

บทที่ 2

ทฤษฎีและการวิเคราะห์ฐานรากตื้น

2.1 Introduction of shallow foundation

ฐานรากตื้น (Shallow Foundation)

ฐานราก หรือ โครงสร้างใต้ดิน มีหน้าที่รับน้ำหนักจากสิ่งก่อสร้างบนดิน แล้วถ่ายน้ำหนักที่กระทำต่อไปยังชั้นดินที่รองรับฐานราก หากแบ่งชนิดของฐานรากตามความลึกที่ฝังในชั้นดิน สามารถแบ่งได้ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความลึกของฐานราก เมื่อเทียบกับความกว้างของฐานราก ดังนี้

1. ฐานรากตื้น (shallow foundation) เมื่อ $\frac{Df}{B} \leq 3$
2. ฐานรากแบบเสาเข็ม (pile foundation) เมื่อ $\frac{Df}{B} \geq 3$

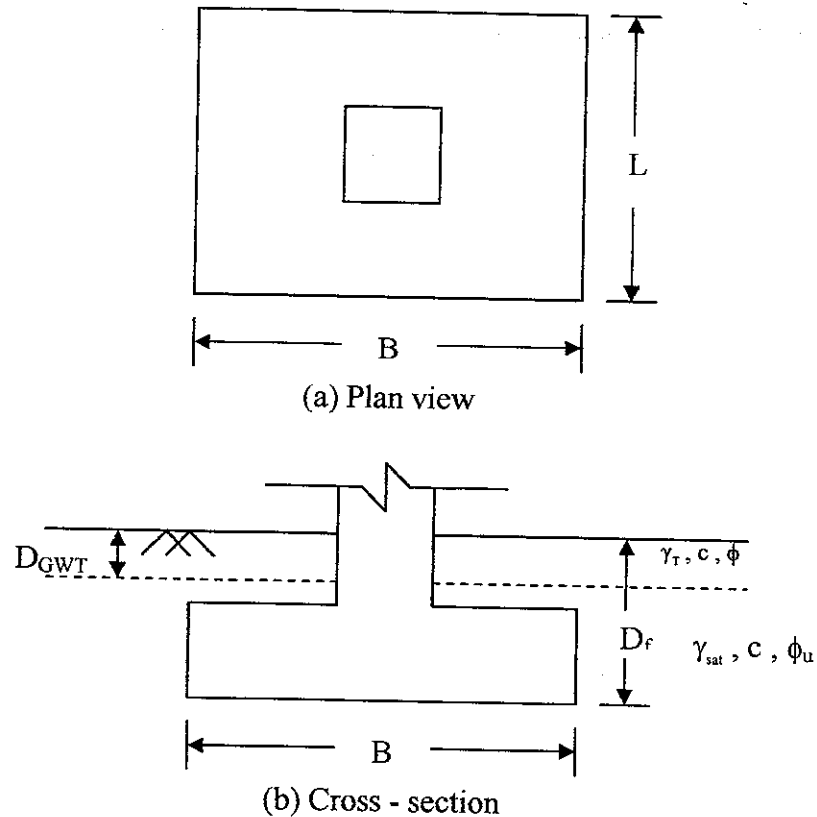
ทั้งนี้เนื้อหาของทฤษฎีจะครอบคลุมเฉพาะ ฐานรากตื้น เพียงอย่างเดียว

ฐานรากตื้น คือสิ่งก่อสร้างใต้ดินชนิดหนึ่ง ที่ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างบนดินลงสู่ชั้นดินที่รองรับอยู่ได้ฐานรากโดยตรง โดยทั่วไปฐานรากตื้นจะวางอยู่บนชั้นดินที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักกระทำได้ อนึ่งในการใช้งานฐานรากตื้น ต้องพิจารณาออกแบบให้ฐานรากตื้นทำหน้าที่อย่างน้อย 3 ประการคือ

1. รับน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายมาจากโครงสร้างได้ โดยมีสัดส่วนความปลอดภัยตามที่กำหนด
2. การเกิดการทรุดตัว ต้องอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้
3. ปริมาตรการทรุดตัวสัมพัทธ์ หรือ ความแตกต่างของการทรุดตัวระหว่างฐานรากที่อยู่ข้างเคียงกัน ต้องไม่เกินค่าที่ยอมรับได้

2.2 สัญลักษณ์ และคำนิยาม

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณประกอบด้วย



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ร่วมกับคำนิยาม ในการวิเคราะห์และคำนวณฐานรากดิน
เมื่อมองบน (a) Plan view (b) Cross - section

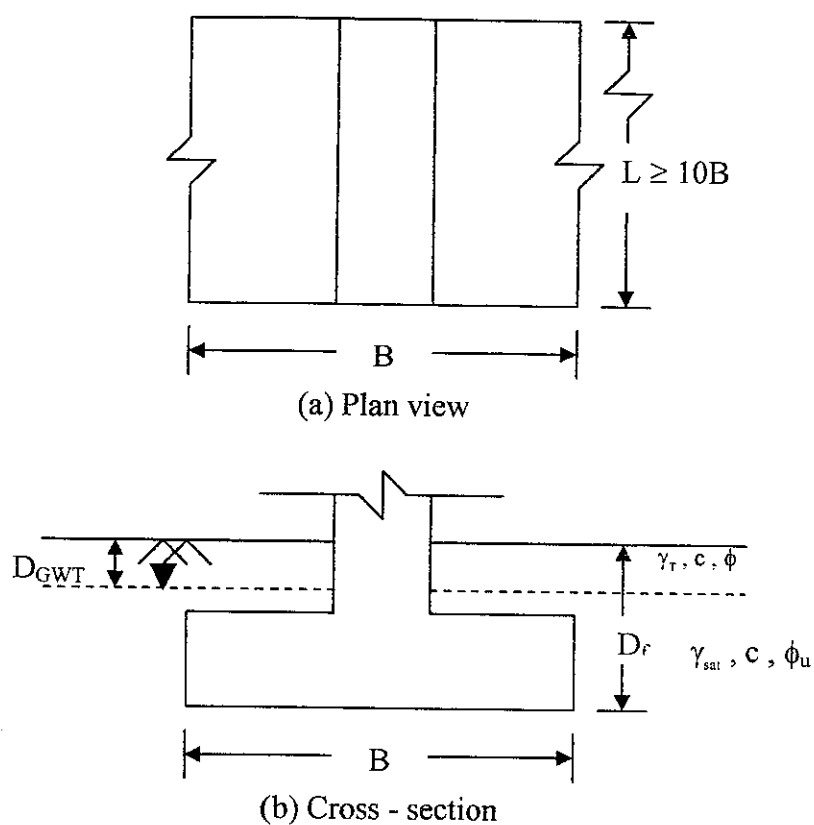
- B = ความกว้างของฐานราก (width) คือด้านที่สั้นที่สุดของฐานราก โดยปกติจะถูกแสดงเป็นด้านหน้าบนรูปตัด (L)
- L = ความยาวของฐานราก (length) คือด้านที่ยาวกว่าของฐานราก โดยปกติจะเป็นด้านที่วัดตามลึกเข้าไปในกระดาษ ซึ่งจะมองไม่เห็นบนรูปตัด (L)
- A = พื้นที่ของฐานราก (area of footing) มีค่าเท่ากับ ผลคูณระหว่างความกว้างและความยาว เป็นพื้นที่ที่ใช้รองรับแรงที่ถ่ายมาจากโครงสร้าง และตั้งฉากกับน้ำหนักกระทำ (L^2)

- D_f = ระดับความลึกของฐานราก (depth of footing) เป็นระดับความลึกที่วัดจากผิวดินถึงระดับใต้ฐานราก (L)
- D_{GWT} = ความลึกของระดับน้ำใต้ดิน (ground water table, D_{GWT}) โดยวัดจากระดับผิวดิน (L)
- c = Soil cohesion (M/L^2)
- c_u = Undrained shear strength (M/L^2)
- ϕ = Angle of internal friction (deg)
- ϕ_u = Undrained angle of internal friction (deg)
- γ_T = Unit weight คือ ค่าหน่วยน้ำหนักของดินที่อยู่เหนือระดับน้ำ (M/L^3)
- γ_{sat} = Saturated unit weight คือค่าหน่วยน้ำหนักของดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำ (M/L^3)
- γ_w = Water unit weight คือ ค่าหน่วยน้ำหนักของน้ำ (M/L^3)
- $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ = Submerged unit weight คือ ค่าหน่วยน้ำหนักที่ปราศจาก ค่าหน่วยน้ำหนักของน้ำ (M/L^3)
- F.S. = Factor of safety คือ วัสดุส่วนความปลอดภัย
- Q = น้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้าง (M)
- q = effective surcharge คือ ค่าน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ของดิน (M/L^2)
- q_u = Ultimate bearing capacity คือ ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (M/L^2)
- q_{all} = Gross allowable capacity คือ ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของดิน รองรับฐานรากโดยปลอดภัย (M/L^2)
- $$= \frac{q'u}{F.S.}$$
- q_{net} = Net allowable capacity คือ ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักโดยปลอดภัยสุทธิของดินรองรับฐานราก (M/L^2)
- $$= \frac{q'u - q}{F.S.} \geq \frac{Q}{A}$$
- e = Eccentric length คือ ระยะเยื้องศูนย์กลาง (L)

2.3 รูปร่างของฐานรากตื้น (Shape of shallow foundation)

ฐานรากตื้น แบ่งตามรูปร่างที่มองจากด้านบนได้ดังนี้

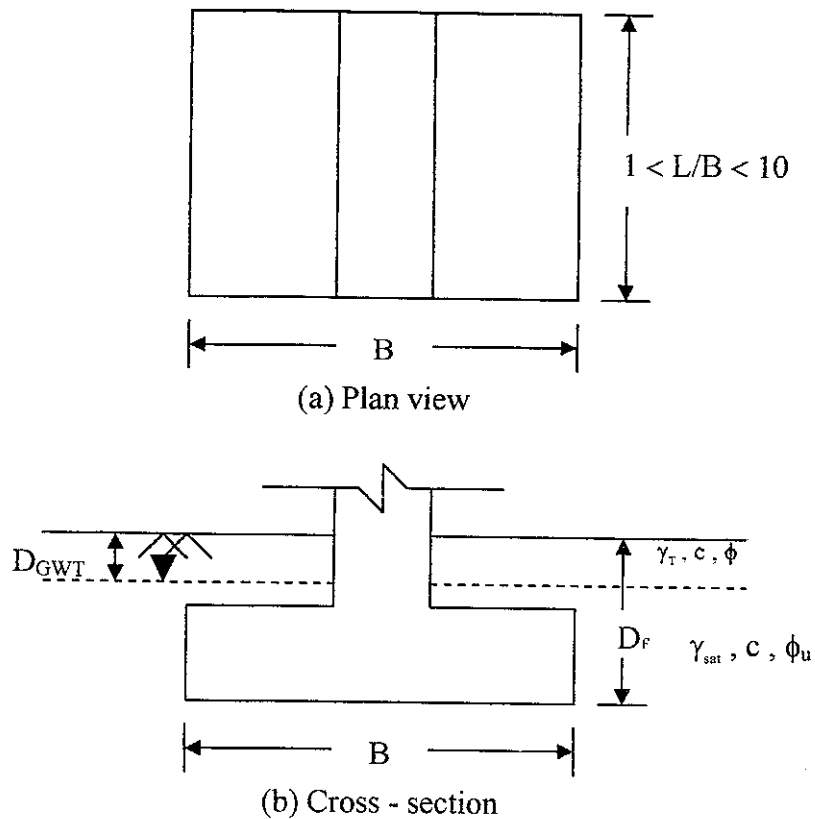
2.3.1 Strip foundation คือฐานรากตื้นที่มีรูปร่าง(shape) บน plan view เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ด้านยาว(L) ยาวกว่าด้านกว้าง(B) มาก ในการออกแบบฐานรากที่มี length to wide ratio ($L/B \geq 10$) ให้ถือว่าเป็น Strip foundation



รูปที่ 2.2 รูปร่างของ Strip foundation บน (a) Plan view (b) Cross - section

สำหรับการใช้งานจริงนั้น ตัวอย่างที่ถือว่าเป็น Strip foundation คือ ฐานรากของคานคั่นทาง ฐานรากของกำแพง ฐานรากของโครงสร้างกันดิน เป็นต้น

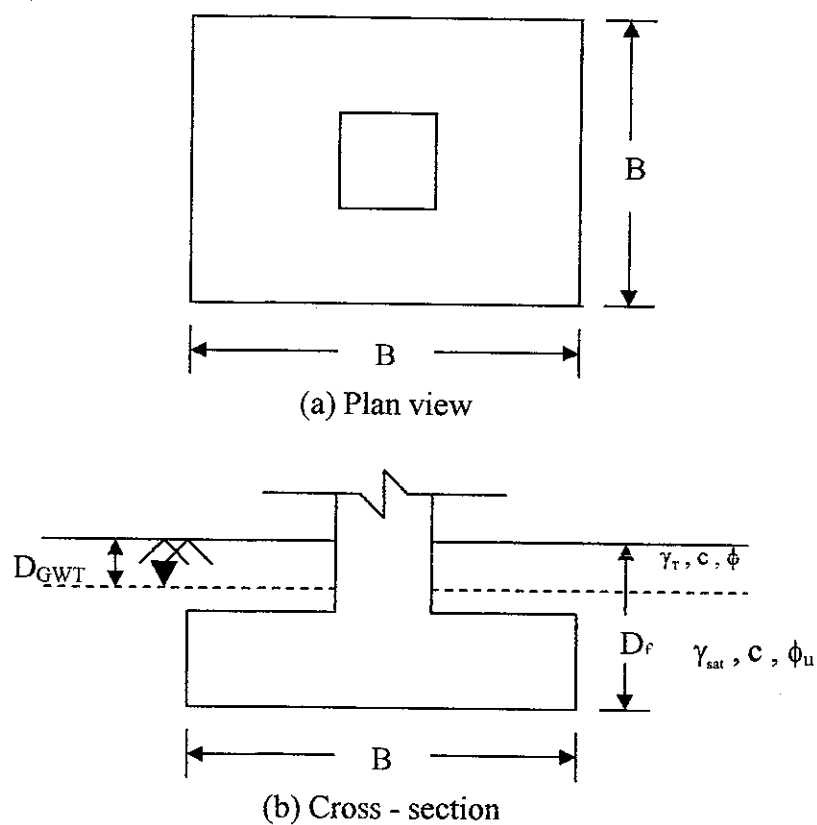
2.3.2 **Rectangular foundation** คือฐานรากค้ำที่มีรูปร่าง(shape)บน plan view เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการวิเคราะห์และออกแบบให้ถือว่าฐานรากที่มีความยาว(L) เทียบกับ ด้านกว้าง(B) ได้ $1 < L/B < 10$ เป็น Rectangular foundation



รูปที่ 2.3 รูปร่างของ Rectangular foundation บน (a) Plan view (b) Cross - section

ตัวอย่างในงานจริงที่มักพบเห็นคือ ฐานรากของบ้านพักอาศัย ฐานรากของสะพาน ฐานรากของถังเก็บสำรองน้ำ เป็นต้น

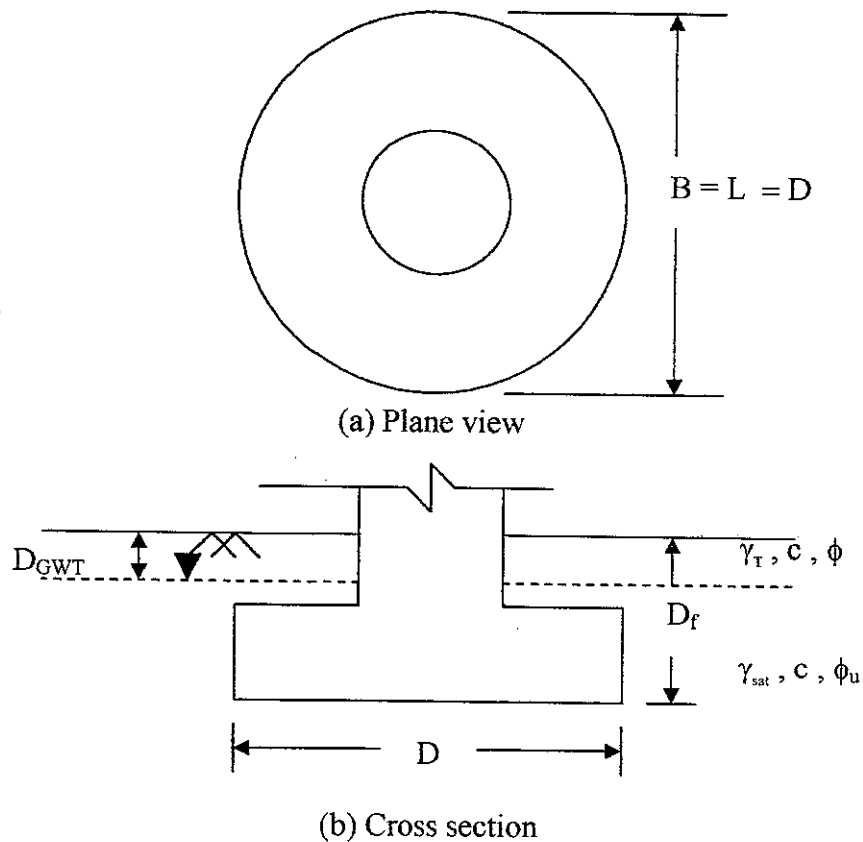
2.3.3 Square foundation คือ ฐานรากคี่นที่มีด้านกว้าง(B) และด้านยาว(L) เท่ากัน นั่นคือ $L/B = 1$ ซึ่งรูปร่าง (shape) ที่เห็นบน plan view เป็นรูป สี่เหลี่ยมจตุรัส



รูปที่ 2.4 รูปร่างของ Square foundation บน (a) Plan view (b) Cross - section

ตัวอย่างในงานจริงที่มักพบเห็นคือ ฐานรากของบ้านพักอาศัย ฐานรากของสะพาน ฐานรากของถังเก็บสำรองน้ำ เป็นต้น

2.3.4 Circular foundation คือ ฐานรากคircular ที่มีรูปร่าง(shape) บน plan view เป็นแบบวงกลม ซึ่งในการออกแบบให้ถือเสมือนว่าเส้นผ่าศูนย์กลาง(D) ของ Circular foundation = $B = L$

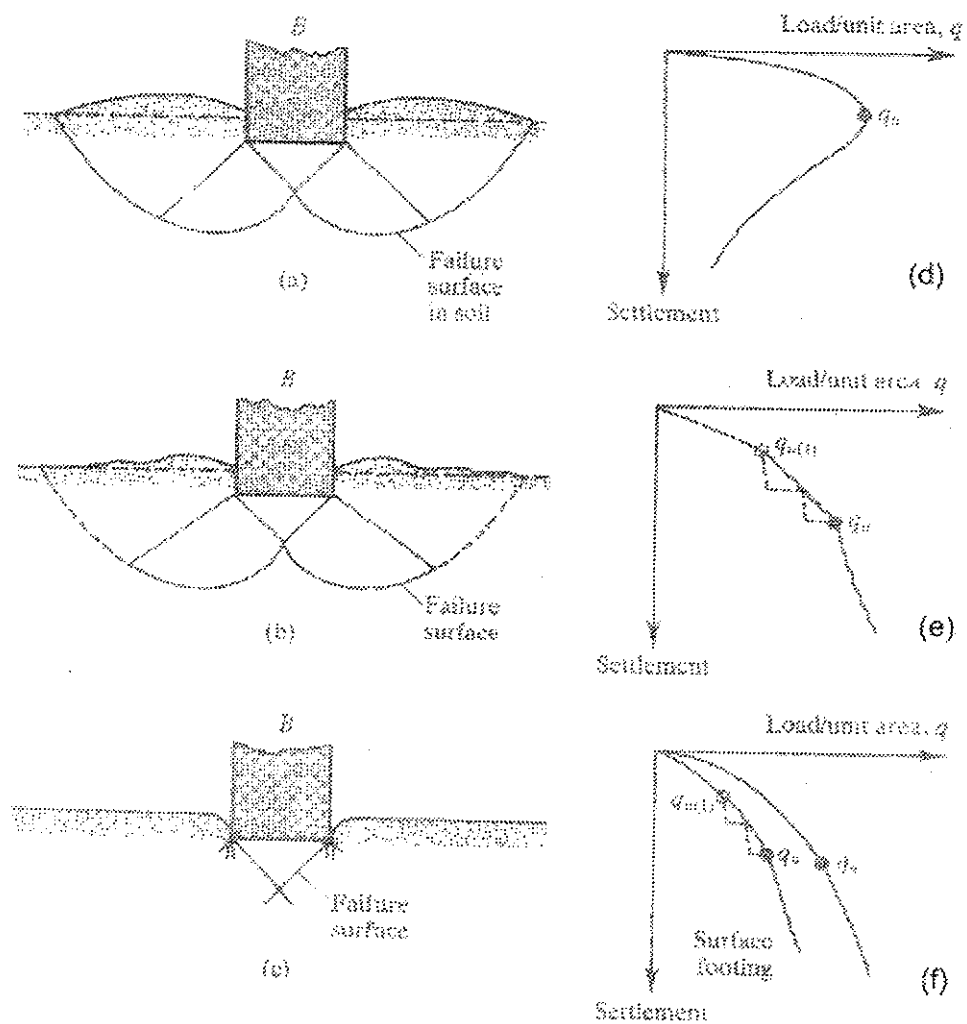


รูปที่ 2.5 รูปร่างของ Circular foundation บน (a) Plan view (b) Cross - section

ตัวอย่างในงานจริงที่มักพบเห็นคือ ฐานรากของถังเก็บสำรองน้ำมัน ฐานรากของถังเก็บสำรองพืชผลที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

2.4 Mode of Bearing Capacity Failure in Soil

Mode of Bearing Capacity Failure in Soil คือ รูปแบบการพังทลายของชั้นดินที่รองรับฐานรากตื้น ซึ่งรับน้ำหนักกระทำที่ถ่ายมาจากโครงสร้างบนดิน ทั้งนี้ รูปแบบการพังทลายที่อาจเกิดภายใต้การใช้งานดังกล่าว แบ่งออกได้ 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับความอัดแน่นของดินที่รองรับฐานราก ดังนี้



รูปที่ 2.6 รูปแบบการพังทลายของดินรองรับน้ำหนักกระทำถ่ายเทจากฐานรากตื้น

(shallow foundation) 3 แบบคือ (a) General Shear Failure, (B) Local Shear Failure, และ (c) Punching Shear Failure

2.4.1 General shear failure

เป็นการพังทลายของชั้นดิน ซึ่งดินรองรับฐานรากมีความหนาแน่นมาก ทำให้ปริมาณการทรุดตัว หรือการยุบตัวในแนวตั้ง (vertical deformation) ที่เกิดขึ้นในชั้นดินมีค่าน้อย ส่งผลให้ความสัมพันธ์ของการทรุดตัว ที่เพิ่มขึ้นตามหน่วยน้ำหนักกระทำ(q) ที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6 (d) กล่าวคือ

ขณะที่เริ่มใส่และเพิ่มหน่วยน้ำหนักกระทำ(q) ที่ถ่ายลงฐานรากชั้น การทรุดตัวจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์ของ load – settlement curve (รูปที่ 2.6(d)) ค่อนข้างจะราบในช่วงแรก ซึ่งแสดงถึงการทรุดตัวที่เกิดจากหน่วยน้ำหนักกระทำมีค่าน้อย

เมื่อหน่วยน้ำหนักกระทำ(q) เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันสูงสุดที่ดินรับได้(ultimate bearing capacity, q_u) ในรูปที่ 2.6(d) จะเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด(sudden failure) ในดินที่รับฐานราก

ภายใต้การวิบัติดังกล่าวผิวการเคลื่อนพัง(failure surface)จะขยายจากชั้นดินรองรับได้ฐานรากไปยังผิวดิน และดินให้เกิดการปูดตัวของผิวดินที่ด้านข้างของฐานราก(รูปที่ 2.6(a))

ซึ่งหากดินมีคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น ถือว่าเหมาะสำหรับการใช้ฐานรากชั้น

2.4.2 Local shear failure

เป็นการพังทลายของชั้นดิน ซึ่งดินรองรับฐานรากมีความหนาแน่นปานกลาง ส่งผลให้ความสัมพันธ์ของการทรุดตัว ที่เพิ่มขึ้นตามหน่วยน้ำหนักกระทำ(q) ที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6(e) กล่าวคือ

ขณะที่ใส่หน่วยน้ำหนักกระทำ(q) ที่ถ่ายลงฐานรากชั้นไปเรื่อยๆ การทรุดตัวก็จะเพิ่มมากขึ้น โดยความสัมพันธ์ของ load – settlement curve จะมีความชันมากกว่า การวิบัติแบบ General shear failure ซึ่งหมายถึงการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักกระทำมีค่ามากกว่า

เมื่อเพิ่มหน่วยน้ำหนักกระทำจนผ่านจุดวิกฤติขั้นต้นในการรับน้ำหนักบรรทุกของดินคือ ที่ค่า $q_{u(1)}$ หรือ first failure of the bearing capacity (รูปที่ 2.6(e)) ค่าการทรุดตัวจากหน่วยน้ำหนักกระทำจะเกิดในอัตราสูงขึ้น จนเกิดการวิบัติในดิน ที่ค่า ultimate bearing capacity q_u

ลักษณะการวิบัติสามารถแสดงได้ด้วย ส่วนที่เป็นเส้นทึบ ในรูปที่ 2.6(b) กล่าวคือ แนวการเคลื่อนพัง (failure surface) จะลามออกมาจากใต้ฐานราก แล้วขยายไปที่ผิวดิน และดินให้เกิดการปูดขึ้นของผิวดิน แต่ปริมาณของดินที่ถูกดันปูดขึ้นมาจะน้อยกว่าที่เกิดในกรณีที่ 1 เพราะฉะนั้นดินใต้ฐานรากเกิดการทรุดตัวไปก่อนมากแล้ว ทำให้ปริมาตรของดินสามารถขยายลงไปได้ด้านล่างได้อีก

2.4.3 Punching shear failure

เป็นการพังทลายของชั้นดิน ซึ่งดินรองรับฐานรากคั้นมีความหนาแน่นปานกลาง ส่งผลให้ความสัมพันธ์ของการทรุดตัว ที่เพิ่มขึ้นตามหน่วยน้ำหนักกระทำ(q) ที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6(f) กล่าวคือ

ลักษณะของ load – settlement curve จะชันกว่า 2 กรณีแรก ซึ่งแสดงถึงการทรุดตัวที่เกิดมากกว่า ภายใต้หน่วยน้ำหนักกระทำ(q) เท่ากัน

เมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่ามากกว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของดินที่ค่า q_u (รูปที่ 2.6(f)) load – settlement curve จะยิ่งชันมากขึ้น

ในกรณีการวิบัติดังกล่าว ผิวการเคลื่อนพัง(failure surface) จะไม่มีการปูดของดินขึ้นมาเลย เพราะผิวการวิบัติ ในดิน จะไม่ขยายไปยังผิวดิน แต่จะมีรูปร่างเหมือนลิ้มกดลงใต้ฐานราก เพราะชั้นดินใต้ฐานรากเกิดการทรุดตัวมาก

ซึ่งหากดินมีคุณสมบัติแบบนี้ควรที่จะเลือกใช้ฐานรากแบบเสาเข็มแทนฐานราก
คั้น

2.5 การพิจารณาแยก Mode of Bearing Capacity Failure

วิธีที่เสนอ โดย Vesic (1973)

โดยอาศัยผลจากการทดลอง มาเสนอให้พิจารณาหารูปแบบการวิบัติ จากการรับน้ำหนักบรรทุก (mode of bearing failure) บนชั้นดินทราย โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง relative density (D_r) ของทราย กับ D_f/B ดังแสดงในรูปด้านล่าง

D_r = ความหนาแน่นสัมพันธ์ของทราย

D_r = ระดับความลึกของฐานรากคั้น โดยวัดจากผิวดินถึงพื้นฐานราก

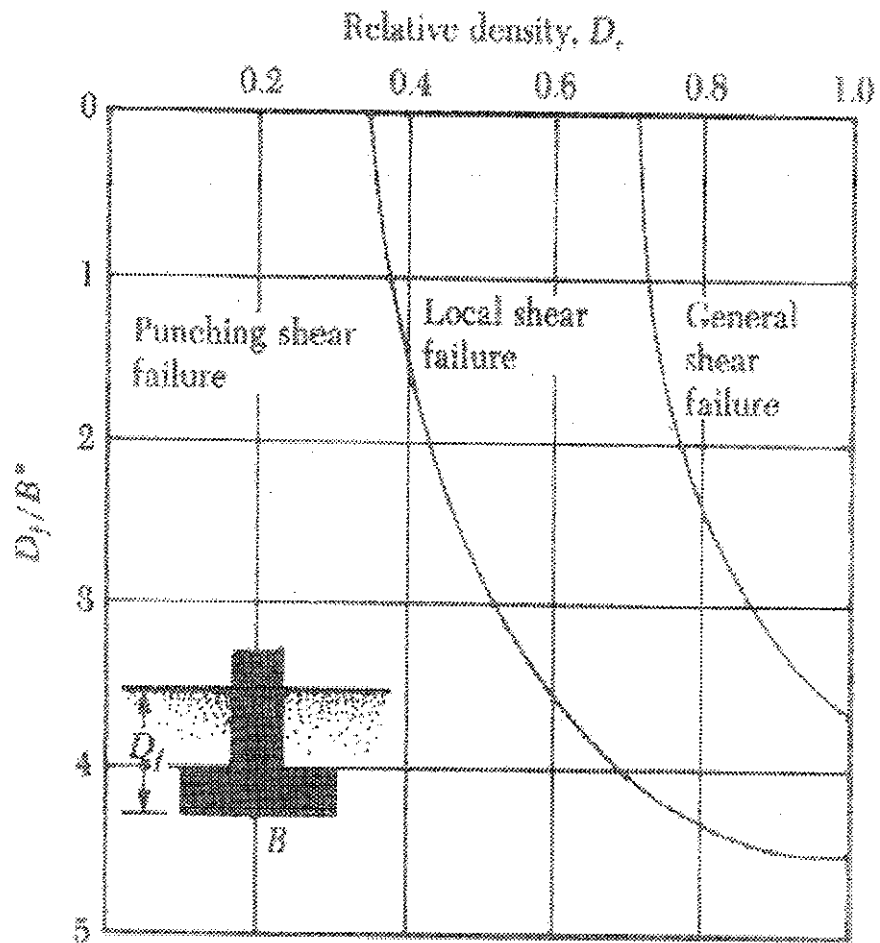
$$B^* = \frac{2BL}{B+L}$$

B = ความกว้างของฐานราก

L = ความยาวของฐานราก

ถ้าสำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส และฐานรากวงกลม, $B=L$ ดังนั้น $B^*=B$

ซึ่งในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะ General shear failure



รูปที่ 2.7 Mode of Bearing Capacity Failure in Sand

2.6 Terzaghi's Bearing Capacity Theory

ในปีค.ศ.1943 ได้เสนอทฤษฎีสำหรับใช้หาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย(ultimate bearing capacity, q_u) ของชั้นดิน ที่รองรับฐานรากตื้นซึ่งมีพื้นผิวด้านใต้ขรุขระ นั่นคือใช้ได้สำหรับฐานรากตื้นที่ถูกวางระดับความลึกของฐานรากจากผิวดิน ใวน้อยกว่าหรือเท่ากับความกว้างของฐานราก(B) อย่างไรก็ตาม การสำรวจภายหลังพบว่าฐานรากตื้น อาจจจะรวมถึงฐานรากที่ถูกจัดวาง $D_f \leq 3-4B$

สมมติฐานของทฤษฎีกล่าวไว้ว่า ระดับความลึกของน้ำใต้ดิน(Ground water table, D_{GWT}) อยู่ใต้ระดับความลึกของฐานราก(D_f) ไปมาก จนทำให้ความลึกของน้ำใต้ดินไม่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (q_u)

Terzaghi เสนอว่า หากฐานรากตื้นมีรูปร่างแบบ continuous หรือ strip foundation นั่นคือ wide to length ratio (B/L) ของฐานรากมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ผิวการวิบัติ (failure surface) ที่เกิดขึ้นในชั้นดินรองรับฐานรากตื้น สามารถสมมติให้มีรูปร่างแบบ general shear failure mode และยังสามารถนำมาใช้ในการพัฒนา bearing capacity theory อีกดังนี้

1. ให้ถือเสมือนว่าไม่มีเนื้อดินอยู่ที่ระดับความลึกจากผิวดิน (เส้น "JI") ถึงระดับความลึกของฐานราก(D_f) และให้ทดแทนผลกระทบที่เกิดจากน้ำหนักของดินดังกล่าวด้วย effective equivalent surcharge คือ

$$q = \gamma D_f \text{ (M/L}^2\text{)}$$

$$\gamma = \text{effective unit weigh of soil from surface to } D_f \text{ (M/L}^3\text{)}$$

D_f = depth of bottom of shallow foundation measure from ground surface (L)

2. ผลจากสมมติฐาน จากข้อ 1 ให้ละทิ้งผิวการวิบัติ(failure surface)ที่เกิดขึ้นในดินที่อยู่สูงกว่าระดับพื้นของฐานราก(D_f) นั่นคือ ไม่รวมค่า shear resistance ของดินตามแนวการวิบัติ GI กับ HJ เข้าช่วยรับแรงกระทำ

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

3.1 Triangular zone "ACD" ซึ่งติดอยู่กับใต้ฐานราก

3.2 Radial shear zone "ADF" และ "CDE" ซึ่งมี DE และ DF เป็นส่วนโค้งที่แสดงได้ตามความสัมพันธ์ของสมการ logarithmic spiral

3.3 Rankine passive zone "AFH และ "CEG"

2.7 General Bearing Capacity Equation

Meyerhof (1963) ได้เสนอสมการในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย(ultimate bearing capacity, q_u) ของดินรองรับฐานราก ซึ่งสมมติฐานที่ใช้ในการพัฒนาทฤษฎีนี้ โดยส่วนใหญ่จะเป็นเช่นเดียวกับของ Terzaghi เพราะผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในสนาม แสดงว่า failure surface ที่ Terzaghi เสนอมีความถูกต้อง ทั้งนี้ สมมติฐานที่ต่างคือ

1. ค่ามุม α ในรูปที่ มีค่า $45 + \phi/2$ ขณะที่ของ Terzaghi, $\alpha = \phi$
2. รวม Shearing resistance ที่เกิดบนผิวการวิบัติ (surface failure) เหนือระดับ D_f ถึงผิวดินเข้ามาในการคำนวณ ซึ่งหากย้อนกลับไปดูในส่วน "C. Terzaghi Bearing Capacity"

จะพบว่า เป็นส่วนที่ถูกสมมติฐานตัดออกไปใน Terzaghi's Bearing Capacity Theory

3. ได้ปรับสมการหาการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ultimate bearing capacity, q_u) ของ Terzaghi ให้สามารถรวมผลกระทบของ รูปร่าง(shape)ของฐานรากบน plan view ระดับความลึกของฐานราก (D_f) และแนวเอียงของน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างผ่านการใส่ factor เพิ่มเข้าในสมการของ Terzaghi 3 ชุดคือ shape factor, depth factor, และ load inclination factor และทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$N_c, N_q, N_\gamma =$ ค่า bearing capacity factor เป็นค่าที่แปรเปลี่ยนตามค่า angle of internal friction ของดิน ดังแสดงในตาราง 2.1 และสมการที่ 2.2 -2.4 ซึ่งเป็นค่าเสนอของ โดย Meyerhof

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s} =$ ค่า shape factor หาค่าได้ในตารางที่ 2.2

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d} =$ ค่า depth factor หาค่าได้ในตารางที่ 2.2

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i} =$ ค่า inclination factor หาค่าได้ในตารางที่ 2.2

2.8 Bearing Capacity Factor for General Bearing Capacity Equation

จากสมมุติฐานที่ว่า $\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$ ทำให้ Bearing capacity factor ที่ Terzaghi เคยเสนอไว้สำหรับ $\alpha = \phi$ ต้องปรับเปลี่ยน และจากสมการหา N_c, N_q, N_γ ใหม่ สำหรับ $\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$ จะได้ดังนี้

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (2.2)$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.3)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi) \quad (2.4)$$

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า Bearing capacity factor

ϕ	N_c	N_q	N_γ	N_q/N_c	$\tan \phi$	ϕ	N_c	N_q	N_γ	N_q/N_c	$\tan \phi$
0	5.14	1.00	0.00	0.20	0.00	26	22.25	11.85	12.54	0.53	0.49
1	5.38	1.09	0.07	0.20	0.02	27	23.94	13.20	14.47	0.55	0.51
2	5.63	1.20	0.15	0.21	0.03	28	25.80	14.72	16.72	0.57	0.53
3	5.90	1.31	0.24	0.22	0.05	29	27.86	16.44	19.34	0.59	0.55
4	6.19	1.43	0.34	0.23	0.07	30	30.14	18.40	22.40	0.61	0.58
5	6.49	1.57	0.45	0.24	0.09	31	32.67	20.63	25.99	0.63	0.60
6	6.81	1.72	0.57	0.25	0.11	32	35.49	23.18	30.22	0.65	0.62
7	7.16	1.88	0.71	0.26	0.12	33	38.64	26.09	35.19	0.68	0.65
8	7.53	2.06	0.86	0.27	0.14	34	42.16	29.44	41.06	0.70	0.67
9	7.92	2.25	1.03	0.28	0.16	35	46.12	33.30	48.03	0.72	0.70
10	8.35	2.47	1.22	0.30	0.18	36	50.59	37.75	56.31	0.75	0.73
11	8.80	2.71	1.44	0.31	0.19	37	55.63	42.92	66.19	0.77	0.75
12	9.28	2.97	1.69	0.32	0.21	38	61.35	48.93	78.03	0.80	0.78
13	9.81	3.26	1.97	0.33	0.23	39	67.87	55.96	92.25	0.82	0.81
14	10.37	3.59	2.29	0.35	0.25	40	75.31	64.20	109.41	0.85	0.84
15	10.98	3.94	2.65	0.36	0.27	41	83.86	73.90	130.22	0.88	0.87
16	11.63	4.34	3.06	0.37	0.29	42	93.71	85.38	155.55	0.91	0.90
17	12.34	4.77	3.53	0.39	0.31	43	105.11	99.02	186.54	0.94	0.93
18	13.10	5.26	4.07	0.40	0.32	44	118.37	115.31	224.64	0.97	0.97
19	13.93	5.80	4.68	0.42	0.34	45	133.88	134.88	271.76	1.01	1.00
20	14.83	6.40	5.39	0.43	0.36	46	152.10	158.51	330.35	1.04	1.04
21	15.82	7.07	6.20	0.45	0.38	47	173.64	187.21	403.67	1.08	1.07
22	16.88	7.82	7.13	0.46	0.40	48	199.26	222.31	496.01	1.12	1.11
23	18.05	8.66	8.20	0.48	0.42	49	229.93	265.51	613.16	1.15	1.15
24	19.32	9.60	9.44	0.50	0.45	50	266.89	319.07	762.89	1.20	1.19
25	20.72	10.66	10.88	0.51	0.47						

* After Vesic (1973)

2.9 Shape, Depth, and Inclination factor

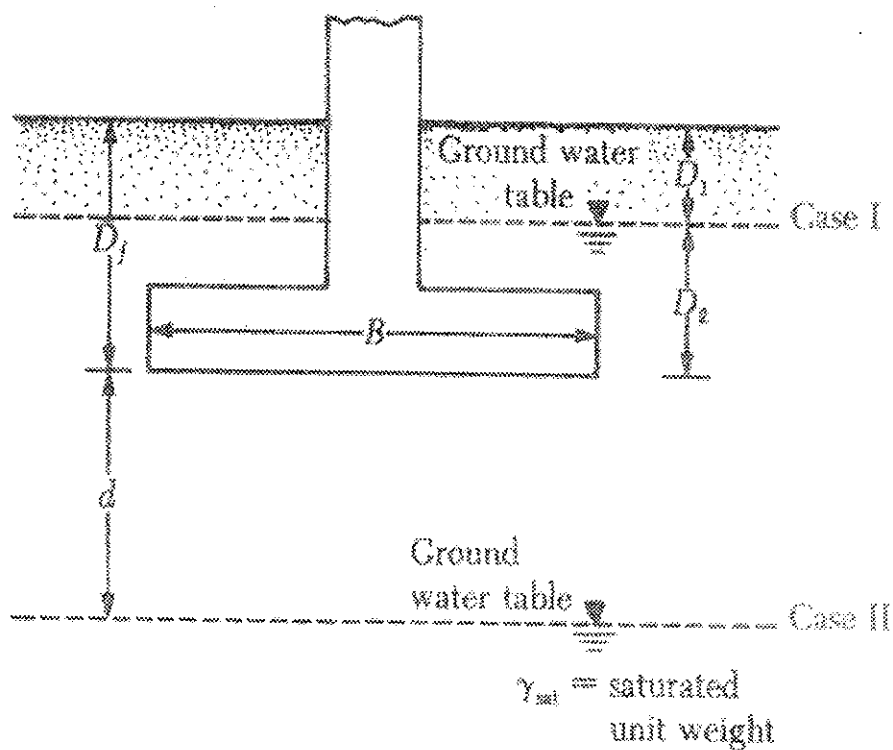
Das (1995) แนะนำให้ใช้ค่า Shape, Depth, and Inclination factor ซึ่งถูกผนวกเข้ามาใช้เพิ่มในสมการประมาณหาค่า q_u โดย General equation ดังเสนอไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า Shape, Depth, and Inclination factor

Factor	Relationship	Source
Shape ^a	$F_s = 1 + \frac{BN_c}{L N_c}$	De Beer (1970) Hansen (1970)
	$F_s = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi$	
	$F_s = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$	
	where L = length of the foundation ($L > B$)	
Depth ^b	Condition (a): $D_f/B \leq 1$	Hansen (1970)
	$F_d = 1 + 0.4 \frac{D_f}{B}$	
	$F_d = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B}$	
	$F_d = 1$	
	Condition (b): $D_f/B > 1$	
	$F_d = 1 + (0.4) \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right)$	
	$F_d = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right)$	
$F_d = 1$		
Inclination	$F_i = F_s = \left(1 - \frac{\beta^2}{90^\circ} \right)^2$	Meyerhof (1983); Hanna and Meyerhof (1981)
	$F_i = \left(1 - \frac{\beta}{\phi} \right)^2$	
	where β = inclination of the load on the foundation with respect to the vertical	
^a These shape factors are empirical relations based on extensive laboratory tests.		
^b The factor $\tan^{-1}(D_f/B)$ is in radians.		

2.10 Modification of General Bearing Capacity for Ground Water Table

ทำนองเดียวกันกับการปรับ Terzaghi's Bearing Capacity Equation จากผลกระทบที่ระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) สมการประมาณหา q_u โดย General Bearing Capacity Equation ต้องถูกปรับแก้ค่า q และ γ ให้สอดคล้องกับผลกระทบของระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) ในทำนองเดียวกันคือ



รูปที่ 2.9 กรณีที่เป็นไปได้ สำหรับการปรับ (Modification) การใช้สมการกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดิน (q_u) เนื่องจากผลกระทบของระดับน้ำใต้ดิน

จากการนำ Terzaghi's Bearing Capacity Theory ไปใช้ จะต้องพิจารณาสภาพการ
ใช้งานจริงในสนาม ตลอดช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างฐานราก ว่าเป็นจริงหรือไม่ ที่ระดับน้ำ
ใต้ดิน (Ground Water Table) จะเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า $D_{GWT} \geq D_f + B$ หากไม่ใช่ ในการ
ออกแบบฐานรากจะต้องวิเคราะห์หาค่า q_u โดยคำนึงถึงผลกระทบของระดับน้ำใต้ดิน (Ground
Water Table) ต่อ q_u ด้วยการใช้ Modification of Terzaghi's Bearing Capacity for Ground Water
Table ในการหาค่า q_u

ในการปรับ (Modification) ทฤษฎีของ general bearing capacity เนื่องจาก
ผลกระทบของ Ground Water Table มีลักษณะคล้ายกับของ Terzaghi ซึ่งสามารถแยกออกเป็น 3
กรณี ขึ้นอยู่กับความลึกของระดับน้ำ (D_{GWT}) เทียบกับความลึก (D_f) และความกว้าง (B) ของฐานราก
คือ

$$D_{GWT} < D_f \quad (\text{Case I รูปที่ 2.9})$$

$$D_f \leq D_{GWT} < D_f + B \quad (\text{Case II รูปที่ 2.9})$$

$$D_f + B \leq D_{GWT} \quad (\text{Case III รูปที่ 2.9})$$

2.10.1 กรณีระดับน้ำใต้ดินสูงกว่าระดับความลึกของฐานราก ($D_{GWT} < D_f$)

เมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่เหนือระดับความลึกที่วางฐานราก (D_f) ดัง Case I รูปที่ 2.9
จะส่งผลให้

1. Effective surcharge ที่เกิดจากดินส่วนที่อยู่เหนือฐานราก มีค่าลดลง นั่น
คือ ค่า Effective surcharge หรือค่า q ในสนามของ general bearing capacity จะเป็น

$$q = \gamma_T D_{GWT} + (\gamma_{SAT} - \gamma_w)(D_f - D_{GWT}) \quad (2.5)$$

2. ค่า γ ในพจน์ของ $\frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$ ของสมการ general bearing capacity
เปลี่ยนเป็น $(\gamma_{SAT} - \gamma_w)$ ซึ่งก็คือ γ' หรือ submerged unit weight โดยที่

$$\gamma_{SAT} = \text{Saturated unit weight}$$

$$\gamma_w = \text{Water unit weight}$$

2.10.2 กรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับฐานรากไม่เกินความกว้างของฐานราก
($D_f \leq D_{GWT} < D_f + B$)

เมื่อระดับน้ำใต้ดินอยู่ระหว่าง D_f ถึง $D_f + B$ ดัง Case II ในรูปที่ 2.9 ผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินต่อการใช้ general bearing capacity มีดังนี้

1. ค่า q หรือ effective surcharge ในสมการของ general bearing capacity ไม่ถูกผลกระทบ ดังนั้นไม่ต้องปรับค่า q ซึ่ง $= \gamma_T D_{GWT}$

2. ค่า γ ในพจน์ $\frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$ ของสมการ general bearing capacity เปลี่ยนเป็นค่า $\bar{\gamma}$ หรือค่า unit weight ที่ได้จากการเฉลี่ยผลกระทบของ ground water table แบบเส้นตรง (linear averaging) ระหว่าง $D_{GWT} = D_f$ และ $D_{GWT} = D_f + B$ นั่นคือ

$$\bar{\gamma} = \gamma' + \frac{(D_{GWT} - D_f)}{B} (\gamma_T - \gamma') \quad (2.6)$$

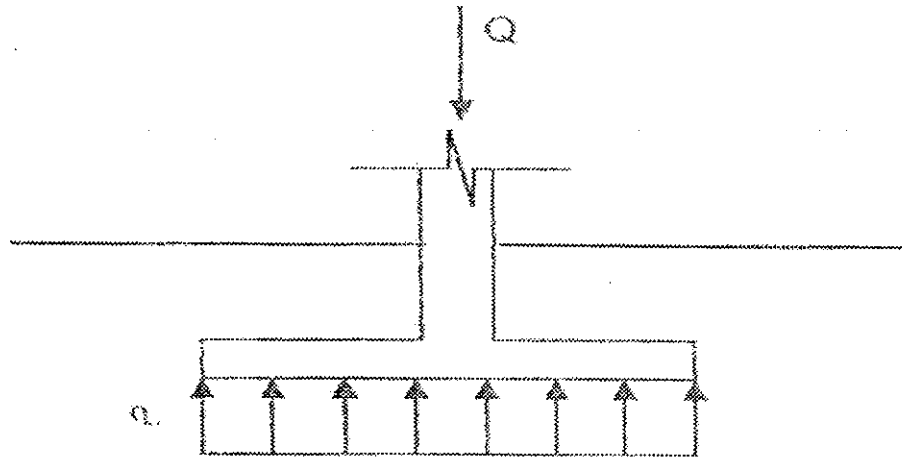
$$\text{เมื่อ } \gamma' = (\gamma_{SAT} - \gamma_w)$$

2.10.3 กรณีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับฐานรากเกินความกว้างของฐานราก
($D_f + B \leq D_{GWT}$)

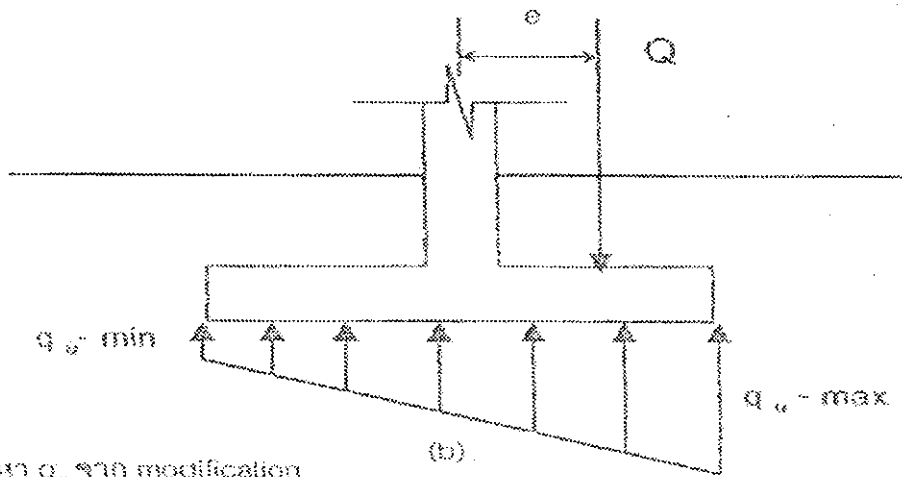
เมื่อระดับน้ำใต้ดิน (D_{GWT}) อยู่ที่ระดับความลึกมากกว่า $D_f + B$ ดัง Case III ในรูปที่ 2.9 ระดับน้ำจะไม่มีผลกระทบต่อการใช้ general bearing capacity ดังนั้น

$$1. \quad q = \gamma_T D_f$$

$$2. \quad \gamma = \gamma_T$$



q_u มาได้จาก Terzaghi's (a)
หรือ general bearing capacity theory



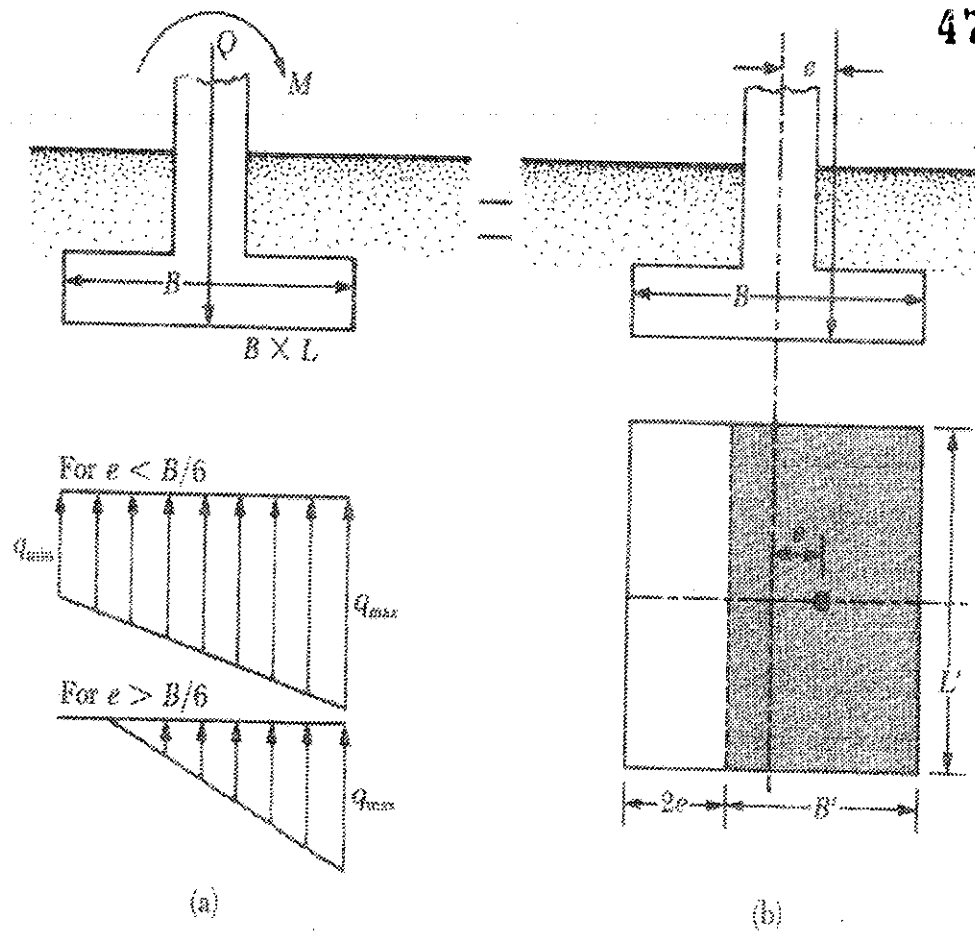
ต้องหา q_u จาก modification
of general bearing capacity
theory for **eccentric loading**

รูปที่ 2.10 ฐานรากดินแบบที่รับแรงซึ่ง (a) แนวแรงผ่านจุดศูนย์กลางของฐานราก และไม่มีกรเยื้องศูนย์กลาง (b) แนวแรงผ่านไม่จุดศูนย์กลางของฐานราก

๗
TA
๗๗๕
๖๖๓๗
๒๕๔๕



สำนักหอสมุด
- 2 S.A. 2546
4740038



รูปที่ 2.11 แสดงการกระจายของแรง ที่เกิดจากแรงเยื้องศูนย์

2.11 Modification of General Bearing Capacity for Eccentric Loading

การใช้ฐานรากค้ำรับน้ำหนักบรรทุกเยื้องศูนย์กลาง (eccentric loading) ทำให้เกิดโมเมนต์รอบแกนกลางของฐานรากค้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งสภาพจริง อาจจะมีโมเมนต์ค้ำเกิดขึ้นหนึ่งแกน หรือ สองแกนก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงกระทำเยื้องไปจากศูนย์กลางของฐานราก หนึ่งหรือสองแกนทั้งนี้ eccentric loading ส่งผลต่อการรับแรงจริงของฐานรากค้ำ 2 ประการคือ

1. การกระจายของแรงกระทำที่ฐานรากไม่สม่ำเสมอ (non-uniform pressure distribution)
2. ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยภายใต้การรับแรงเยื้องศูนย์กลาง (q_u) ลดลงจากความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยภายใต้การรับแรงไม่เยื้องศูนย์กลาง (q_u)

2.11.1 การกระจายของแรงกระทำที่ฐานรากไม่สม่ำเสมอ

เมื่อฐานรากรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง การกระจายแรงกระทำ (pressure distribution) ที่ฐานรากถ่ายเทลงดินจะไม่สม่ำเสมอ (non uniform) เพราะ โมเมนต์ที่เกิดขึ้น กดฐานรากด้านที่มีแรงกระทำเองศูนย์กลาง (e) ทำให้ส่วนของฐานรากด้านนี้ต้องรับน้ำหนักมากกว่าค่าเฉลี่ย (i.e. Q/A) และยกฐานรากด้านที่ไม่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลางทำให้น้ำหนักกระทำที่ลดลงจริงน้อยกว่าค่าเฉลี่ย Q/A

การกระจายแรงกระทำที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านดังกล่าวหาได้ดังนี้

$$q_{\max} = \frac{Q}{BL} + \frac{6M}{B^2L} \quad \text{ด้านที่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.11 (2.7)}$$

$$q_{\min} = \frac{Q}{BL} - \frac{6M}{B^2L} \quad \text{ด้านที่ไม่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.11 (2.8)}$$

เมื่อ

$$q_{\max} = \text{แรงกระทำที่ฐานราก ของด้านที่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง (M/L}^2\text{)}$$

$$q_{\min} = \text{แรงกระทำที่ฐานราก ของด้านที่ไม่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง (M/L}^2\text{)}$$

$$Q = \text{น้ำหนักจากโครงสร้าง (M)}$$

$$M = \text{โมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนฐานราก} = eQ \quad \text{ดูรูปที่ 2.10 (ML)}$$

$$e = \text{ระยะเยื้องศูนย์กลาง (L)}$$

$$B = \text{ความกว้างของฐานราก (L)}$$

$$L = \text{ความยาวของฐานราก (L)}$$

นั่นคือ

$$q_{\max} = \frac{Q}{ML} \left[1 + \frac{6e}{B} \right] \text{ ด้านที่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.11 (2.9)}$$

$$q_{\min} = \frac{Q}{ML} \left[1 - \frac{6e}{B} \right] \text{ ด้านที่ไม่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.11 (2.10)}$$

จากสมการที่

ที่กล่าวมา การเยื้องศูนย์กลางจะเกิดขึ้นอยู่กับค่า e จะแยกเป็นกรณี ดังนี้

$e = B/6$ จะทำให้ การรับแรงกระทำที่ฐานรากด้านที่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง จะมีค่าเป็นศูนย์

$e > B/6$ จะทำให้ การรับแรงกระทำที่ฐานราก ด้านที่มีแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง จะมีค่าเป็นลบ นั่นหมายถึง จะมีพื้นที่ของฐานรากที่ไม่ได้ใช้ในการรับแรง

2.11.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง

Meyerhof (1953) ได้เสนอให้วิธี effective area สำหรับหาค่า q'_u หรือความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ultimate bearing capacity) ของฐานรากตื้น (shallow foundation) ภายใต้การรับแรงแบบเยื้องศูนย์กลาง หรือเมื่อแนวแรงศูนย์กลางแรงกระทำไม่ผ่านจุดศูนย์กลางของฐานรากตื้น (center of foundation) บน (plan view)

การหาค่า q'_u โดยวิธี effective area เป็นการรวมผลกระทบจากระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงกระทำ เข้าไปในการใช้ general bearing capacity equation ด้วยการปรับลด พื้นที่ (A) บน plan view ของฐานราก (area of foundation) ที่มีส่วนในการรับแรงกระทำ (Q) ให้ลดเหลือเพียง effective area, A' โดยการ

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

ปรับลด Length (L) เป็น effective Length (L')

และได้ $A = B \times L$ และ $A' = B' \times L'$

ขั้นตอนการประมาณหาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ประลัย (ultimate bearing capacity, q'_u) โดยวิธี effective area คือ

1. หาระยะเยื้องศูนย์กลาง eccentricity (e) ของแรงกระทำจาก

$$e_B = \frac{M_B}{Q} \quad (2.11)$$

$$e_L = \frac{M_L}{Q} \quad (2.12)$$

เมื่อ

e_B, e_L = ระยะเยื้องศูนย์กลางในทิศทางของความกว้างและความยาว
ของฐานราก

M_B = โมเมนต์ที่เกิดในแนว B

M_L = โมเมนต์ที่เกิดในแนว L

2. หา effective dimension คือ ความกว้างและความยาวประสิทธิผล (B และ L)

จาก

$$B' = B - 2e_B \leq L' \tag{2.13}$$

$$L' = L - 2e_L \leq B' \tag{2.14}$$

โดยที่ค่า $(B - 2e_B)$ ต้องน้อยกว่าค่า $(L - 2e_L)$ นั่นคือ ในระหว่าง 2 ค่า ค่า
ใดที่น้อยกว่าจะถูกใช้เป็น effective width (B')

3. หาพื้นที่ประสิทธิผล effective area จาก

$$A' = B' \times L' \tag{2.15}$$

4. หาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัย เมื่อฐานรากรับแรงกระทำ
เยื้องศูนย์กลาง (q_u) โดยใช้ทฤษฎีของ Meyerhoff(1963) หรือ General bearing capacity equation

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \tag{2.16}$$

ทั้งนี้ การหา Shape factor ($F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$) ให้รวมผลกระทบของ effective area
โดย

ใช้ effective width (B') แทน B และ effective Length (L') แทน L

ในการหา depth factor ($F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$) ให้ใช้ค่า B และ L ตามเดิม เหมือนกรณีที่ไม่มีการเยื้องศูนย์กลาง

5. หาน้ำหนักกระทำประลัยทั้งหมดที่ฐานรากรับแรงเยื้องศูนย์กลางรับได้ คือ

$$Q_{ult} = q_u B' L' \tag{2.17}$$

6. หาสัดส่วนความปลอดภัย (factor of safety) โดยสมการ

$$F.S. = \frac{Q_{ult}}{Q} \tag{2.18}$$

2.12 การกำหนดค่าที่จะใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณ

ในการเลือกใช้ฐานรากชนิดแบบฐานรากตื้นนั้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก และคุณภาพของดินที่รองรับฐานรากนั้นต้องเป็นดินที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้ค่อนข้างดี กล่าวคือ ต้องมีความแน่น(Dense)พอสมควร ยิ่งมีความแน่นมากยิ่งขึ้น และต้องไม่หลวม(Very Loose)จนเกินไป เพราะยิ่งดินนั้นมีความหลวมมากจะทำให้ฐานรากมีการทรุดมากตามไปด้วย ซึ่งถ้าหากฐานรากมีการทรุดตัวเกินค่าที่กำหนดไว้แล้วจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอื่น ทำให้เกิดความเสียหายตามมาภายหลังมากมาย

ในการกำหนดค่าที่จะนำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้ ได้กำหนดค่าต่างๆ ให้ครอบคลุมกับคุณสมบัติของดินชนิดต่างๆ มากที่สุด ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเน้นค่าที่พบได้จริงในงานก่อสร้าง ตลอดจนค่าขนาด (B x L) , ความลึกของฐานราก (D_r) เช่นกัน จะเน้นค่าที่นิยมใช้มากในงานก่อสร้าง ซึ่งรายละเอียดในการเลือกค่าดังกล่าว แสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 2.3 Empirical value for ϕ , D_r and unit weight of granular soil base on the SPT at about 6 m depth and normally consolidate (approximately, $\phi = 28^\circ + 15^\circ D_r (\pm 2^\circ)$)

Empirical values for ϕ , D_r , and unit weight of granular soils based on the SPT at about 6 m depth and normally consolidated [approximately, $\phi = 28^\circ + 15^\circ D_r (\pm 2^\circ)$]

Description	Very loose	Loose	Medium	Dense	Very dense
Relative density D_r	0	0.15	0.35	0.65	0.85
SPT N'_{70} : fine	1-2	3-6	7-15	16-30	?
medium	2-3	4-7	8-20	21-40	> 40
coarse	3-6	5-9	10-25	26-45	> 45
ϕ : fine	26-28	28-30	30-34	33-38	
medium	27-28	30-32	32-36	36-42	< 50
coarse	28-30	30-34	33-40	40-50	
γ_{wet} , kN/m ³	11-16*	14-18	17-20	17-22	20-23

* Excavated soil or material dumped from a truck has a unit weight of 11 to 14 kN/m³ and must be quite dense to weigh much over 21 kN/m³. No existing soil has a $D_r = 0.00$ nor a value of 1.00. Common ranges are from 0.3 to 0.7.

ตารางที่ 2.4 Consistency of saturate cohesive soil

Consistency of saturated cohesive soils*

Consistency			N_{79}	q_u , kPa	Remarks
Very soft	NC	Young clay	0-2	<25	Squishes between fingers when squeezed
Soft			3-5	25-50	Very easily deformed by squeezing
Medium	Increasing OCR	Aged/cemented	6-9	50-100	??
Stiff			10-16	100-200	Hard to deform by hand squeezing
Very stiff			17-30	200-400	Very hard to deform by hand squeezing
Hard			>30	>400	Nearly impossible to deform by hand

* Blow counts and OCR division are for a guide—in clay "exceptions to the rule" are very common.

ตัวอย่างการแปลงหน่วย

จากตารางที่ ทำการแปลงหน่วยจาก $\frac{kN}{m^3}$ เป็น $\frac{T}{m^3}$ ซึ่งใช้ในการหาค่า γ_T สามารถทำได้โดยการนำ 9.81 ไปหารค่าในหน่วย $\frac{kN}{m^3}$

เช่น $18 \frac{kN}{m^3} = \frac{18}{9.81} \left(\frac{T}{m^3} \right)$

$= 1.83 \frac{T}{m^3}$

จากตารางที่ ทำการแปลงหน่วยจาก kPa หรือ $\frac{kN}{m^2}$ เป็น $\frac{T}{m^2}$ ซึ่งใช้ในการหาค่า c สามารถทำได้โดยการนำ 9.81 ไปหารค่าในหน่วย $\frac{kN}{m^2}$

เช่น $q_u = 100 \frac{kN}{m^2}$

จากความสัมพันธ์ $c = \frac{q_u}{2}$

$\therefore c = \frac{100}{2 \times 9.81} \left(\frac{T}{m^2} \right)$

$= 5.1 \frac{T}{m^2}$

2.12.1 การเลือกค่า ϕ ที่จะใช้ในการวิเคราะห์คำนวณ

จากตารางที่ 3.4 เลือกใช้ค่า ϕ ในช่วง Loose , Medium และ Dense โดยมีรายละเอียดดังนี้

ค่า ϕ ที่เลือกใช้ได้แก่ 28° , 30° , 32° , 34° และ 36°

2.12.2 การเลือกค่า γ_T ที่จะใช้ในการวิเคราะห์คำนวณ

จากตารางที่ 3.4 เลือกใช้ค่า γ_T ในช่วง Loose , Medium และ Dense โดยมีรายละเอียดดังนี้

ค่า γ_T ที่เลือกใช้ได้แก่ 1.6 , 1.8 , และ 2 T/m³

2.12.3 การเลือกค่า c ที่จะใช้ในการวิเคราะห์คำนวณ

จากตารางที่ 3.5 เลือกใช้ค่า c ในช่วงของ Soft , Medium และ Stiff โดยมีรายละเอียดดังนี้

ค่า c ที่เลือกใช้ได้แก่ 0 T/m² , 2.5 T/m² , 5 T/m² , 7.5 T/m² , และ 10 T/m²

2.12.4 การเลือกขนาดของฐานราก (B x L) ที่จะใช้ในการวิเคราะห์คำนวณ

ในการเลือกใช้ฐานรากคั้นั้น ขนาดของฐานรากถือว่ามีค่าสำคัญเช่นกัน กล่าวคือ ขนาดของฐานรากคั้นั้นจะมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ทั้งนี้เพราะว่าเป็นฐานรากที่รับน้ำหนักที่ไม่มากนัก และเพื่อความสะดวกในการทำงาน ซึ่งจากการสอบถามผู้มีประสบการณ์ และจากการสำรวจยังสถานที่ก่อสร้างถึงขนาดของฐานรากคั้นที่นิยมใช้ก่อสร้าง จึงได้กำหนดขนาดของฐานรากคั้นที่จะใช้ในการวิเคราะห์ไว้ดังนี้

ขนาดของฐานรากคั้นที่เลือกใช้ ได้แก่ 1 x 1 m² , 1 x 1.2 m² , 1 x 1.5 m² และ 1.2 x 1.2 m²

2.12.5 การเลือกความลึกของฐานราก (D_p) ที่จะใช้ในการวิเคราะห์คำนวณ

ในการเลือกระดับความลึกของฐานรากคั้นั้นมีความสำคัญต่อการรับน้ำหนักของฐานรากมาก กล่าวคือ ฐานรากคั้นที่มีระดับความลึกมาก จะสามารถรับน้ำหนักได้มาก ตามไปด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติคั้นนั้นเป็นไปได้ที่เราจะเลือกระดับความลึกที่มาก ๆ ไว้ก่อน ทั้งนี้เพราะข้อจำกัดด้านอื่น เช่น ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง , น้ำหนักที่ถ่ายลงสู่ฐานราก , คุณภาพของดิน เป็นต้น

ซึ่งจากการสอบถามผู้มีประสบการณ์ และจากการสำรวจดูยังสถานที่ก่อสร้างถึงระดับความลึกของฐานรากดินที่นิยมใช้ก่อสร้าง จึงได้กำหนดระดับความลึกของฐานรากดินที่จะใช้ในการวิเคราะห์ไว้ดังนี้

ระดับความลึกของฐานรากที่เลือกใช้ ได้แก่ 1 m, และ 1.5 m.

จากค่าที่เลือกใช้ดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.5 สรุปช่วงของค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์

	ค่าที่เลือกใช้ในการคำนวณ				
c (T/m^2)	0	2.5	5	7.5	10
ϕ (deg)	28	30	32	34	36
γ (T/m^3)	1.4	1.8	2		
B (m)	1	1	1	1.2	
L (m)	1	1.2	1.5	1.2	
D_f (m)	1	1.5			

ในการวิเคราะห์ครั้งนี้แบ่งได้เป็น 3 กรณีใหญ่ คือ

1. กรณีที่ดินเป็นดินทราย (Sand Soil)
2. กรณีที่ดินเป็นดินเหนียว (Clay Soil)
3. กรณีที่ดินเป็นดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay Soil)

2.12.6 หลักที่ใช้ในการจำแนกประเภทของดิน

1. กรณีที่เป็นดินทราย จะกำหนดให้มีค่า $c = 0 T/m^2$ ทั้งนี้เพราะว่าทรายส่วนใหญ่จะประกอบด้วยควอทซ์ (Quartz) , เฟลสปาร์ (Feldspar) และแร่ธาตุอื่นๆ ที่ถูกกัดเซาะ ผุพัง เป็นวัสดุเม็ดหยาบ มีขนาดตั้งแต่ 0.075 – 4.75 มิลลิเมตร ซึ่งจะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดวัสดุ (Cohesion)

2. กรณีที่เป็นดินเหนียว จะกำหนดให้มีค่า c ตั้งแต่ $8 T/m^2$ ถึง $10 T/m^2$ ทั้งนี้เพราะว่าดินเหนียวจะประกอบด้วยวัสดุจำพวก ไมกา (Mica) แร่ธาตุต่างๆ ที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร และจะเป็นประจุลบ ทำให้สามารถเกาะติดกับน้ำได้ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) ระหว่างโมเลกุล หรือเม็ดดินเหนียว

3. กรณีที่เป็นดินเหนียวปนทราย จะกำหนดให้มีค่า c ตั้งแต่ $2 T/m^2$ ถึง $6 T/m^2$ ซึ่งค่าคุณสมบัติก็จะผสมกันระหว่าง ดินเหนียว กับทราย ดังนั้นค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) จึงอยู่ประมาณกลางๆ

ข้อกำหนดในการเลือกรูปแบบ และคุณสมบัติที่สามารถเกิดขึ้นได้จริง ที่จะนำมาเป็น
ข้อมูลในการวิเคราะห์

1. เมื่อค่า ϕ มีค่าสูง ค่า γ ก็จะสูงตามไปด้วย

ซึ่งในที่นี้ กำหนดให้ กรณีที่ ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ คือ

$$\text{เมื่อ } \phi = 28 \text{ องศา แล้ว } \gamma = 2 \text{ T/m}^3$$

$$\text{เมื่อ } \phi = 36 \text{ องศา แล้ว } \gamma = 1.6 \text{ T/m}^3$$

2. เมื่อค่า c มีค่าสูง ค่า ϕ จะมีค่าต่ำ

ซึ่งในที่นี้ กำหนดให้ กรณีที่ ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ คือ

$$\text{เมื่อ } c = 0 \text{ T/m}^2 \text{ แล้ว } \phi = 28 \text{ องศา หรือ } 30 \text{ องศา}$$

$$\text{เมื่อ } c = 10 \text{ T/m}^2 \text{ แล้ว } \phi = 34 \text{ องศา หรือ } 36 \text{ องศา}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ในการออกแบบฐานรากตื้น สำหรับน้ำหนักของอาคารหอพัก ที่ ต.ท่าโพธิ์ อ. เมือง จ.พิษณุโลก ผู้ออกแบบได้ว่าจ้าง บริษัทพิษณุคอนสตรัคชั่น จำกัด ให้ทำการสำรวจชั้นดิน บริเวณที่รองรับฐานรากดังกล่าว พบว่า มีคุณสมบัติดังนี้ $\phi = 20$, $c = 1.6 \text{ T/m}^2$, $\gamma_r = 1.82 \text{ T/m}^3$, $\gamma_{sat} = 1.9 \text{ T/m}^3$, ความกว้าง = 1.5 m , ความยาว = 1.5 m โดยที่ความลึกของระดับฐานราก = 1 m

ในฐานะวิศวกรโยธา ของบริษัทที่รับผิดชอบการออกแบบ กรุณาหา กำลังแบกทานของดินได้ฐานรากตื้นดังกล่าว และ น้ำหนักสูงสุดที่ฐานรากตื้นจะรับได้ที่ระยะเยื้องศูนย์ 0.1 m ขึ้นตอนที่ 1 ทำการคำนวณหา q'_u

จากสมการ 2.16

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

จากตารางที่ 2.1 เมื่อ $\phi = 20$ จะได้

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi = 14.83$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = 6.40$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi) = 3.59$$

$$N_q / N_c = 0.43$$

$$\tan \phi = 0.36$$

จากข้อมูลข้างต้น ได้

$$c = 0 \text{ T/m}^2$$

$$\gamma_r = 1.82 \text{ T/m}^3$$

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

$$B = 1.5 \text{ m}$$

$$e_B = 0.1 \text{ m}$$

$$B' = 1.5 - 2e = 1.3 \text{ m}$$

$$L = 1.5$$

$$\beta = 0$$

จากตารางที่ 2.2

Shape factor

$$F_{cs} = 1.37$$

$$F_{qs} = 1.312$$

$$F_{\gamma_s} = 0.65$$

Depth factor : $Df/B \leq 1$

$$F_{cd} = 1.66$$

$$F_{qd} = 1.21$$

$$F_{\gamma_d} = 1$$

Inclination factor

$$F_{ci} = 1$$

$$F_{qi} = 1$$

$$F_{\gamma_i} = 1$$

จะได้

$$q'_u = (1.6 \text{ T/m}^2)(14.83)(1.37)(1.66)(1) + (1.82 \text{ T/m}^3)(1)(6.4)(1.32)(1) + 0.5(1.82 \text{ T/m}^3)(1.3)(5.39)(0.65)(1)(1)$$

$$= 559 \text{ T/m}^2$$

$$Q'_u = q'_u \cdot B' \cdot L'$$

$$= 559 \times 1.3 \times 1.5$$

$$= 1200 \text{ T}$$