

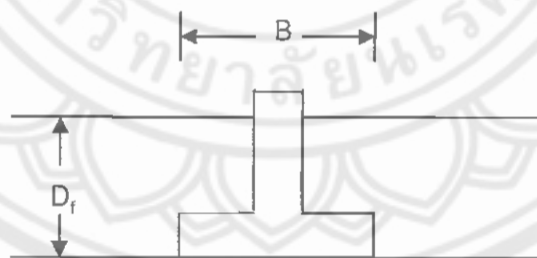
## บทที่ 6 ฐานรากตื้น (Shallow Foundation)

### 6.1 เนื้อหาโดยย่อ

ฐานราก(Footing) ทำหน้าที่รับน้ำหนักจากโครงสร้างทั้งหมด แล้วถ่ายน้ำหนักลงสู่เสาเข็มหรือดินโดยตรง คุณสมบัติที่ดีของดินที่รองรับฐานราก ควรมีความสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ โดยไม่มีการเคลื่อนตัวหรือพังลายของดินใต้ฐานรากและต้องไม่เกิดการทรุดตัวลงมากจนก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้าง

ฐานรากตื้น(Shallow Foundation)

ฐานรากตื้น(Shallow Foundation) หมายถึง ฐานรากซึ่งลึกจากระดับผิวดิน ( $D_f$ ) น้อยกว่าหรือเท่ากับด้านที่สั้นที่สุด ( $B$ ) ของฐานรากซึ่งภายหลังยอมให้ระดับความลึกจากระดับผิวดินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3-4 เท่าของด้านที่สั้นที่สุดของฐานราก ( $D_f \leq 3-4 B$ )



ประเภทของฐานราก

ฐานรากสามารถแบ่งประเภทได้ตามรูปร่างและลักษณะของน้ำหนักบรรทุกได้ดังนี้

1. ฐานเดี่ยว

ฐานเดี่ยว (Isolate footing) เป็นฐานรากเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกของเสาหรือตอม่อต้นเดียว อาจเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือรูปอื่นก็ได้

2. ฐานได้กำแพงหรือฐานแบบต่อเนื่อง

ฐานใต้กำแพงหรือฐานแบบต่อเนื่อง (Strip footing) ใช้รับน้ำหนักกำแพง ดังนั้นฐานรากจึงมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเป็นแถบยาวต่อเนื่องกันไปตามความยาวของกำแพง ส่วนความกว้างของฐานแผ่แปรได้แต่โดยปกติจะกว้างกว่าความหนาของกำแพง

### 3. ฐานร่วม

ฐานร่วม (Combined footing) เป็นฐานรากเพื่อใช้รับน้ำหนักบรรทุกของเสาหรือตอม่อสองต้นขึ้นไป ฐานร่วมพบในกรณีที่เสาเหล่านั้นอยู่ใกล้กันมาก จนฐานรากเกยกันหรือมีฉะนั้นอาจเป็นเพราะฐานรากใด ๆ ที่ไม่เสถียร จึงจำเป็นต้องยึดไว้กับฐานรากอื่นที่อยู่ใกล้เคียงกัน

### 4. ฐานชนิดมีคานรัด

ฐานชนิดมีคานรัดหรือฐานชนิดเขต (Cantilever footing) เป็นฐานรากร่วมชนิดหนึ่งรับน้ำหนักบรรทุกของเสาตอม่อหรือกำแพงที่อยู่ริมขอบฐานทำให้น้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงสู่ฐานรากเยื้องกับศูนย์ถ่วงของตัวฐาน เช่น ฐานรากที่อยู่ใกล้แนวเขตที่ดิน ฐานรากชนิดนี้ไม่เสถียร คือมีแนวโน้มที่จะพลิกล้ม (Overtum) ได้ง่าย จึงจำเป็นต้องยึดไว้กับฐานรากอื่นที่อยู่ใกล้เคียงกันโดยมีคานยึด (Strap beam) คานยึดนี้อาจยกระดับขึ้นเหนือระดับฐานรากหรือซ่อนหรือซ่อนภายใต้ (Common) เป็นส่วนหนึ่งของฐานรากได้

### 5. ฐานแพ

ฐานแพ (Raft or mat foundation) เป็นฐานร่วมขนาดใหญ่ใช้รับน้ำหนักบรรทุกของเสาหลาย ๆ ต้น โดยจะแผ่บนพื้นที่กว้างๆ บางครั้งจะใช้รับน้ำหนักบรรทุกของเสาทุกต้นของอาคารก็ได้ โดยมากแล้วจะใช้ฐานแพกับอาคารสูง ข้อดีของฐานรากชนิดนี้เมื่อเทียบกับฐานรากเดี่ยวคือ การกระจายน้ำหนักสู่ดินหรือหินเบื้องล่างได้ดีกว่าและปัญหาการทรุดตัวต่างระดับแทบหมดไป

#### 6.1.1 Mode of Bearing Capacity Failure in Soil

Mode of Bearing Capacity Failure in Soil คือ รูปแบบการพังทลายของชั้นดินที่รองรับฐานรากตื้น (Shallow foundation) ซึ่งรับน้ำหนักกระทำที่ถ่ายมาจากโครงสร้างบนดิน (super-structure) โดยรูปแบบการพังทลายดังกล่าว แบ่งออกได้ 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับความอัดแน่น (compactness) ของดินที่รองรับฐานราก คือ

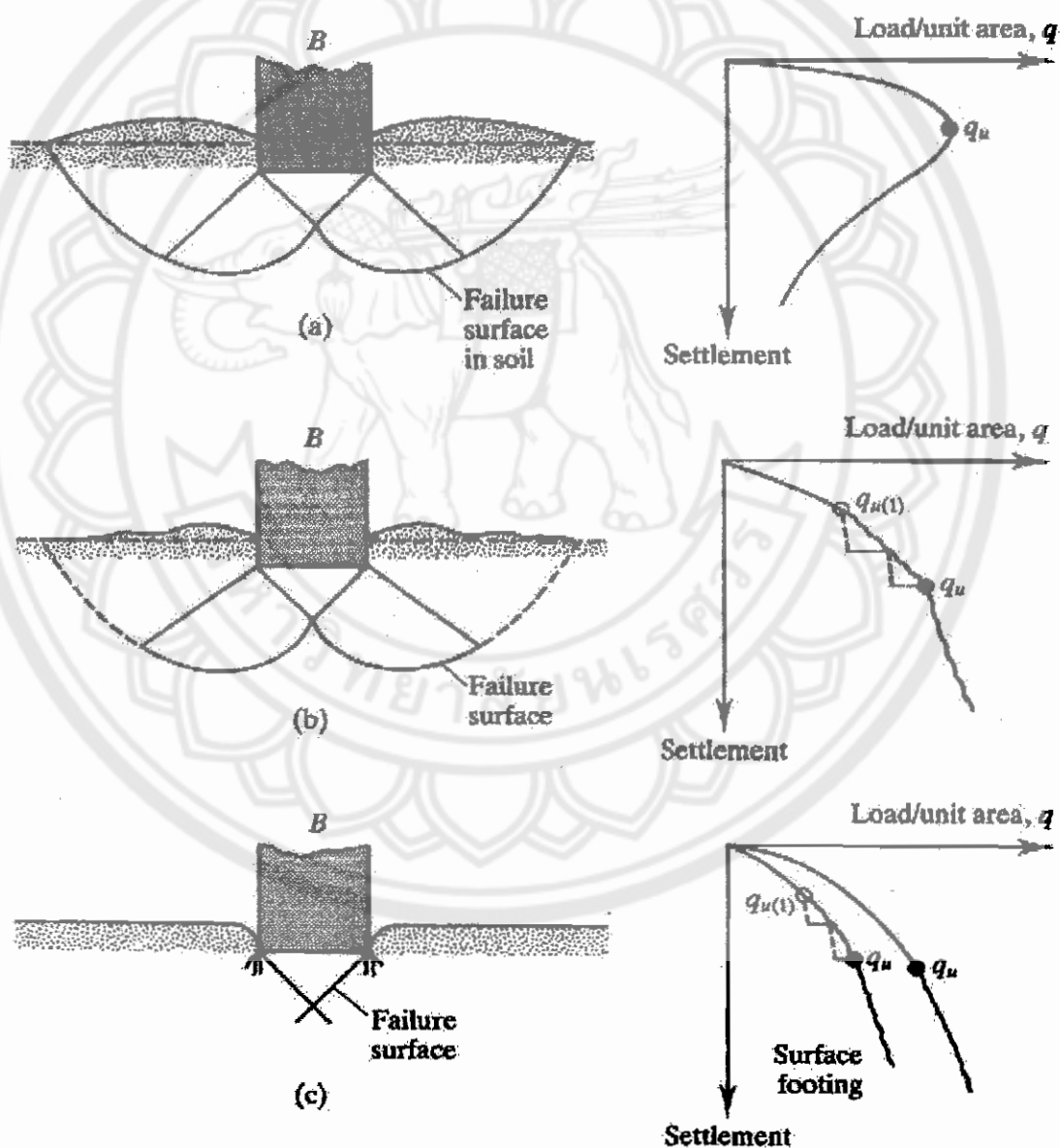
- General shear failure
- Local shear failure
- Punching shear failure

ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นในชั้นดิน (Mode of Bearing Capacity Failure)

รายละเอียดของการวิบัติทั้ง 3 แบบ สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. กรณีที่ฐานรากตั้งอยู่บน Dense Sand หรือ Stiff Cohesive Soil

ในกรณีชั้นดินรองรับฐานรากมีความหนาแน่นมาก ทำให้ปริมาณการทรุดตัว (Settlement) หรือการยุบตัวในแนวตั้ง (Vertical deformation) ที่เกิดขึ้นในดินมีค่าน้อย



รูปที่ 6.1.1 Nature of bearing capacity failure in soil



Terzaghi (1943) ได้เสนอทฤษฎีสำหรับใช้หาค่า ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก  
 ประลัย (Ultimate bearing capacity,  $q_u$ ) ของชั้นดิน ที่รองรับฐานรากตื้นซึ่งมีผิวด้านใต้ขรุขระ นั้น  
 คือใช้ได้สำหรับฐานรากตื้นที่ถูกวางระดับความลึกของฐานรากจากผิวดิน ( $D_f$ ) ใวน้อยกว่าหรือ  
 เท่ากับ ความกว้างของฐานราก (B) อย่างไรก็ตาม ผลการสำรวจภายหลังพบว่าฐานรากตื้นอาจจะ  
 รวมถึงฐานรากที่ถูกจัดวาง  $D_f \leq 3-4 B$

Terzaghi พัฒนาทฤษฎีโดยการสมมติว่าระดับความลึกของน้ำใต้ดิน (ground water  
 table,  $D_{GWT}$ ) อยู่ใต้ระดับความลึกของฐานรากไปมาก จนทำให้ความลึกของระดับน้ำใต้ดินไม่มีผล  
 ต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ( $q_u$ )

Terzaghi เสนอว่าหากฐานรากตื้นมีรูปร่างแบบ continuous หรือ strip foundation นั้น  
 คือ length - to - width ratio (B/L) ของฐานรากมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ผิวดินการวิบัติที่เกิดขึ้นในชั้นดิน  
 รองรับฐานรากตื้นสามารถสมมติให้มีรูปร่างแบบ general shear failure mode และยังได้ผนวก  
 สมมติฐานในการพัฒนา bearing capacity theory อีกดังนี้

1. ให้ถือเสมือนว่าไม่มีเนื้อดินอยู่ที่ระดับความลึกจากผิวดิน (เส้น "JI") ถึงระดับความลึก  
 ของฐานราก ( $D_f$ ) และให้ทดแทนผลกระทบที่เกิดจากน้ำหนักของดินดังกล่าวด้วย effective  
 equivalent surcharge คือ

$$q = \gamma D_f$$

$\gamma$  = effective unit weigh of soil from surface to  $D_f$

$D_f$  = depth of bottom of shallow foundation measured from ground surface

2. ผลจากสมมติฐานจากข้อ 1 ให้ละทิ้งผิวดินการวิบัติ (failure surface) ที่เกิดขึ้นในดินที่อยู่  
 สูงกว่าระดับพื้นของฐานราก ( $D_f$ ) นั่นคือไม่ผนวกค่า shear resistance ของดินตามแนวการวิบัติ  
 GI กับ HJ เข้ามาช่วยรับแรงกระทำ

3. ให้แยกบริเวณที่เกิดการวิบัติ (failure zone) ในชั้นดินใต้ continuous หรือ strip  
 shallow foundation เป็น 3 ส่วน คือ

3.1 Triangular zone "ADC" ซึ่งติดอยู่กับดินใต้ฐานราก

3.2 Radial shear zone "ADF" และ "CDF" ซึ่งมี DE และ DF เป็นส่วนโค้งที่  
 แสดงตามความสัมพันธ์ของสมการ logarithmic spiral

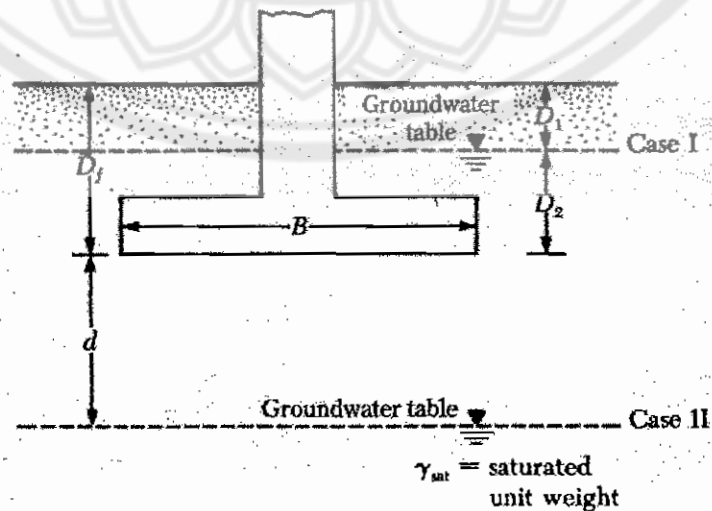
3.3 Rankine passive zone "AFH"และ "CEG"

4. ให้ค่ามุม  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ angle of internal friction ( $\Phi$ ) ของดิน

ตารางที่ 6.1.1 Terzaghi's Bearing Capacity Factors

$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_{\gamma}^a$	$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_{\gamma}^a$
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.1	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	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

## 6.1.3 Modification of Terzaghi's Bearing Capacity Equations for water table



รูปที่ 6.1.3 Modification of bearing capacity equations for water table

Modification of Terzaghi's Bearing Capacity Equations for water table คือการปรับ  
ทฤษฎีของ Terzaghi ให้สามารถรวมผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินที่อยู่สูง จนเข้ามามีผลกระทบ  
ต่อชั้นดินที่รองรับฐานราก (นั่นคือ  $D_{GWT} \leq D_f + B$ ) เข้าไปในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับ  
น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate bearing capacity,  $q_u$ ) ของชั้นดินที่รองรับฐานราก

ในการปรับ (Modification) ทฤษฎีของ Terzaghi ผลกระทบของระดับน้ำใต้ดิน ( $D_{GWT}$ )  
เทียบกับความลึก ( $D_f$ ) และความกว้าง ( $B$ ) ของฐานราก คือ

- $D_{GWT} < D_f$  [ case I ]
- $D_f \leq D_{GWT} \leq D_f + B$  [ case II ]
- $D_f + B < D_{GWT}$  [ case III ]

1. กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงกว่าระดับความลึกของฐานราก ( $D_{GWT} < D_f$ ) จะส่งผลให้

1.1 effective surcharge ที่เกิดขึ้นจากดินที่อยู่เหนือฐานรากมีค่าลดลง

$$q = \gamma_T D_{GWT} + (\gamma_{sat} - \gamma_w)(D_f - D_{GWT})$$

1.2 ค่า  $\gamma$  ในพจน์ของ  $1/2 \gamma BN_\gamma$  ของสมการ Terzaghi's Bearing Capacity  
เปลี่ยนเป็น

$\gamma'$  (Submerged unit weight) ซึ่งเท่ากับ  $\gamma_{sat} - \gamma_w$

2. กรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับฐานรากไม่เกินความกว้าง ( $B$ ) ของฐานราก

เมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ระหว่าง  $D_f$  ถึง  $D_f + B$  ดังในกรณีที่ 2 [ case II ] ผลกระทบของ  
ระดับน้ำใต้ดินต่อการใช้ Terzaghi's Bearing Capacity theory มีดังนี้

2.1 ค่า  $q$  หรือ effective surcharge ในสมการของ Ultimate bearing capacity ไม่ได้รับ  
ผลกระทบ ดังนั้นจึงไม่ต้องปรับค่า effective surcharge ( $q = \gamma_T D_f$ )

2.2 ค่า  $\gamma$  ในพจน์ของ  $1/2 \gamma BN_\gamma$  ของสมการ Terzaghi's Bearing Capacity  
เปลี่ยนเป็น

$\bar{\gamma}$  หรือค่าหน่วยน้ำหนัก (unit weight) ที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยผลกระทบของ  
ระดับน้ำใต้ดิน(ground water table)แบบเส้นตรง(linear averaging)ระหว่าง  $D_{GWT} = D_f$   
และ  $D_f + B$  นั่นคือ

$$\bar{\gamma} = \gamma' + (D_{GWT} - D_f)(\gamma_T - \gamma')$$

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

เมื่อทดลองแทนค่า  $D_{GWT}$  ที่ขอบเขตที่เป็นไปได้จะพบว่า

- หาก  $D_{GWT} = D_f$  หรือระดับน้ำอยู่ที่ระดับฐานราก  $\bar{\gamma} = \gamma'$  หรือ unit weight ของดินใต้ฐานราก คือ Submerged unit weight
- หาก  $D_{GWT} = D_f + B$  หรือระดับน้ำอยู่ที่ระดับความลึกฐานรากรวมกับความกว้างของฐานราก ค่า  $\bar{\gamma} = \gamma_r$  ซึ่งเป็น effective unit weight

3. กรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ระดับต่ำกว่าฐานรากเกินความกว้าง (B) ของฐานราก

เมื่อระดับน้ำใต้ดิน ( $D_{GWT}$ ) อยู่ที่ระดับความลึกที่มากกว่า  $D_f + B$  ดังกรณี III [ case III ] ระดับน้ำจะไม่มีผลกระทบต่อ Terzaghi's Bearing Capacity จึงไม่คิดในกรณีนี้

ตารางที่ 6.1.2 Terzaghi's Modified Bearing Capacity Factors

$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.70	1.00	0.00	26	15.53	6.05	2.59
1	5.90	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	44.45	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				



#### 6.1.4 Ultimate Bearing Capacity กรณีการวิบัติเป็นแบบ General Shear Failure

การรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate bearing capacity,  $q_u$ ) ของชั้นดินรองรับฐานราก ในกรณีการวิบัติ (failure) ในชั้นดินใต้ฐานรากเป็นแบบ general shear failure ดังนี้

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \text{ สำหรับ strip foundation}$$

$$q_u = 1.3 cN_c + qN_q + 0.4 \gamma B N_\gamma \text{ สำหรับ square foundation}$$

$$q_u = 1.3 cN_c + qN_q + 0.3 \gamma B N_\gamma \text{ สำหรับ circular foundation}$$

เมื่อ  $c$  = cohesion of soil

$\gamma$  = unit weigh of soil

$$q = \gamma D_f$$

$N_c, N_q, N_\gamma$  = bearing capacity factors that are nondimensional and are only function angle,  $\phi$

#### 6.1.5 Ultimate Bearing Capacity กรณีการวิบัติเป็นแบบ Local Shear Failure

หากการเคลื่อนที่ที่พังที่เกิดในชั้นดินใต้ฐานรากเป็นแบบ local shear failure, Terzaghi (1943) แนะนำให้ปรับสมการที่ใช้หาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ultimate bearing capacity,  $q_u$ ) เป็นดังนี้

$$q_u = 2/3 cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \text{ สำหรับ strip foundation}$$

$$q_u = 0.867 cN_c + qN_q + 0.4 \gamma B N_\gamma \text{ สำหรับ square foundation}$$

$$q_u = 0.867 cN_c + qN_q + 0.3 \gamma B N_\gamma \text{ สำหรับ circular foundation}$$

เมื่อ  $N'_c, N'_q, N'_\gamma$  = ค่า modified bearing capacity factor มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่า  $\phi'$

#### 6.1.6 THE GENERAL BEARING CAPACITY EQUATION

สมการสำหรับหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ultimate bearing capacity,  $q_u$ ) ทั้ง 3 สมการคือ

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4 \gamma B N_\gamma$$

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.3 \gamma B N_\gamma$$

เป็นสมการสำหรับ Continuous, square and circular foundations เท่านั้น ไม่รวมถึง rectangular foundations ( $0 < B/L < 1$ )

นอกจากนี้สมการดังกล่าวยังไม่คิดรวมค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่อยู่บนพื้นผิวการวิบัติที่อยู่ระดับต่ำสุดของฐานราก

ในกรณีนี้ยังไม่รวมถึง Inclined load ที่กระทำกับฐานรากด้วย

ซึ่งทฤษฎีที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ Meyerhof (1963) ได้เสนอเป็นสมการขึ้นมาโดยอ้างอิงจากสมการเดิมของ Terzaghi (1943) ทั้งนี้เพื่อให้การก่อสร้างฐานรากตั้งอยู่บนพื้นฐานของความปลอดภัยไม่น้อยกว่าเดิม โดยสมการของ Meyerhof (1963) เรียกว่า general bearing capacity equation เขียนได้ดังนี้

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

โดยที่  $F_{cs} F_{cd} F_{ci} =$  shape factors

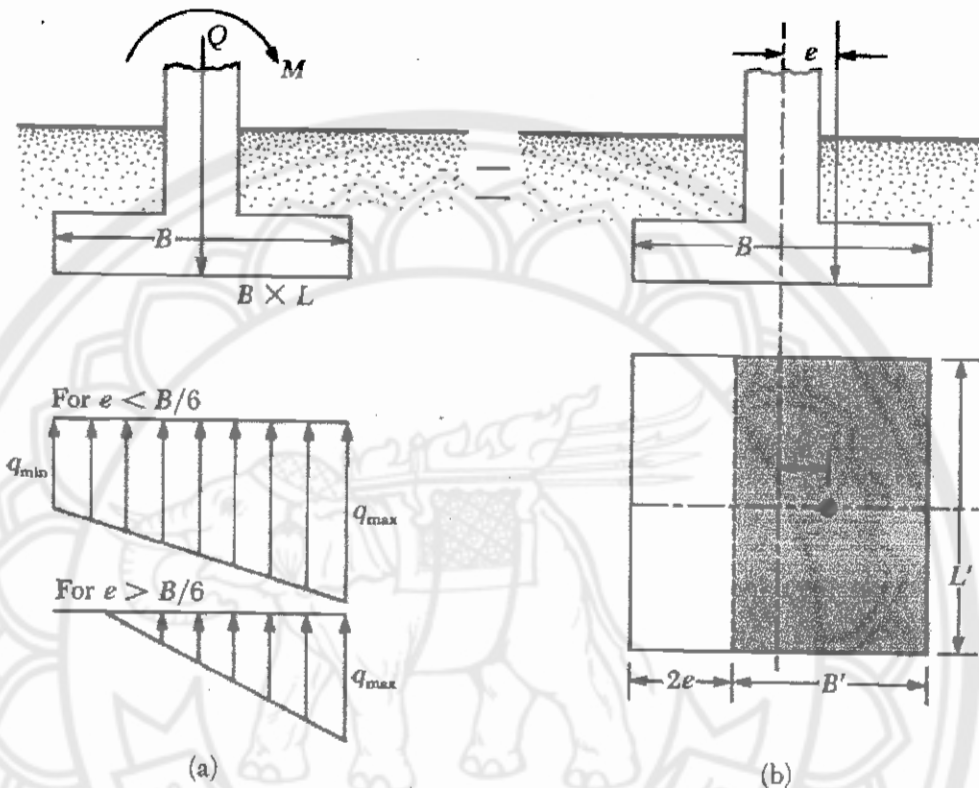
$F_{qs} F_{qd} F_{qi} =$  depth factors

$F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} =$  load inclination factors

ซึ่ง factors ดังกล่าวเป็น factors ที่ Meyerhof (1963) เพิ่มเข้าไปในสมการเดิมของ Terzaghi (1943)

นอกจากนี้ค่ามุม  $\alpha$  ของ Meyerhof (1963) ยังต่างจากของ Terzaghi (1943) กล่าวคือ ทฤษฎีของ Terzaghi (1943) ค่า  $\alpha = 45 + \phi / 2$  จะเห็นได้ว่าค่า  $\alpha$  ของ Meyerhof (1963) จะสูงกว่าของ Terzaghi (1943) ซึ่งค่า  $\alpha$  จะมีผลทำให้ bearing capacity factors ( $N_c, N_q, N_\gamma$ ) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

## 6.1.7 Eccentrically Loaded Foundations



รูปที่ 6.1.4 Eccentrically loaded foundations

การใช้ฐานรากตื้นรับน้ำหนักบรรทุกเยื้องศูนย์กลาง (Eccentric loading) ทำให้มีโมเมนต์เกิดขึ้นรอบแกนกลางของฐานรากตื้น eccentric loading ส่งผลต่อการรับแรงจริงของฐานรากตื้น 2 ประการ คือ

- 1) การกระจายของแรงกระทำทำให้ฐานรากไม่สม่ำเสมอ (non – uniform pressure distribution)
- 2) ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยภายใต้การรับแรงเยื้องศูนย์กลางลดลงจากความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยภายใต้การรับแรงไม่เยื้องศูนย์กลาง

- การกระจายของแรงกระทำใต้ฐานรากไม่สม่ำเสมอ (non-uniform pressure distribution) ที่ฐานรากถ่ายเทลงดินจะไม่สม่ำเสมอ (non-uniform) เพราะโมเมนต์ที่เกิดขึ้นก่อด้านฐานรากด้านที่มีแรงกระทำเอียงศูนย์ ( $e$ ) ทำให้ส่วนของฐานรากด้านนี้ต้องรับน้ำหนักมากกว่าค่าเฉลี่ยและยกฐานรากด้านที่ไม่มีแรงกระทำเอียงศูนย์ ทำให้น้ำหนักกระทำที่ลดลงจริงน้อยกว่าค่าเฉลี่ย

การกระจายแรงกระทำที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านดังกล่าว หาได้ดังนี้

$$q_{\max} = Q/BL + 6M/B^2L \quad \text{ด้านที่มีแรงกระทำเอียงศูนย์} \quad (1)$$

$$q_{\min} = Q/BL - 6M/B^2L \quad \text{ด้านที่ไม่มีแรงกระทำเอียงศูนย์} \quad (2)$$

เมื่อ

$$q_{\max} = \text{แรงกระทำที่ฐานรากของด้านที่มีแรงกระทำเอียงศูนย์}$$

$$q_{\min} = \text{แรงกระทำที่ฐานรากของด้านที่ไม่มีแรงกระทำเอียงศูนย์}$$

$$Q = \text{น้ำหนักจากโครงสร้าง}$$

$$M = \text{โมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนฐานราก} = eQ$$

$$e = \text{ระยะเอียงศูนย์}$$

$$B = \text{ความกว้างของฐานราก}$$

$$L = \text{ความยาวของฐานราก}$$

แทนค่า  $e$  =  $M/Q$  ลงในสมการ (1) และ (2) จะได้

$$q_{\max} = Q(1 + 6e/B)/BL \quad \text{สำหรับด้านที่มีแรงกระทำเอียงศูนย์} \quad (3)$$

$$q_{\min} = Q(1 - 6e/B)/BL \quad \text{สำหรับด้านที่ไม่มีแรงกระทำเอียงศูนย์} \quad (4)$$

จากสมการที่ (3) และ (4) ที่กล่าวมา การเอียงศูนย์จะขึ้นอยู่กับค่า  $e$  ซึ่งแยกเป็นกรณี ดังนี้

$$- e = B/6 \quad \text{จะทำให้ } q_{\min} \text{ เท่ากับศูนย์}$$

$$- e > B/6 \quad \text{จะทำให้ } q_{\min} \text{ มีค่าติดลบซึ่ง หมายถึง จะมีพื้นที่บางส่วนของ}$$

ฐานรากที่ได้ใช้ในการรับแรง

- ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกภายใต้แรงกระทำเอียงศูนย์

Meyerhof (1953) ได้เสนอให้ใช้วิธี effective area สำหรับหาค่าความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (ultimate bearing capacity) ของฐานรากตื้น (shallow foundation) ภายใต้การรับแรงแบบเอียงศูนย์ หรือเมื่อแนวแรงศูนย์กลางแรงกระทำไม่ผ่านจุดศูนย์กลางของฐานรากตื้น (center of foundation) บน plan view

การหาค่า  $q_u'$  โดยวิธี effective area เป็นการผนวกผลกระทบจากระยะเอียงศูนย์ ( $e$ ) ของแรงกระทำ ( $Q$ ) เข้าไปในการใช้ general bearing capacity equation ด้วยการปรับลดพื้นที่ ( $A$ ) บน

plan view ของฐานรากที่มีส่วนในการรับแรงกระทำ (Q) ให้ลดเหลือเพียง effective area (A') โดยการ

- ปรับลด width (B) เป็น effective width (B')

- ปรับลด length (L) เป็น effective length (L')

จะได้  $A = B \cdot L$  และ  $A' = B' \cdot L'$

ขั้นตอนการประมาณหาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate bearing capacity,  $q_u$ ) โดยใช้ effective area method

1. หาค่า effective dimensions ของฐานรากโดยที่

$$B' = \text{effective width} = B - 2e$$

$$L' = \text{effective length} = L$$

หากแรงกระทำเอียงศูนย์เกิดขึ้นในด้านยาวของฐานราก ให้ค่า  $L' = L - 2e$  และ ค่า  $B' = B$  โดยให้เลือกใช้ค่าที่น้อยระหว่าง  $L'$  กับ  $B'$  ค่าใดน้อยกว่าให้ใช้ค่านั้นเป็นค่า effective width ของฐานราก

2. หาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย เมื่อฐานรากรับแรงกระทำเอียงศูนย์ ( $q_u$ ) โดยใช้ general bearing capacity equation

$$q_u' = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

ในการหาค่า  $F_{cs}$ ,  $F_{qs}$  และ  $F_{\gamma s}$  ให้ใช้ตารางที่ 6.1.3 และใช้ effective width (B') แทน B และ effective length (L') แทน L สำหรับค่า  $F_{qs}$ ,  $F_{qd}$  และ  $F_{qi}$  ให้ใช้ตารางที่ 6.1.3 เช่นเดียวกัน แต่ค่า B และ L ยังคงใช้ค่าเดิม ซึ่งไม่ใช่ค่า effective width และ effective length

3. น้ำหนักประลัยทั้งหมดที่ฐานรากรับแรงเอียงศูนย์สามารถรับได้ คือ

$$Q_{ult} = q_u' B' L'$$

$$\text{โดยที่ } A' = \text{effective area} = B' L'$$

4. สัดส่วนความปลอดภัย (The factor of safety) หาได้จากสมการ

$$F.S. = Q_{ult} / Q$$

5. ตรวจสอบสัดส่วนความปลอดภัย  $q_{max}$  หรือ  $FS = q_u' / q_{max}$

ตารางที่ 6.1.3 Meyerhof's Bearing Capacity, Shape, Depth, and Inclination Factors

Factor	Relationship
<b>Bearing capacity</b>	
$N_c$	Equation (3.23)
$N_q$	Equation (3.22)
$N_\gamma$	$(N_q - 1) \tan (1.4 \phi')$ ; see Table 3.6
<b>Shape</b>	
For $\phi = 0$ , $F_{cs}$ $F_{qs} = F_{\gamma s}$	$1 + 0.2 (B/L)$ 1
For $\phi' \geq 10^\circ$ , $F_{cs}$ $F_{qs} = F_{\gamma s}$	$1 + 0.2 (B/L) \tan^2 (45 + \phi'/2)$ $1 + 0.1 (B/L) \tan^2 (45 + \phi'/2)$
<b>Depth</b>	
For $\phi = 0$ , $F_{cd}$ $F_{qd} = F_{\gamma d}$	$1 + 0.2 (D_f/B)$ 1
For $\phi' \geq 10^\circ$ , $F_{cd}$ $F_{qd} = F_{\gamma d}$	$1 + 0.2 (D_f/B) \tan (45 + \phi'/2)$ $1 + 0.1 (D_f/B) \tan (45 + \phi'/2)$
<b>Inclination</b>	
$F_{ci} = F_{qi}$	Equation (3.34)
$F_{\gamma i}$	Equation (3.35)

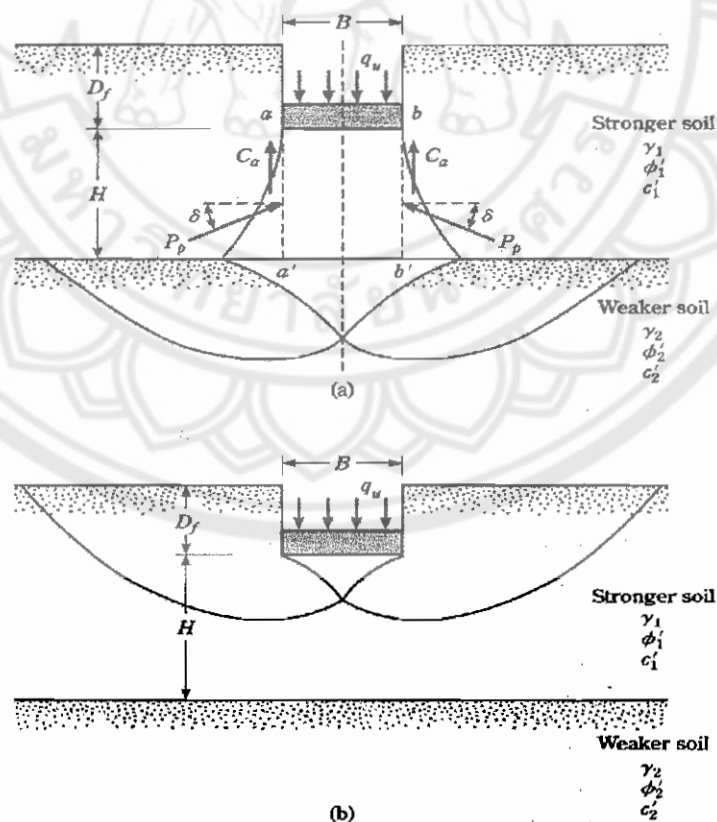
#### 6.1.8 Bearing Capacity of Layered Soils: Stronger Soil Underlain by Weaker Soil

สมการ bearing capacity ที่แสดงไว้ใน Chapter 3 สัมพันธ์ในกรณีที่ดินรองรับบานรากเป็นดินที่มีคุณสมบัติแบบ homogeneous และยังรวมถึงความลึกที่สามารถพิจารณาได้อีกด้วย โดยที่ค่าความเชื่อมแน่น (cohesion), ค่ามุมเสียดทาน (angle of friction) และหน่วยน้ำหนัก (unit weight) ของดินจะคงที่ตลอดการวิเคราะห์ bearing capacity อย่างไรก็ตามสำหรับในทางปฏิบัติแล้วนั้น มักจะประสบกับดินที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ (layered soil) อยู่บ่อยครั้ง ในสถานการณ์เช่นนี้พื้นผิวการวิบัติที่น้ำหนักบรรทุกแต่ละชั้นจะแผ่ขยายไปตลอดชั้นดินตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปและการดำเนินการหา ultimate bearing capacity ในดินที่เป็นชั้นๆ นั้นจะจำกัดเป็นกรณีเท่านั้น ซึ่งในส่วนนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนวิธีการสำหรับประมาณค่า bearing capacity ของ layered soil โดยวิธีการดังกล่าวได้เสนอโดย Meyerhof กับ Hanna (1978) และ Meyerhof (1974)

รูปที่ 6.1.5 แสดงภาพของ shallow continuous foundation ที่ถูกรองรับโดย stronger soil layer ที่มี weaker soil อยู่ด้านล่างอีกชั้นหนึ่ง ซึ่ง weaker soil นี้ มีระยะความลึกค่อนข้างมาก สำหรับชั้นดินสองชั้นนี้ มีตัวแปรกำหนดทางกายภาพ (physical parameters) ดังต่อไปนี้

Layer	Unit weight	Soil friction angle	cohesion
Top	$\gamma_1$	$\phi'_1$	$c'_1$
Bottom	$\gamma_2$	$\phi'_2$	$c'_2$

ที่ ultimate load per unit area ( $q_u$ ) พื้นผิวการวิบัติในดินจะแสดงใน figure ถ้าความลึก  $H$  ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับความกว้างของฐานราก  $B$  ในลักษณะเช่นนี้จะปรากฏ punching shear failure ขึ้น ในชั้นดินด้านบนและเกิด general shear failure ในชั้นดินด้านล่าง ดังแสดงใน รูปที่ 6.1.5(a) อย่างไรก็ตามถ้าความลึก  $H$  มีค่ามาก พื้นผิวการวิบัติจะปรากฏอย่างสมบูรณ์เต็มทั้งในชั้นดินด้านบน ซึ่งเป็น upper limit สำหรับ ultimate bearing capacity ดังแสดงใน รูปที่ 6.1.5 (b)



รูปที่ 6.1.5 Bearing capacity of a continuous foundation on layered soil

Ultimate bearing capacity สำหรับปัญหาลักษณะเช่นนี้ แสดงไว้ใน รูปที่ 6.1.5(a)  
สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$q_u = q_b + \frac{2(C_a + P_p \sin \delta)}{B} - \gamma_1 H$$

Where  $B$  = width of the foundation

$C_a$  = adhesive force

$P_p$  = passive force per unit length of the faces  $aa'$  and  $bb'$

$q_b$  = bearing capacity of the bottom soil layer

$\delta$  = inclination of the bottom soil layer

จากสมการ  $q_{u(\text{square})} = [\pi + 2 + B/2H - 2^{1/2}/2] c_u + q$  [for  $B/2H - 2^{1/2}/2 \geq 0$ ]

$$C_a = c_a' H$$

Where  $c_a'$  = adhesion

สามารถอธิบายได้ง่ายในรูป

$$q_u = q_b + 2c_a' H/B + \gamma_1 H^2 [1 + 2D_f/H] (K_{pH} \tan \delta)/B - \gamma_1 H$$

Where  $K_{pH}$  = horizontal component of passive earth pressure coefficient

ดังนั้นจะได้

$$K_{pH} \tan \delta = K_s \tan \phi_1'$$

Where  $K_s$  = punching shear coefficient

จากนั้น

$$q_u = q_b + 2c_a' H/B + \gamma_1 H^2 [1 + 2D_f/H] (K_s \tan \delta)/B - \gamma_1 H$$

punching shear coefficient,  $K_s$ , เป็นฟังก์ชันของ  $q_2/q_1$  และ  $\phi_1'$

$$K_s = f(q_2/q_1, \phi_1')$$



โดย  $q_1$  และ  $q_2$  คือ ultimate bearing capacity ของ continuous foundations ที่ความกว้าง  $B$  ซึ่งรองรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้ง (vertical load) บนพื้นผิวของ homogeneous thick beds ของ upper และ lower soil หรือ

$$q_1 = c_1' N_{c(1)} + 1/2 \gamma_1 B N_{\gamma(1)}$$

และ

$$q_2 = c_2' N_{c(2)} + 1/2 \gamma_2 B N_{\gamma(2)}$$

where  $N_{c(1)}, N_{\gamma(1)}$  = bearing capacity factors for friction angle  $\phi_1'$

$N_{c(2)}, N_{\gamma(2)}$  = bearing capacity factors for friction angle  $\phi_2'$

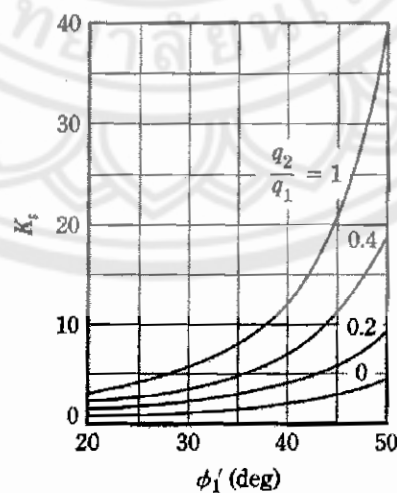
ค่าความแปรผันของ  $K_s$  ตาม  $q_2/q_1$  และ  $\phi_1'$  แสดงไว้ใน รูปที่ 6.1.6 ส่วนค่าความแปรผันของ  $c_2'/c_1'$  ตาม  $q_2/q_1$  แสดงไว้ใน รูปที่ 6.1.7 ถ้าความสูง  $H$  มีค่าค่อนข้างมากแล้วพื้นผิวการวิบัติในดินจะปรากฏอย่างสมบูรณ์ในชั้นดินด้านบน (รูปที่ 6.1.5b) สำหรับในกรณีนี้แล้ว

$$q_u = q_t = c_1' N_{c(1)} + q N_{q(1)} + 1/2 \gamma_1 B N_{\gamma(1)}$$

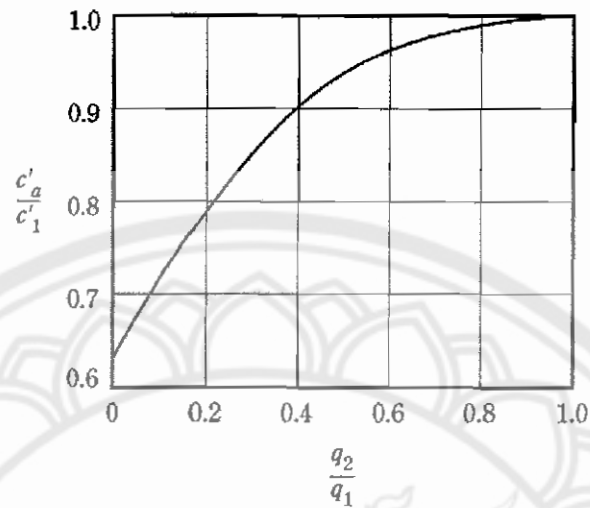
where  $N_{q(1)}$  = bearing capacity factors for  $\phi' = \phi_1'$  and  $q = \gamma_1 D_f$

รวมสมการ เข้าไว้ด้วยกัน

$$q_u = q_b + 2c_2' H/B + \gamma_1 H^2 [1 + 2D_f/H] (K_s \tan \phi_1') / B - \gamma_1 H \leq q_t$$



รูปที่ 6.1.6 Meyerhof and Hanna's punching shear coefficient  $K_s$



รูปที่ 6.1.7 Variation of  $c'_a/c'_1$  with  $q_2/q_1$  based on the theory of Meyerhof and Hanna

สำหรับ rectangular foundation สามารถขยายรูปสมการ ได้ดังนี้

$$q_u = q_b + [1 + B/L] [2 c'_a H/B] + \gamma_1 H^2 [1 + B/L] [1 + 2D_f/H] [(K_s \tan \phi_1')/B] - \gamma_1 H \leq q_t$$

เมื่อ

$$q_u = q_b = c'_2 N_{c(2)} F_{cs(2)} + \gamma_1 (D_f + H) N_{q(2)} F_{qs(2)} + 1/2 \gamma_2 B N_{\gamma(2)} F_{\gamma s(2)}$$

และ

$$q_u = q_t = c'_1 N_{c(1)} F_{cs(1)} + \gamma_1 (D_f + H) N_{q(1)} F_{qs(1)} + 1/2 \gamma_1 B N_{\gamma(1)} F_{\gamma s(1)}$$

Special Cases

1. Top layer is stronger and bottom layer is saturated soft clay ( $\phi_2 = 0$ ) จากสมการ

$$q_b = (1 + 0.2B/L) 5.14 c_2 + \gamma_1 (D_f + H)$$

และ

$$q_t = \gamma_1 D_f N_{q(1)} F_{qs(1)} + 1/2 \gamma_1 B N_{\gamma(1)} F_{\gamma s(1)}$$

ดังนั้น

$$q_u = [1 + 0.2 B/L] 5.14 c_2 + \gamma_1 H^2 [1 + B/L] [1 + 2D_f/H] [K_s \tan \phi_1']/B$$

$$+ \gamma_1 D_f \leq \gamma_1 D_f N_{q(1)} F_{qs(1)} + 1/2 \gamma_1 B N_{\gamma(1)} F_{\gamma s(1)}$$

where  $c_2$  = undrained cohesion

เมื่อได้  $q_u$  มาแล้วให้นำค่าที่ได้นั้นไปเทียบกับกับค่า  $q_t$  หาก  $q_u$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $q_t$  แล้วให้

ใช้ค่า  $q_u$  แต่ถ้า  $q_u$  มีค่ามากกว่า  $q_t$  ให้เลือกใช้ค่า  $q_t$

สำหรับการหาค่า  $K_s$  จาก รูปที่ 6.1.6

$$q_2/q_1 = c_2 N_{c(2)}/0.5 \gamma_1 B N_{\gamma(1)} = 5.14 c_2 / 0.5 \gamma_1 B N_{\gamma(1)}$$

2. Top layer is stronger sand and bottom layer is weaker sand ( $c_1' = 0, c_2' = 0$ ) ในกรณี

นี้ค่า ultimate bearing capacity เป็นดังนี้

$$q_u = [\gamma_1 (D_f + H) N_{q(2)} F_{qs(2)} + 1/2 \gamma_2 B N_{\gamma(2)} F_{\gamma s(2)}] + \gamma_1 H^2 [1 + B/L] [1 + 2D_f/H] [K_s \tan \phi_1'] / B - \gamma_1 H \leq q_t$$

เมื่อ

$$q_t = \gamma_1 D_f N_{q(1)} F_{qs(1)} + 1/2 \gamma_1 B N_{\gamma(1)} F_{\gamma s(1)}$$

และ

$$q_2/q_1 = 1/2 \gamma_2 B N_{\gamma(2)} / 1/2 \gamma_1 B N_{\gamma(1)} = 1/2 \gamma_2 B N_{\gamma(2)} / 1/2 \gamma_1 B N_{\gamma(1)}$$

3. Top layer is stronger saturated clay ( $\phi_1 = 0$ ) and bottom layer is weaker saturated

clay ( $\phi_2 = 0$ ) ในกรณีนี้ค่า ultimate bearing capacity เป็นดังนี้

$$q_u = [1 + 0.2B/L] 5.14 c_2 + [1 + B/L] [2c_2 H/B] + \gamma_1 D_f \leq q_t$$

เมื่อ

$$q_t = [1 + 0.2 B/L] 5.14 c_1 + \gamma_1 D_f$$

$c_1$  และ  $c_2$  คือ undrained cohesion สำหรับกรณีนี้

$$q_2/q_1 = 5.14 c_2 / 5.14 c_1 = c_2 / c_1$$

### 6.1.9 Bearing Capacity of Foundations on Top of a slope

ในบางสถานการณ์นั้นจำเป็นต้องก่อสร้าง shallow foundation ณ ตำแหน่งที่เป็น top slope ดังแสดงใน รูปที่ 6.1.8 โดยความสูงของ slope คือ  $H$  ซึ่ง slope จะวางเป็นมุม  $\beta$  กับแนวราบ และขอบของฐานรากจะมีระยะ  $b$  จากตำแหน่ง top slope ส่วนพื้นผิวการวิบัติที่มี ultimate load,  $q_u$  มากกระทำจะแสดงใน รูปที่ 6.1.8

Meyerhof (1957) ได้พัฒนาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับ ultimate bearing capacity ของ continuous foundations:

$$q_u = c' N_{cq} + 1/2 \gamma B N_\gamma$$

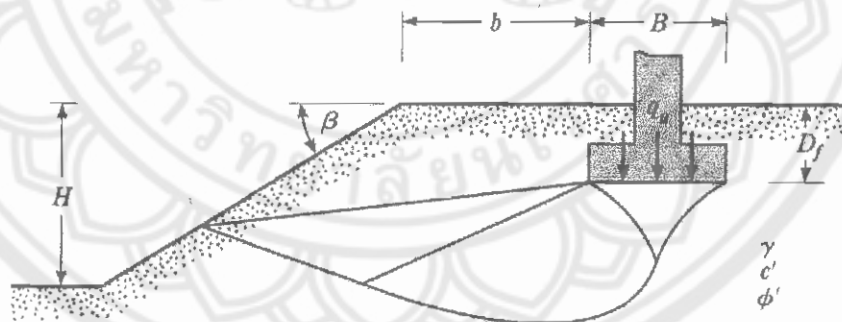
สำหรับ purely granular soil,  $c' = 0$  ดังนั้น

$$q_u = 1/2 \gamma B N_{\gamma q}$$

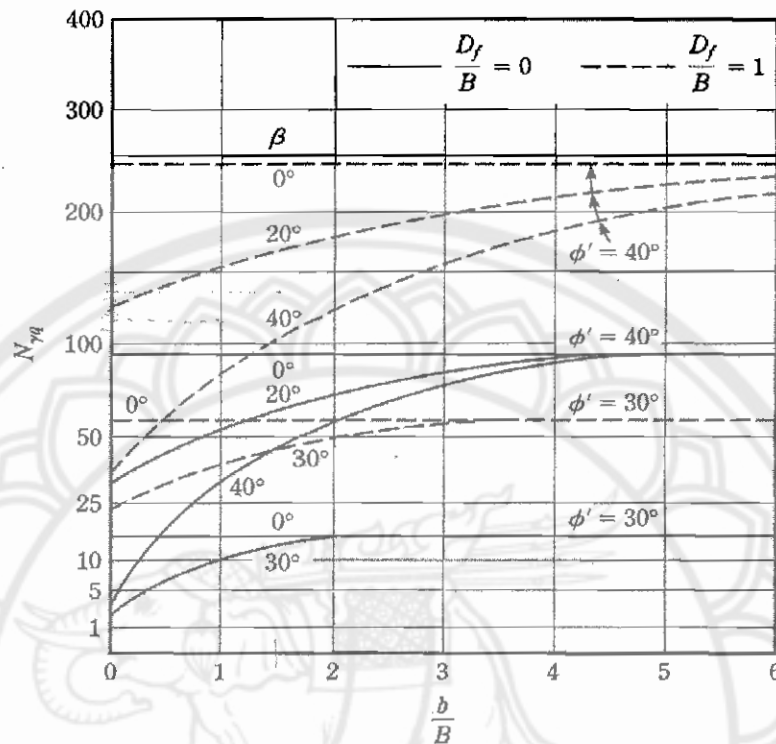
และสำหรับ purely cohesive soil,  $\phi = 0$  (the undrained condition); ดังนั้น

$$q_u = c' N_{cq}$$

where  $c$  = undrained cohesion



รูปที่ 6.1.8 Shallow foundation on top of a slope



รูปที่ 6.1.9 Meyerhof's bearing capacity factor  $N_{\gamma q}$  for granular soil ( $c' = 0$ )

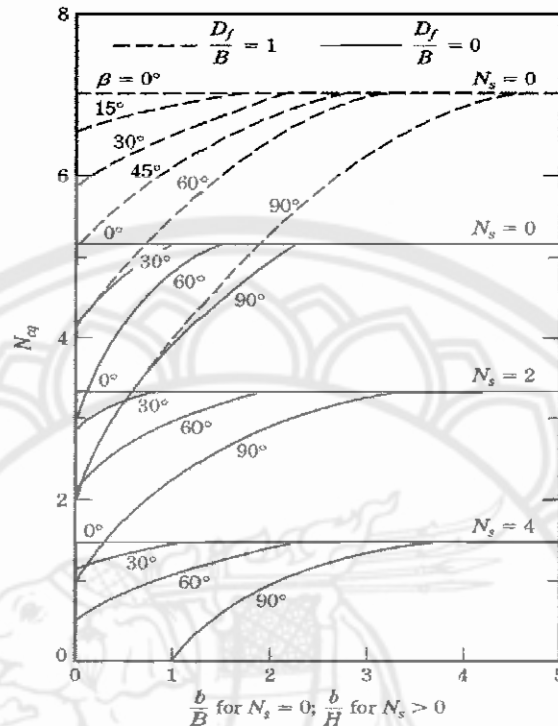
ค่าความผันแปรของ  $N_{\gamma q}$  และ  $N_{cq}$  ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 6.1.9 และ รูปที่ 6.1.10 ตามลำดับ  
ในการใช้  $N_{cq}$  ที่ได้ให้ใน รูปที่ 6.1.10 คำนึงถึงขั้นตอนต่อไปนี้

1. ในเทอม

$$N_s = \gamma H / C$$

2. ถ้า  $B < H$  ใช้เส้นโค้งสำหรับ  $N_s = 0$

3. ถ้า  $B \geq H$  ใช้เส้นโค้งสำหรับคำนวณ stability number  $N_s$



รูปที่ 6.1.10 Meyerhof's bearing capacity factor  $N_{cq}$  for purely cohesive soil

#### 6.1.10 Combined Footing

*Combined footing* เป็นการออกแบบฐานรากเพื่อแก้ปัญหา กรณีไม่สามารถสร้างฐานรากเดี่ยวที่สมมาตรได้ ซึ่งฐานรากที่ไม่สมมาตรนี้เมื่อรับน้ำหนักที่ถ่ายลงบนฐานไม่เท่ากัน ทำให้เกิดแรงเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity) อาจทำให้อาคารทรุดได้ ดังนั้นฐานรากที่ออกแบบจึงมีลักษณะแผ่กว้างออกเพื่อรองรับน้ำหนักจากเสาตอม่อมากกว่า 1 ต้น การออกแบบ *Combined footing* ต้องกำหนดขนาดของฐานราก โดยเสาตอม่อที่มีน้ำหนักมากต้องอยู่บนฐานรากที่ขนาดพื้นที่มากกว่าเสาตอม่อต้นที่มีน้ำหนักน้อยกว่า เพื่อกระจายน้ำหนักลงสู่ดินให้สม่ำเสมอ ฐานรากอาจมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมคางหมู ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับารออกแบบของวิศวกร (ที่มา : วิทวัส สิทธิกุล)

*Combined footing* แบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่

1. Rectangular Combined Footing (RCF)
2. Trapezoidal – shaped Combined Footing (TCF)

## 3. Cantilever or Strap Combined Footing (SCF)

## 4. Mat Foundation (MF)

*Combined footing* นั้นรองรับเสาตอม่อเป็นจำนวนที่แน่นอนและทราบน้ำหนักบรรทุกของเสาตอม่อแต่ละต้นด้วย

นอกจากนี้เราสมมุติให้ *Combined footing* มีลักษณะเป็น rigid ดังนั้นแรงดันดินลัพธ์ (resulting soil pressure) คือ

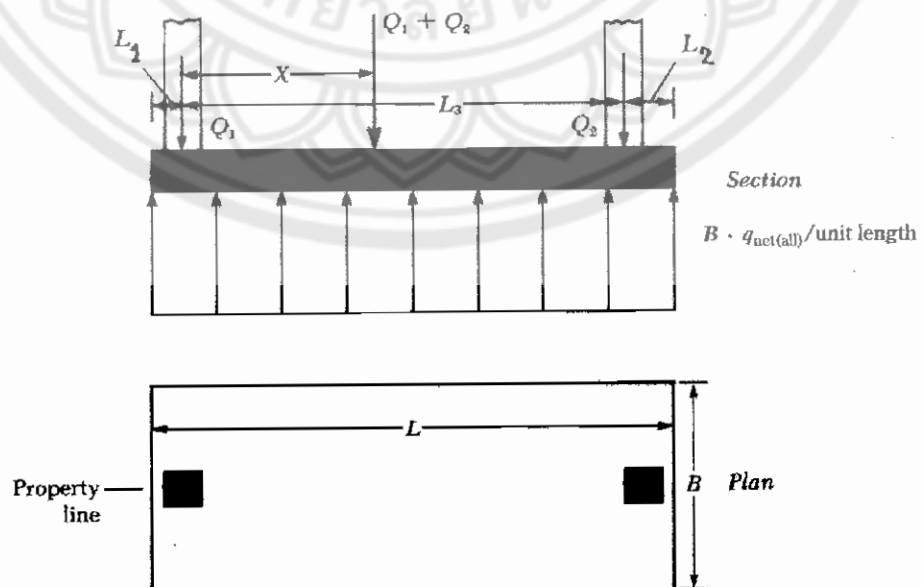
- มีลักษณะสม่ำเสมอ (uniform) ภายใต้ RCF, SCF และ MF
- มีลักษณะเพิ่มขึ้นเชิงเส้น (linear varying) ภายใต้ TCF

ดังนั้น

- จะต้องทราบน้ำหนักบรรทุกที่สม่ำเสมอกับแรงปฏิกิริยาทั้งหมดของเสาตอม่อ สำหรับ RCF, SCF และ MF
- จะต้องทราบน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นเชิงเส้นกับแรงปฏิกิริยาทั้งหมดของเสาตอม่อ สำหรับ TCF

## 6.1.10.1 Rectangular Combined Footing (RCF)

RCF เหมาะสมในกรณีที่ น้ำหนักลงเสาด้านนอกหรือต้นที่ชิดเขตมีค่าน้อยกว่าต้นภายใน และตำแหน่งของเสาอยู่ห่างกันไม่มากนัก (ที่มา: วรากร ไม้เรียง)



รูปที่ 6.1.11 Rectangular combined footing

## Calculation of Footing Dimensions

### Assumptions

- 1) เนื่องจาก RCF มีลักษณะแบบ rigid ดังนั้นแรงดันดินจึงมีลักษณะแบบเชิงเส้น (linear)
- 2) แรงดันใต้ RCF จะสม่ำเสมอ ถ้าตำแหน่งของแรงลัพธ์ (รวมถึงโมเมนต์จากเสาคอม่อ) ตรงกับจุดศูนย์กลางของพื้นที่ฐานราก (จะเป็นจริงเมื่อดินมีคุณสมบัติแบบ homogeneous และฐานรากเป็นแบบ rigid)
- 3) ความกว้าง, ความยาว และ ความหนาของ RCF มีค่าเท่ากันตลอด
- 4) รู้ขนาดความยาว
  - $L_1$  (ระยะจาก property line ถึงเสาคอม่อที่มี  $Q_1$  กระทำ)
  - $L_3$  (ระยะห่างระหว่างเสาคอม่อ  $Q_1$  และ  $Q_2$ )

### Principals

- 1) ใช้วิธีการ trial – and – error
- 2) เริ่มทำการประมาณการ โดย
  - 2.1) สมมติขนาดความกว้าง (B) ของ RCF โดยจะต้องทราบระยะฝัง  $D_f$  แล้ว
  - 2.2) หา net allowable soil pressure [bearing capacity,  $\sigma_{all(net)}$ ]
- 3) หาขนาดพื้นที่โดยอาศัย  $\sigma_{all(net)}$  จากนั้นจึงหาตำแหน่งศูนย์กลางของพื้นที่ฐานราก
- 4) หาความยาว (L) ของ RCF โดยที่แรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกจากเสาคอม่อถ่ายผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฐานราก (โดยสมมุติว่าการกระจ่ายสม่ำเสมอของแรงดันดินมีความแน่นอน)
- 5) หาความกว้าง (B) โดยอาศัย A และ L
- 6) ทำการตรวจสอบว่าค่า B ที่สมมุติมานั้นใช้ได้หรือไม่ถ้าไม่ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 2 – 5 อีกครั้ง
- 7) ใช้ L, B และความหนา (T) ของฐานรากและให้ฐานรากมีลักษณะเป็น uniformly distributed loading beam ซึ่งถูกรองรับโดยเสาคอม่อ 2 ต้น เพื่อให้สามารถเขียนแผนภาพแรงเฉือน (SFD) และ แผนภาพโมเมนต์ดัด (BMD)
- 8) ออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยอาศัยผลจากขั้นตอนที่ 7



## Method

## Sizing Analysis Steps

- 1) สมมติความกว้าง B ของ RCF
- 2) หา net allowable soil pressure [bearing capacity,  $q_{all(net)}$ ] โดยใช้ "ความกว้าง B ที่สมมติไว้" หรือ "presumptive bearing capacity" อันใดอันหนึ่ง

- 3) คำนวณพื้นที่ของฐานราก ( $A = B \times L$ )

$$A = \frac{Q_1 + Q_2}{q_{all(net)}}$$

where  $Q_1, Q_2$  = column loads

$q_{all(net)}$  = net allowable soil bearing capacity

- 4) หาค่าตำแหน่งแรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อ

$$X = \frac{Q_3 L_3}{Q_1 + Q_2}$$

where  $X$  = distance of the resultant of the column loads, from  $Q_1$

$L_3$  = cl - cl distance between  $Q_1$  and  $Q_2$

- 5) คำนวณ  $L$  โดยที่แรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อถ่ายผ่านจุด centroid ของฐานราก (สำหรับการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแรงดันดินใต้ RCF)

$$L = 2(L_1 + X)$$

Where  $L$  = length of the foundation

- 6) หา  $L_2$  (ระยะจาก  $Q_1$  cl. ถึงขอบด้านในของ RCF)

$$L_2 = L - L_1 - L_3$$

- 7) ได้ความกว้าง (B) ของ RCF

$$B = A/L$$

- 8) ตรวจสอบค่า B ที่สมมติไว้ในขั้นตอนที่ 1 ว่าใช้ได้หรือไม่

8.1) ถ้าค่า B ที่ได้มานั้นมีค่ามากกว่าค่า B ที่สมมติ (obtained B >>> assumed B) ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1 - 7 โดยใช้ค่า B ที่สมมติใหม่ (new assumed B) ซึ่ง  $previous\ assumed\ B < new\ assumed\ B < obtained\ B$

8.2) ถ้าค่า B ที่ได้มานั้นมีค่าเท่ากับค่า B ที่สมมุติโดยประมาณ (obtained B  $\approx$  assumed B) ให้ใช้ค่าที่มากกว่าเป็นขนาดความกว้างที่ใช้ก่อสร้างสำหรับ RCF

8.3) ถ้าค่า B ที่ได้มานั้นมีค่าน้อยกว่าค่า B ที่สมมุติ (obtained B  $\lll$  assumed B) ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1 – 7 โดยใช้ค่า B ที่สมมุติใหม่ (new assumed B) ซึ่ง  $\text{previous assumed B} > \text{new assumed B} > \text{obtained B}$

#### Structural Analysis Steps

9) คำนวณและเขียนแผนภาพแรงเฉือน (SFD) และ โมเมนต์ดัด (BMD)

#### Structural Design Steps

10) ออกแบบความหนา (t) ของ RCF โดยใช้ Punching Shear และ Diagonal Tension ที่ critical section (คำนวณผ่านทาง SFD)

11) ออกแบบเหล็กเสริม โดยใช้ Bending Moment ที่ critical section และที่ transverse section (คำนวณผ่านทาง BMD)

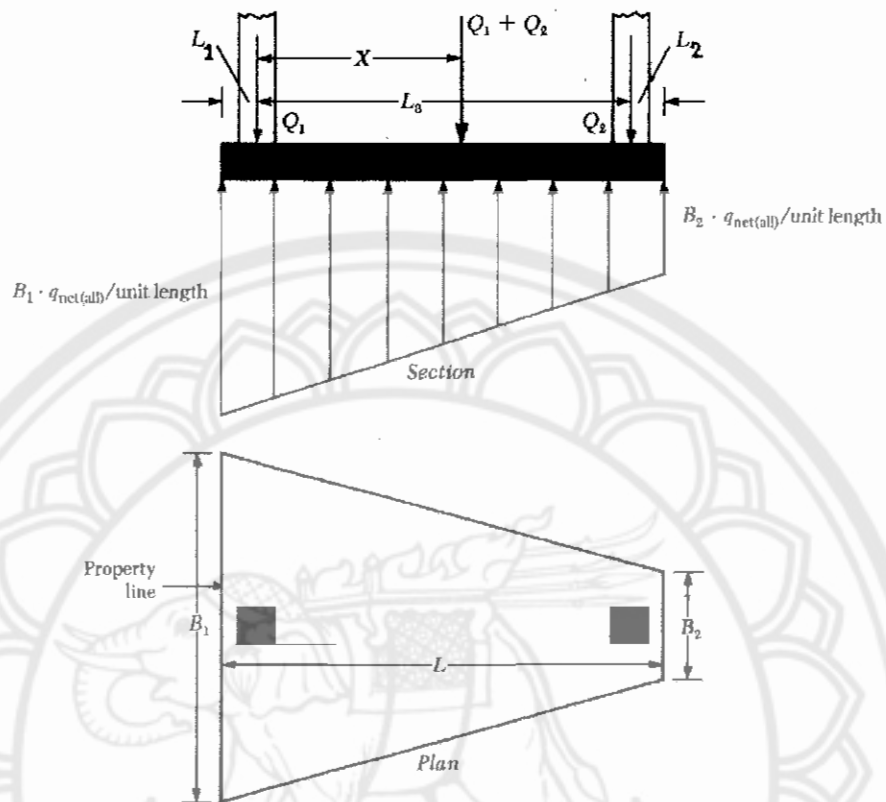
12) ทำการตรวจสอบ ว่า Bending Stress ที่ได้มานั้นใช้ได้หรือไม่

13) วาดแบบร่างรายละเอียดของ RCF และเหล็กเสริม

14) กำหนดรายละเอียดอื่นๆตามที่ออกแบบไว้

#### 6.1.10.2 Trapezoidal Combined Footing (TCF)

Trapezoidal – shaped combined footing จะนำมาใช้ในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกลงสู่เสาตอม่อต้นที่ชิดเขตมีมากกว่าน้ำหนักบรรทุกที่ลงสู่เสาภายในมากกว่า เนื่องจากไม่สามารถออกแบบเป็น RCF เพราะไม่สามารถจัดความยาวของฐานให้ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุก  $Q_1$  และ  $Q_2$  ลงตรงกับจุดศูนย์กลางของพื้นที่ฐานรากได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฐานให้เป็น Trapezoidal – shaped combined footing โดยมีด้านกว้างอยู่ชิดเขต และด้านแคบอยู่ทางด้านเสาต้นใน



รูปที่ 6.1.12 Trapezoidal combined footing

### Calculation of Footing Dimensions

#### Assumptions

- 1) TCF เป็น rigid
- 2) มีการกระจายเชิงเส้นของแรงดันดินใต้ TCF
- 3) ความยาว ( $L$ ) และความหนา ( $t$ ) ของ TCF มีขนาดคงที่ตลอด
- 4) ขนาดความยาว

–  $L_1$  (ระยะจาก property line ถึง cl. ของ  $Q_1$ )

–  $L_2$  (ระยะจาก inside edge ถึง cl. ของ  $Q_2$ ) และ

–  $L_3$  (ระยะจาก cl – cl ระหว่าง  $Q_1$  และ  $Q_2$ )

#### Principals

- 1) ใช้วิธีการ trail – and – error
- 2) เริ่มการประมาณการโดย

2.1 สมมุติความกว้างของด้านที่สั้นกว่า (B<sub>2</sub>) ของ TCF (ใช้ด้าน inside edge ของ TCF ในการออกแบบ)

2.2 หา net allowable soil pressure [bearing capacity,  $q_{all(net)}$ ]

3) หาความกว้างของด้านสั้น (B<sub>2</sub>) และความกว้างของด้านยาว (B<sub>1</sub>) ของ TCF โดยที่แรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกจากเสาตอม่อถ่ายผ่านจุด centroid ของ TCF

4) ทำการตรวจสอบว่า

$$4.1 \quad L/3 < X + L_2 < L/2$$

4.2 B<sub>2</sub> ที่สมมุติไว้ นั้นใช้ได้

5) เมื่อหาขนาดของ B<sub>1</sub> และ B<sub>2</sub> แล้ว ให้ TCF เสมือนว่าเป็นคาน RCF แต่แผนภาพแรงดันที่กระทำต่อ TCF beam นั้นจะเป็น linear varying (first degree) จาก B<sub>1</sub> และ B<sub>2</sub> ซึ่งไม่เท่ากับ RCF

6) ผลลัพธ์จะได้ว่า SFD และ BMD จะเป็น second – degree และ third – degree ตามลำดับ

Method

Sizing Analysis Steps

1) สมมุติ B<sub>2</sub>

2) หา net allowable soil pressure [bearing capacity,  $q_{all(net)}$ ] โดยใช้ " ความกว้าง B ที่สมมุติไว้ " หรือ " presumptive bearing capacity " อันใดอันหนึ่ง

3) คำนวณพื้นที่ของฐานราก (  $A = B \times L$  )

$$A = \frac{Q_1 + Q_2}{q_{all(net)}}$$

where  $Q_1, Q_2$  = column loads

4) หาตำแหน่งแรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกจากเสาตอม่อ

$$X = \frac{Q_2 L_3}{Q_1 + Q_2}$$

where  $X$  = distance of the resultant of the column loads, from  $Q_1$

$L_3$  = cl – cl distance between  $Q_1$  and  $Q_2$

5) ตรวจสอบขนาดที่ได้มาว่าสอดคล้องกับ trapezoidal – shaped solutions หรือไม่

$$L/3 < X + L_2 < L/2$$

- 6) ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าชั้นตอนที่ 5 ยังใช้ไม่ได้ ให้ปฏิบัติ ดังนี้
- 6.1 กำหนดขนาด  $L_2$  ชั้นใหม่ จนกระทั่งเป็นไปตามชั้นตอนที่ 5
- 6.2 ถ้าขนาด  $L_2$  ที่กำหนดขึ้นมาใหม่นั้นไม่สามารถเป็นไปตามที่แสดงไว้ในชั้นตอนที่ 5 ให้ทำการปรึกษากับสถาปนิก และกำหนด  $L_3$  หรือ  $L_1$  ชั้นใหม่เพื่อความเหมาะสม
- 7) คำนวณหาค่า  $B_1$  และ  $B_2$  โดยที่แรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อถ่ายผ่านจุด centroid ของฐานราก (สำหรับการกระจายแบบสม่ำเสมอของแรงดันดินใต้ RCF) โดยใช้คุณสมบัติของ trapezoid

$$X + L_1 = \frac{B_1 + 2B_2}{B_1 + B_2} \frac{L}{3} \quad \text{และ} \quad A = \frac{B_1 + B_2}{2} L$$

- 8) ตรวจสอบค่า  $B$  ที่สมมุติไว้ในชั้นตอนที่ 1 ว่าใช้ได้หรือไม่
- 8.1) ถ้าค่า  $B$  ที่ได้มานั้นมีค่ามากกว่าค่า  $B$  ที่สมมุติ (obtained  $B \gg \gg$  assumed  $B$ ) ให้กลับไปทำตามชั้นตอนที่ 1 – 7 โดยใช้ค่า  $B$  ที่สมมุติใหม่ (new assumed  $B$ ) ซึ่ง previous assumed  $B < \text{new assumed } B < \text{obtained } B$
- 8.2) ถ้าค่า  $B$  ที่ได้มานั้นมีค่าเท่ากับค่า  $B$  ที่สมมุติโดยประมาณ (obtained  $B \approx$  assumed  $B$ ) ให้ใช้ค่าที่มากกว่าเป็นขนาดความกว้างที่ใช้ก่อสร้างสำหรับ RCF
- 8.3) ถ้าค่า  $B$  ที่ได้มานั้นมีค่าน้อยกว่าค่า  $B$  ที่สมมุติ (obtained  $B \ll \ll$  assumed  $B$ ) ให้กลับไปทำตามชั้นตอนที่ 1 – 7 โดยใช้ค่า  $B$  ที่สมมุติใหม่ (new assumed  $B$ ) ซึ่ง previous assumed  $B > \text{new assumed } B > \text{obtained } B$

#### Structural Analysis Steps

- 9) คำนวณและเขียนแผนภาพแรงเฉือน (SFD) และ โมเมนต์ดัด (BMD)

#### Structural Design Steps

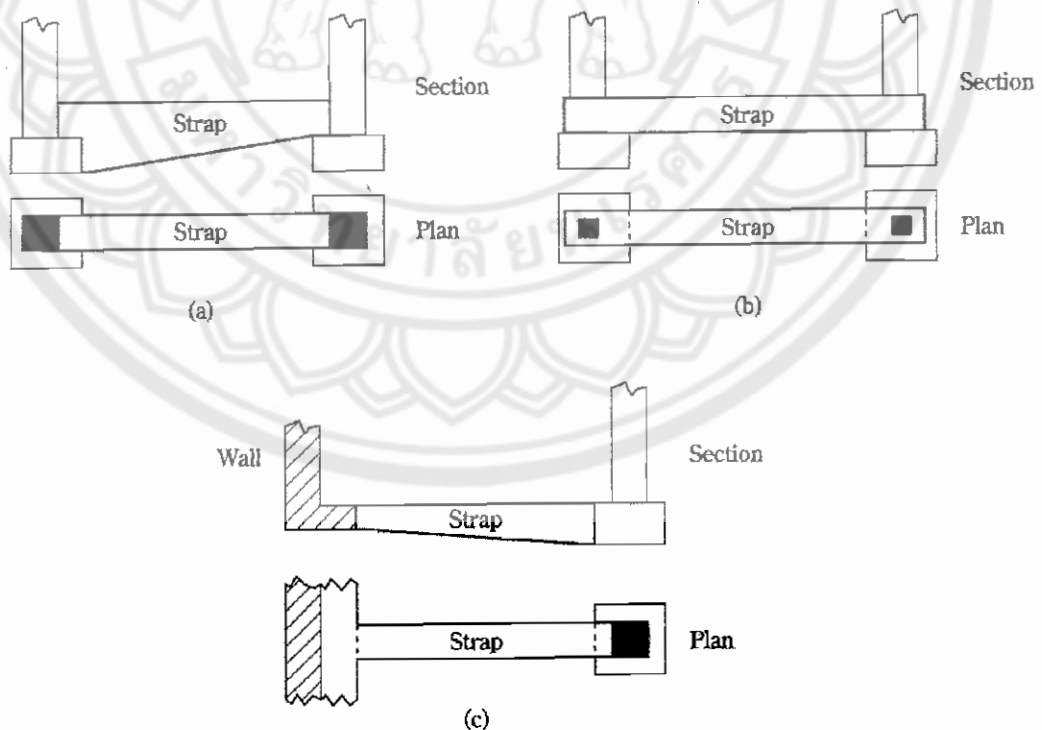
- 15) ออกแบบความหนา ( $t$ ) ของ TCF โดยใช้ Punching Shear และ Diagonal Tension ที่ critical section (คำนวณผ่านทาง SFD)
- 16) ออกแบบเหล็กเสริม โดยใช้ Bending Moment ที่ critical section และที่ transverse section (คำนวณผ่านทาง BMD)
- 17) ทำการตรวจสอบ ว่า Bending Stress ที่ได้มานั้นใช้ได้หรือไม่
- 18) วาดแบบร่างรายละเอียดของ TCF และเหล็กเสริม
- 19) กำหนดรายละเอียดอื่นๆตามทีออกแบบไว้

### 6.1.10.3 Cantilever or Strap Combined Footing (CCF)

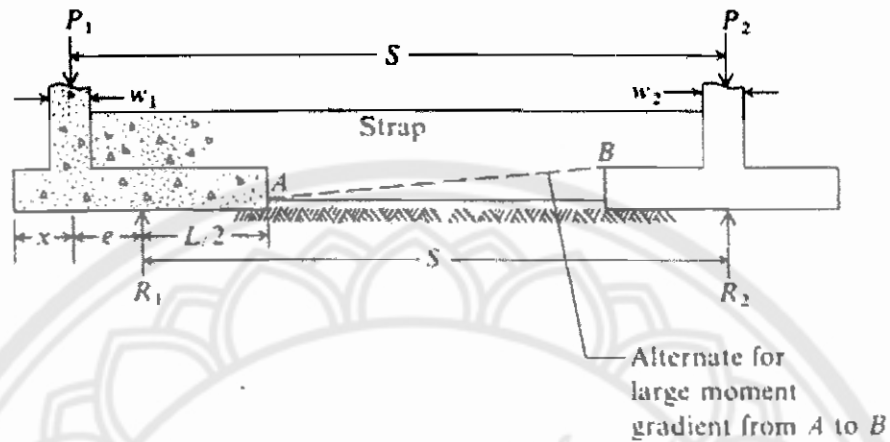
*Cantilever or Strap Combined Footing (CCF)* เป็นการออกแบบฐานรากเพื่อแก้ปัญหา กรณีไม่สามารถสร้างฐานรากที่สมมาตรได้อีกวิธีหนึ่ง เหมาะสำหรับเสาของอาคารที่มีความจำเป็นต้องสร้างประชิดติดกับอาคารเดิมหรือแนวเขตที่ดิน ไม่สามารถวางตำแหน่งของฐานรากให้ตรงกับแนวเสาต่อม่อได้ ในกรณีนี้จึงออกแบบให้มีคานคอนกรีตแบกรับน้ำหนักจากเสาต่อม่อ ซึ่งน้ำหนักจากอาคารจะถูกถ่ายลงที่เสาต่อม่อ แล้วถ่ายน้ำหนักลงบนคานก่อนที่จะลงสู่ฐานรากอีกทอดหนึ่ง (ที่มา: วิวัฒน์ สิทธิกุล, เทคนิคก่อสร้าง)

โดยตัวคานรัดนี้มีจุดประสงค์เพื่อเป็นชิ้นส่วนภายในของ combined footing แต่มีขนาดที่แคบกว่าทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการประหยัดวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดพื้นที่ของฐานราก CCF จะนำมาใช้แทน TCF หรือ RCF ก็ต่อเมื่อ

1. ความสามารถในการรับแรงแบกทานของดินมีสูง
2. ระยะห่างระหว่างเสาต่อม่อมีมาก



รูปที่ 6.1.13 Cantilever footing-use of strap beam



รูปที่ 6.1.14 Assumed loading and reactions for a strap-footing design.

Make strap width about same as smallest column  $w$ .

### Calculation of Footing Dimensions

#### Assumptions

- 1) คานรัดต้องมีลักษณะเป็น rigid
- 2) เพื่อลด differential settlement
  - 2.1 เสาคอนกรีตต้นในและต้นนอกจะต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับแรงดันดินที่เท่ากัน โดยประมาณ
  - 2.2 ควรหลีกเลี่ยงการใช้ค่า  $B$  ที่มีขนาดต่างกันมาก ๆ
- 3) คานรัดไม่ควรสัมผัสกับผิวดินเนื่องจากสมมุติฐานที่ใช้ในการออกแบบนั้นไม่มีแรงปฏิกิริยาจากดินมากระทำต่อคานรัด
- 4) โดยทั่วไปแล้วในการออกแบบจะไม่พิจารณาน้ำหนักของคานรัด
- 5) ตรวจสอบ depth - to - span ระหว่างขอบของฐานราก
- 6) คานรัดจะต้องยึดติดอย่างมั่นคงกับเสาคอนกรีตและฐานรากโดยใช้สลักหรือเหล็กเดือย ทั้งนี้ก็เพื่อให้เป็นชิ้นส่วนเดียวกัน

#### Principals

- 1) ใช้วิธีการ trial - and - error
- 2) เริ่มการประมาณการ net allowable soil pressure [bearing capacity,  $q_{all(net)}$ ]
- 3) หาแรงปฏิกิริยาของดินที่กระทำต่อเสาคอนกรีตต้นในและต้นนอก ( $R_1$  และ  $R_2$ )

- 3.1 สมมุติตำแหน่ง eccentricity (e) บนฐานรากที่รับเสาคอม่อตันนอก
- 3.2 หาค่า  $R_1$  โดยหาโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของฐานรากที่รองรับเสาคอม่อตัวใน ซึ่งแนวของน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างจะตรงกันพอดีกับแรงปฏิกิริยา
- 3.3 หาค่า  $R_2$  โดยอาศัยการหาโมเมนต์รอบ  $R_1$
- 4) หาขนาดของฐานราก โดยที่แรงลัพธ์ของแรงดันดินจะอยู่ตรงกับจุด centroids ของฐานราก
- 5) ตรวจสอบ
  - 5.1 แรงดันดินที่เท่ากันโดยประมาณที่กระทำต่อฐานรากทั้งเสาคอม่อตัวนอกและตัวใน
  - 5.2 ค่า B จะต้องไม่ต่างกันมากในฐานรากที่รองเสาคอม่อทั้งสอง
- 6) โดยทั่วไปแล้วคานารัดจะมีรูปร่างที่ไม่ใหญ่มากนัก อย่างไรก็ตามสามารถทำให้มีลักษณะแข็งเกร็งที่สุด (greatest rigidity) โดยการให้ความกว้างของคานารัดอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ ความกว้างที่เล็กที่สุดของเสาคอม่อ
 

สิ่งที่เพิ่มเติมอีกก็คือว่า ถ้าความลึกของฐานรากถูกจำกัด ในกรณีนี้จำเป็นต้องเพิ่มความกว้างของคานารัดเพื่อให้ได้ rigidity ที่ต้องการ
- 7) เมื่อหาขนาดของฐานรากและพื้นที่  $A_1$  และ  $A_2$  แล้ว CCF จะมีพฤติกรรมเสมือนคานา ซึ่ง
  - 7.1 แผนภาพของแรงดันดินที่กระทำต่อฐานรากมีความสม่ำเสมอ
  - 7.2 น้ำหนักของคานารัดจะไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ SFD และ BMD

#### Method

##### Sizing Analysis Steps

- 1) หา net allowable soil pressure [bearing capacity,  $q_{all(net)}$ ] โดยใช้ “ ความกว้าง B ที่สมมุติไว้ “ หรือ “ presumptive bearing capacity “ อันใดอันหนึ่ง
- 2) สมมุติค่า eccentricity(e) บนฐานรากตัวนอก
- 3) คำนวณระยะห่างระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของเสาคอม่อทั้งสอง

$$S_1 = L_3 - e$$

$L_3 = c_1 - c_2$  distance between both columns

- 4) หาค่าแรงปฏิกิริยาของดินที่กระทำต่อฐานรากทั้งตัวนอกและตัวใน ( $R_1$  และ  $R_2$ )

- 4.1 หาค่า  $R_1$  โดยการหาโมเมนต์รอบจุด centroid ของฐานรากตัวใน

$$R_1 S_1 = Q_1 L_3$$

- 4.2 หาค่า  $R_2$  โดยการหาโมเมนต์รอบ  $R_1$

$$R_2 S_1 + Q_1 e = Q_2 S_1$$



- 5) หาขนาดของฐานรากที่ต้องการสำหรับ  $R_1$  และ  $R_2$  โดยใช้  $q_{all(net)}$  และ uniform soil pressure ได้ CCF โดย  $L = 2(e + L)$

5.1 พื้นฐานรากตัวใน ( $A_2$ )

$$B_2^2 q_{all(net)} = R_2$$

5.2 พื้นฐานรากตัวนอก ( $A_1$ )

$$LB_1 q_{all(net)} = R_1$$

$$L = 2(e + L_1)$$

- 6) ตรวจสอบแรงดันดินและค่าความแตกต่างของ  $B$  ในฐานรากทั้งตัวในและตัวนอก  
 7) ถ้าขั้นตอนที่ 6 ยังใช้ไม่ได้ ให้ทำการลดค่า "e" และกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3 – 6 อีกครั้ง  
 8) ถ้าขั้นตอนที่ 6 ใช้ได้แล้ว ให้ตรวจสอบว่า  $q_{all(net)}$  นั้นใช้ได้หรือไม่

8.1) ถ้าค่า  $B$  ที่ได้มานั้นมีค่ามากกว่าค่า  $B$  ที่สมมุติ (obtained  $B \gg \gg$  assumed  $B$ ) ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1 – 7 โดยใช้ค่า  $B$  ที่สมมุติใหม่ (new assumed  $B$ ) ซึ่ง previous assumed  $B < \text{new assumed } B < \text{obtained } B$

8.2) ถ้าค่า  $B$  ที่ได้มานั้นมีค่าเท่ากับค่า  $B$  ที่สมมุติโดยประมาณ (obtained  $B \approx$  assumed  $B$ ) ให้ใช้ค่าที่มากกว่าเป็นขนาดความกว้างที่ใช้ก่อสร้างสำหรับ RCF

8.3) ถ้าค่า  $B$  ที่ได้มานั้นมีค่าน้อยกว่าค่า  $B$  ที่สมมุติ (obtained  $B \ll \ll$  assumed  $B$ ) ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1 – 7 โดยใช้ค่า  $B$  ที่สมมุติใหม่ (new assumed  $B$ ) ซึ่ง previous assumed  $B > \text{new assumed } B > \text{obtained } B$

Structural Analysis Steps

- 9) คำนวณและเขียนแผนภาพแรงเฉือน (SFD) และ โมเมนต์ดัด (BMD)

9.1 ให้คิด CCF เป็นเสมือนคาน

9.2 แผนภาพแรงดันดินที่กระทำต่อฐานรากจะเป็น uniform line load

9.3 น้ำหนักของคานรััดจะไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ SFD และ BMD

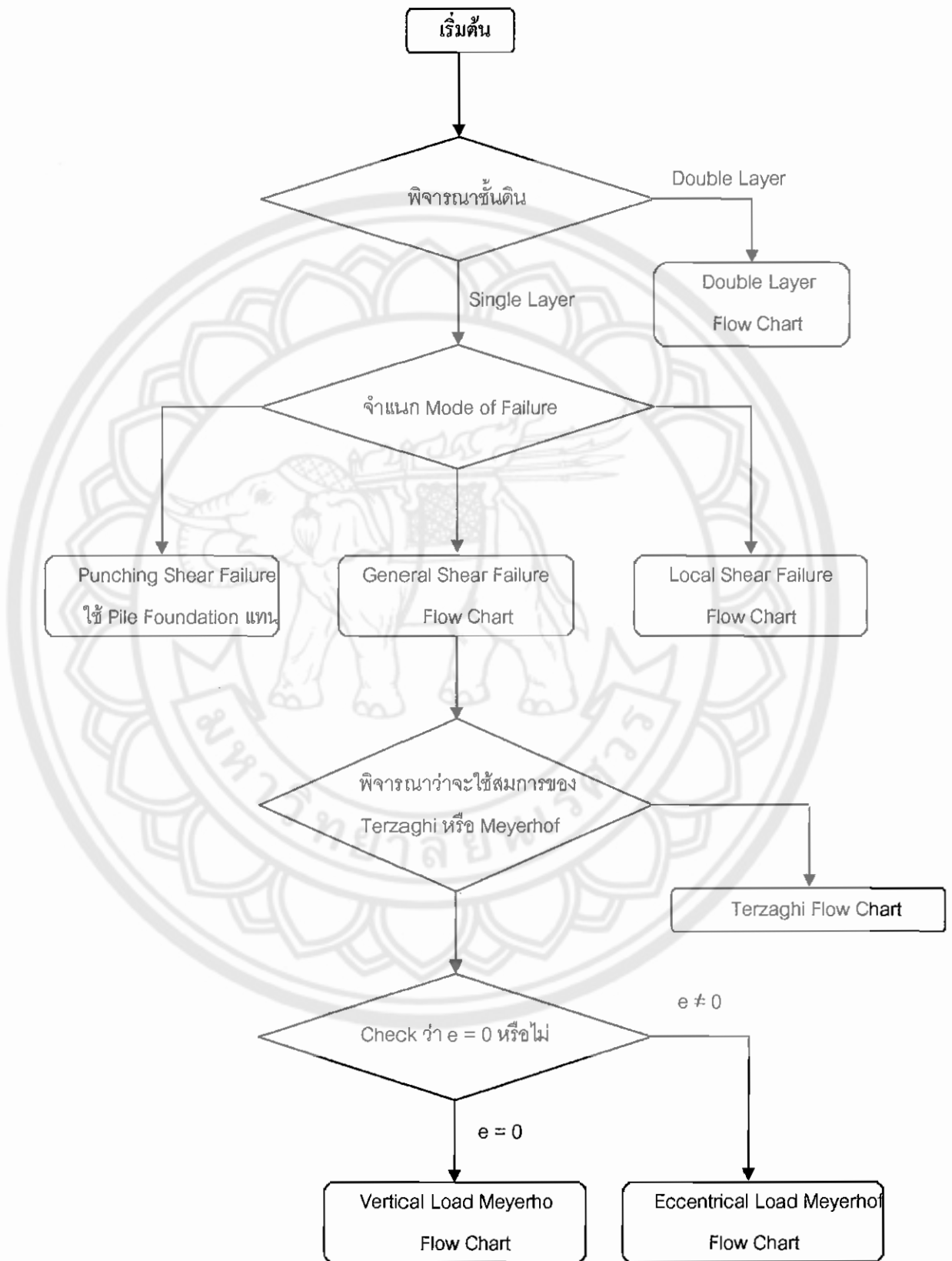
9.4 คัดน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อเป็น point load

Structural Design Steps

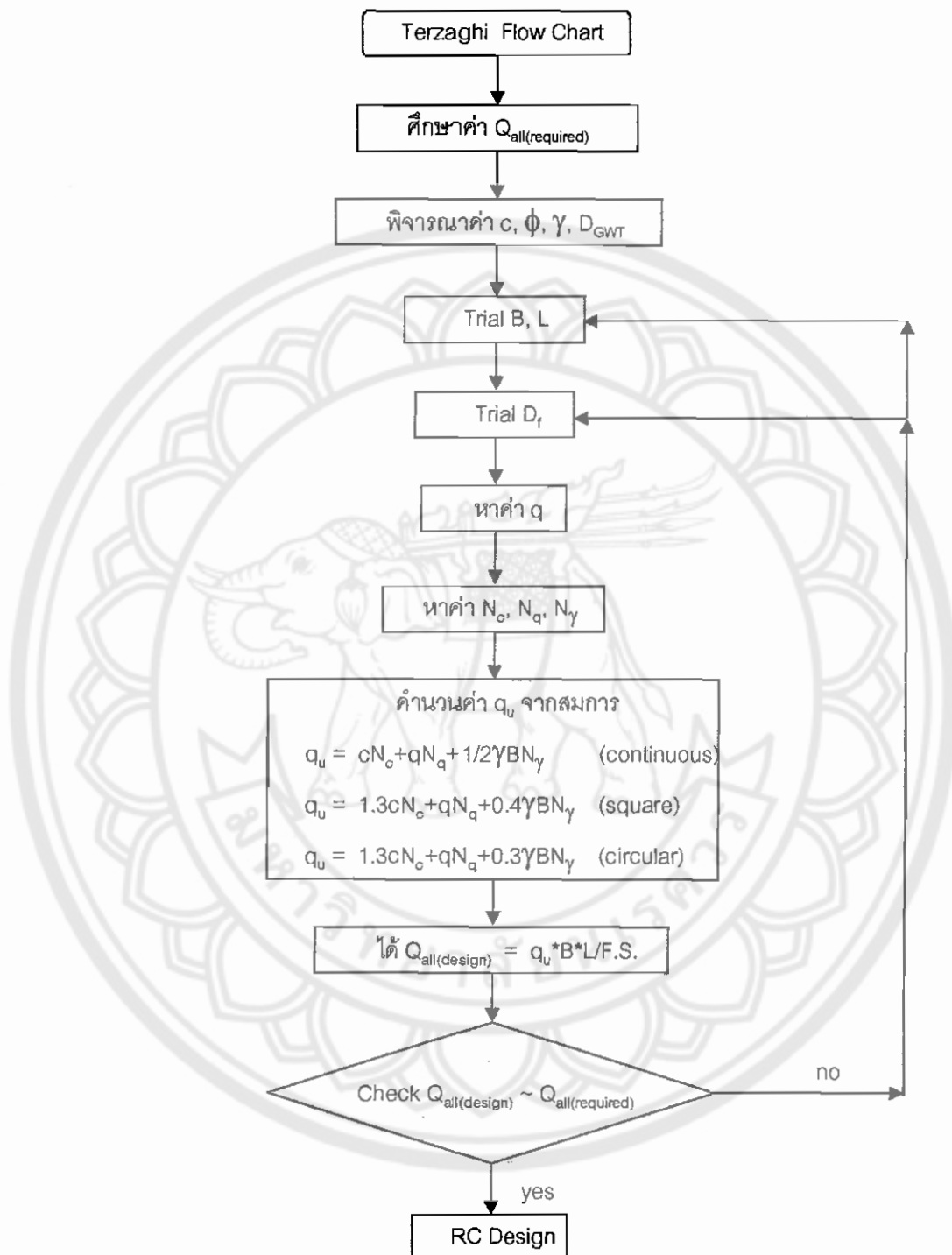
- 10) ออกแบบความหนา (t) ของ CCF โดยใช้ Punching Shear และ Diagonal Tension ที่ critical section (คำนวณผ่านทาง SFD)

- 11) ออกแบบเหล็กเสริม โดยใช้ Bending Moment ที่ critical section และที่ transverse section (คำนวณผ่านทาง BMD)
- 12) ทำการตรวจสอบ ว่า Bending Stress ที่ได้มานั้นใช้ได้หรือไม่
- 13) วาดแบบร่างรายละเอียดของ CCF และเหล็กเสริม
- 14) กำหนดรายละเอียดอื่นๆตามทีออกแบบไว้

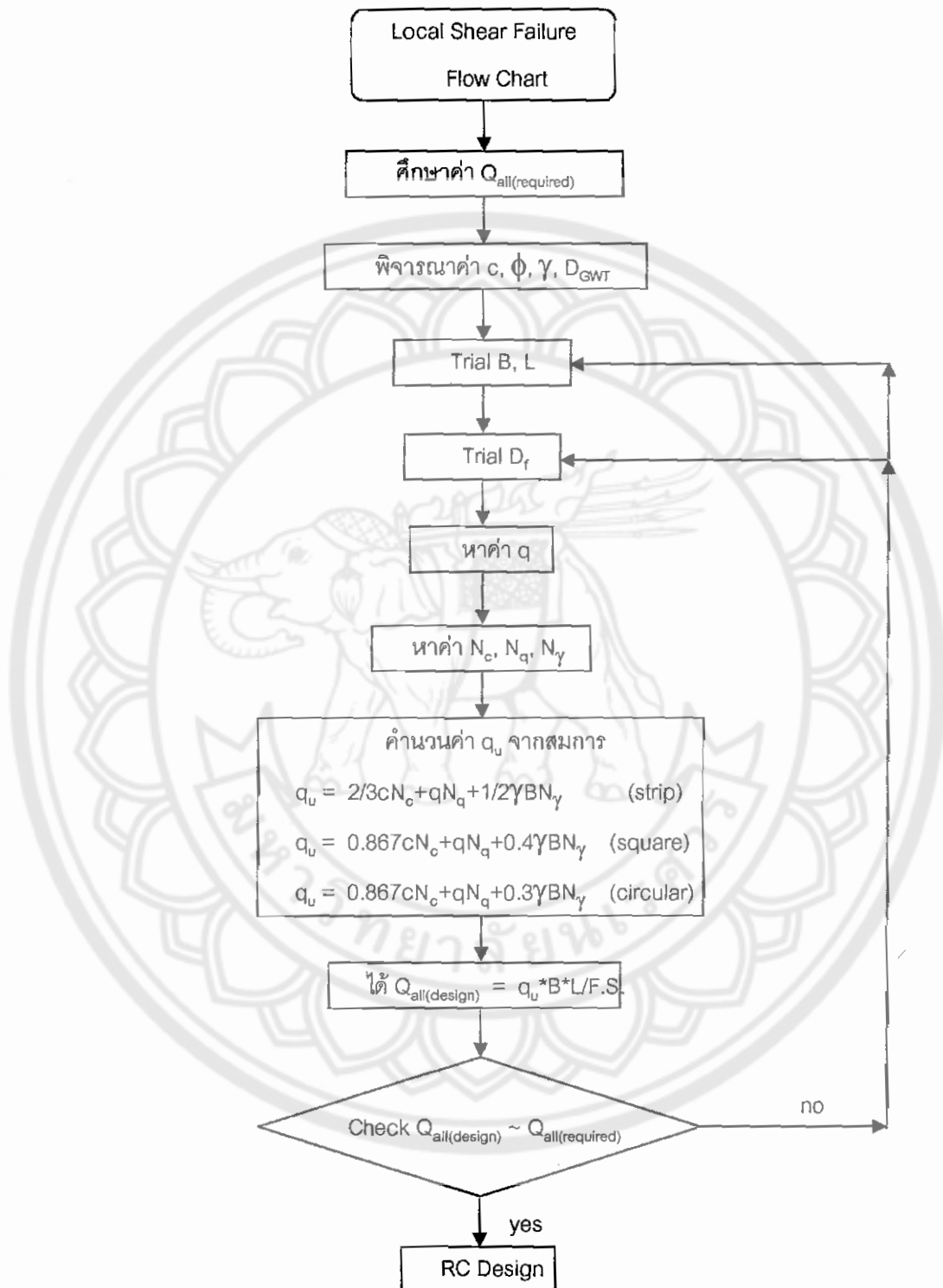




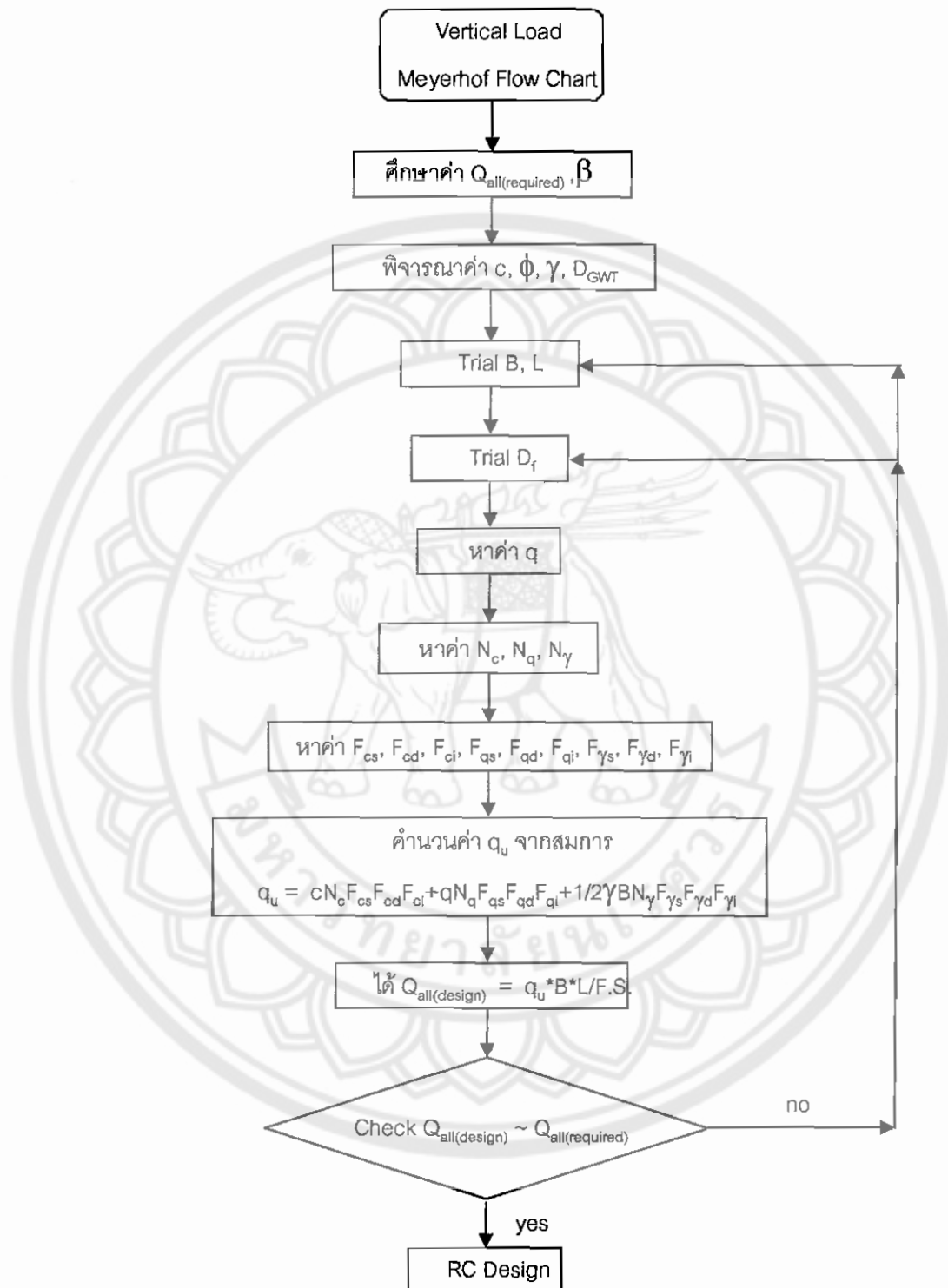
รูปที่ 6.1.15 ขั้นตอนที่ใช้ในการพิจารณาเนื้อหา Shallow Foundation



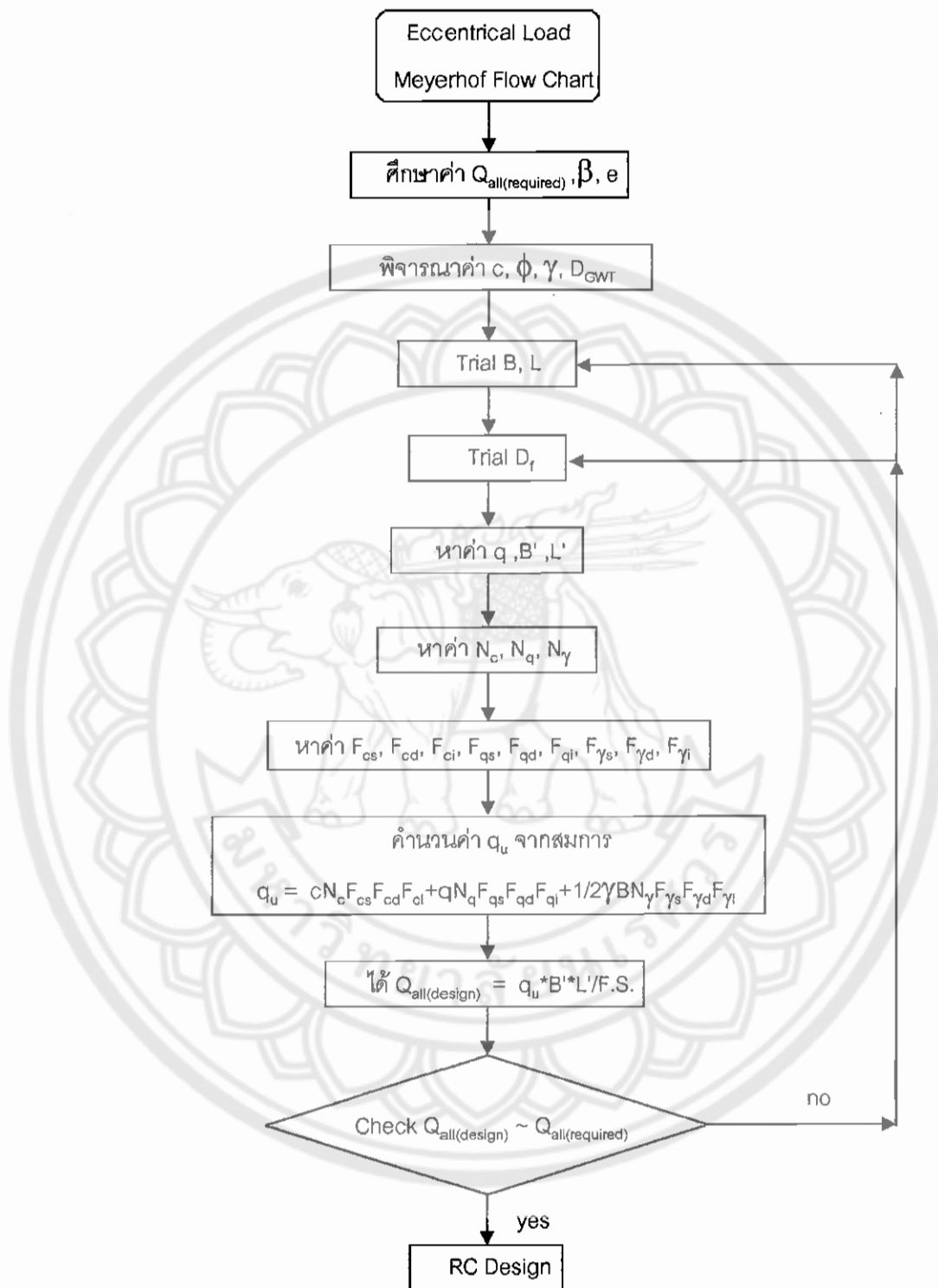
รูปที่ 6.1.16 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากดิน ด้วยวิธี Terzaghi



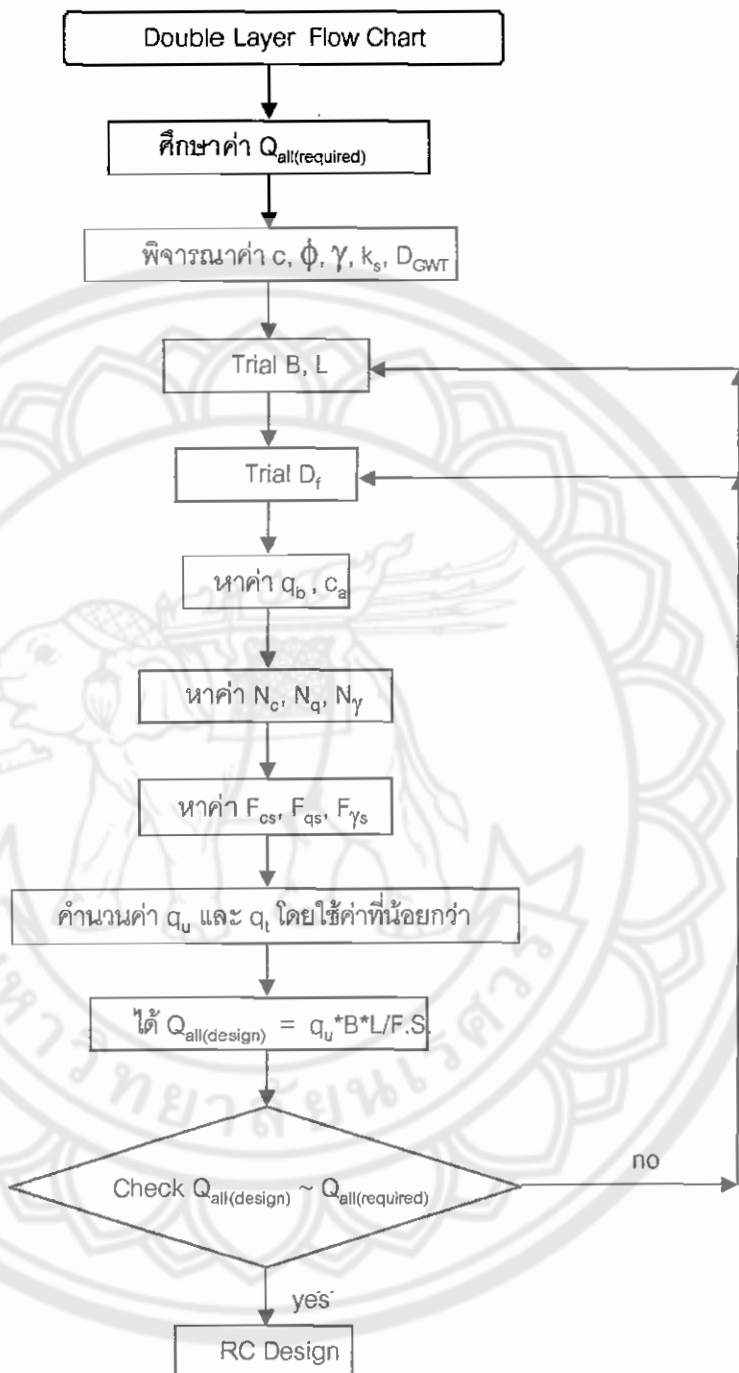
รูปที่ 6.1.17 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากตื้น ด้วยวิธี Local Shear Failure



รูปที่ 6.1.18 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากดิน ด้วยวิธี Vertical Load Meyerhof

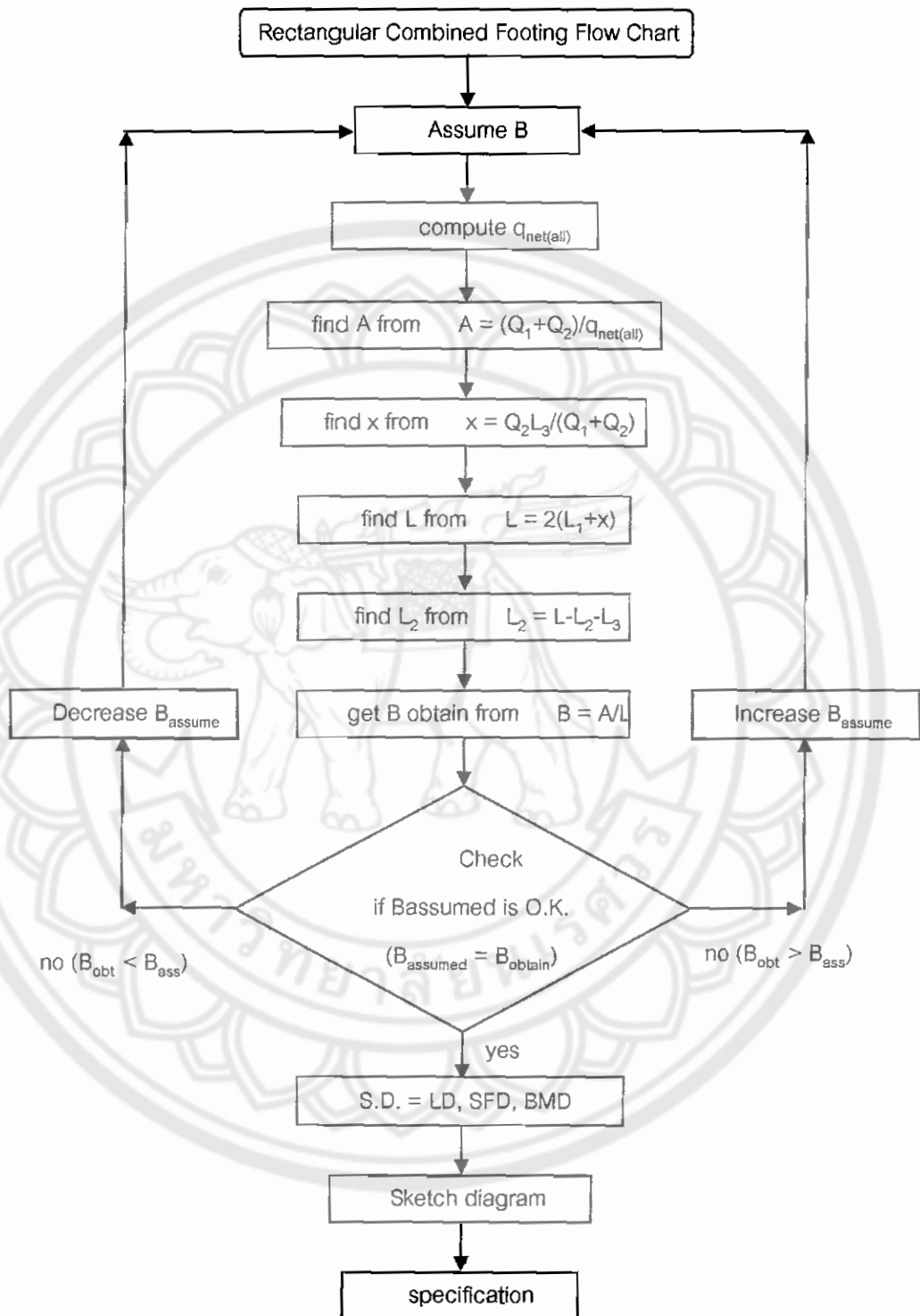


รูปที่ 6.1.19 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากดิน ด้วยวิธี Eccentric Load Meyerhof

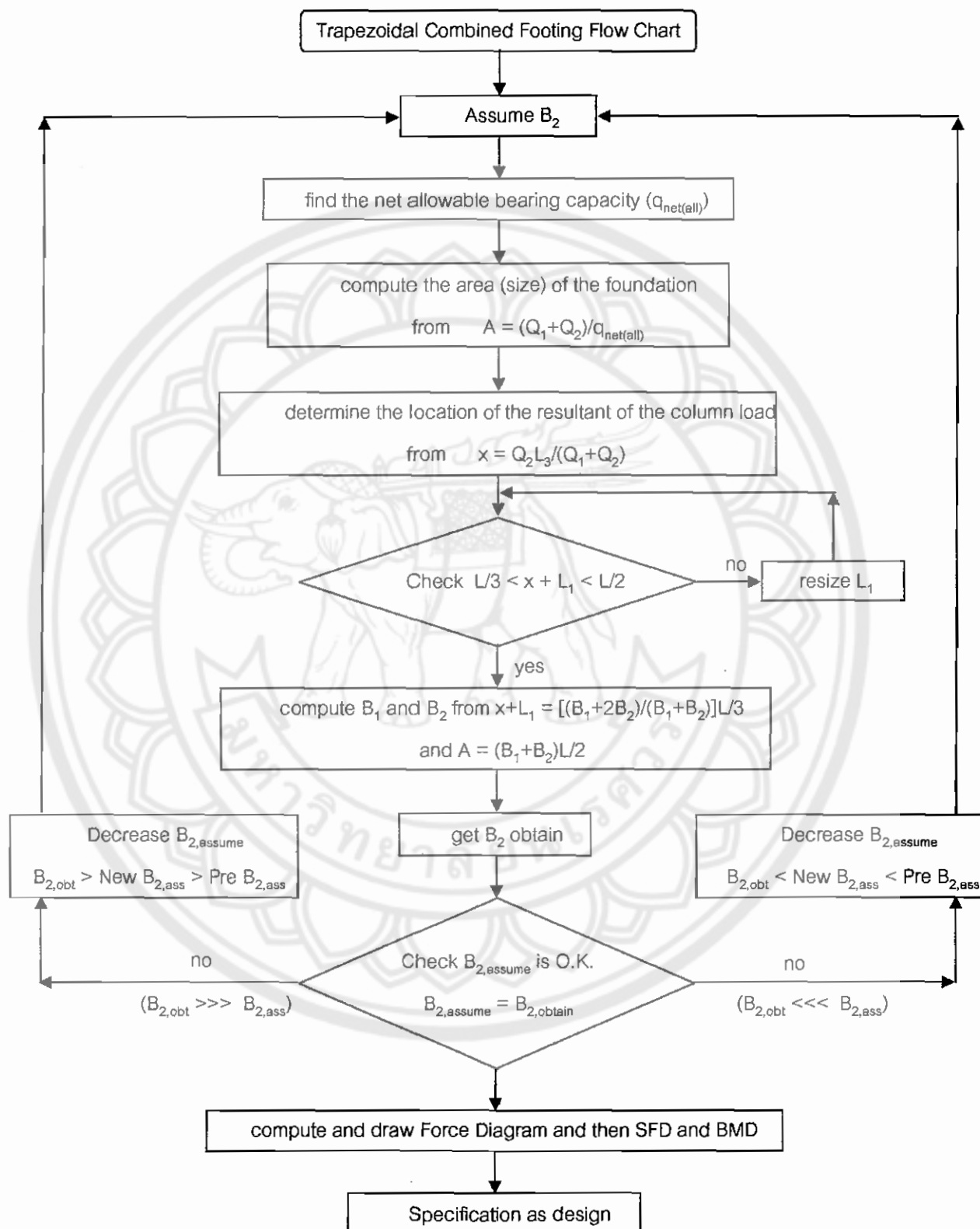


รูปที่ 6.1.20 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากดิน โดยมีดินเป็น Double Layer

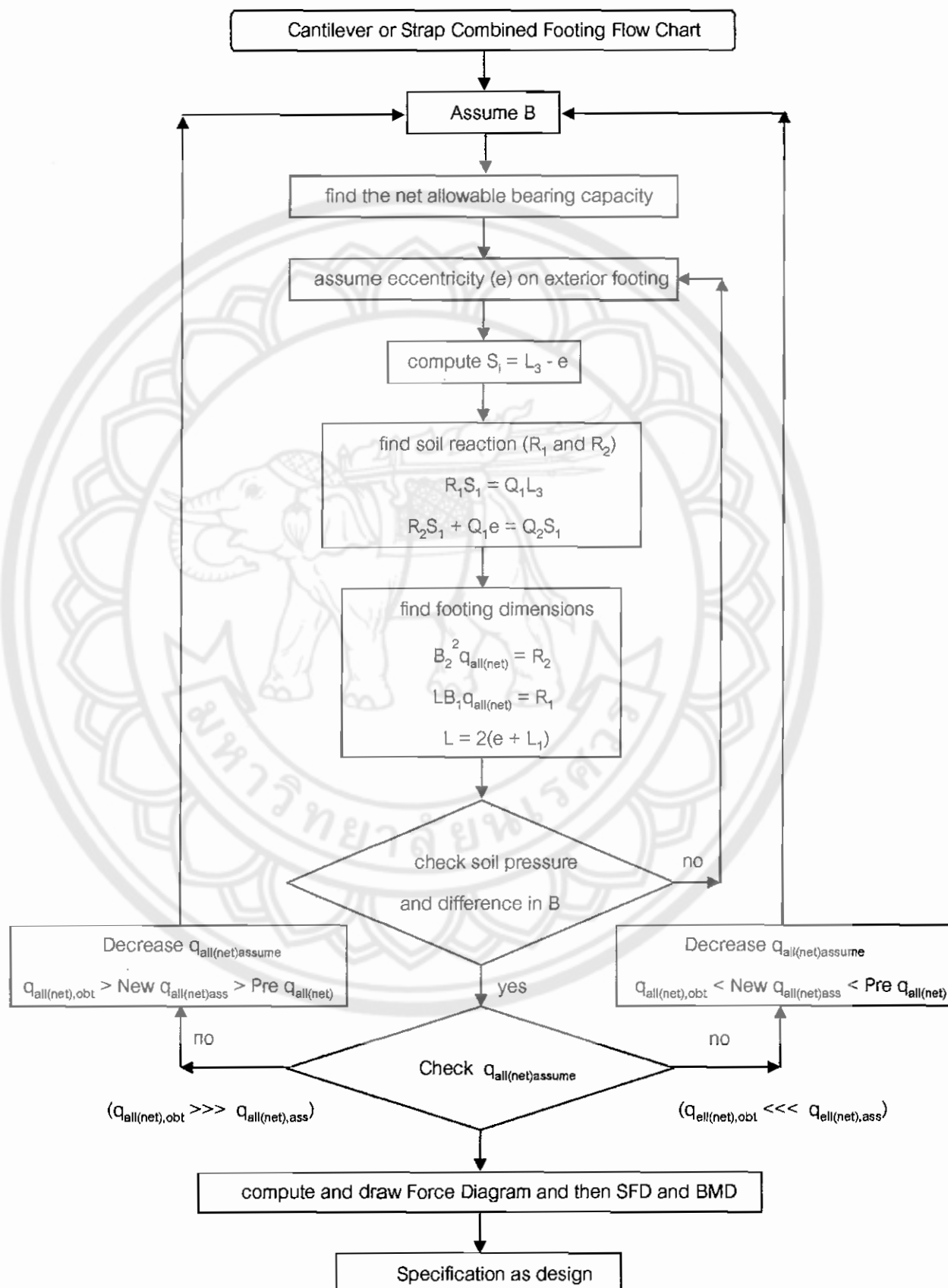




รูปที่ 6.1.21 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากดิน ด้วยวิธี Rectangular Combined Footing



รูปที่ 6.1.22 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากตีน ด้วยวิธี Trapezoidal Combined Footing



รูปที่ 6.1.23 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากดิน ด้วยวิธี Cantilever or Strap Combined Footing

## 6.2 โจทย์ทบทวนความรู้ ความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของเนื้อหาที่เรียน

1. เราสามารถใช้ฐานรากตื้นได้เมื่อใด

ตอบ ใช้ได้เมื่อความลึกจากระดับผิวดินน้อยกว่าหรือเท่ากับด้านที่สั้นที่สุดของฐานราก ภายหลังยอมให้ระดับความลึกจากระดับผิวดินน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3-4 เท่าของด้านที่สั้นที่สุดของฐานราก ( $D_f \leq 3-4 B$ )

2. รูปแบบการพังทลายของชั้นดินที่รองรับฐานรากตื้น มีกี่ชนิด อะไรบ้าง

ตอบ รูปแบบการพังทลายของชั้นดินที่รองรับฐานรากตื้น 3 ชนิด คือ

1. General shear failure
2. Local shear failure
3. Punching shear failure

3. Terzaghi's equation ต่างกับ Meyerhof equation อย่างไร

ตอบ Terzaghi จะเป็นการออกแบบฐานรากแบบลื่นเปลือก แต่ Meyerhof จะประหยัดกว่าของ Terzaghi

4. เราสามารถใช้ local shear failure ได้เมื่อใด

ตอบ เมื่อ  $\phi < 28^\circ$  และ  $D_f < 20$

5. ฐานรากร่วม (combined footing) มีลักษณะเป็นอย่างไร

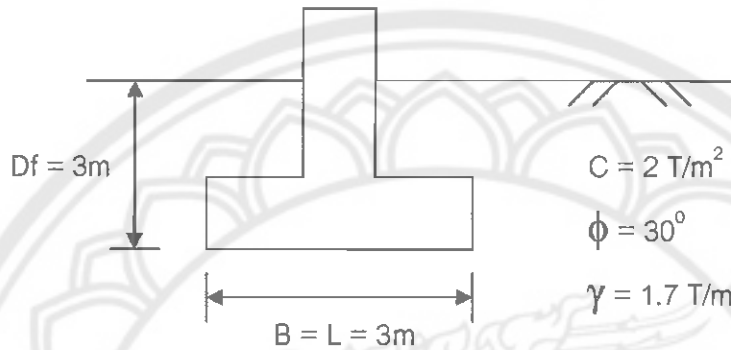
ตอบ เป็นฐานรากเพื่อใช้รับน้ำหนักบรรทุกของเสาหรือตอม่อสองต้นขึ้นไป ฐานร่วมพบในกรณีที่เสาเหล่านั้นอยู่ใกล้กันมาก จนฐานรากเกยกันหรือมีจะนั้นอาจเป็นเพราะฐานรากใด ๆ ที่ไม่เสถียร จึงจำต้องยึดไว้กับฐานรากอื่นที่อยู่ใกล้เคียงกัน

6. การที่ฐานรากตื้นรับน้ำหนักบรรทุกทุกเยื้องศูนย์กลาง ส่งผลกระทบต่อกรรับแรงอย่างไรบ้าง

ตอบ 1. การกระจายของแรงกระทำทำให้ฐานรากไม่สม่ำเสมอ  
2. ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยภายใต้การรับแรงเยื้องศูนย์กลางลดลง จากความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยภายใต้การรับแรงไม่เยื้องศูนย์กลาง

### 6.3 ใจหทัยทดสอบความสามารถในการคิดวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้ความรู้

1. จงคำนวณว่าฐานรากนี้สามารถรับน้ำหนักแบกหาได้เท่าไร โดยใช้วิธีของ Terzaghi โดยที่  $FS = 3$  และระดับน้ำอยู่ลึกมาก



รูปที่ 6.3.1 รูปตัดด้านข้างของฐานราก

วิธีทำ

เลือกใช้สมการของ Terzaghi's equation

ตัวสมการ

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$$

ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณ

$$q = \gamma D_f = 1.7 \times 3 = 5.1 \text{ T/m}^2$$

ผลการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{จาก } q_u &= 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma \\ &= (1.3 \times 2 \times 37.16) + (5.1 \times 22.46) + (0.4 \times 1.7 \times 3 \times 19.13) \\ &= 250.19 \text{ T/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{all} &= q_u \cdot B \cdot L / FS \\ &= 250.19 \times 3 \times 3 / 3 \\ &= 750.56 \text{ T} \end{aligned}$$

2. ฐานรากขนาด 3\*3 m สมมติให้เป็นการพังแบบ local shear failure ให้ใช้ Terzaghi's equation และ ให้ F.S = 5 ,  $D_f = 2m$  ให้หาค่า  $Q_{all}$  ที่ฐานรากนี้สามารถรับได้

### วิธีทำ

เลือกใช้ Terzaghi's equation for square foundation.

ตัวสมการ

$$q_u = 0.867cN_c + qN_q + 0.4\gamma B N_\gamma$$

พิจารณาตัวแปรที่โจทย์กำหนด

F.S	=	5		c	=	0	kN/m <sup>2</sup>
B	=	3	m	$\gamma$	=	16	kN/m <sup>3</sup>
L	=	3	m	$\phi$	=	20	องศา
$D_f$	=	2	m				

ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณ

f	=	20	องศา	จะได้
$N_c$	=	17.69		
$N_q$	=	7.44		
$N_\gamma$	=	3.64		
q	=	$\gamma D_f$		
	=	16*2	=	32 kN/m <sup>2</sup>

ผลการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{จาก } q_u &= 0.867cN_c + qN_q + 0.4\gamma B N_\gamma \\ &= (0.867*0*17.69) + (32*7.44) + (0.4*16*3*3.64) \\ q_u &= 307.97 \text{ kN/m}^2 \\ Q_{all} &= q_u * B * L / FS \\ &= 307.97 * 3 * 3 / 5 = 554.34 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

3. ฐานรากขนาด 2\*2m สมมุติให้เป็นการพังแบบ general shear failure และใช้ Meyerhof's equation โดย FS = 3 ,  $D_f = 1.5\text{m}$  ให้หา  $Q_{all}$  ที่ฐานรากนี้สามารถรับได้

วิธีทำ

เลือกใช้ Meyerhof's equation

ตัวสมการ

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 1/2gBN_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

พิจารณาตัวแปรที่โจทย์กำหนด

F.S	=	3	
B	=	2	m
L	=	2	m
$D_f$	=	1.5	m
c	=	0	$\text{kN/m}^2$
$\gamma$	=	16.5	$\text{kN/m}^3$
$\phi$	=	36	องศา

ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณ

f	=	36	องศา	จะได้
$N_c$	=	50.59		
$N_q$	=	37.75		
$N_\gamma$	=	56.31		
q	=	$\gamma D_f$		
	=	$16.5 * 1.5$		
	=	24.75	$\text{kN/m}^2$	
$F_{qs}$	=	$1 + (B/L) \tan \phi$		
	=	$1 + (2/2) \tan 36$		
	=	1.73		
$F_{qi}$	=	$F_{ci}$	=	$(1 - \beta^0/90^0)^2 = 1$

$$\begin{aligned}
 F_{qd} &= 1+2\tan\phi(1-\sin\phi)^2 Df/B \\
 &= 1+2\tan 36(1-\sin 36)^2 1.5/2 \\
 &= 1.19
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{\gamma_s} &= 1-0.4(B/L) = 1-0.4(2/2) \\
 &= 0.6
 \end{aligned}$$

$$F_{\gamma_i} = (1-\beta/\phi)^2 = 1$$

$$F_{\gamma_d} = 1$$

$$\begin{aligned}
 F_{cs} &= 1+(B/L)(Nq/Nc) = 1+(2/2)(37.75/50.59) \\
 &= 1.75
 \end{aligned}$$

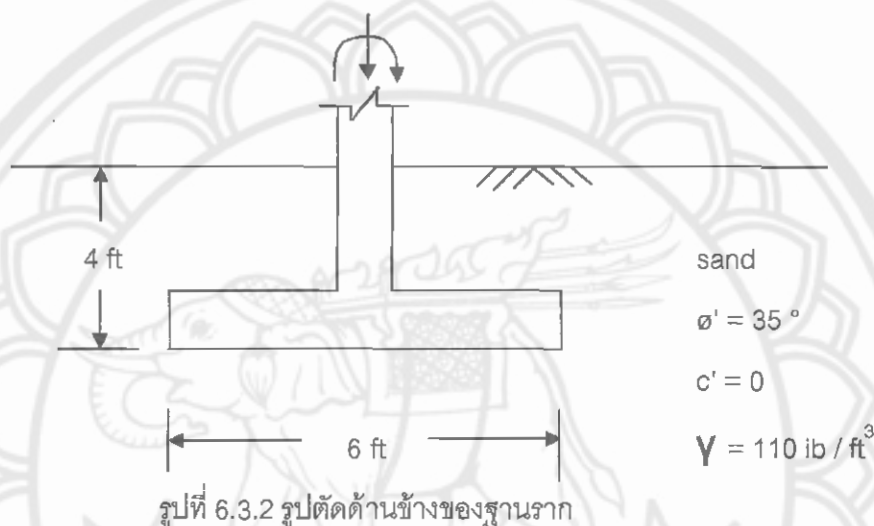
$$\begin{aligned}
 F_{cd} &= 1+0.4(Df/B) = 1+0.4(1.5/2) \\
 &= 1.3
 \end{aligned}$$

ผลการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } q_u &= cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 1/2gBN_\gamma F_{\gamma_s} F_{\gamma_d} F_{\gamma_i} \\
 q_u &= (0 \cdot 50.59 \cdot 1.75 \cdot 1.3 \cdot 1) + (24.75 \cdot 37.75 \cdot 1.73 \cdot 1.19 \cdot 1) \\
 &\quad + (1/2 \cdot 16.5 \cdot 2 \cdot 56.31 \cdot 0.6 \cdot 1 \cdot 1) \\
 &= 2469.32 \text{ kN/m}^2 \\
 Q_{all} &= q_u \cdot B \cdot L / FS \\
 &= 2469.32 \cdot 2 \cdot 2 / 3 \\
 &= 3292.43 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$



4. ฐานรากแบบต่อเนื่อง ( continuous foundation ) ที่แสดงในรูปถัดมามีค่าการเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 ft จงหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประดัย ,  $Q_{ult}$  ต่อหนึ่งหน่วยความยาวฐานราก



วิธีทำ

ขั้นที่ 1 หาขนาดประสิทธิภาพของฐานราก

$$\begin{aligned} B' &= 6 - 2e \\ &= 6 - 2(0.5) \\ &= 5 \text{ ft} \\ L' &= L \end{aligned}$$

ขั้นที่ 2 ใช้ The General Bearing Capacity Equation

$$q'_u = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 1/2 \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

เนื่องจากชั้นดินเป็น sand ค่า  $c' = 0$  ดังนั้นสมการจึงลดรูปลง

$$q'_u = q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 1/2 \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

หาค่าต่างๆในสมการ

$$q' = (110)(4) \\ = 440 \text{ lb/ft}^2$$

สำหรับ  $\phi' = 35^\circ$  จาก Table 3.4 จะได้

$$N_q = 33.3$$

$$N_\gamma = 48.03$$

เนื่องจากฐานรากดังกล่าวเป็นแบบ strip foundation ค่า B'/L' เท่ากับศูนย์

ดังนั้น  $F_{qs} = 1$  ,  $F_{\gamma s} = 1$

$$F_{qi} = F_{\gamma i} = 1$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 D_f / B = 1 + 0.255(4/6) = 1.17$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

และ

$$q'_u = (440)(33.3)(1)(1.17)(1) + (1/2)(110)(5)(48.03)(1)(1)(1) \\ = 30,351 \text{ lb/ft}^2$$

ผลการคำนวณ

$$Q_{ult} = (B')(1)(q'_u) \\ = (5)(1)(30,351) \\ = 151,755 \text{ lb/ft}$$

5. ฐานรากขนาด  $5 \times 5$  m โดย  $FS = 3, D_f = 4$  m,  $H = 6$  m ให้หา  $Q_{all}$  ที่ฐานรากนี้สามารถรับได้  
วิธีทำ

เลือกใช้ Bearing Capacity of Layered soils, Special Case 3

ตัวสมการ

$$q_u = (1+0.2B/L)5.14c_2 + (1+B/L)(2c_a H/B) + \gamma_1 D_f \leq q_t$$

$$q_t = (1+0.2B/L)5.14c_1 + \gamma_1 D_f$$

พิจารณาตัวแปรที่โจทย์กำหนด

B	=	5	m	$c_1$	2 T/m <sup>2</sup>	0m
L	=	5	m	$\gamma_T$	1.7 T/m <sup>3</sup>	
H	=	6	m	$\gamma_{sat}$	3.7 T/m <sup>3</sup>	
$D_f$	=	4	m	$\phi_1$	0 องศา	1m
F.S	=	3		$c_2$	4 T/m <sup>2</sup>	
				$\gamma_T$	1.75 T/m <sup>3</sup>	
				$\gamma_{sat}$	1.85 T/m <sup>3</sup>	
				$\phi_2$	0 องศา	10m

ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณ

$$c_2/c_1 = 2.00 \quad c_a/c_1 = 1$$

$$c_a = 2.00 \quad T/m^2$$

ผลการคำนวณ

$$\text{จาก } q_u = (1+0.2B/L)5.14c_2 + (1+B/L)(2c_a H/B) + \gamma_1 D_f \leq q_t$$

$$\begin{aligned} q_u &= (1+0.2 \cdot 5/5)(5.14 \cdot 4) + (1+5/5)(2 \cdot 2 \cdot 6/5) + (1 \cdot 1.7 + 3 \cdot 1.85) \\ &= 41.52 \quad T/m^2 \end{aligned}$$

$$\text{จาก } q_t = (1+0.2B/L)5.14c_1 + \gamma_1 D_f$$

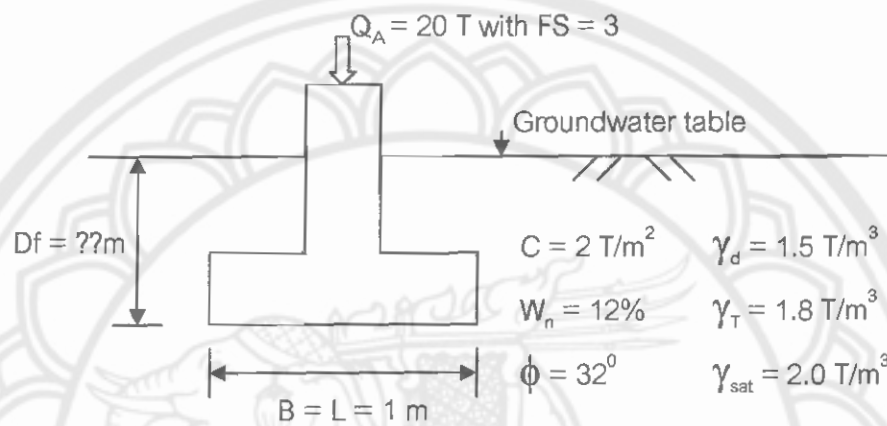
$$\begin{aligned} q_t &= (1+0.2 \cdot 5/5)(5.14 \cdot 2) + (1 \cdot 1.7 + 3 \cdot 1.85) \\ &= 19.59 \quad T/m^2 \end{aligned}$$

$$Q_{all} = q_{all} \cdot B \cdot L$$

$$= 6.53 \cdot 5 \cdot 5 = 163.22 \quad T$$

## 6.4 โจทย์ทดสอบความสามารถในการนำความรู้ไปใช้ในการทำงานจริง

- ท่านได้รับคัดเลือกบรรจุเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรโยธา และได้รับมอบหมายให้ออกแบบฐานราก ดังรูปที่ 6.4.1 กรุณาวิเคราะห์และแสดงรายการคำนวณประกอบการออกแบบว่า ต้องวางฐานราก (Df) ไว้ที่ความลึกเท่าใด



รูปที่ 6.4.1 รูปตัดด้านข้าง (cross-section) ของฐานราก

### วิธีทำ

เลือกใช้สมการของ Terzaghi's equation

ตัวสมการ

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma B N_\gamma$$

จาก  $D_f/B \leq 3$

ดังนั้น  $D_f \leq 3$  (เพราะ  $B = 1 \text{ m}$ )

Assume 1  $D_f = 1 \text{ m}$

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma B N_\gamma$$

$$= (1.3 \cdot 2 \cdot 44.04) + (1)(2-1)(28.52) + (0.4)(2-1)(1)(26.87)$$

$$= 153.77 \text{ T/m}^2$$

$$Q_{\text{all}} = q_u \cdot B \cdot L / FS$$

$$= 153.77 \cdot 1 \cdot 1 / 3$$

$$= 51.26 \text{ T} > 20 \text{ T} \quad \text{OK}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Assume2} \quad D_f &= 0.5 \text{ m} \\
 q_u &= 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma \\
 &= (1.3 \cdot 2 \cdot 44.04) + (0.5)(2-1)(28.52) + (0.4)(2-1)(1)(26.87) \\
 &= 139.51 \text{ T/m}^2 \\
 Q_{\text{all}} &= q_u \cdot B \cdot L / FS \\
 &= 139.51 \cdot 1 \cdot 1 / 3 \\
 &= 46.50 \text{ T} > 20 \text{ T} \quad \text{OK}
 \end{aligned}$$

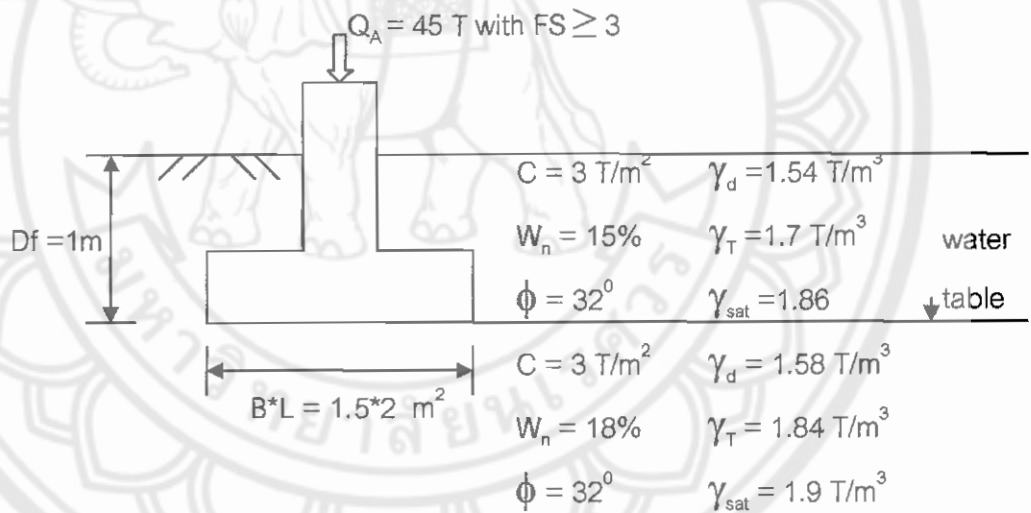
$$\begin{aligned}
 \text{Assume3} \quad D_f &= 0.25 \text{ m} \\
 q_u &= 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma \\
 &= (1.3 \cdot 2 \cdot 44.04) + (0.25)(2-1)(28.52) + (0.4)(2-1)(1)(26.87) \\
 &= 132.38 \text{ T/m}^2 \\
 Q_{\text{all}} &= q_u \cdot B \cdot L / FS \\
 &= 132.38 \cdot 1 \cdot 1 / 3 \\
 &= 44.13 \text{ T} > 20 \text{ T} \quad \text{OK}
 \end{aligned}$$

ตอบ จากที่ได้ Assume มาทั้ง 3 ครั้ง เราได้  $D_f = 1\text{m}$ ,  $0.5\text{m}$  และ  $0.25\text{m}$  ซึ่งทุกค่าที่ Assume มา นั้นสามารถรับแรงได้มากกว่า  $20 \text{ T}$  ทั้งสิ้น แต่เพื่อความเหมาะสมเราจึงเลือกที่จะใช้ค่า  $D_f$  อย่างน้อย  $1\text{m}$  เพื่อเป็นการกันการกัดเซาะของน้ำ เป็นการป้องกันไม่ให้ฐานรากนี้เอียงด้วย

2. นายช่างชัยพร ออกแบบฐานรากตื้น ดังรูปที่ 6.4.2 โดยได้เผื่อรวมค่า eccentricity ( $e_{design}$ ) = 0.025m ไว้สำหรับความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นขณะก่อสร้าง หลังจากผู้รับเหมาก่อสร้างตรวจสอบการติดตั้งแบบหล่อเสา พบว่าได้ติดตั้งแบบหล่อเสา ผิดไปจากแบบ ทำให้เกิด eccentricity ( $e_{constructed}$ ) ขึ้นจริง = 0.075 m จึงทำหนังสือขอความคิดเห็นมายัง บริษัทควบคุมงานก่อสร้าง ดังนี้

2.1 จำเป็นหรือไม่? ที่จะต้องรื้อแบบหล่อเสา แล้วทำการติดตั้งใหม่ เพราะเหตุใด?

2.2 หากสามารถปรับแบบ เพื่อให้น้ำหนักกระทำ ( $Q_A$ ) บนฐานราก ลดลงเหลือเพียง 40 tons, เป็นไปได้หรือไม่? ที่นายช่างบุญเอียง จะหล่อเสาและใช้งานโดยมีค่า( $e_{constructed}$ ) จริง = 0.075 m ไปเลย โดยไม่ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่าย เพื่อรื้อแบบหล่อเสา แล้วทำการติดตั้งใหม่



รูปที่ 6.4.2 รูปตัดด้านข้าง (cross-section) แสดงข้อมูลชั้นดินและฐานราก

วิธีทำ

เลือกใช้สมการของ Eccentrically Loaded Foundations

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 1/2 \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

รายการคำนวณ

$$L' = L = 2 \text{ m}$$

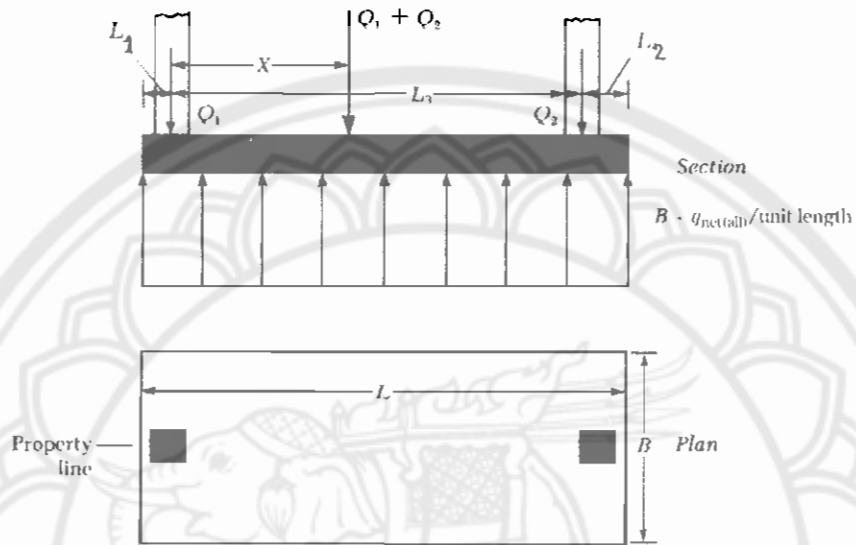
$$B' = B - 2e = 1.5 - 2(0.075) = 1.35 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 F_{qs} &= 1+(B'/L')\tan\phi \\
 &= 1+(1.35/2)(\tan 32) = 1.42 \\
 F_{qd} &= 1+2\tan\phi(1-\sin\phi)^2(Df/B) \\
 &= 1+2\tan 32(1-\sin 32)^2(1/1.5) = 1.18 \\
 F_{qi} &= F_{ci} = (1-\beta^0/90^0)^2 = 1 \\
 F_{\gamma_s} &= 1-0.4(B'/L') \\
 &= 1-0.4(1.35/2) = 0.73 \\
 F_{\gamma_d} &= 1 \\
 F_{\gamma_i} &= (1-\beta/\phi)^2 = 1 \\
 F_{cs} &= 1+(B'/L')(N_q/N_c) \\
 &= 1+(1.35/2)(23.18/35.49) = 1.44 \\
 F_{cd} &= 1+0.4(Df/B) \\
 &= 1+(0.4*1/1.5) = 1.27 \\
 \gamma &= \gamma' + (d/B)(\gamma - \gamma') \\
 &= \gamma_{sat} - \gamma_w \\
 &= 1.9 - 1 = 0.9 \text{ T/m}^3 \\
 \text{จาก } q_u &= cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 1/2\gamma B' N_\gamma F_{\gamma_s} F_{\gamma_d} F_{\gamma_i} \\
 \text{แทนค่า} &= (3*35.49*1.44*1.27*1) + (1.7*1)(23.18*1.42*1.18*1) \\
 &\quad + (1/2*0.9*1.35*30.22*0.73*1*1) \\
 &= 274.14 \text{ T/m}^2 \\
 Q_{all} &= q_u * B' * L' / FS \\
 &= 274.14 * 2 * 1.35 / 3 = 246.73 \text{ T} > 45 \text{ T}
 \end{aligned}$$

ตอบข้อ 2.1 ไม่จำเป็นที่จะติดตั้งใหม่ เพราะ  $e = 0.075\text{m}$  ได้  $Q_{all} = 246.73 \text{ T}$  ซึ่งมากกว่า  $45\text{T}$  อยู่มาก จึงใช้  $e = 0.075\text{m}$  ได้เลย

ตอบข้อ 2.2 สามารถลด  $Q_A$  เหลือ  $40\text{T}$  ได้ เพราะ  $Q_{all} = 246.73 \text{ T}$  ซึ่งมากเหลือเฟือ แต่ถ้าจะเพิ่ม  $Q_A$  จะต้องไม่ให้เกิน  $Q_{all} = 246.73 \text{ T}$  แต่ไม่จำเป็นต้องปรับแบบ

6. บริษัททำโพธิ์ Construction ได้ทำการก่อสร้างฐานรากตื้นดังรูปที่ 6.4.3 ในฐานะที่ท่านเป็นวิศวกรของบริษัทจงออกแบบฐานรากนี้



รูปที่ 6.4.3 รูปตัดด้านข้างของฐานราก

พิจารณาตัวแปรที่โจทย์กำหนด

$c$	$= 0$	$T/m^2$	$q$	$= 1.8$	$T/m^2$
$\gamma$	$= 1.8$	$T/m^3$	$N_q$	$= 22.46$	
$D_f$	$= 1$	$m$	$N_\gamma$	$= 19.13$	
$\phi$	$= 30$	องศา	$FS$	$= 3$	
$Q_1$	$= 100$	$T$	$L_1$	$= 1$	$m$
$Q_2$	$= 200$	$T$	$L_2$	$= 5$	$m$

Check ว่าสามารถเป็นฐานรากเดี่ยวได้หรือไม่

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$$

$$\text{ให้ } B = 2L_1 = 2 \times 1 = 2 \text{ m}$$

$$q_u = (1.3 \times 0 \times 37.16) + (1.8 \times 22.46) + (0.4 \times 1.8 \times 2 \times 19.13)$$

$$= 67.98 \text{ T/m}^2$$

$$Q_{all} = q_u \times B \times L / FS$$



$$= 67.98 \cdot 2^{2/3} = 90.63 \text{ T}$$

(ต้องออกแบบเป็น Combined Footings เพราะ  $Q_{all}$  น้อยกว่า  $Q_1$ )

พิจารณาค่าที่ออกแบบ

$$1st \text{ trial Assume } B = 1.65 \text{ m}$$

ผลการคำนวณ

$$q_u = qN_q + 0.45 \gamma B N_{\gamma}$$

$$q_u = (1.8 \cdot 22.46) + (0.45 \cdot 1.8 \cdot 1.65 \cdot 19.13)$$

$$= 66.00 \text{ T/m}^2$$

$$q_{all(net)} = (q_u - q) / FS$$

$$= (66 - 1.8) / 3 = 21.40 \text{ T/m}^2$$

$$A = (Q_1 + Q_2) / q_{net(all)}$$

$$= (100 + 200) / 21.40 = 14.02 \text{ m}^2$$

$$x = (Q_2 L_3) / (Q_1 + Q_2)$$

$$= (200 \cdot 5) / (100 + 200) = 3.33 \text{ m}$$

$$L = 2(L_1 + x)$$

$$= 2(1 + 3.33) = 8.67 \text{ m}$$

$$L_2 = L - L_1 - L_3$$

$$= 8.67 - 1 - 5 = 2.67 \text{ m}$$

$$B_{ob} = A / L$$

$$= 14.02 / 8.67 = 1.62 \text{ m}$$

เพราะฉะนั้นใช้  $B = 1.65 \text{ m}$

$$L = 8.67 \text{ m}$$