดคะเนสูงเกินไป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทดสอบทะลวงมาตรฐานไม่สามารถแสดงความเกี่ยวข้องกับการอัดแน่นเกินตัวของดิน และประมาณค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของดินต่ำเกินไป

##### Alpan Approximation

เป็นการประมาณโดยใช้สมการที่ 4.3 ซึ่งได้จากการศึกษาค่าการทรุดตัวของแผ่นเหล็กขนาด 1 ตารางฟุตเทียบกับค่าการทดสอบทะลวงมาตรฐาน

$$\rho_i = m' \cdot \left[ \frac{0.6096B}{0.3048+B} \right]^2 \cdot \frac{\alpha_0}{12} \cdot q \quad (4.3)$$

โดย  $\rho_i$  = ค่าการทรุดตัวทันทีทันใด หน่วยเป็นฟุต

$m'$  = ค่าตัวประกอบรูปร่าง =  $(L/B)^{0.39}$

$L$  = ความยาวของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

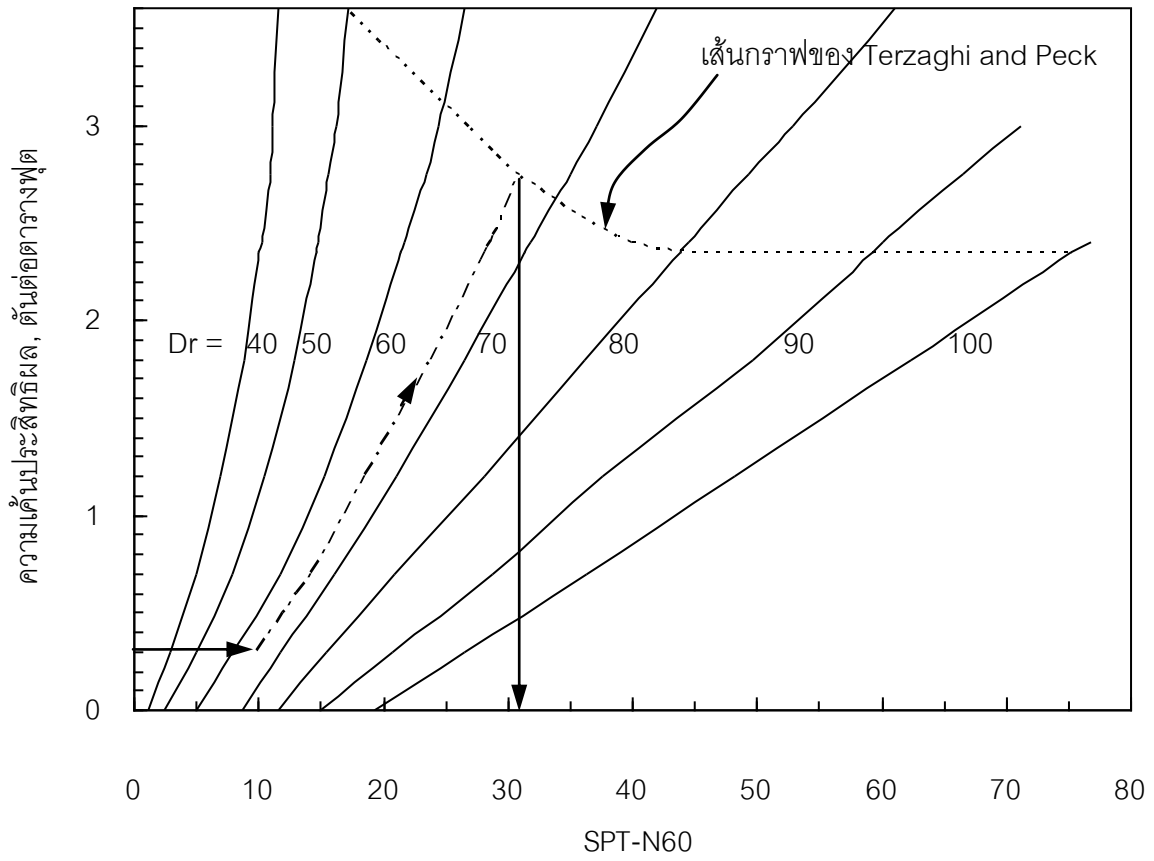
$B$  = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

$\alpha_0$  = ค่าจากกราฟในรูปที่ 4.3 โดยใช้ค่า  $N'_{60}$  หน่วยเป็นนิ้วต่อตันต่อตารางฟุต

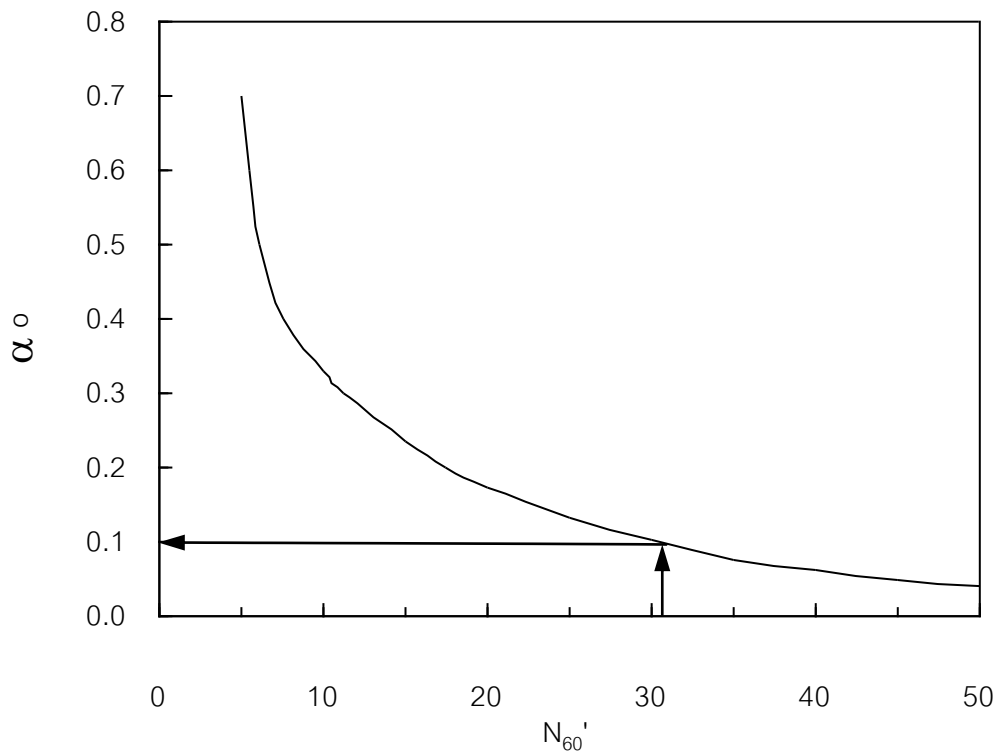
$N'_{60}$  = ค่า SPT- $N_{60}$  ที่ปรับแก้โดยใช้ค่าความเค้นประสิทธิผล ดังรูปที่ 4.2

$q$  = ค่าความดันที่ฐานรากกระทำต่อดินหน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

ตัวอย่างเช่น ที่ค่าความเค้นประสิทธิผล 0.3 ตันต่อตารางฟุตได้ค่า  $N_{60}$  เป็น 10 จากรูปที่ 4.2 จะได้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็น 67 เปอร์เซ็นต์ และได้ค่า  $N'_{60}$  เป็น 31 ซึ่งจะได้ค่า  $\alpha_0$  จากรูปที่ 4.3 เป็น 0.1 นิ้วต่อตันต่อตารางฟุต



รูปที่ 4.2 การปรับค่า SPT- $N_{60}$  ไปเป็น  $N'_{60}$

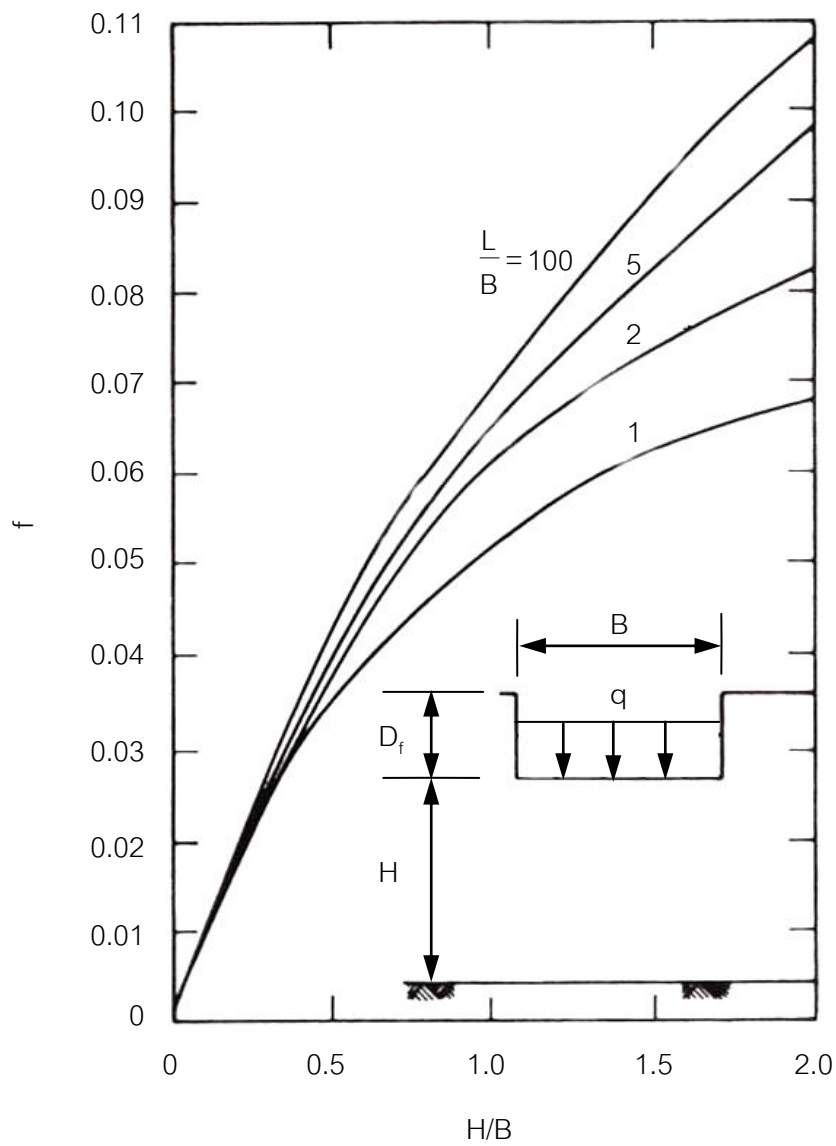


รูปที่ 4.3 การหาค่า  $\alpha_0$  จาก  $N'_{60}$

Schultze and Sherif Approximation

เป็นการประมาณโดยใช้สมการที่ 4.4 ซึ่งได้จากกรณีศึกษา 48 กรณี เทียบกับผลการทดสอบ  
 ทะลวงมาตรฐาน

$$\rho_i = \frac{f \times q \times \sqrt{B}}{N_{60(ave)}^{0.87} \times \left( 1 + 0.4 \frac{D_f}{B} \right)} \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.4 ค่าตัวประกอบ  $f$

โดย  $\rho_i$  = ค่าการทรุดตัวทันทีที่ทันใด หน่วยเป็นฟุต

$f$  = ค่าตัวประกอบของอิทธิพลจากรูปร่าง จากรูปที่ 4.4

$q$  = ค่าความดันที่ฐานรากกระทำต่อดินหน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$B$  = ความยาวของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

$L$  = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

$D_f$  = ความลึกของฐานรากจากผิวดิน หน่วยเป็นฟุต

$H$  = ความลึกจากใต้ฐานรากลงไปถึงชั้นดินแข็ง หน่วยเป็นฟุต

$N_{60(\text{avg})}$  = ค่าเฉลี่ยของ  $N_{60}$  ตลอดความหนา  $H$

#### Modified Terzaghi and Peck Approximation

เป็นการปรับปรุงการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความดันที่กดทับและน้ำใต้ดินของเทอซากิและเป็ค โดยการปรับค่า SPT-N ให้เป็น  $N'$  ดังสมการที่ 4.5

$$N_{60}' = N_{60} \cdot C_w \cdot C_N \quad (4.5)$$

$$C_w = 0.5 + 0.5 \times \frac{D_w}{D_f + B} \quad (4.6)$$

โดย  $C_N$  = ค่าปรับแก้เนื่องจากความเค้นประสิทธิผลให้เทียบเท่า 1 ตันต่อตารางฟุตโดยใช้กราฟในรูปที่ 4.5

$D_w$  = ความลึกจากระดับฐานรากลงไปถึงระดับน้ำใต้ดิน

$C_w$  จะมีค่าเป็น 0.5 ถ้าระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ผิวดิน และมีค่าเป็น 1 ถ้าเป็นทรายแห้งหรือระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกกว่า  $D_f + B$  ใต้ผิวดิน

ค่าการทรุดตัวเป็นดังสมการที่ 4.7

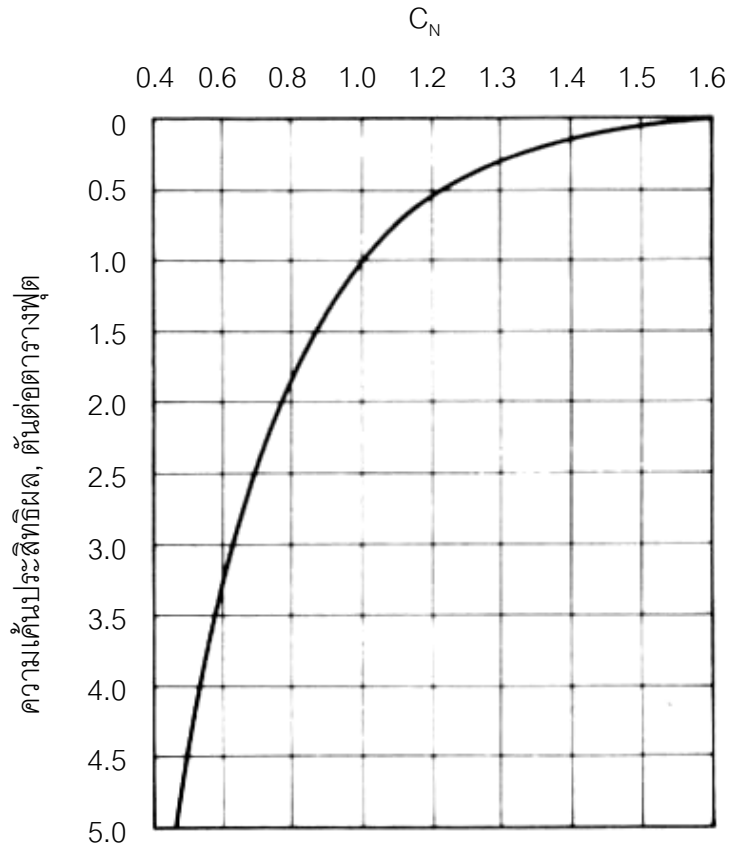
$$\rho_i = \frac{q}{18 \cdot q_1} \quad (4.7)$$

โดย  $\rho_i$  = ค่าการทรุดตัวทันทีที่ทันใด หน่วยเป็นฟุต

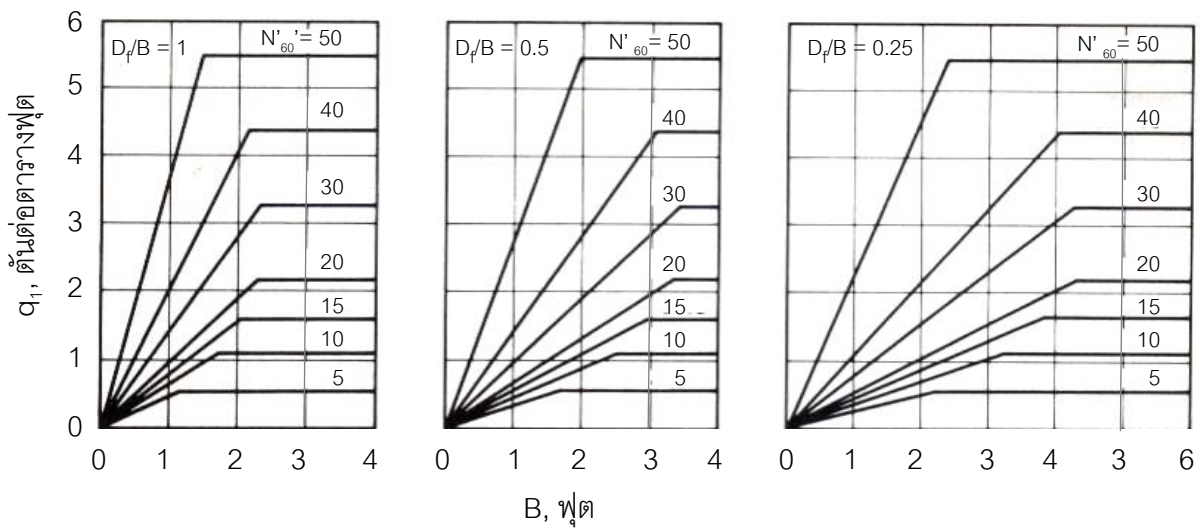
$q$  = ค่าความดันที่ฐานรากกระทำต่อดินหน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$q_1$  = ความดันของดินจากกราฟในรูปที่ 4.6





รูปที่ 4.5  $C_N$  สำหรับปรับแก้ค่า  $N_{60}$



รูปที่ 4.6 การหาค่า  $q_1$

### Schmertmann Approximation

วิธีนี้แบ่งดินออกเป็นหลายๆ ชั้น แล้วประมาณค่าการทรุดตัวโดยสมการที่ 4.8 ทั้งนี้ ความหมายของตัวแปรต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ค่าการทรุดตัวโดยวิธีนี้สามารถประมาณในระยะยาวหลายปีได้

$$\rho_i = C_1 \cdot C_t \cdot \Delta p \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{E_{si}} \cdot I_{zi} \quad (4.8)$$

$$C_1 = 1 - \frac{0.5\sigma'_{0D}}{\Delta p} \geq 0.5 \quad (4.9)$$

$$C_t = 1 + 0.2 \log\left(\frac{t}{0.1}\right) \quad (4.10)$$

โดย  $\rho_i$  = ค่าการทรุดตัวทันทีที่ทันใด หน่วยเป็นฟุต

$\Delta p$  = ความดันสุทธิที่ฐานรากกระทำต่อดิน =  $q - \sigma'_{0D}$  หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$q$  = ความดันทั้งหมดจากฐานราก หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$\sigma'_{0D}$  = ความเค้นประสิทธิผลที่ระดับฐานรากซึ่งอยู่ลึก  $D_f$  หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$D_f$  = ความลึกของฐานรากจากผิวดิน หน่วยเป็นฟุต

$\Delta z_i$  = ความหนาของดินแต่ละชั้น =  $0.2B$  หน่วยเป็นฟุต

$B$  = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

$L$  = ความยาวของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

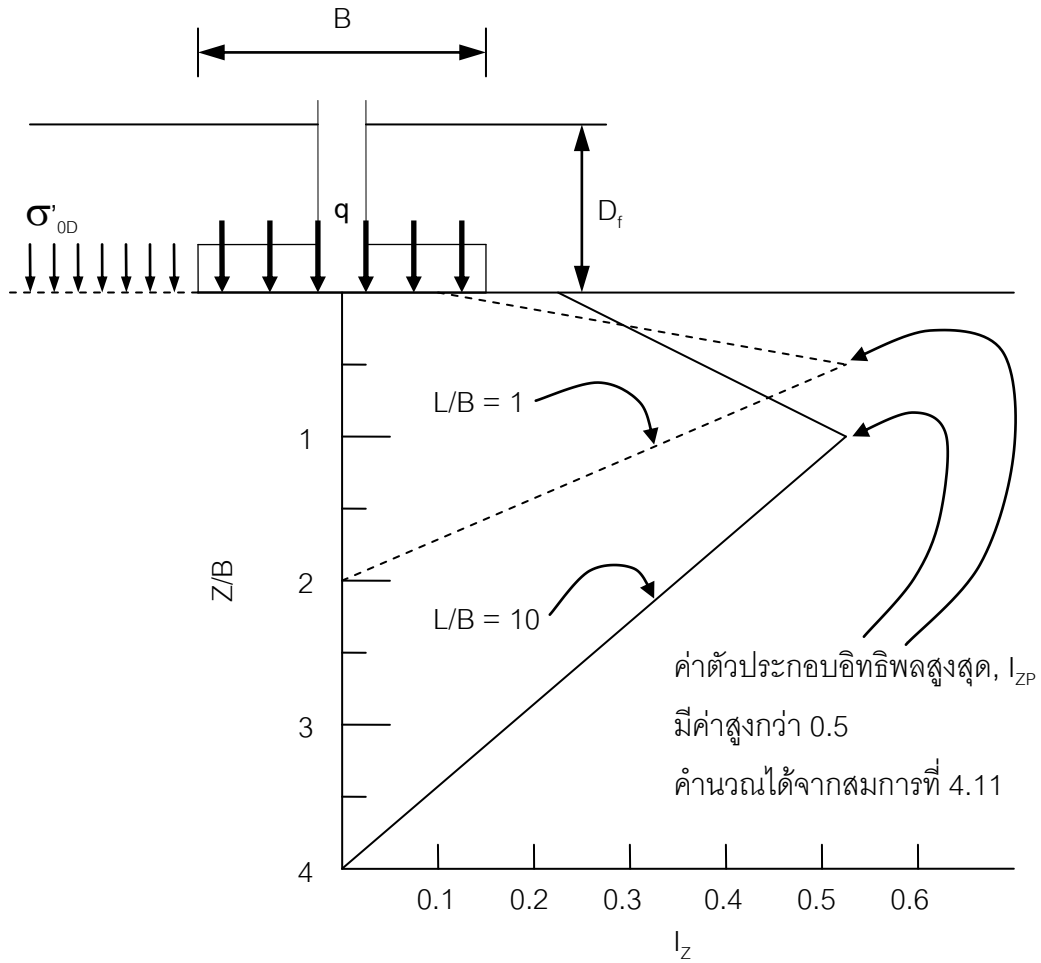
$E_{si}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของดิน หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$I_{zi}$  = ค่าตัวประกอบอิทธิพลของความลึก เป็นค่าที่ได้มาจากสมมุติฐานว่าดินเป็นวัสดุยืดหยุ่นของบูลิเนสค์ (Boussinesq)

$t$  = ระยะเวลาหลังจากความดันกระทำต่อดิน หน่วยเป็นปี

ค่าตัวประกอบอิทธิพลของความลึกในแต่ละชั้นดินนั้น ถ้าเป็นฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Axisymmetric,  $L/B=1$ ) จะมีค่าเป็น 0.1 และ 0 เมื่อ  $Z/B$  เป็น 0 และ 2 ตามลำดับ ถ้าเป็นฐานรากแถบ (Plane Strain,  $L/B=10$ ) จะมีค่าเป็น 0.2 และ 0 เมื่อ  $Z/B$  เป็น 0 และ 4 ตามลำดับ จากนั้นหาค่าตัวประกอบนี้สำหรับค่า  $Z/B$  อื่นๆ โดยการประมาณ (Interpolation) จากค่าเหล่านี้

และค่าตัวประกอบอิทธิพลของความลึกสูงสุด (Peak Depth Influence Factor,  $I_{zp}$ ) จากสมการที่ 4.11 (ดูรูปที่ 4.7 ประกอบ)



รูปที่ 4.7 ความหมายของตัวแปรสำหรับวิธีของชเมิทมาน

$$I_{zp} = 0.5 + 0.1 \left[ \frac{\Delta p}{\sigma'_{I_{zp}}} \right]^{1/2} \quad (4.11)$$

กรณีที่  $L/B = 1$        $\sigma'_{I_{zp}} = 0.5 \cdot B \cdot \gamma' + D_f \cdot \gamma'$       (4.12)

กรณีที่  $L/B \geq 10$        $\sigma'_{I_{zp}} = B \cdot \gamma' + D_f \cdot \gamma'$       (4.13)

ในกรณีที่  $L/B$  มีค่าระหว่าง 1 ถึง 10 ค่า  $\sigma'_{I_{zp}}$  จะอยู่ระหว่างสมการที่ 4.12 และ 4.13 หาโดยใช้วิธีประมาณ (Interpolation) ค่าตัวประกอบอิทธิพลของความลึกที่  $Z/B = 0$  จะอยู่ระหว่าง 0.1

และ 0.2 และค่าตัวประกอบอิทธิพลของความลึกจะมีค่าเป็น 0 เมื่อ อยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 ทั้งนี้ หาค่าโดยใช้วิธีประมาณเช่นกัน

สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินนั้น หากไม่สามารถหาค่าโดยตรงได้ อาจประมาณจากผล การทดสอบทะลวงโดยกรวย (Cone Penetration Test, CPT) ดังสมการที่ 4.14 และ 4.15 และถ้า ค่า L/B อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ให้ใช้วิธีประมาณ

$$\text{กรณีที่ } L/B = 1 \quad E_{si} = 2.5 \cdot q_c \quad (4.14)$$

$$\text{กรณีที่ } L/B \geq 10 \quad E_{si} = 4.5 \cdot q_c \quad (4.15)$$

โดย  $q_c$  = แรงต้านที่ปลายโคน หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนระหว่างผลของ CPT กับ SPT

ประเภทของดิน	$q_c/N_{60}$
ตะกอนทราย ทรายปนตะกอนทราย ทรายและตะกอนทรายปนดินเหนียวเล็กน้อย	2
ทรายละเอียดถึงปานกลาง มีตะกอนทรายปนเล็กน้อย	3.5
ทรายหยาบ ทรายที่มีกรวดปนเล็กน้อย	5
กรวด กรวดปนทราย	6

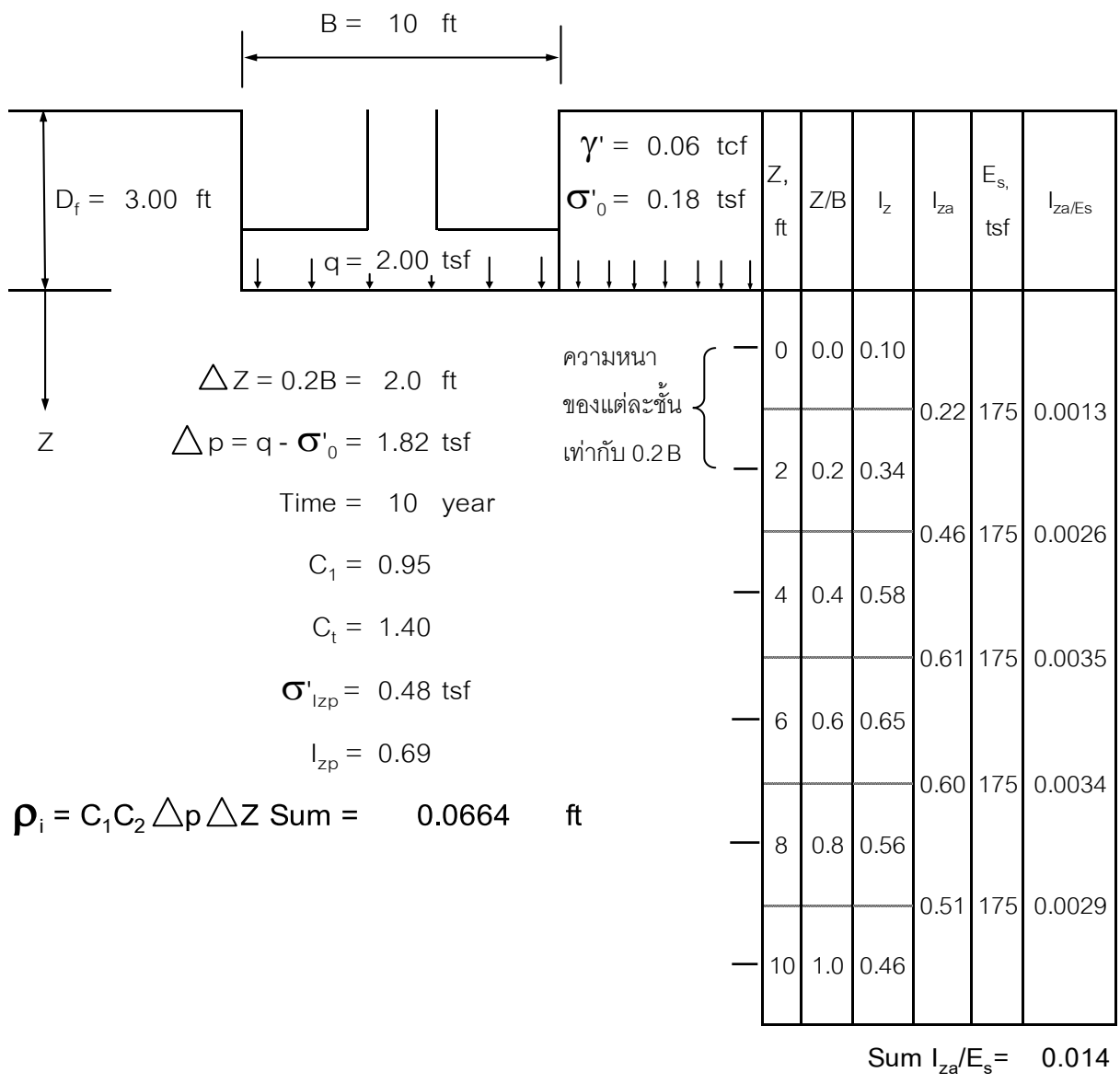
ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของดิน

ประเภทของดิน	โมดูลัสยืดหยุ่น		ปัจจัยของเงา
	เมกะกะนิตันต่อตร.เมตร	ปอนด์ต่อตร.นิ้ว	
ทรายหลวม	10.50-24.00	1,500-3,500	0.20-0.40
ทรายแน่นปานกลาง	17.25-27.60	2,500-4,000	0.25-0.40
ทรายแน่น	34.50-55.20	5,000-8,000	0.30-0.45
ทรายปนตะกอนทราย	10.35-17.25	1,500-2,500	0.20-0.40
ทรายและกรวด	69.00-172.50	10,000-25,000	0.15-0.35
ดินเหนียวอ่อน	4.10-20.70	600-3,000	
ดินเหนียวปานกลาง	20.70-41.40	3,000-6,000	0.20-0.50
ดินเหนียวแน่น	41.40-96.60	6,000-14,000	

ในกรณีที่มีข้อมูล  $N_{60}$  สามารถประมาณค่า  $q_c$  ได้โดยใช้อัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 4.4 และอาจตรวจสอบความน่าเชื่อถือของค่าต่างๆ กับตารางที่ 4.5

**ตัวอย่างที่ 4.1** ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสรับน้ำหนักบรรทุกในชั้นดินดังแสดงในรูปที่ 4.8 ให้หาค่าการทรุดตัวหลังจากถูกความดันกระทำเป็นเวลา 10 ปี

การคำนวณค่าการทรุดตัวโดยวิธีของ Schmertmann นี้ อาจทำเป็นแผ่นงาน (Work Sheet) ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างแผ่นงานสำหรับคำนวณค่าการทรุดตัวของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว  
โดยวิธีของ Schmertmann

ที่ Z/B เป็น 0 และ 2 ค่า  $I_z$  เป็น 0.1 และ 0 ตามลำดับ จากสมการที่ 4.11 และ 4.12 ที่ Z/B เป็น 0.5 ได้ค่า  $I_{zp}$  เป็น 0.69 หลังจากหาค่า  $I_z$  ที่ทุกๆ ความลึก 0.2B แล้ว จึงหาค่า  $I_{za}$  ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของดินแต่ละชั้นซึ่งหนา 0.2B

#### Burland and Burbidge Approximation

วิธีนี้พัฒนามาจากการศึกษาผลของ SPT เทียบกับค่าการทรุดตัวประมาณ 200 แห่ง ได้เป็นสมการที่ 4.16 ถึง 4.20

$$\Delta P'_{avg} > \sigma'_p : \rho_i = f_s \cdot f_i \cdot \left[ \left( \Delta P'_{avg} - \frac{2}{3} \sigma'_p \right) \cdot B^{0.7} \cdot I_c \right] \quad (4.16)$$

$$\Delta P'_{avg} < \sigma'_p : \rho_i = f_s \cdot f_i \cdot \Delta P'_{avg} \cdot \frac{I_c}{3} \quad (4.17)$$

$$f_s = \left( \frac{1.25 \cdot \frac{L}{B}}{\frac{L}{B} + 0.25} \right)^2 \quad (4.18)$$

$$f_i = \frac{H}{Z_1} \cdot \left( 2 - \frac{H}{Z_1} \right) \quad (4.19)$$

$$\Delta P'_{avg} = q_{avg} + \sigma'_{avg} \quad (4.20)$$

โดย  $\rho_i$  = ค่าการทรุดตัวทันทีที่ทันใด หน่วยเป็นฟุต

$\sigma'_p$  = ความเค้นประสิทธิผลสูงสุดที่กระทำต่อดินในอดีต หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$I_c$  = ค่าตัวประกอบของอิทธิพลของการอัดตัว (Compressibility Influence Factor)

$$\approx \frac{0.23}{N_{60avg}^{1.4}}$$

B = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

L = ความยาวของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

H = ความหนาของชั้นดิน หน่วยเป็นฟุต

$Z_1$  = ความลึกของอิทธิพลของพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำ (Depth of Influence of Loaded Area) หน่วยเป็นฟุต ค่านี้หมายถึงความลึกในช่วงใต้ฐานรากลงไปที่มีการหลุดตัว 25 เปอร์เซ็นต์ของการหลุดตัวที่ใต้ฐานราก มีค่าโดยประมาณเป็น  $1.35B^{0.75}$  ถ้าค่า  $N_{60avg}$  เพิ่มขึ้นหรือคงที่ตามความลึก และมีค่าโดยประมาณเป็น 2B ถ้าค่า  $N_{60avg}$  ลดลงอย่างสม่ำเสมอตามความลึก

$N_{60avg}$  = ค่าเฉลี่ยของ  $N_{60avg}$  ตลอดความลึก  $Z_1$  ค่านี้ไม่ต้องปรับแก้เนื่องจากความเค้นประสิทธิผล แต่ต้องปรับแก้หากดินนั้นอยู่ใต้ระดับน้ำ โดยปรับแก้เป็น  $N_{60avg} + 0.5(N_{60avg} - 15)$  ในกรณีที่เป็นทรายละเอียดหรือทรายปนตะกอนทราย และปรับแก้เป็น  $1.25 N_{60avg}$  สำหรับกรวดหรือกรวดปนทราย

$q_{avg}$  = ค่าเฉลี่ยของความดันที่ฐานรากกระทำในชั้นดินหนา H

$\sigma'_{avg}$  = ค่าเฉลี่ยของความดันที่ฐานรากกระทำในชั้นดินหนา H

ค่าการหลุดตัวที่คำนวณได้โดยสมการที่ 4.16 และ 4.17 นี้ จะมีความแม่นยำเมื่อค่า เป็นดังสมการที่ 4.21

$$\frac{0.08}{N_{avg}^{1.3}} \leq I_c \leq \frac{1.37}{N_{avg}^{1.67}} \quad (4.21)$$

วิธีนี้สามารถใช้ประมาณค่าการหลุดตัวที่มากกว่า 3 ปีเนื่องจากการล้าและการอัดตัวระยะที่สองได้ดังนี้

$$\rho_t = f_t \cdot \rho_i \quad (4.22)$$

$$f_t = 1 + R_3 + R_t \cdot \log \frac{t}{3} \quad (4.23)$$

โดย  $\rho_t$  = ค่าการหลุดตัวเมื่อเวลาผ่านไปอย่างน้อย 3 ปีหลังจากก่อสร้างเสร็จ หน่วยเป็นฟุต

$R_3$  = อัตราส่วนการทรุดตัวที่ขึ้นกับเวลา (Time-Dependent Settlement Ratio) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่า  $\rho_i$  ในช่วง 3 ปีแรก หลังจากก่อสร้างเสร็จ

$$\approx 0.3$$

$R_t$  = อัตราส่วนการทรุดตัวที่ขึ้นกับเวลาซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่า  $\rho_i$  สำหรับแต่ละวงจรมวลของลึกลับของเวลา (Log Cycle of Time) หลังจากก่อสร้างเสร็จ 3 ปี

$$\approx 0.2$$

ตัวอย่างที่ 4.2 ให้หาค่าการทรุดตัวทันทีที่ทันใดของดินโดยวิธีต่างๆ ใช้ข้อมูลเดียวกับตัวอย่างที่ 4.1 ผลการคำนวณโดยสรุปแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบผลการประมาณค่าการทรุดตัวทันทีที่ทันใดของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว

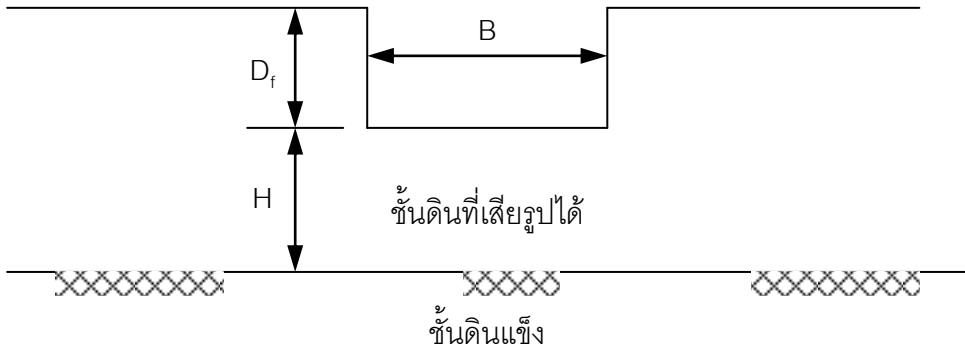
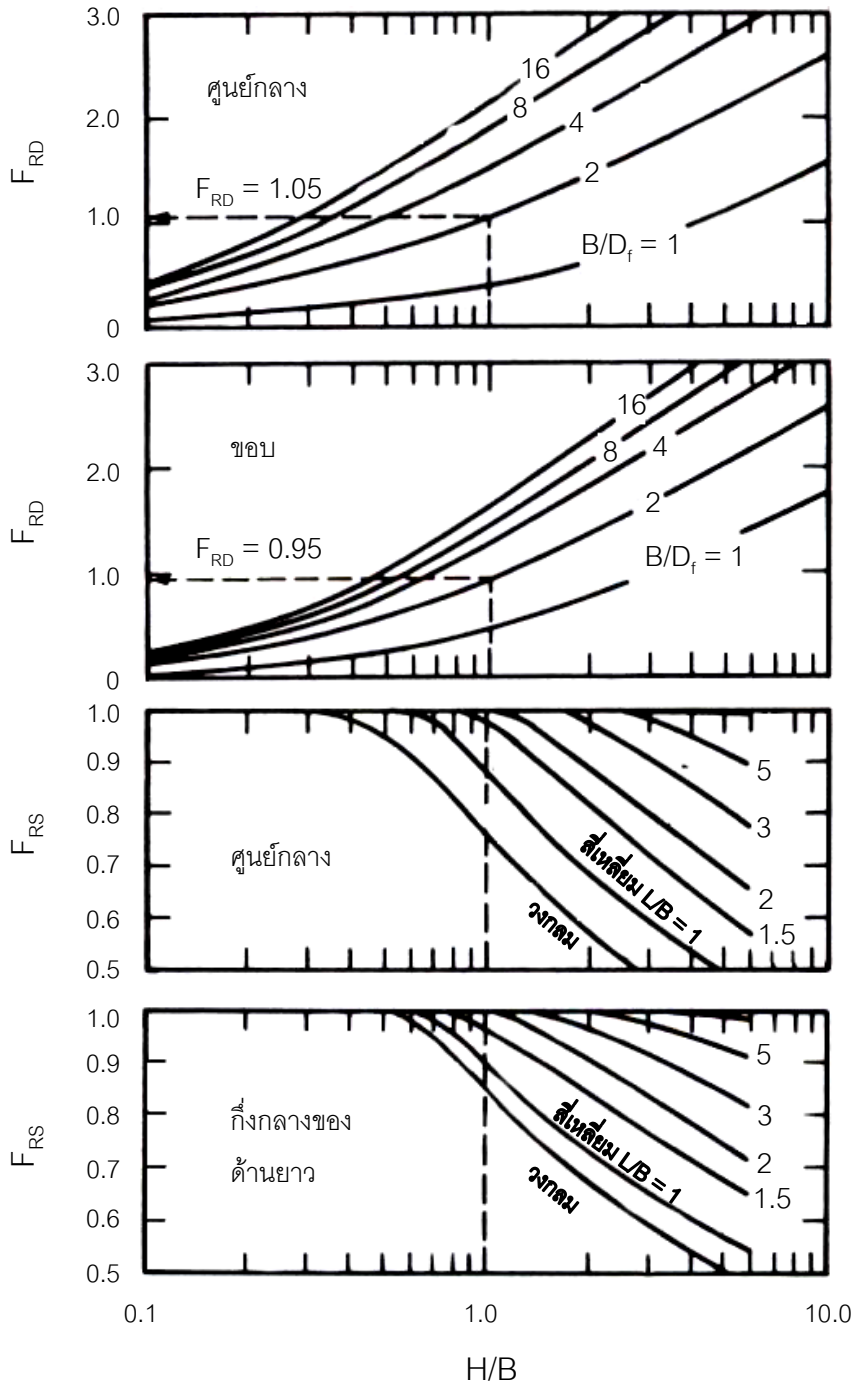
วิธี	การคำนวณ	การทรุดตัว, นิ้ว
Alpan	รูปที่ 4.2 ได้ $N'=65$ ; รูปที่ 4.3 ได้ $\alpha_0=0.05$ นิ้ว ต่อต้นต่อตารางฟุต	0.33
Schultze and Sherif	$H/B=1$ ; $L/B=1$ ; รูปที่ 4.4 ได้ $f=0.052$ ; $D/B=0.3$	0.27
Modified Terzaghi and Peck	รูปที่ 4.5 ได้ $C_N=1.6$ ; $C_W=1$ ; $N'=32$	0.38
Schmertmann	เหมือนรูปที่ 4.8 แต่ใช้ค่า $C_t=1$ สำหรับการทรุดตัวทันทีที่ทันใดหลังจากก่อสร้างเสร็จ	0.57
Burland and Burbidge	$f_s=1$ ; $Z_1=7.59$ ฟุต; $f_1=0.90$ ; ที่กึ่งกลางชั้นดินหนา 10 ฟุต (H) คือความลึก 5 ฟุตจากใต้ฐานราก ได้ $q_{avg}=1.42$ ต้นต่อตร.ฟุต (ใช้สมการของนิวมาร์กดังอธิบายในบทที่ 2); $\sigma'_{avg}=0.48$ ต้นต่อตร.ฟุต; $\sigma'_p=0.18$ ; $I_c=0.0035$	0.34

#### 4.4.2 ฐานรากในดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive Soil)

ดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวนั้น นอกจากการทรุดตัวแล้ว อาจมีการขยายตัวเนื่องจากการขุดดินทำให้น้ำหนักบรรทุกลดลง (Rebound or Heave) ซึ่งประมาณได้จากสมการที่ 4.24

$$S_{RE} = F_{RD} \cdot F_{RS} \cdot \frac{\gamma D_f^2}{E_s} \quad (4.24)$$





รูปที่ 4.9 ค่าของ  $F_{RD}$  และ  $F_{RS}$

โดย  $S_{RE}$  = ค่าการขยายตัวจากการขุด หน่วยเป็นฟุต

$F_{RD}$  = ค่าตัวประกอบความลึกของการขยายตัว จากกราฟในรูปที่ 4.9

$F_{RS}$  = ค่าตัวประกอบรูปร่างของการขยายตัว จากกราฟในรูปที่ 4.9

$\gamma$  = ความหนาแน่นของดินที่ถูกขุด หน่วยเป็นตันต่อลูกบาศก์ฟุต

$D_f$  = ความลึกของการขุด หน่วยเป็นฟุต

$H$  = ความหนาของชั้นดิน หน่วยเป็นฟุต

$E_s^*$  = โมดูลัสยืดหยุ่นเทียบเท่า (Equivalent Modulus of Elasticity) หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

**ตัวอย่างที่ 4.3** เมื่อขุดดินเหนียวที่มีหน่วยน้ำหนักเป็น 0.05 ตันต่อลูกบาศก์ฟุตและมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเทียบเท่าเป็น 400 ตันต่อตารางฟุต กว้าง 20 ฟุต ยาว 40 ฟุต ลึก 10 ฟุต กั้นหลุมอยู่สูงจากชั้นดินแข็ง 20 ฟุต ให้คำนวณหาค่าการขยายตัวจากการขุดนี้

$$H/B = 20/20 = 1.0$$

$$B/D = 20/10 = 2.0$$

$$L/B = 40/20 = 2.0$$

จากรูปที่ 4.9 ได้  $F_{RD}$  ที่กลางหลุม = 1.05

$F_{RD}$  ที่ขอบหลุม = 0.95

$F_{RS}$  ที่กลางหลุม = 1.00

$F_{RS}$  ที่ขอบหลุม = 1.00

จากสมการที่ 4.24 ได้ ค่าการขยายตัวที่กลางหลุม = 0.16 นิ้ว

ค่าการขยายตัวที่ขอบหลุม = 0.14 นิ้ว

สำหรับการหาค่าตัวที่ทันใดของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวนั้น สามารถใช้วิธีดังต่อไปนี้

#### Improved Janbu Approximation

การหาค่าตัวที่ทันใดของฐานรากบนดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน หาได้จาก

$$\rho_i = \mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \frac{q \cdot B}{E_s^*} \quad (4.25)$$

โดย  $\rho_i$  = ค่าการหดตัวทันทีที่ทันใด หน่วยเป็นฟุต

$\mu_0$  = ค่าตัวประกอบอิทธิพล (Influence Factor) สำหรับความลึกของฐานราก หาจากกราฟในรูปที่ 4.10

$\mu_1$  = ค่าตัวประกอบอิทธิพล (Influence Factor) สำหรับรูปร่างของฐานราก หากจากกราฟในรูปที่ 4.10

$E_s^*$  = โมดูลัสยืดหยุ่นเทียบเท่า (Equivalent Modulus of Elasticity) หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

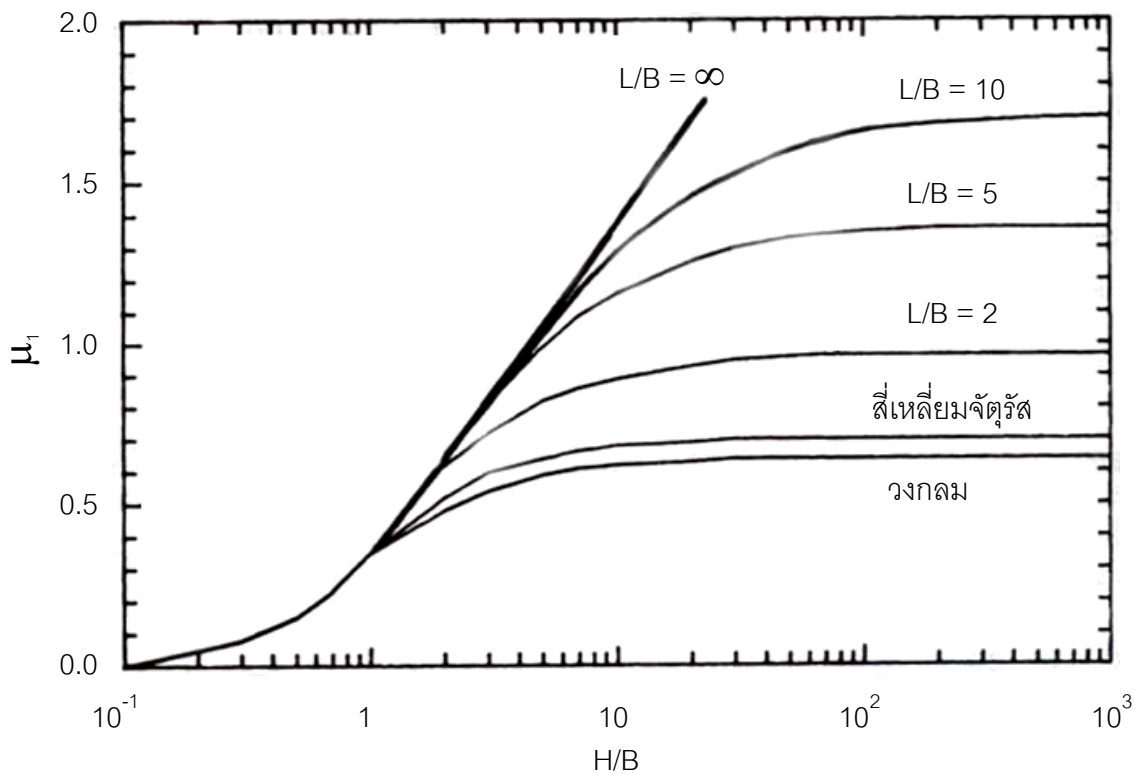
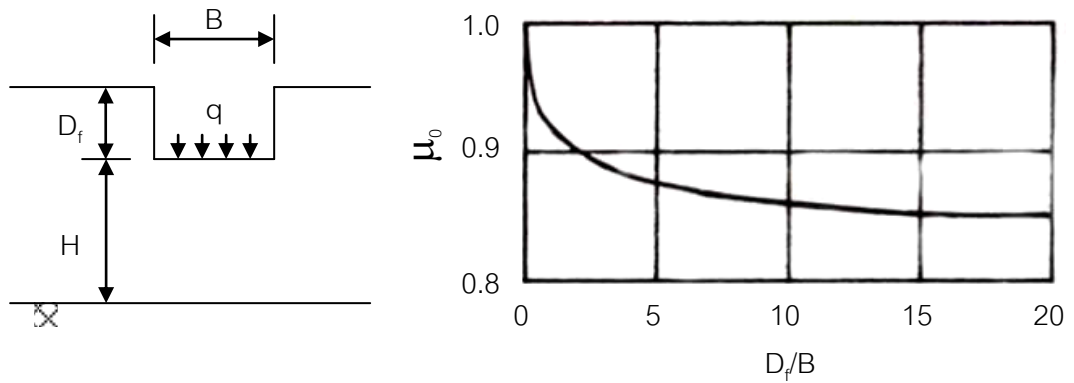
B = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

L = ความยาวของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

q = ความดันทั้งหมดจากฐานราก หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$D_f$  = ความลึกของการขุด หน่วยเป็นฟุต

H = ความหนาของชั้นดิน หน่วยเป็นฟุต



รูปที่ 4.10 ค่าของ  $\mu_0$  และ  $\mu_1$

จากการเทียบผลที่ได้โดยวิธีนี้กับการวิเคราะห์โดยวิธีจำกัดชิ้นส่วน (Finite Element Method) พบว่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ H/B อยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 10; L/B อยู่ระหว่าง 1 ถึง 5 และ D/B อยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 3 ทั้งนี้ยังพบว่า ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกันหากใช้  $\mu_0$  เป็น 1 และอัตราส่วนปัวร์ซอง (Poisson's Ratio) เป็น 0.5

#### Perloff Approximation

การหาค่าการทรุดตัวที่พื้นใต้ที่ศูนย์กลางและขอบของฐานรากบนดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน หาได้จาก

$$\rho_i = I \cdot q \cdot B \cdot \left[ \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \right] \cdot \alpha \quad (4.26)$$

โดย  $\rho_i$  = ค่าการทรุดตัวที่พื้นใต้ หน่วยเป็นฟุต

$I$  = ค่าตัวประกอบอิทธิพลสำหรับกรณีดินมีความลึกที่ไม่มีขอบเขตและดินที่มีความสม่ำเสมอ (Influence Factor for Infinitely Deep and Homogeneous Soil) แสดงในตารางที่ 4.7

หากชั้นดินที่กำลังพิจารณามีความหนาจำกัด และมีชั้นดินที่แข็งแรงกว่ารองรับข้างใต้ ให้ใช้กราฟในรูปที่ 4.11

$q$  = ความดันทั้งหมดจากฐานราก หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$B$  = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

$L$  = ความยาวของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

$\nu_s$  = อัตราส่วนปัวร์ซอง (Poisson's Ratio) ของดิน

$\alpha$  = ค่าตัวประกอบปรับแก้สำหรับดินชั้นที่รองรับชั้นดินที่กำลังพิจารณา (Subgrade Soil) แสดงในตารางที่ 4.8

$H$  = ความหนาของชั้นดิน หน่วยเป็นฟุต

$D_f$  = ความลึกของการขุด หน่วยเป็นฟุต

$E_{s1}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินที่กำลังพิจารณา หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

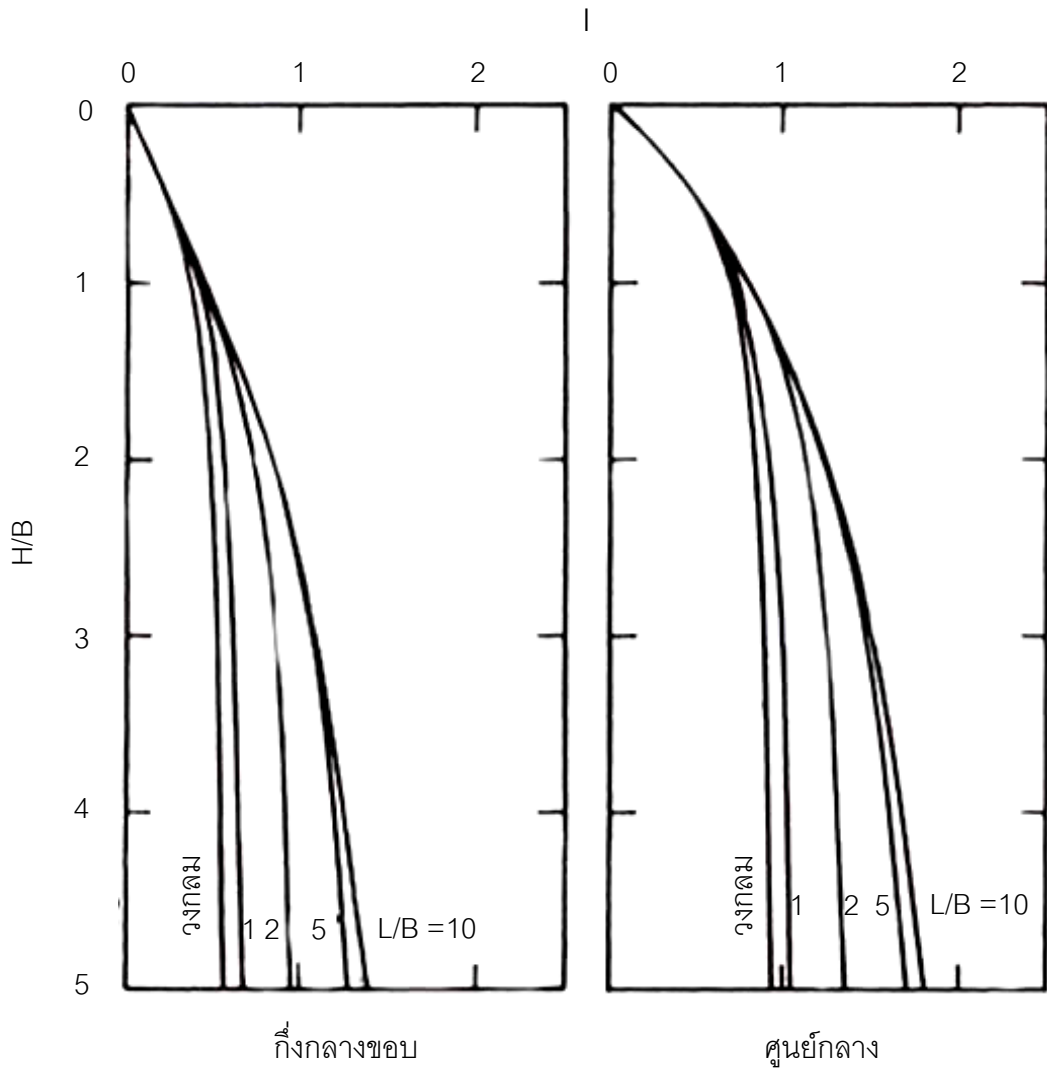
$E_{s2}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินที่รองรับ หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

ตารางที่ 4.7 ค่า  $\alpha$  สำหรับสมการที่ 4.26 กรณีที่ชั้นดินที่กำลังพิจารณามีความลึกที่ไม่มีขอบเขต

รูปร่าง	L/B	ศูนย์กลาง	มุม	กลางด้านสั้น	กลางด้านยาว
วงกลม	-	1.00	0.64	0.64	0.64
วงกลมแฉ่ง	-	0.79	-	-	-
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	-	1.12	0.56	0.76	0.76
สี่เหลี่ยมจัตุรัสแฉ่ง	-	0.99	-	-	-
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	1.5	1.36	0.67	0.89	0.97
	2	1.52	0.76	0.98	1.12
	3	1.78	0.88	1.11	1.35
	5	2.10	1.05	1.27	1.68
	10	2.53	1.26	1.49	2.12
	100	4.00	2.00	2.20	3.60
	1,000	5.47	2.75	2.94	5.03
	10,000	6.90	3.50	3.70	6.50

ตารางที่ 4.8 ค่า  $\alpha$  สำหรับสมการที่ 4.26

H/B	$E_{s1} / E_{s2}$				
	1	2	5	10	100
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.10	1.000	0.972	0.943	0.923	0.760
0.25	1.000	0.885	0.779	0.699	0.431
0.50	1.000	0.747	0.566	0.463	0.228
1.00	1.000	0.627	0.399	0.287	0.121
2.50	1.000	0.550	0.274	0.175	0.058
5.00	1.000	0.525	0.238	0.136	0.036
$\infty$	1.000	0.500	0.200	0.100	0.010



รูปที่ 4.11 ค่า I สำหรับสมการที่ 4.26 กรณีที่ชั้นดินที่กำลังพิจารณามีความหนาจำกัด

#### Kay and Cavagnaro Approximation

การทุดตัวทันทีทันใดที่ศูนย์กลางและขอบของฐานรากทรงกลม และฐานรากสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนยาวต่อกว้างไม่เกิน 2 สามารถกระทำได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\rho_c = \frac{qhl_c}{E_s} \quad (4.27)$$

$$\rho_e = \frac{qhl_e}{E_s} \quad (4.28)$$

$$\Delta p = R_s (\rho_c - \rho_e) \quad (4.29)$$

$$\log K_R = \log \left[ \frac{\rho_c E_c D^3 (1 + \nu_s)}{2qR^4 (1 - \nu_s)} \right] \quad (4.30)$$

โดย  $\rho_c$  = ค่าการทรุดตัวทันทีทันใดที่ศูนย์กลาง หน่วยเป็นฟุต

$\rho_e$  = ค่าการทรุดตัวทันทีทันใดที่ขอบ หน่วยเป็นฟุต

$q$  = ความดันทั้งหมดจากฐานราก หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$h$  = ความหนาของชั้นดินย่อยที่พิจารณา หน่วยเป็นฟุต

$I_c$  = ค่าตัวประกอบอิทธิพลที่ศูนย์กลาง จากกราฟในรูปที่ 4.12

$I_e$  = ค่าตัวประกอบอิทธิพลที่ขอบ จากกราฟในรูปที่ 4.12

$Z$  = ระยะจากใต้ฐานรากลงไปถึงกึ่งกลางชั้นที่กำลังพิจารณา

$E_s$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินที่กำลังพิจารณา หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

$\Delta p$  = ความแตกต่างระหว่างค่าการทรุดตัวทันทีทันใดที่ศูนย์กลางกับที่ขอบ

$R_s$  = สัมประสิทธิ์ปรับแก้ (Reduction Coefficient) จากกราฟในรูปที่ 4.12

$K_R$  = ค่าความแกร่ง (Rigidity)

$E_c$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของฐานราก หน่วยเป็นกิโลปอนด์ต่อตารางฟุต

$D$  = ความหนาของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

$\nu_s$  = อัตราส่วนปัวร์ซอง (Poisson's Ratio) ของดิน

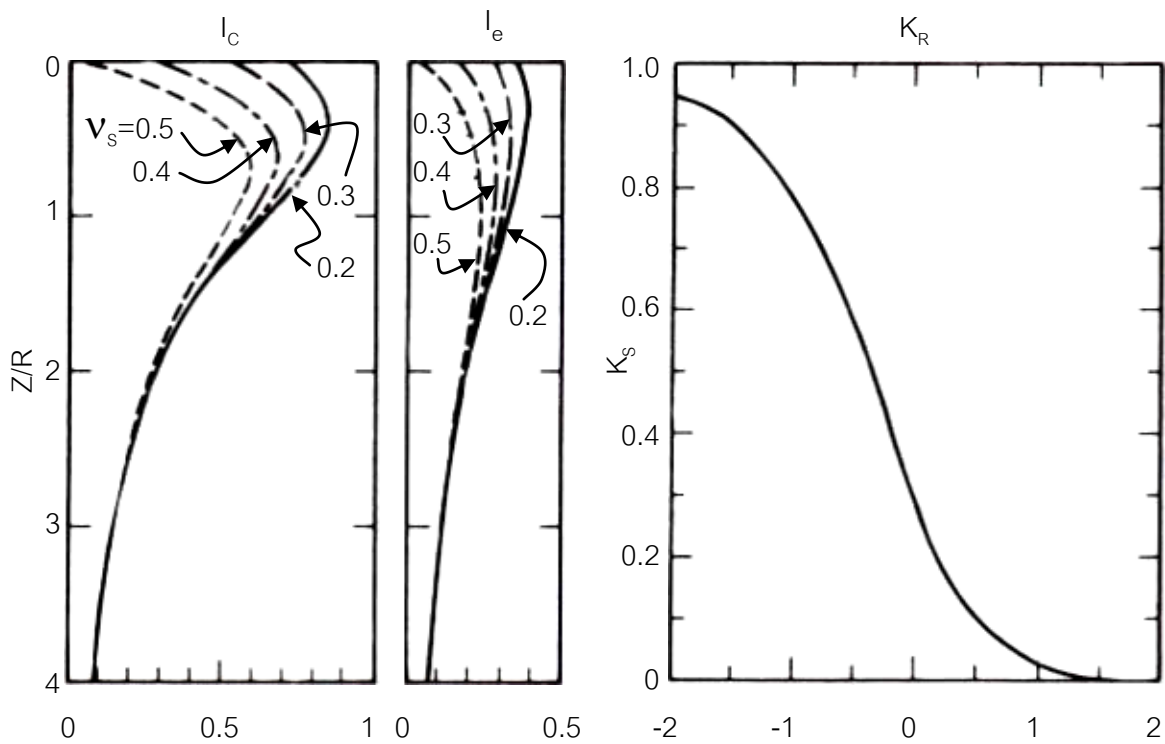
$R$  = รัศมีเทียบเท่า (Equivalent Radius) ของฐานราก คือรัศมีของพื้นที่วงกลมที่มีพื้นที่เท่าฐานราก หน่วยเป็นฟุต

$$= \sqrt{LB/\pi}$$

$L$  = ความยาวของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

$B$  = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

การคำนวณโดยวิธีนี้ จะพิจารณาชั้นดินใต้ฐานรากลงไปเท่ากับความกว้างของฐานราก จากนั้นจึงแบ่งดินออกเป็นชั้นย่อยๆ แต่ละชั้นหนาเท่ากับครึ่งหนึ่งของรัศมีเทียบเท่า คำนวณหาค่าการทรุดตัวทันทีทันใดของแต่ละชั้นโดยสมการที่ 4.27 และ 4.28 ผลรวมของค่าการทรุดตัวทุกชั้นก็คือค่าการทรุดตัวทั้งหมด



รูปที่ 4.12 ค่า  $I_c$ ,  $I_e$  และ  $K_R$

**ตัวอย่างที่ 4.4** ให้คำนวณหาค่าการทรุดตัวทันทีทันใดของฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 ฟุต หนา 1 ฟุต วางอยู่ลึก 3 ฟุต รับน้ำหนักบรรทุก 2 ตันต่อตารางฟุต มีชั้นดินเหนียวหนา 10 ฟุตอยู่ใต้ ฐานราก ดินมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็น 175 ตันต่อตารางฟุต อัตราส่วนปัวร์ซองเป็น 0.4 ฐานราก คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็น 216000 ตันต่อตารางฟุต

ตารางที่ 4.9 การคำนวณค่าการทรุดตัวทันทีทันใดในแต่ละชั้นดินของตัวอย่างที่ 4.4

h, ฟุต	Z, ฟุต	Z/R	ที่ศูนย์กลาง		ที่ขอบ	
			$I_c$	$\rho_c$ , ฟุต	$I_e$	$\rho_e$ , ฟุต
2.82	1.41	0.25	0.5	0.016	0.20	0.0065
2.82	4.23	0.75	0.7	0.022	0.30	0.0097
2.82	7.05	1.25	0.5	0.016	0.25	0.0080
1.54	9.23	1.64	0.4	0.007	0.20	0.0035
$\Sigma = 10.0$	-	-	-	0.061	-	0.028



$R = \sqrt{10 \times 10/\pi} = 5.64$  ฟุต จากนั้นแบ่งดินออกเป็น 4 ชั้น 3 ชั้นแรกหนา 2.82 ฟุต ชั้นล่างสุดหนา 1.54 ฟุต หาค่า  $I_c$  และ  $I_e$  จากกราฟในรูปที่ 4.12 แล้วหาค่าการทรุดตัวแต่ละชั้นดังแสดงในตารางที่ 4.9

$\text{Log } K_R = 1.04$  ดังนั้น ได้ค่า เป็น 0.05 จากกราฟในรูปที่ 4.12

$\Delta p = 0.05 (0.061 - 0.028) = 0.00165$  ฟุต = 0.0198 นิ้ว

**ตัวอย่างที่ 4.5** ให้คำนวณหาค่าการทรุดตัวทันทีทันใดของฐานรากบนดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวโดยวิธีต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกัน ให้ใช้ข้อมูลของตัวอย่างที่ 4.4

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการประมาณค่าการทรุดตัวทันทีทันใดของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว

วิธี	การคำนวณ	การทรุดตัวที่ศูนย์กลาง, นิ้ว
Improved Janbu	$D_f/B=0.3$ ; $H/B=L/B=1.0$ ; จากรูปที่ 4.10 ได้ $\mu_0=1.0$ และ $\mu_1=0.35$	0.48
Perloff	$L/B=1.0$ ; จากรูปที่ 4.11 ได้ $I_c=0.7$	0.81
Kay and Cavagnaro	เหมือนตัวอย่างที่ 4.4	0.73