

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการ

ฐานรากคือ สิ่งที่รองรับน้ำหนักจากโครงสร้างอาคารแล้วถ่ายทอดไปยังชั้นดินที่อยู่ข้างล่าง ดังนั้นถ้าชั้นดินสามารถรองรับน้ำหนักจากฐานรากได้ ฐานรากนั้นก็เลยจะไม่เกิดการพังทลาย ทั้งนี้ ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของฐานราก (q_u) ที่ใช้ในการถ่ายเทแรงจากอาคารลงสู่ชั้นดินที่รองรับด้านล่าง ได้รับผลกระทบจากปัจจัยหลายกลุ่มเช่น คุณสมบัติของดิน, การเคลื่อนตัวของดิน และคุณสมบัติของฐานราก เป็นต้น

อนึ่ง อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฐานรากเกิดการพังทลายมากที่สุดก็คือ การทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน หรือ การทรุดตัวที่มากเกินไป

ดังนั้น จะเห็นว่าความมั่นคงของฐานรากขึ้นอยู่กับ

- ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินใต้ฐานราก
- การทรุดตัวของดินใต้ฐานราก

ฐานรากจะมีอยู่ 2 ประเภทขึ้นอยู่กับ ระยะความลึกของฐานราก คือ

- shallow foundation (ฐานรากตื้น) เมื่อ $D_f \leq 3-4B$
- deep foundation (ฐานรากลึก) เมื่อมีความลึกมากกว่าฐานรากตื้น $D_f > 3-4B$

ในโครงการนี้ จะศึกษาครอบคลุมเฉพาะลักษณะผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานรากตื้น

2.2 การคำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักประลัย (Ultimate Bearing Capacity)

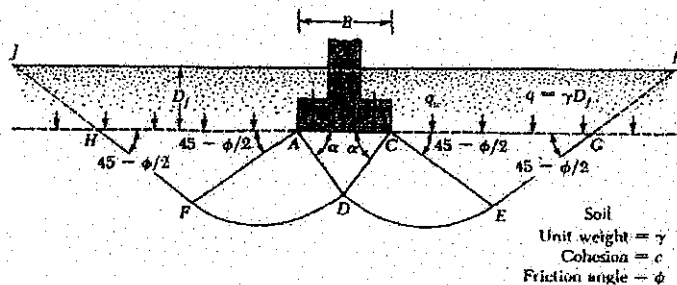
ชั้นดินสามารถรองรับน้ำหนักที่ฐานรากถ่ายเทจากโครงสร้าง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน เช่น แรงเชื่อมแน่น (c), แรงเสียดทาน (ϕ), หน่วยน้ำหนัก (γ) และการออกแบบฐานราก เช่น ขนาด รูป ร้างและความลึกของฐานราก ความสามารถในการรับน้ำหนักประลัย (q_u) ของดินสามารถคำนวณได้จาก

- Terzaghi's bearing capacity
- General bearing capacity

2.2.1 Terzaghi's Bearing Capacity

หลักการในการวิเคราะห์หา q_u โดย Terzaghi's bearing capacity สามารถแสดงได้ดังรูป 2.1 ซึ่งสมมติฐานที่สำคัญในการพัฒนาทฤษฎี ประกอบด้วย (Das, 1995)

- ระดับน้ำใต้ดินอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าฐานรากมาก
- บริเวณที่อยู่เหนือฐานรากกำหนดให้คิดเป็น $q = \gamma D_f$
- บริเวณการพังทลายของดินมี 3 ส่วน
 - บริเวณสามเหลี่ยมใต้ฐานราก ACD
 - บริเวณส่วนโค้ง DF และ DE
 - บริเวณสามเหลี่ยม AFH และ CDE
- โดยที่มุม CAD และ ACD มีค่าเท่ากับ friction angle



รูปที่ 2.1 Bearing capacity failure in soil under a rough rigid continuous foundation (Das, 1995)

ความสามารถในการวิเคราะห์โดย Terzaghi's bearing capacity แยกได้เป็น 2 กรณี ตามลักษณะการพิบัติ (failure mode) ของดิน เมื่อรับน้ำหนักกระทำที่ถ่ายเทมาฐานราก ดังนี้

2.2.1.1 กรณีที่การเคลื่อนพิบัติเป็น General Shear Failure

การวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (q_u) แยกได้ 3 แบบตามรูปร่างของฐานราก (shape of footing) ที่มองเห็นบน plan view คือ (Das, 1995)

a. ฐานรากต่อเนื่อง (Strip Foundation)

$$q_u = cN_c + qN_q + 0.5\gamma BN_\gamma \quad (2.1)$$

b. ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Foundation)

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma \quad (2.2)$$

c. ฐานรากกลม (Circular Foundation)

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.3\gamma BN_\gamma \quad (2.3)$$

โดย

q_u = ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของดิน (t/m^2)

c = แรงเชื่อมแน่นของดิน (t/m^2)

q = γD_f (t/m^2)

γ = หน่วยน้ำหนักของดิน (t/m^3)

D_f = ระยะจากผิวดินถึงใต้ระดับฐานราก (m)

B = ความกว้างของฐานราก (m)

N_c, N_q, N_γ = Bearing Capacity Factor ในสภาพ General Shear Failure สามารถหาได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Terzaghi's Bearing Capacity Factor (Das, 1995)

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	16.56	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	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.23	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

From Kumbhojkar (1993)

2.2.1.2 กรณีที่การเคลื่อนพิบัติเป็นแบบ Local Shear Failure

การวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (q_u) แยกได้ 3 แบบ ตามรูปร่างของฐานราก (shape of footing) คือ (Das, 1995)

a. ฐานรากค่อเนื่อง (Strip Foundation)

$$q_u = \frac{2}{3}cN'_c + qN'_q + 0.5\gamma BN'_\gamma \quad (2.4)$$

b. ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Foundation)

$$q_u = 0.867cN'_c + qN'_q + 0.4\gamma BN'_\gamma \quad (2.5)$$

c. ฐานรากกลม (Circular Foundation)

$$q_u = 0.867cN'_c + qN'_q + 0.3\gamma BN'_\gamma \quad (2.6)$$

โดย

$$\phi' = \tan^{-1}(2/3 \tan\phi)$$

N'_c, N'_q, N'_γ = modified bearing capacity factor ในสภาพ local shear failure สามารถหาได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 Terzaghi's Modified Bearing Capacity Factor, N_c' , N_q' , N_γ' (Das, 1995)

ϕ	N_c'	N_q'	N_γ'	ϕ	N_c'	N_q'	N_γ'
0	5.70	1.00	0.00	26	15.53	6.05	2.59
1	2.90	1.07	0.005	27	16.30	6.54	2.88
2	6.10	1.14	0.02	28	17.13	7.07	3.29
3	6.30	1.22	0.04	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	6.97	1.49	0.10	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				

2.2.1.3 Modification of Bearing Capacity Equation for Water Table

จากสมมติฐานที่ใช้ในการพัฒนาความสัมพันธ์เพื่อหา q_u ดังที่อธิบายในหัวข้อ 2.2.1.1 ultimate bearing capacity (q_u) ที่ได้ จะสะท้อนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าฐานรากมาก ($D_{GWT} \gg D_f + B$) ซึ่งหากระดับน้ำใต้ดินอยู่ใกล้ฐานราก ($D_{GWT} \leq D_f + B$) ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของชั้นดินใต้ฐานรากชั้น จะได้รับผลกระทบด้านลบ (นั่นคือ q_u ลดลง) และจำเป็นต้องรวมผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินเข้ามาในการวิเคราะห์หาค่า q_u

การวิเคราะห์หาค่า q_u โดยรวมผลกระทบของระดับน้ำใต้ดิน สามารถทำได้โดยการปรับแก้ค่า effective surcharge (q) และ effective unit weight (γ) ในทุกความสัมพันธ์ ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กรณี ตามระดับความลึกของระดับน้ำใต้ดิน (D_{GWT}) เทียบกับระดับความลึก (D_f) และความกว้างของฐานราก (B) ดังรูปที่ 2.2 คือ (Das, 1995)

a. ระดับน้ำอยู่ระหว่างผิวดินและ D_f ($0 \leq D_1 \leq D_f$)

ให้คำนวณโดยใช้ Terzaghi's bearing capacity โดย

1. ปรับค่า factor q เป็น $q = \text{effective surcharge} = D_1\gamma + D_2(\gamma_{sat} - \gamma_w)$ (2.7)

โดย γ_{sat} = หน่วยน้ำหนักของดินอิ่มตัว (t/m^3)

γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (t/m^3)

2. ปรับค่า γ ใน term สุดท้ายในสมการเป็น $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

b. ระดับน้ำอยู่ระหว่าง D_f และ $D_f + B$ ($0 \leq d \leq B$)

ให้คำนวณโดยใช้ Terzaghi's bearing capacity โดย

1. ปรับค่า factor q เป็น $q = \gamma D_f$

2. ปรับค่า γ ใน term สุดท้ายในสมการเป็น $\bar{\gamma} = \gamma' + \frac{d}{B}(\gamma_{sat} - \gamma_w)$

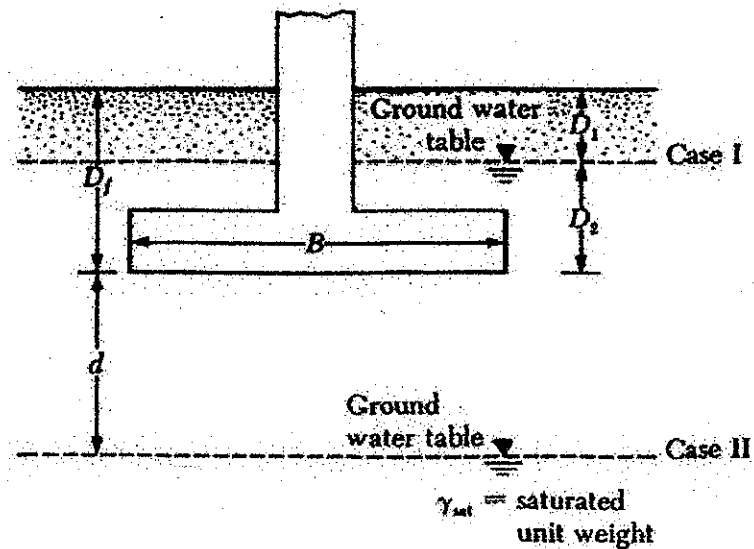
c. ระดับน้ำมีค่ามากกว่า $D_f + B$ ($d \geq B$)

ระดับน้ำจะไม่มีผลกับค่า ultimate bearing capacity (q_u)

ทั้งนี้ในการจัดทำโครงการนี้จะศึกษาเฉพาะ กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับของผิวดิน ($D_{GWT}=0$) นั่นคือจะทำการวิเคราะห์หา q_u โดยพิจารณาจาก q จาก

$$q = (\gamma_{sat} - \gamma_w) D_f$$

$$\gamma = \gamma_{sat} - \gamma_w$$



รูปที่ 2.2 Modification of bearing capacity equation for water table (Das, 1995)

2.2.2 General Bearing Capacity Equation

Terzaghi's bearing capacity ที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.2.1 จะครอบคลุมเฉพาะฐานรากต่อเนื่อง, ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส และฐานรากกลมเท่านั้น จึงมีการพัฒนา Terzaghi's bearing capacity มาเป็น general bearing capacity เพื่อให้วิเคราะห์ได้ในกรณีที่เป็นฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular foundation) ซึ่ง $0 < B/L < 1$ และปัจจัยที่มีผลกระทบจากรูปร่าง, ความลึกของฐานราก ดังที่ Meyerhof (1963) เสนอคือ (Das, 1995)

$$q_u = c N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (2.8)$$

โดย

N_c, N_q, N_γ = Bearing Capacity Factor หาได้จากตารางที่ 2.3

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$ = ปัจจัยทางด้านรูปร่าง หาได้จากตารางที่ 2.4

$F_{cd}, F_{\gamma d}, F_{qd}$ = ปัจจัยทางด้านความลึก หาได้จากตารางที่ 2.4

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$ = ปัจจัยทางด้านความลาด หาได้จากตารางที่ 2.4

ทั้งนี้ในการศึกษา general bearing capacity เพื่อใช้ในการคำนวณ ในกรณีที่มีผลกระทบจากรูปร่างของฐานราก ความลึกของฐานราก และแรงที่กระทำลงฐานราก ไม่อยู่ในแนวตั้ง

ตารางที่ 2.3 Bearing Capacity Factors for General Bearing Capacity Equation (Das, 1995)

ϕ	N_c	N_q	N_γ	ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1.00	0.00	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.20	14.47
2	5.63	1.20	0.15	28	25.80	14.72	16.72
3	5.90	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.40	22.40
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.99
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.64	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.86	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.30	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.80	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	5.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.20	109.41
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.90	130.22
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.55
17	12.34	4.77	3.53	43	105.11	99.02	186.54
18	13.10	5.26	4.07	44	118.37	115.31	224.64
19	13.39	5.80	4.68	45	133.88	134.88	271.76
20	14.83	6.40	5.39	46	152.10	158.51	330.35
21	15.82	7.07	6.20	47	173.64	187.21	403.67
22	16.88	7.82	7.13	48	199.26	222.31	496.01
23	18.05	8.66	8.20	49	229.93	265.51	613.16
24	19.32	9.60	9.44	50	266.89	319.07	762.89
25	20.72	10.66	10.88				
After Vesic (1973)							

ตารางที่ 2.4 Shape, Depth, and Inclination Factors Recommended (Das, 1995)

Factor	Relationship	Source
Shape	$F_{cs} = 1 + \frac{B Nq}{L Nc}$ $F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi$ $F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$ <p>Where L = length of foundation (L > B)</p>	De Beer (1970)
Depth	<p>Condition (a): $Df / B \leq 1$</p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{Df}{B}$ $F_{qs} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{Df}{B}$ $F_{\gamma d} = 1$ <p>Condition (b): $Df / B > 1$</p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \tan^{-1} \frac{Df}{B}$ $F_{qs} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \frac{Df}{B}$ $F_{\gamma d} = 1$	Hansen (1970)
Inclination	$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ}\right)^2$ $F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{\phi^\circ}\right)^2$ <p>Where β = inclination of the load on the foundation with respect to the vertical</p>	Meyerhof (1963); Hanna and Meyerhof (1981)
<p>These shape factors are empirical relation based on extensive laboratory test.</p> <p>The factor $\tan^{-1} (Df/B)$ is in radians.</p>		

2.3 การทรุดตัว

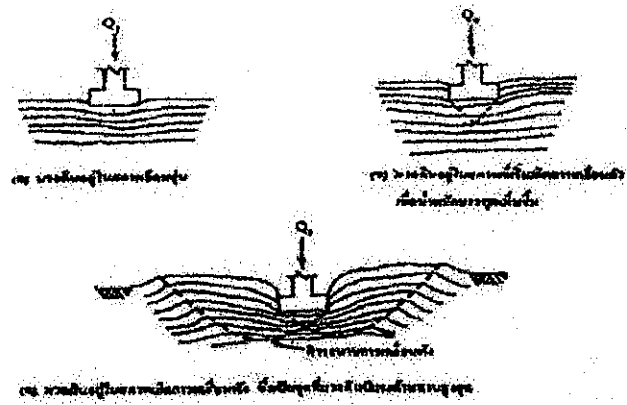
การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวของดิน โดยเฉพาะดินเหนียว จะมีความสำคัญ และเป็นปัญหา มากที่สุดในการทรุดตัวของฐานรากตื้นรองรับ โครงสร้าง สำหรับดินทรายหรือชั้นดินที่น้ำสามารถ ซึมผ่านได้ง่าย จะพิจารณาได้ว่าการทรุดตัวจะเกิดในช่วงระหว่างเวลาการก่อสร้าง ดังนั้น จึงไม่เป็น ปัญหามากนัก

ส่วนดินเหนียวและดินตะกอนน้ำ ไหลซึมผ่าน ได้ยาก การยุบอัดตัวของดินประเภทนี้จึงเกิดต่อ เนื่องกันเป็นปี ๆ และการยุบอัดตัวของดินประเภทนี้ก็ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการกระจายแรงดันไม่ เท่ากันและการเปลี่ยนแปลงในดินทั้งทางกว้างและทางลึก ดังนั้นจึงเป็นปัญหาอย่างมาก ซึ่ง ไม่เกี่ยวข้องกับการดำเนิน โครงการจึงไม่กล่าวภาคการคำนวณมา ณ ที่นี้ (Das, 1995)

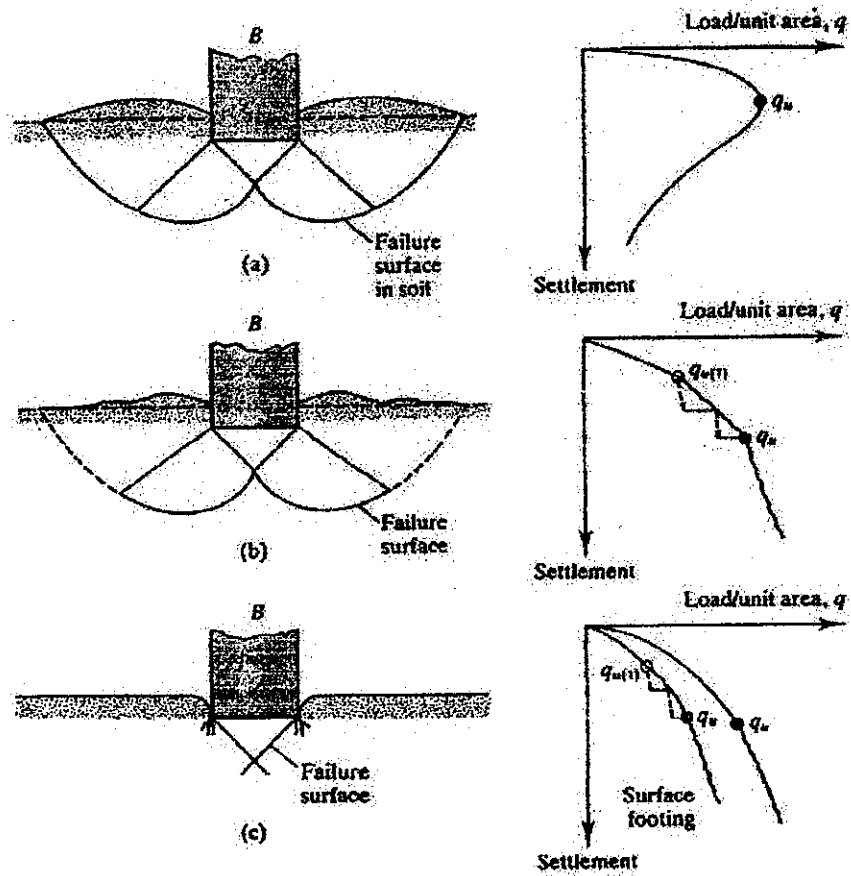
2.4 การขยับตัวและการเคลื่อนพัง

เมื่อน้ำหนักของ โครงสร้างลงสู่ชั้นดินที่รองรับฐานรากโดยตรง ทำให้มวลดินในชั้นดินเกิดการ ขยับตัวและเกิดการเคลื่อนพัง (bearing failure) ในกรณีที่มวลดินไม่สามารถต้านทานน้ำหนักที่ บรรทุก ฐานรากจะเกิดการทรุดตัวจนไม่สามารถที่จะใช้งานได้ต่อไป การเคลื่อนพังของดินชั้นฐาน รากเนื่องจากแรงเฉือนสามารถจำแนก ได้ดังรูปที่ 2.3 พฤติกรรมของดินชั้นฐานรากที่มีต่อน้ำหนัก บรรทุกสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงแบกทานกับการทรุดตัวของชั้นดินฐานราก ด้วยเส้นกราฟ ดังรูปที่ 2.4 คือ (Das, 1995)

- General shear failure จะเกิดกับดินฐานรากจำพวกทรายอัดแน่นหรือดินแข็งภายใต้สภาพ ความขุบตัวน้อยมาก ซึ่งผิวการเคลื่อนพัง (failure plane) ปรากฏชัดเจน
- Local shear failure จะเกิดกับดินฐานรากจำพวกทรายหลวมปานกลางหรือดินค่อนข้างแข็ง ผิวการเคลื่อนพังของมวลดินจะปรากฏเฉพาะบางส่วน
- Punching shear failure จะเกิดกับดินฐานรากจำพวกดินอ่อนหรือทรายสภาพหลวม ซึ่งผิว การเคลื่อนพังจะไม่ปรากฏมีเฉพาะการขุบตัวเท่านั้น ซึ่งฐานรากจำพวกดินอ่อนหรือทรายสภาพ หลวม ไม่เหมาะต่อการออกแบบฐานรากแผ่



รูปที่ 2.3 สภาพการเคลื่อนพังของมวลดิน (Das, 1995)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเคลื่อนพังของฐานราก (Das, 1995)