

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดิน

การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินได้ฐานรากจะพิจารณาได้จากการพิบัติของดินเพียงสองกรณี คือการพิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทั่วไปและแรงเฉือนเฉพาะที่ ซึ่งการพิบัติทั้งสองกรณีนั้นสามารถคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินได้ฐานรากได้จากสมการทั่วไปแสดงในสมการที่ 3.1 ต่อมาได้มีนักวิจัยมากมายนำสมการที่ 3.1 มาพัฒนาสมการเป็นแบบจำลองของตนเอง เช่น Terzaghi Meyerhof Hansen และ Vesic เป็นต้น แต่สำหรับงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเฉพาะของ Terzaghi และ Vesic มาศึกษาเนื่องจากแบบจำลองทั้งสองมีการจำลองของการพิบัติทั้งสองกรณีที่ศึกษา

$$q_u = cN_c\zeta_c + \frac{1}{2}B'\gamma'_H N_\gamma \zeta_\gamma + \sigma'_D N_q \zeta_q \quad (3.1)$$

โดยที่

q_u คือกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินได้ฐานรากสูงสุด

c คือแรงยึดเหนี่ยวของดิน

B' คือความกว้างประสิทธิภาพของฐานราก มีค่าเป็น $B - 2e_B$

e_B คือระยะเยื้องศูนย์กลางของน้ำหนักที่ระยะขนานตามแนวความกว้างฐานราก มีค่าเป็น M_B / Q

M_B คือโมเมนต์ที่ขนานตามแนวความกว้างฐานราก

Q คือน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งที่กระทำต่อฐานราก

γ'_H คือหน่วยน้ำหนักประสิทธิภาพของดินได้ฐานรากภายในตำแหน่งพิบัติ

σ'_D คือหน่วยแรงดันดินประสิทธิภาพที่ระดับความลึกของฐานราก มีค่าเป็น $\gamma'_D \cdot D$

γ'_D คือหน่วยน้ำหนักประสิทธิภาพของดินจากผิวดินถึงระดับฐานราก

D คือความลึกของฐานรากจากระดับผิวดิน

N_c, N_γ, N_q คือค่าตัวประกอบของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของการยึดเหนี่ยวของดิน น้ำหนักของดินในลิ้มที่พิบัติ และน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ

$\zeta_c, \zeta_\gamma, \zeta_q$ คือค่าตัวประกอบปรับแก้ของการยึดเหนี่ยวของดิน น้ำหนักของดินในลิ้มที่พิบัติ และน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ

(1) แบบจำลองของ Terzaghi

Terzaghi ได้เสนอสมการที่ 3.2 ในปี 1943 ใช้สำหรับการประมาณค่าอย่างง่ายของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินได้ฐานรากแผ่ที่เป็นแถบยาวและมีลักษณะแข็งแรง ร่องรับโดยดินที่มีความแข็งแรงสูงและมีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันไปตลอดความลึก โดยพิจารณาให้การพิบัติของดินได้ฐานรากเป็นการพิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทั่วไป

Terzaghi ได้เสนอค่า N_c , N_γ และ N_q ให้คำนวณหาค่าได้จากสมการที่ 3.3 สมการที่ 3.4 และสมการที่ 3.5 ตามลำดับ

$$q_u = cN_c + \frac{1}{2} B\gamma N_\gamma + q(N_q - 1) \quad (3.2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (3.3)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} K_{p\gamma} \tan^2 \phi \frac{\tan \phi}{2} \quad (3.4)$$

$$N_q = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \tan \phi}}{2 \cos^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (3.5)$$

โดยที่

ϕ คือมุมของแรงเสียดทานภายในของดิน

γ คือหน่วยน้ำหนักของดินใต้ฐานรากภายในตำแหน่งพิบัติ

q คือหน่วยแรงดันดินที่ระดับความลึกของฐานราก มีค่าเป็น $\gamma_D \cdot D$

ค่า $K_{p\gamma}$ Terzaghi ไม่ได้ให้คำอธิบายอย่างชัดเจน แต่ให้ค่า $K_{p\gamma}$ ในรูปแบบของตารางโดยเทียบค่ากับค่ามุมของแรงเสียดทานภายในของดินดังแสดงในตารางที่ 3.1 ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านเสนอค่า N_γ ดังเช่น Coduto ซึ่งเสนอใช้สมการที่ 3.6 แทนสมการที่ 3.4 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ ± 10 แต่สำหรับงานวิจัยนี้ยังคงใช้ข้อมูลในตารางที่ 3.1 ในการคำนวณ

$$N_\gamma = [2(N_q + 1) \tan \phi] / [1 + 0.4 \sin(4\phi)] \quad (3.6)$$

สำหรับฐานรากที่ไม่ได้มีลักษณะเป็นแถบยาวนั้น Terzaghi ได้แนะนำให้ใช้ค่าปรับแก้ตัวประกอบ N_c และ N_γ โดยเขียนรูปของสมการที่ 3.2 ใหม่เป็นสมการที่ 3.7 สมการที่ 3.8 และสมการที่ 3.9 ซึ่งใช้กับฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และฐานรากวงกลมตามลำดับ

$$q_u = [1 + 0.2(B/L)]cN_c + 0.5[1 - 0.2(B/L)]B\gamma N_\gamma + q(N_q - 1) \quad (3.7)$$

$$q_u = 1.3cN_c + 0.4B\gamma N_\gamma + q(N_q - 1) \quad (3.8)$$

$$q_u = 1.3cN_c + 0.3B\gamma N_\gamma + q(N_q - 1) \quad (3.9)$$

สมการตามแบบจำลองของ Terzaghi ข้างบนนี้ ใช้สมมติฐานว่าดินมีการพิบัติของดินแบบแรงเฉือนทั่วไปในกรณีการพิบัติของดินแบบแรงเฉือนเฉพาะที่ Terzaghi ได้แนะนำให้ใช้ค่า c' N'_c N'_q และ N'_γ แทน ซึ่ง $c' = 2c/3$ ส่วนค่า N'_c N'_q และ N'_γ ใช้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวประกอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินตามแบบจำลองของ Terzaghi สำหรับกรณีการ
 พับตัวของดินแบบแรงเฉือนทั่วไป

ϕ	N'_c	N'_q	N'_γ	ϕ	N'_c	N'_q	N'_γ
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.10	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.74	261.60
19	16.57	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.87
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

(Das, B.M., 1999)

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวประกอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินตามแบบจำลองของ Terzaghi สำหรับกรณีการ
 พัดขึ้นของดินแบบแรงเฉือนเฉพาะที่

ϕ	N'_c	N'_q	N'_γ	ϕ	N'_c	N'_q	N'_γ
0	5.70	1.00	0	26	15.53	6.05	2.59
1	5.90	1.07	0.005	27	16.03	6.54	2.88
2	6.10	1.14	0.020	28	17.13	7.07	3.29
3	6.30	1.22	0.040	29	18.03	7.66	3.76
4	6.51	1.30	0.055	30	18.99	8.31	4.39
5	6.74	1.39	0.074	31	20.03	9.03	4.83
6	6.79	1.49	0.100	32	21.16	9.82	5.51
7	7.22	1.59	0.128	33	22.39	10.69	6.32
8	7.47	1.70	0.16	34	23.72	11.67	7.22
9	7.74	1.82	0.20	35	25.18	12.75	8.35
10	8.02	1.94	0.24	36	26.77	13.97	9.41
11	8.32	2.08	0.30	37	28.51	15.32	10.90
12	8.63	2.22	0.35	38	30.43	16.85	12.75
13	8.96	2.38	0.42	39	32.53	18.56	14.71
14	9.31	2.55	0.48	40	34.87	20.50	17.22
15	9.67	2.73	0.57	41	37.45	22.70	19.75
16	10.06	2.92	0.67	42	40.33	25.21	22.50
17	10.47	3.13	0.76	43	43.54	28.06	26.25
18	10.90	3.36	0.88	44	47.13	31.34	30.40
19	11.36	3.61	1.03	45	51.17	35.11	36.00
20	11.85	3.88	1.12	46	55.73	39.48	41.70
21	12.37	4.17	1.35	47	60.91	44.54	49.30
22	12.92	4.48	1.55	48	66.80	50.46	59.25
23	13.51	4.82	1.74	49	73.55	57.41	71.45
24	14.14	5.20	1.97	50	81.31	65.60	85.75
25	14.80	5.60	2.25				

(Das, B.M., 1999)

(2) แบบจำลองของ Vesic

Vesic ได้เสนอสมการที่ 3.10 ในปี 1973 ซึ่งสมการเป็นสมการเดียวกันกับสมการของ Hansen ที่นำเสนอไว้ในปี 1970 แตกต่างกันที่ค่าตัวประกอบต่างๆใช้ในการคำนวณ สำหรับสมการดังกล่าวพิจารณาให้การพิบัติของดินใต้ฐานรากเป็นการพิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทั่วไป

Vesic ให้ใช้ค่า N_c เหมือนกับ Terzaghi ที่นำเสนอไว้ในสมการที่ 3.3 ในส่วนค่า N_γ และ N_q ให้คำนวณค่าได้จากสมการที่ 3.11 และสมการที่ 3.12 ตามลำดับ

$$q_u = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma + q(N_q - 1) s_q d_q i_q g_q b_q \quad (3.10)$$

และ

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \quad (3.11)$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 (45 + \phi/2) \quad (3.12)$$

โดยที่

s_c, s_γ, s_q คือค่าตัวประกอบรูปร่าง

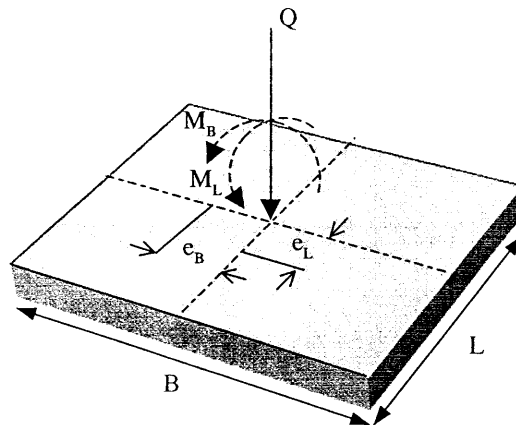
d_c, d_γ, d_q คือค่าตัวประกอบความลึก

i_c, i_γ, i_q คือค่าตัวประกอบความเอียงของน้ำหนักบรรทุก

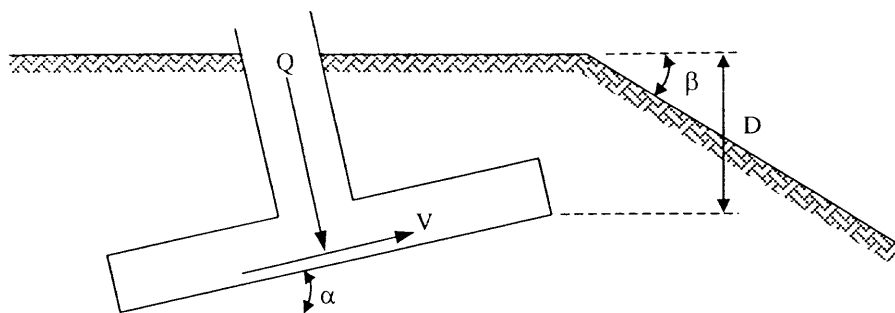
g_c, g_γ, g_q คือค่าตัวประกอบความเอียงของพื้นดิน

b_c, b_γ, b_q คือค่าตัวประกอบความเอียงของฐานราก

..... ค่าตัวประกอบทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และความหมายของตัวแปรที่ใช้ในสมการได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.1 และ ภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 ตัวแปรค่าโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานราก (American society of civil engineers, 1993)



ภาพที่ 3.2 ตัวแปรค่ามุมของดิน และฐานราก (Coduto, D.P., 1994)

กรณีการพิบัติของดินแบบแรงเฉือนเฉพาะที่ Vesic ได้แนะนำให้ใช้ค่าตัวประกอบ f_c f_γ และ f_q เพิ่มเข้าไปในสมการที่ 3.10 โดยหาค่าดัชนีความแกร่ง (I_r) และดัชนีความแกร่งวิกฤติ ($I_{r(cr)}$) ดังแสดงในสมการที่ 3.13 และ สมการที่ 3.14 ตามลำดับ ถ้า $I_r \geq I_{r(cr)}$ ให้ใช้ค่า f_c f_γ และ f_q เท่ากับหนึ่ง แต่ ถ้า $I_r < I_{r(cr)}$ ให้ใช้ค่าตามตารางที่ 3.3

$$I_r = \frac{G}{c + q \tan \phi} \quad (3.13)$$

$$I_{r(cr)} = \frac{1}{2} \left\{ \exp \left[\left(3.3 - 0.45 \left(\frac{B}{L} \right) \right) \cot \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right] \right\} \quad (3.14)$$

โดยที่

G คือโมดูลัสเฉือนของดิน มีค่าเป็น $\frac{E}{2(1+\nu)}$

E คือโมดูลัสยืดหยุ่น

ν คืออัตราส่วนปัวซองส์

ϕ คือมุมเสียดทานของดิน

q คือความดันประสิทธิผลของดินที่กดทับ ณ ระดับที่กดทับ

ตารางที่ 3.3 ค่าตัวประกอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินตามแบบจำลองของ Vesic

ค่าตัวประกอบ		
	$\phi = 0$	$\phi > 0$
S_c	$0.2(B'/L')$	$1 + (N_q B')/(N_c L')$
S_q	1	$1 + (B'/L') \tan \phi$
S_γ	1	$1 - 0.4(B'/L')$
d_c	$1 + 0.4k$	
d_q	1	$1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 k$
d_γ	1	
i_c	$0.5 - 0.5mV/(A_e c_a N_c)$	$i_q - (1 - i_q)/(N_q - 1)$
i_q	$[1 - V/(Q + A_e c_a \cot \phi)]^m$	
i_γ	$[1 - V/(Q + A_e c_a \cot \phi)]^{m+1} > 0$	
g_c	$1 - \beta/147.3$	$g_q - (1 - g_q)/147.3$
g_q	$(1 - \tan \beta)^2$	
g_γ	$(1 - \tan \beta)^2$	
b_c	$1 - \alpha/147.3$	$b_q - (1 - b_q)/147.3$
b_q	$(1 - 0.017\alpha \tan \phi)^2$	
b_γ	$(1 - 0.017\alpha \tan \phi)^2$	
f_c	$0.32 + 0.12(B/L) + 0.6 \log I_r$	$f_q - (1 - f_q)/(N_q \tan \phi)$
f_q	$\exp\{-4.4 + 0.6(B/L)\} \tan \phi + (3.07 \sin \phi)(\log 2I_r)/(1 + \sin \phi)\}$	
f_γ	$\exp\{-4.4 + 0.6(B/L)\} \tan \phi + (3.07 \sin \phi)(\log 2I_r)/(1 + \sin \phi)\}$	

(วัชรินทร์ กาสลัก และ วรากร ไหมเรียง, 2547)

หมายเหตุ

B', L' คือความกว้างหรือยาวประสิทธิผล ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าจริง เนื่องจากอิทธิพลของโมเมนต์ที่กระทำต่อฐานราก มีค่าเป็น $B' = B - 2e_B$ และ $e_B = M_B/Q$ หรือ $L' = L - 2e_L$ และ $e_L = M_L/Q$

k มีค่าเป็น D/B ถ้า $D/B \leq 1$ และมีค่าเป็น $\tan^{-1}(D/B)$ ถ้า $D/B > 1$

A_e คือพื้นที่ประสิทธิผลของฐานราก มีค่าเป็น $B' \times L'$

c_a คือค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างฐานรากกับดินมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 1.0 เท่าของค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (c)

m มีค่าเป็น $(2 + R_{BL})/(1 + R_{BL})$ โดยที่ R_{BL} มีค่าเป็น B/L ถ้า V ขนานกับ B และมีค่าเป็น L/B ถ้า V ขนานกับ L

(3) ฐานรากรับแรงเยื้องศูนย์หรือโมเมนต์

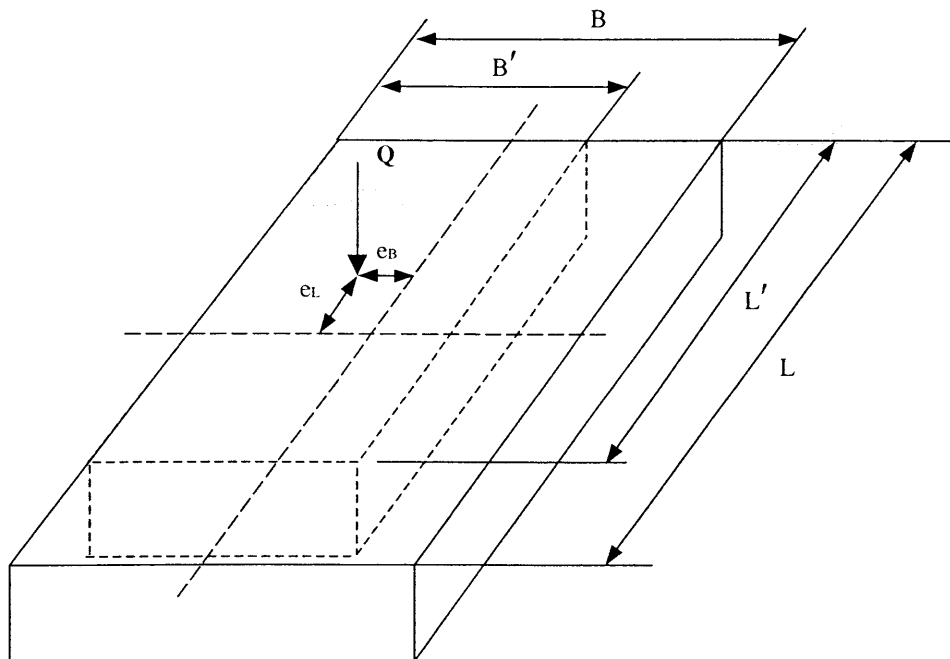
เมื่อต้องการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากที่รับน้ำหนักเยื้องศูนย์หรือรับโมเมนต์ จะต้องพิจารณาเลือกแรงดันใต้ฐานรากที่จะนำไปเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ ซึ่งปัญหาคือในการประมาณค่าแรงดันใต้ฐานรากได้ค่าแรงดันแต่ละมุมของฐานรากไม่เท่ากัน ดังนั้น Meyerhof (1963), Brinch Hansen (1970) และนักวิจัยอื่นๆ ได้นำเสนอการประมาณค่าแรงดันใต้ฐานรากจาก สมการที่ 3.15 และ 3.16 โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าของขนาดฐานรากประสิทธิผล และเมื่อคำนวณจะได้พื้นที่ประสิทธิผล ($A_e = B' \times L'$) ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และนำมาหาค่าแรงดันดินใต้ฐานราก ($q = Q / A_e$)

สมการ Terzaghi ไม่สามารถพิจารณาโมเมนต์ได้จึงใช้ ขนาดฐานราก และพื้นที่ประสิทธิผลในการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของฐานราก ในส่วนการประมาณค่าทรุดตัวของฐานรากก็นำขนาดฐานราก และพื้นที่ประสิทธิผล ในการประมาณค่าการทรุดตัวเช่นกัน

$$B' = B - 2e_B \quad (3.15)$$

$$L' = L - 2e_L \quad (3.16)$$

โดย $e_B = M_B / Q$ และ $e_L = M_L / Q$



ภาพที่ 3.3 พื้นที่ฐานรากประสิทธิผลรับแรงเยื้องศูนย์หรือโมเมนต์ (Coduto, D.P., 1994)

2. การประมาณการทรุดตัวของฐานราก

การทรุดตัวของฐานราก เกิดจากการเสถียรของดินเนื่องจากความดันดินที่ฐานรากนั้นกระทำต่อดิน ซึ่งแบ่งการทรุดตัวจากพฤติกรรมของดินได้ 3 ประเภทคือ การทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate settlement) การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation settlement) และการอัดตัวคายน้ำระยะที่สอง (Secondary consolidation settlement) สำหรับงานวิจัยนี้มีการประมาณการทรุดตัวของฐานรากแต่ไม่รวมการทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำระยะที่สอง

2.1 การทรุดตัวทันทีทันใด

การประมาณค่าการทรุดตัวทันทีทันใดของฐานรากนั้น แบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ ฐานรากอยู่บนดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว โดยงานวิจัยนี้ได้จัดให้ทั้งสองกรณีโดยพิจารณาใช้วิธีประมาณของชเมิร์ตมานน์ (Schmertmann's method) ในกรณีฐานรากอยู่บนดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว และวิธีประมาณของเพอร์ลอฟฟ์ (Perloff's method) ในกรณีฐานรากอยู่บนดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว

(1) การประมาณค่าการทรุดตัวฐานรากโดยวิธีของ Schmertmann

วิธีนี้แบ่งดินออกเป็นหลายๆชั้น แล้วประมาณค่าการทรุดตัวโดยสมการที่ 3.17 ถึง 3.19 ทั้งนี้ความหมายของตัวแปรต่างๆแสดงไว้ในภาพที่ 3.4 วิธีนี้สามารถประมาณในระยะยาวหลายปีได้ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการประมาณถึงการอัดตัวคายน้ำด้วย ซึ่งในดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวมีค่าการทรุดตัวนี้แต่น้อย

$$\rho_i = C_1 \cdot C_t \cdot \Delta p \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Z_i}{E_{si}} \cdot I_{zi} \quad (3.17)$$

$$C_1 = 1 - \frac{0.5\sigma'_{od}}{\Delta p} \geq 0.5 \quad (3.18)$$

$$C_t = 1 + 0.2 \log \left(\frac{t}{0.1} \right) \quad (3.19)$$

- โดย ρ_i = ค่าการทรุดตัวทันทีทันใด หน่วยเป็นฟุต
 Δp = ความดันสุทธิที่ฐานรากกระทำต่อดิน เท่ากับ $q - \sigma'_{od}$ หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต
 q = ความดันทั้งหมดจากฐานราก ($q = B \times L$) หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต
 B = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต
 L = ความยาวของฐานราก หน่วยเป็นฟุต
 σ'_{od} = ความเค้นประสิทธิผลที่ระดับฐานรากซึ่งอยู่ลึก D_f หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต
 D_f = ความลึกของฐานรากจากผิวดิน หน่วยเป็นฟุต
 ΔZ_i = ความหนาของดินแต่ละชั้น เท่ากับ $0.2B$ หน่วยเป็นฟุต
 E_{si} = โมดูลัสยืดหยุ่นของดิน หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต
 I_{zi} = ตัวประกอบอิทธิพลของความลึก เป็นค่าที่ได้จากสมมติฐานดินเป็นวัสดุยืดหยุ่นของบูลินเสต์
 t = ระยะเวลาหลังจากความดันกระทำต่อดิน หน่วยเป็นปี

ค่าตัวประกอบอิทธิพลของความลึกในแต่ละชั้นดินนั้น ถ้าฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Axisymmetric, $L/B = 1$) จะมีค่าเป็น 0.1 และ 0 เมื่อ Z/B มีค่าเป็น 0 และ 2 ตามลำดับ แต่ถ้าฐานรากแถบ (Plane Strain, $L/B = 10$) จะมีค่าเป็น 0.2 และ 0 เมื่อ Z/B มีค่าเป็น 0 และ 4 ตามลำดับ จากนั้นหาค่าตัวประกอบนี้สำหรับค่า Z/B อื่นๆ โดยการประมาณ (Interpolation) จากค่าเหล่านี้ และค่าตัวประกอบอิทธิพลของความลึกสูงสุด (Peak depth influence factor, I_{zp}) จากสมการที่ 3.20 และในกรณีที่ L/B มีค่าระหว่าง 1 ถึง 10 ค่า σ'_{Izp} จะอยู่ระหว่างสมการที่ 3.21 และ 3.22 ซึ่งหาโดยใช้วิธีประมาณจากค่าตัวประกอบอิทธิพลของความลึกที่ Z/B เท่ากับศูนย์จะอยู่ระหว่าง 0.1 และ 0.2 และค่าตัวประกอบอิทธิพลของความลึกจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ระหว่างค่า 2 ถึง 4 ทั้งนี้หาค่าโดยวิธีประมาณเช่นกัน

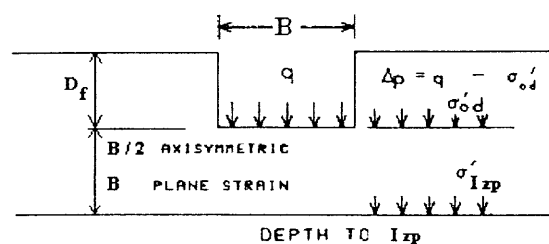
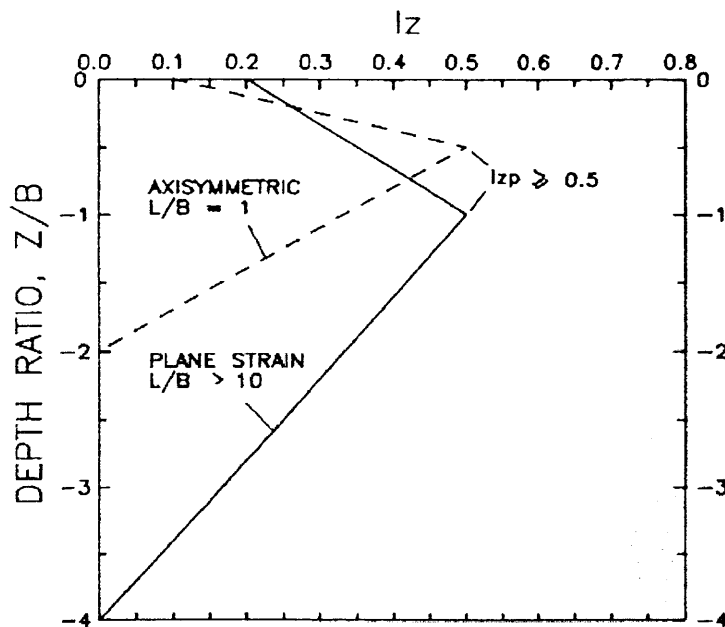
$$I_{zp} = 0.5 + 0.1 \left[\frac{\Delta p}{\sigma'_{Izp}} \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

กรณีที่ $L/B = 1$

$$\sigma'_{Izp} = 0.5 \cdot B \cdot \gamma' + D_f \cdot \gamma' \quad (3.21)$$

กรณีที่ $L/B \geq 10$

$$\sigma'_{Izp} = B \cdot \gamma' + D_f \cdot \gamma' \quad (3.22)$$



ภาพที่ 3.4 ความหมายของตัวแปรสำหรับวิธีของ Schmertmann (U.S. Army Corps of Engineers, 1990)

(2) การประมาณค่าการทรุดตัวฐานรากโดยวิธีของ Perloff

การทรุดตัวทันทีที่ศูนย์กลาง และขอบของฐานรากบนดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินหาได้จากสมการที่ 3.23 การประมาณค่าการทรุดตัวของ Perloff เป็นการประมาณค่าการทรุดตัวทันทีที่ศูนย์กลางโดยไม่มีตัวประกอบของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นควรพิจารณาการอัดตัวคายน้ำในกรณีต้องการศึกษาระยะเวลานาน

$$\rho_i = I \cdot q \cdot B \cdot \left[\frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \right] \cdot \alpha \quad (3.23)$$

โดย ρ_i = ค่าการทรุดตัวทันทีที่ศูนย์กลาง หน่วยเป็นฟุต

α = ค่าตัวประกอบปรับแก้สำหรับดินชั้นที่รองรับชั้นดินที่กำลังพิจารณา ดังตารางที่ 3.4

I = ค่าตัวประกอบอิทธิพลสำหรับกรณีดินมีความลึกที่มีขอบเขตและมีชั้นดินที่แข็งแรงกว่ารองรับข้างใต้ แสดงค่าในตารางที่ 3.5

q = ความดันทั้งหมดจากฐานราก หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

B = ความกว้างของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

L = ความยาวของฐานราก หน่วยเป็นฟุต

ν_s = อัตราส่วนปัวร์ซองของดิน

E_{s1} or E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินที่กำลังพิจารณา หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

E_{s2} = โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินที่รองรับ หน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต

H = ความหนาของชั้นดิน หน่วยเป็นฟุต

ตารางที่ 3.4 ค่าตัวประกอบปรับแก้สำหรับดินชั้นที่รองรับชั้นดินที่กำลังพิจารณา

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
Infinite	1.000	0.500	0.200	0.100	0.010

(U.S. Army Corps of Engineers, 1990)

ตารางที่ 3.5 ค่าตัวประกอบอิทธิพลสำหรับกรณีดินมีความลึกที่มีขอบเขต ที่ศูนย์กลางฐานราก

รูปร่าง		วงกลม	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	สี่เหลี่ยมผืนผ้า		
L/B			1	2	5	10
H/B	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	0.70	0.70	0.80	0.80	0.80
	2	0.85	0.95	1.15	1.25	1.25
	3	0.90	1.00	1.25	1.45	1.50
	4	0.90	1.05	1.30	1.60	1.65
	5	0.95	1.10	1.30	1.70	1.80

2.2 การอัดตัวคายน้

การอัดตัวคายน้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดินด้วยการคายน้ออกจากช่องว่าง ทำให้มีปริมาณความชื้นลดลง และปริมาตรลดลง สำหรับดินเหนียวที่มีค่า k ต่ำ เป็นดินชนิดหลักที่มีปัญหาการทรุดตัว การทรุดตัวจะเกิดขึ้นในระยะเวลายาวนาน

ปริมาณการทรุดตัวทั้งหมด (Total settlement) ของชั้นดินที่ถูกน้หนักบรรทุกกดทับ สามารถคำนวณได้จากสมการค่าทรุดตัวของชั้นดินอัดตัวตามปกติ (Normally consolidate clay : NCC) ดังแสดงในสมการที่ 3.24 แต่สมการนี้ไม่ได้ให้ความสัมพันธ์ของอัตราการทรุดตัว (Rate of consolidation)

$$S = \frac{C_c}{1 + e_o} \cdot H \cdot \log \left(\frac{P'_o + \Delta P}{P'_o} \right) \quad (3.24)$$

โดย S = ค่าการทรุดตัว
 H = ความหนาของชั้นดินที่พิจารณา
 C_c = ค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index)
 e_o = อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial void ratio)
 P'_o = ความดันประสิทธิผลก่อนการกดทับเพิ่มในธรรมชาติที่กึ่งกลางชั้นดิน
 ΔP = ความดันเพิ่มขึ้น ณ จุดกึ่งกลางของชั้นดินที่พิจารณาเป็นผลเนื่องจากแรงดันดินใต้ฐานราก
 คำนวณจากการกระจายของแรงดันดินใต้ฐานรากในหัวข้อที่ 3 ต่อไป

Terzaghi ได้เป็นผู้นำเสนอทฤษฎีอัตราการทรุดตัวทางคณิตศาสตร์ในปี 1925 ดังแสดงในสมการที่ 3.25 โดยสมการดังกล่าวตั้งสมมุติฐานหลักไว้ดังนี้ คือ ดินอัดตัวด้วยน้ ดินมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทุกทาง น้ไหลออกทิศทางเดียวในแนวแรงกดทับ ใช้กฎของดาร์ซีสำหรับการไหลของน้

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.25)$$

โดย u = ความดันน้ำ
 t = เวลา
 z = ความลึก
 C_v = สัมประสิทธิ์การอัดตัว (Coefficient of consolidation)

จากสมการข้างต้นเมื่อนำมาแก้สมการภายใต้ขอบเขตการระบายน้ำและอธิบายโดยใช้ค่าเฉลี่ยดิกรีการอัดตัว (Degree of consolidation) ดังสมการที่ 3.26 และสามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ 3.27 และ 3.28 ซึ่งค่าเฉลี่ยดิกรีการอัดตัวจะขึ้นอยู่กับค่าองค์ประกอบของเวลา

$$U = \frac{S_t}{S} = 1 - \frac{\left(\frac{1}{2}H\right)_o \int_0^{2H} u_z dz}{u_o} \quad (3.26)$$

สำหรับ $T_v \leq 0.217$ ($U \leq 52.6\%$)

$$U = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \cdot 100\% \quad (3.27)$$

สำหรับ $T_v > 0.217$ ($U > 52.6\%$)

$$U = \left[1 - 10^{-\left(\frac{0.085 + T_v}{0.933}\right)} \right] \cdot 100\% \quad (3.28)$$

โดย U = ค่าเฉลี่ยดิกรีการอัดตัว
 S_t = ค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่เวลา t
 S = ค่าทรุดตัวสูงสุด (จากสมการที่ 3.24)
 T_v = ค่าองค์ประกอบเวลา

ค่าองค์ประกอบของเวลาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.29 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว โดยค่าจะลดลงเมื่อดินมีค่าพิกิตเหลวสูงขึ้น การหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวจะหาจากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test)

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} \quad (3.29)$$

โดย C_v = ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัว
 H_d = ระยะทางระบายน้ำที่ยาวที่สุด
 t = ระยะเวลาที่จะพิจารณาการเกิดการอัดตัวคายน้ำ

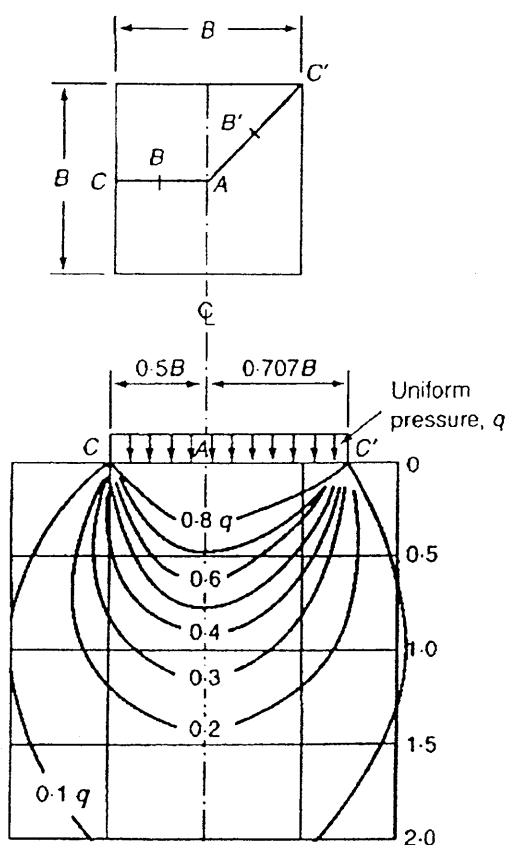
3. การกระจายปริมาณหน่วยแรงในดิน

ปริมาณหน่วยแรงในดินซึ่งเกิดจากความดันที่ฐานรากกระทำต่อดินขึ้นอยู่กับตัวประกอบที่สำคัญ 3 ประการ คือ ชนิดของดิน ขนาดของความดันที่ฐานรากกระทำ และความลึกจากระดับใต้ฐานราก

ชนิดของดินนั้น ถึงแม้ว่าจะมีผลต่อการกระจายหน่วยแรงในดินโดยดินแข็งจะกระจายหน่วยแรงได้ดีกว่าดินอ่อนก็ตาม แต่ในงานฐานรากตื้นนั้น ฐานรากจะวางอยู่บนชั้นดินที่แข็งแรงพอสมควร จึงไม่คำนึงถึงชนิดของดินในการกระจายหน่วยแรง

ขนาดของความดันและความลึกจากใต้ระดับฐานรากมีผลต่อค่าหน่วยแรงในดิน การประมาณค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในดินที่จุดต่างๆ เนื่องจากความดันฐานรากสามารถคำนวณค่าได้มีวิธีการต่างๆหลายวิธี ซึ่งการประมาณค่าหน่วยแรงในดินจากกระเปาะหน่วยแรงดังแสดงในภาพที่ 3.5 เมื่อพิจารณาจากกระเปาะหน่วยแรงแล้วมีประเด็นที่น่าสนใจอยู่สองประเด็น คือ

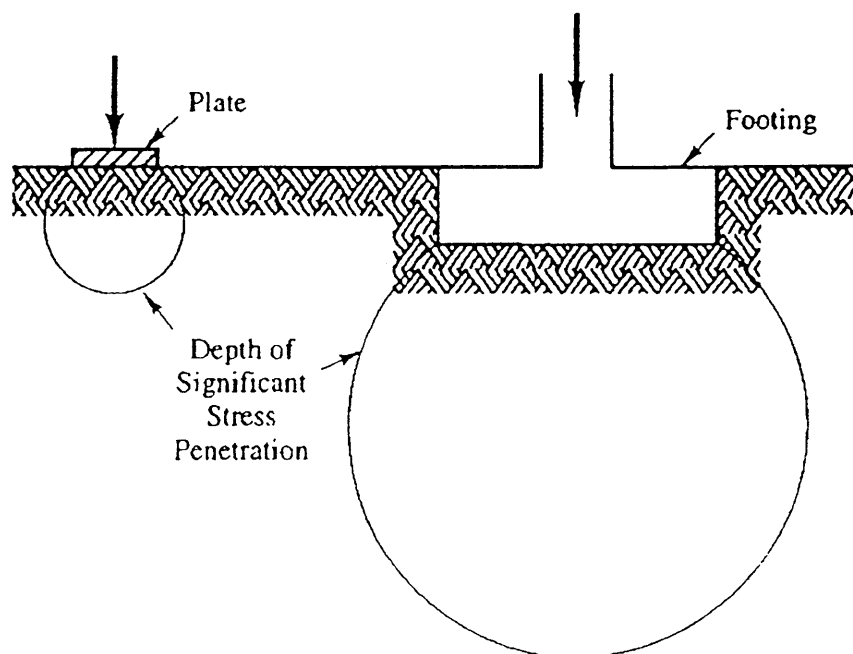
(1) ถ้าอาคารที่กำลังออกแบบมีตอม่อสองตัว ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกต่างกันมากการเลือกขนาดฐานรากโดยใช้ค่าที่ได้จากการหารน้ำหนักบรรทุกด้วยกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของดิน จะทำให้ได้ฐานรากสองตัวมีค่าความดันที่กระทำต่อดินใกล้เคียงกันแต่มีขนาดต่างกัน จะพบว่าฐานรากที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้หน่วยแรงในดิน ณ จุดเดียวกันเพิ่มขึ้นมากกว่า หรืออาจกล่าวอีกอย่างได้ว่า ฐานรากขนาดใหญ่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงในดินมากกว่าและลงไปลึกกว่า นั่นคือ ฐานรากขนาดใหญ่จะมีค่าการทรุดตัวสูงกว่าฐานรากขนาดเล็กที่มีค่าความดันเท่ากัน ดังนั้นต้องระมัดระวังเป็นพิเศษสำหรับการออกแบบฐานรากอาคารที่มีตอม่อรับน้ำหนักบรรทุกต่างกันมาก



ภาพที่ 3.5 กระเปาะหน่วยแรงของดินใต้ฐานรากชนิดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทั้งในแนวนอนกับขอบฐานราก และแนวเส้นแรงแผ่นมุม (Simons, N.E. & Menzies, B.K., 1977)

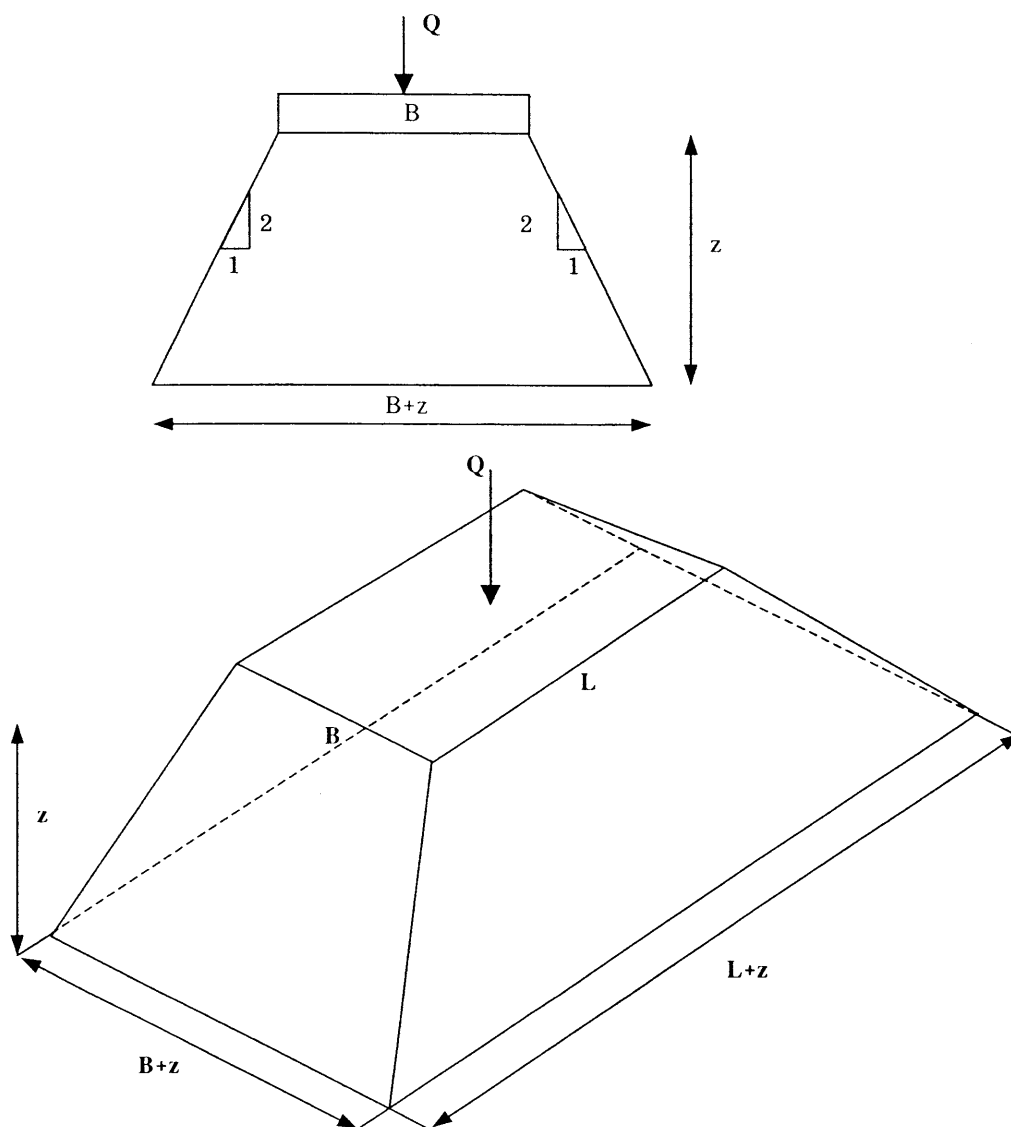
(2) การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินโดยใช้แผ่นเหล็ก เป็นการทดสอบในสนามโดยตรงที่ชั้นดินนั้นซึ่งจะทำการก่อสร้างฐานรากจริง ค่าที่ได้จะทำให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือได้ตั้งแต่เมื่อพิจารณาการทดสอบนั้นใช้แผ่นเหล็กขนาด 0.30x0.30 เมตร กระทำ ณ ที่ความลึกเพียงไม่ถึงหนึ่งเมตร หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในดินก็เกือบเป็นศูนย์ แต่ในฐานรากจริงซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า เช่นฐานรากขนาด 2.00x2.00 เมตร ค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับความลึกมากกว่าสี่เมตร กล่าวคือฐานรากจริงจะมีอิทธิพลต่อดินมากกว่าแผ่นเหล็กทดสอบถึงแม้จะมีค่าความดันเท่ากันก็ตามดังแสดงในภาพที่ 3.6 ดังนั้นถึงแม้ผลการทดสอบจริงในสนามจะแสดงให้เห็นว่าดินมีกำลังสูงพอสำหรับค่าที่ออกแบบไว้ก็ตาม ควรพิจารณาในแง่ของการทรุดตัวด้วย เพราะฐานรากจริงจะมีการทรุดตัวมากกว่าการทรุดตัวของแผ่นเหล็กทดสอบที่มีค่าความดันเท่ากัน นอกจากนี้ควรทราบสภาพชั้นดินใต้ระดับฐานรากลงไปอีกด้วย เพราะหากมีชั้นดินอ่อนอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของดินเมื่อรองรับฐานรากจริง

สมการที่ใช้ในการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินนั้น พิจารณาพารามิเตอร์และขนาดของฐานรากแต่ละตัวโดยไม่ได้คำนึงถึงค่าการทรุดตัว ดังนั้นหากอาคารหลังเดียวกันมีฐานรากหลายขนาดอยู่ด้วยกันแล้วนั้นย่อมมีโอกาสที่จะเกิดปัญหาการทรุดตัวไม่เท่ากันของฐานราก เนื่องจากการกระจายหน่วยแรงลงไปลึกไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้



ภาพที่ 3.6 หน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในมวลดิน เนื่องจากการทดสอบโดยใช้แผ่นเหล็กและฐานราก
(Coduto, D.P., 1994)

การประมาณหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในมวลดินเนื่องจากผลกระทำของความดันใต้ฐานราก สามารถหาได้โดยการสมมุติว่าแนวของการกระจายหน่วยแรงแผ่ออกจากพื้นที่ของแรงกระทำที่ผิวดินด้วยสัดส่วนความชัน 2 : 1 (ระยะในแนวดิ่ง : ระยะในแนวราบ) ดังแสดงในภาพที่ 3.7 วิธีนี้จะสมมติว่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นที่แต่ละความลึกมีความสม่ำเสมอ เมื่อตำแหน่งความลึกที่พิจารณามีค่ามากขึ้นค่าความผิดพลาดของวิธีประมาณจะลดน้อยลง วิธีการนี้โปรแกรมได้นำมาใช้ในการประมาณหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในมวลดิน



ภาพที่ 3.7 การประมาณหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในมวลดิน โดยพิจารณาจากความชัน

4. อัตราส่วนค่าทรุดตัวของฐานรากอ้างอิงกับฐานรากอื่นๆ

การออกแบบฐานรากให้มีปัญหาหลักๆ อยู่สองประการ คือ การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินกับการทรุดตัวของฐานราก ในส่วนการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินได้ใช้แบบจำลองทั้งสองแบบ ในหัวข้อที่ 1 ในการประมาณซึ่งจะเกี่ยวข้องกับขนาดของฐานรากที่เป็นตัวประกอบในการประมาณ ในส่วนการทรุดตัวของฐานรากประมาณจากในหัวข้อที่ 2 จะเกี่ยวข้องกับความดันที่ฐานรากกระทำกับดิน แล้วยังเกี่ยวข้องกับขนาดของฐานรากอีกด้วย

เมื่อคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของดินใต้ในส่วนของค่าการทรุดตัวจะพิจารณาเฉพาะฐานรากอ้างอิงเท่านั้น และใช้อัตราส่วนการทรุดตัวของฐานรากอ้างอิงเทียบหาค่าการทรุดตัวของฐานรากทุก ๆ ฐานในอาคาร ซึ่งจากทฤษฎีอัสติค ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งทุก ๆ จุดบนพื้นผิวดินที่สัมผัสกับฐานรากภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดแบบวงกลมหรือสี่เหลี่ยม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.30

$$S = K_o q B \quad (3.30)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} S &= \text{ค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง} \\ K_o &= \text{ค่าคงที่ของสัดส่วน} \\ q &= \text{ค่าความดันดินที่ฐานรากกระทำต่อดินจริง} \end{aligned}$$

ค่าคงที่ของสัดส่วนเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับรูปร่าง ความลึก อัตราส่วนระหว่างความกว้าง และความยาวของฐานราก ปัวร์ซองเรโซของดิน เป็นต้น ซึ่งเป็นการยุ่งยากที่จะหาค่าได้ถูกต้อง จึงเลี่ยงจากค่านี้โดยพิจารณาในรูปแบบของอัตราส่วนฐานรากต่อฐานรากแทนดังแสดงในสมการที่ 3.31 แล้วเปลี่ยนค่าความดันดินที่ฐานรากเป็นน้ำหนักบรรทุกลงฐานราก ($q = Q/A$) โดยพิจารณาฐานรากเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($A=B^2$, B คือ ความกว้างของฐานราก) พร้อมทั้งคูณด้วย B_1/B_1 และ B_2/B_2 ของค่าความดันดินทั้งสองในสมการขวามือของสมการที่ 3.31 จะได้สมการใหม่ดังแสดงในสมการที่ 3.32

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{q_1 B_1}{q_2 B_2} \quad (3.31)$$

เป็น

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{Q_1}{B_1} \right) / \left(\frac{Q_2}{B_2} \right) \quad (3.32)$$

ในกรณีที่ต้องการควบคุมให้การทรุดตัวของฐานรากทุกตัวเท่ากันหมด นั่นคือ S_1/S_2 จะมีค่าเป็นหนึ่งทำให้สมการที่ 3.32 จะเปลี่ยนเป็นสมการที่ 3.33

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{B_1}{B_2} \quad (3.33)$$

จากสมการที่ 3.32 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าการทรุดตัวของฐานรากเทียบกับฐานรากอ้างอิงหรือหาขนาดของฐานรากที่ทำให้เกิดการทรุดตัวไม่เท่ากันอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย

5. เกณฑ์การยอมรับค่าการทรุดตัว

เกณฑ์สูงสุดของการทรุดตัวของฐานรากที่ยอมรับได้ของสิ่งก่อสร้างแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้ คือ จะต้องไม่เสียประโยชน์ใช้สอยของสิ่งก่อสร้าง ไม่ทำให้องค์อาคารหรือโครงสร้างที่เกี่ยวข้องเสียหาย และไม่เสียความสวยงามที่จำเป็นของสิ่งก่อสร้าง

ดังนั้นการกำหนดค่าทรุดตัวที่ยอมรับได้ ต้องคำนึงถึงประโยชน์ใช้สอย ชนิดของวัสดุก่อสร้าง ความแข็งแรงหรือยืดหยุ่นของสิ่งก่อสร้าง ความสวยงาม และข้อบัญญัติตามความต้องการและความจำเป็นในแต่ละท้องถิ่น การพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

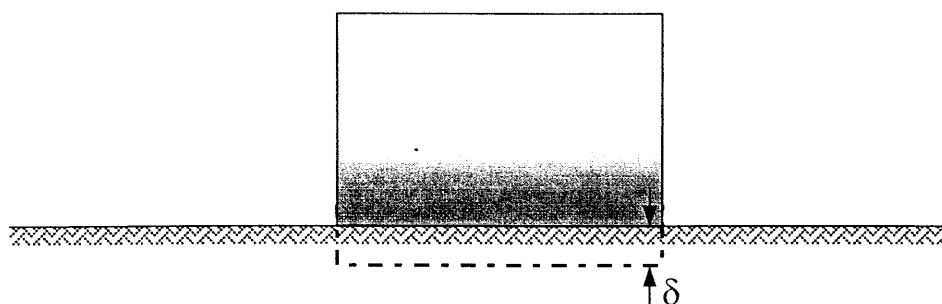
(1) ฐานรากทรุดตัวเท่า ๆ กัน

การทรุดตัวเท่า ๆ กันแสดงไว้ในภาพที่ 3.8 ซึ่งพิจารณาการทรุดตัวสูงสุดเป็นเกณฑ์ โดยอาคารอาจเกิดการทรุดตัวทั้งหลังได้มากที่สุดดังค่าในตารางที่ 3.6 แต่อาคารส่วนใหญ่ไม่ควรให้การทรุดตัวมากเกินไปกว่า 2.5 เซนติเมตร เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบสาธารณูปโภค การระบายน้ำ และการเชื่อมต่อถนนที่เข้าสู่อาคาร เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามอาคารบางประเภทเช่น ไซโล และหอสูง อาจยอมให้เกิดการทรุดตัวได้มากถึง 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.6 ค่าการทรุดตัวเฉลี่ยสูงสุดที่ยอมรับได้ของอาคาร

ประเภทของอาคาร	ค่าการทรุดตัว(cm.)
อาคารที่ใช้กำแพงอิฐ มีอัตราส่วนความยาวต่อความสูงเกิน 2.5	7.5
อาคารที่ใช้กำแพงอิฐ มีอัตราส่วนความยาวต่อความสูงไม่เกิน 1.5	10.0
โครงสร้างที่เป็นโครงข้อแข็ง	10.0
อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กำแพงอิฐ	15.0
ไซโล หอ และอาคารที่ใช้งานในลักษณะเดียวกัน และใช้ฐานรากแผ่พื้นรวมคอนกรีตเสริมเหล็ก	30.0

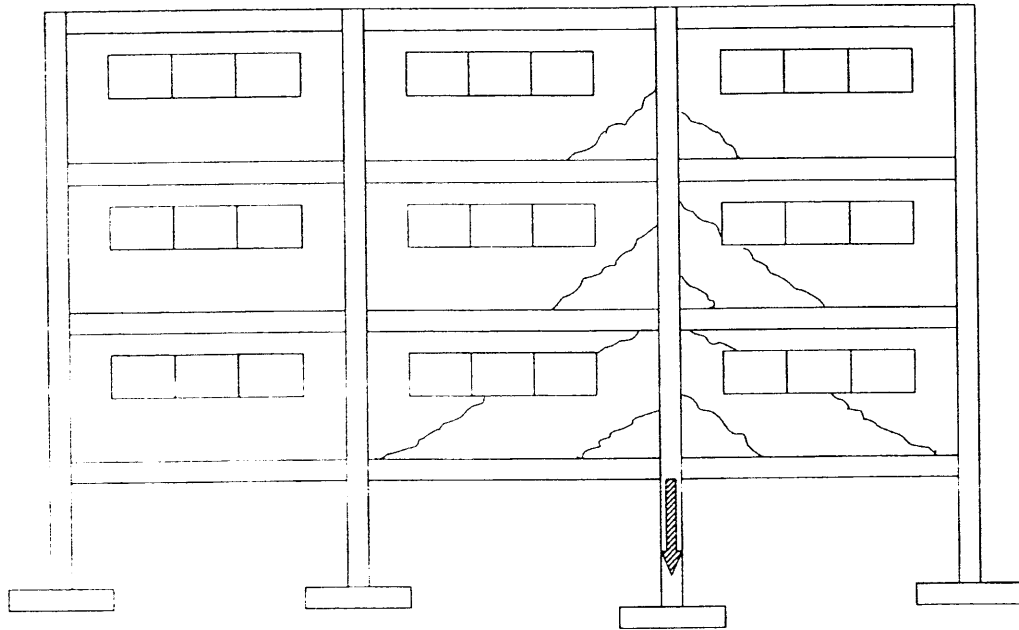
(วัชรินทร์ กาสลัก และ วรากร ไม้เรียง, 2547)



ภาพที่ 3.8 การทรุดตัวเท่า ๆ กันของอาคาร (วัชรินทร์ กาสลัก และ วรากร ไม้เรียง, 2547)

(2) ฐานรากทรุดตัวไม่เท่ากัน

อาคารโดยทั่วไปมีฐานรากหลายตัว หากฐานรากแต่ละตัวทรุดตัวไม่เท่ากันแล้วอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้ดังแสดงในภาพที่ 3.9 อาคารที่มีปัญหานี้จะทำให้ประตูดังกล่าวใช้งานไม่ได้ ระบบประปาเสียหาย และถ้ารุนแรงมากอาจทำให้อาคารพังทลายได้



ภาพที่ 3.9 ความเสียหายของโครงสร้างเนื่องจากการทรุดตัวไม่เท่ากันของฐานราก (วัชรินทร์ กาสลัก และ วรากร ไผ่เรียง, 2547)

การพิจารณาความรุนแรงของปัญหาการทรุดตัวไม่เท่ากันนั้น อาจพิจารณาจากมุมของการบิดระหว่างฐานราก (Angular Distortion) ดังแสดงตัวแปรในภาพที่ 3.10 และสำหรับค่ามุมของการบิดที่ยอมให้แสดงไว้ในตารางที่ 3.7 พร้อมกับคำนวณค่าได้จากสมการที่ 3.34

$$\beta = \delta_{ij} / L_{ij} \quad (3.34)$$

โดย ω = ค่ามุมเอียงของอาคาร

β = มุมของการบิด เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะเคลื่อนตัวกับความยาวช่วง

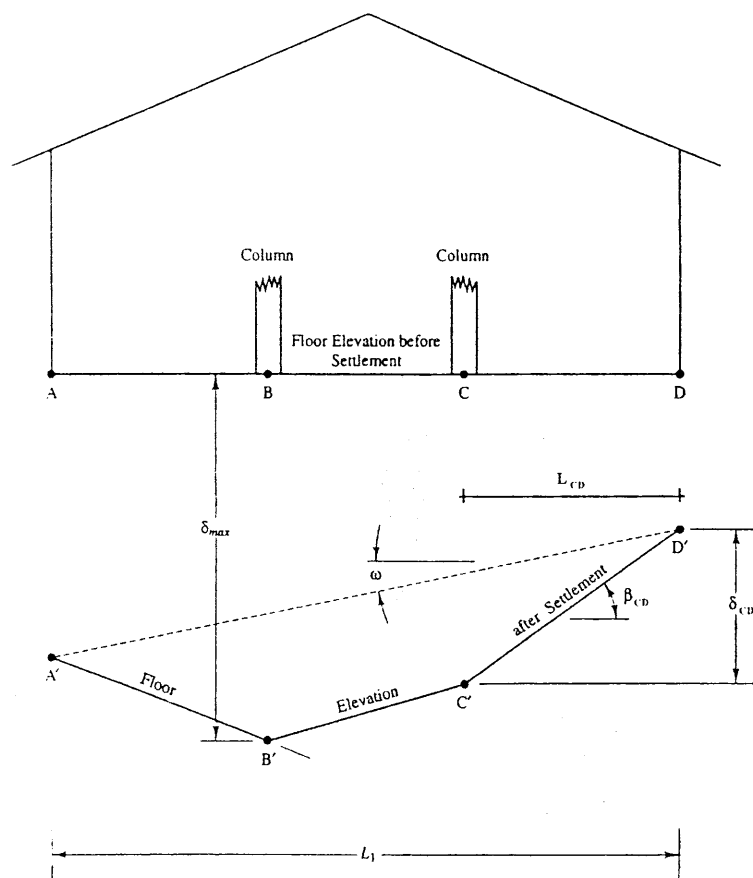
δ_{ij} = ผลต่างของระยะเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของจุด i และ j

L_{ij} = ความยาวช่วงของจุด i และ j

ตารางที่ 3.7 ค่ามุมของการบิดที่ยอมให้ของอาคาร

ลักษณะโครงสร้าง	ความยาวต่อความสูง	ค่ามุมของการบิด (δ/L)
การโค้งตัวของกำแพงไม่เสริมเหล็กที่ใช้น้ำหนักบรรทุก	-	1/2000
กำแพงอิฐหรืออิฐบล็อกที่ใช้น้ำหนักบรรทุก	≥ 5	1/1250
กำแพงอิฐหรืออิฐบล็อกที่ใช้น้ำหนักบรรทุก	≤ 3	1/2500
การแอ่นตัวของกำแพงไม่เสริมเหล็กที่ใช้น้ำหนักบรรทุก	-	1/1000
เครื่องจักรที่อาจเสียหายจากการเคลื่อนที่	-	1/750
โครงข้อแข็งที่มีชิ้นส่วนในแนวทแยง	-	1/600
อาคารทั่วไปที่ไม่มีรอยแตกกว้าง อาคารสูงเช่นตึกน้ำ ไซโล อาคารที่มีฐานรากแผ่ผืนรวม	-	1/500
อาคารเหล็กหรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐฉาบปูน	≥ 5	1/500
อาคารเหล็กหรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐฉาบปูน	≤ 3	1/1000
เมื่อพิจารณาการเอียงของอาคารสูงทั้งหลาย	-	1/250

(วัชรินทร์ กาสลัก และ วรากร ไม่เรียง, 2547)



ภาพที่ 3.10 ตัวแปรต่างๆของการทรุดตัวไม่เท่ากัน (Coduto, D.P., 1994)