บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 บทนำ

"Combined Footing" เป็นการออกแบบฐานรากเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการออกแบบที่จำกัดทางด้านพื้นที่หรือกรณีไม่สามารถสร้างฐานรากเดี่ยวที่สมมาตรได้ ซึ่งฐานรากที่ไม่สมมาตรนี้เมื่อรับน้ำหนักที่ถ่ายลงบนฐานที่ไม่เท่ากันทำให้เกิดแรงเยื้องศูนย์ (Eccentricity) อาจทำให้อาคารทรุดได้ ดังนั้นฐานรากที่ออกแบบจึงมีลักษณะแผ่กว้างออกเพื่อรองรับน้ำหนักจากเสาตอม่อมากกว่า 1 ต้น การออกแบบ Combined Footing ต้องกำหนดขนาดของฐานราก โดยเสาตอม่อที่มีน้ำหนักมากต้องอยู่บนฐานรากที่ขนาดพื้นที่มากกว่าเสาตอม่อที่มีน้ำหนักน้อยกว่า เพื่อกระจายน้ำหนักลงสู่ดินให้สม่ำเสมอกัน ฐานรากอาจมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมคางหมู ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบของวิศวกร

Combined Footing นั้นรองรับเสาตอม่อเป็นจำนวนที่แน่นอนและทราบน้ำหนักบรรทุกของเสาแต่ละต้นด้วย

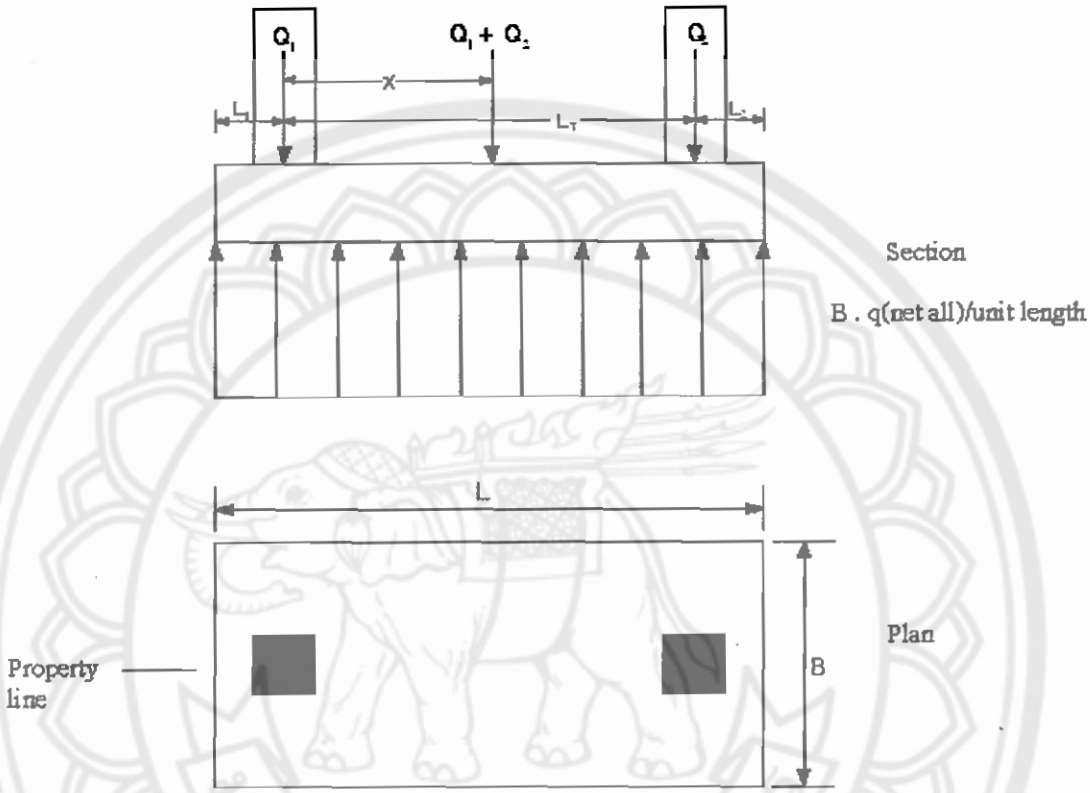
สำหรับการออกแบบ Combined Footing นั้น โดยทั่วไปนิยมใช้ rigid (conventional) method พอที่จะสรุปขั้นตอนในการออกแบบได้ดังนี้

- คำนวณหา total column loads และหาตำแหน่งของแรงลัพท์ ให้พิจารณารวมทั้งโมเมนต์ที่ถ่ายทอดผ่านเสาหรือผนังที่อยู่ติดกับฐานราก
- หา soil pressure distribution
- หาขนาดของ Combined Footing
- เขียน shear diagram
- เขียน moment diagram
- ออกแบบฐานรากโดยพิจารณาให้เป็นคานต่อเนื่อง (continuous beam)โดยให้สามารถ **รับได้ทั้งแรงเฉือน แรงยึดเหนี่ยวและโมเมนต์**

Combined Footing ในที่นี้แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

2.2 Rectangular Combined Footing

RCF ที่เหมาะสมในกรณีที่ น้ำหนักลงเสาต้นนอกหรือต้นที่ชิดเขตมีค่าน้อยกว่าต้นภายในและตำแหน่งของเสาอยู่ห่างกันไม่มากนัก



รูปที่ 2.1 Rectangular Combined Footing

Calculation of footing Dimensions

Assumptions

1) เนื่องจาก RCF มีลักษณะเป็นแบบ rigid ดังนั้นแรงดันดินจึงมีลักษณะแบบเชิงเส้น (linear)
2) แรงต้านได้ RCF จะสม่ำเสมอ ถ้าตำแหน่งของแรงลัพธ์(รวมถึงโมเมนต์จากเสาดอม่อ) ตรงกับจุดศูนย์กลางของพื้นที่ฐานราก (จะเป็นจริงเมื่อคุณสมบัติแบบ homogeneous และฐานรากเป็นแบบ rigid)
3) ความกว้าง, ความยาว และ ความหนาของ RCF มีค่าเท่ากันตลอด
4) รู้ขนาดความยาว

- L_1 (ระยะจาก property line ถึงเสาดอม่อที่มี Q_1 กระทำ)
- L_2 (ระยะห่างระหว่างเสาดอม่อ Q_1 และ Q_2)

Principals

1) ใช้วิธี trial-and-error

2) เริ่มทำการประมาณการโดย

2.1) สมมติขนากความกว้าง(B) ของ RFC โดยจะต้องทราบระยะฝัง D_f แล้ว

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

3) หาขนาดพื้นที่โดยอาศัย $q_{all(net)}$ จากนั้นจึงหาตำแหน่งศูนย์กลางของพื้นที่ฐานราก

4) หาความยาว (L) ของ RFC โดยที่แรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อถ่ายผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฐานราก (โดยสมมติว่าการกระทำอย่างสม่ำเสมอของแรงดันดินมีความแน่นอน)

5) หาความกว้าง (B) โดยอาศัย A และ L

6) ทำการตรวจสอบว่าค่า B ที่สมมติมานั้นใช้ได้หรือไม่ถ้าไม่ได้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 2-5 อีกครั้ง

7) ใช้ L,B และความหนา (T) ของฐานรากและให้ฐานรากมีลักษณะเป็น uniformly distributed loading beam ซึ่งถูกรองรับโดยเสาตอม่อ 2 ต้น เพื่อให้สามารถเขียนแผนภาพแรงเฉือน (SFD) และแผนภาพโมเมนต์ดัด (BMD)

8) ออกแบบคอนกรีดเสริมเหล็กโดยอาศัยผลจากขั้นตอนที่ 7

Method

Sizing Analysis Steps

1) สมมติความกว้าง B ของ RFC

2) หา net allowable soil pressure [bearing capacity,$q_{all(net)}$] โดยใช้ความกว้าง B สมมติไว้ หรือ presumptive bearing capacity อันใดอันหนึ่ง

3) คำนวณพื้นที่ของฐานราก (A = B x 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) หาตำแหน่งแรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อ

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

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 ที่สมมติโดยประมาณ (obtained B ≈ assumed B) ให้ใช้ค่าที่มากกว่าเป็นขนาดความกว้างที่ใช้ก่อสร้างสำหรับ RCF

8.3) ถ้าค่า B ที่ได้มานั้นมีค่าน้อยกว่าค่า B ที่สมมติ (obtained B <<< assumed B) ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1-7 โดยใช้ค่า B ที่สมมติใหม่ (new assumed B) ซึ่ง previous assumed B > new assumed B > obtained B

Structural Analysis Steps

9) คำนวณและเขียนแผนภาพแรงเฉือน (SFD) และโมเมนต์ดัด (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)

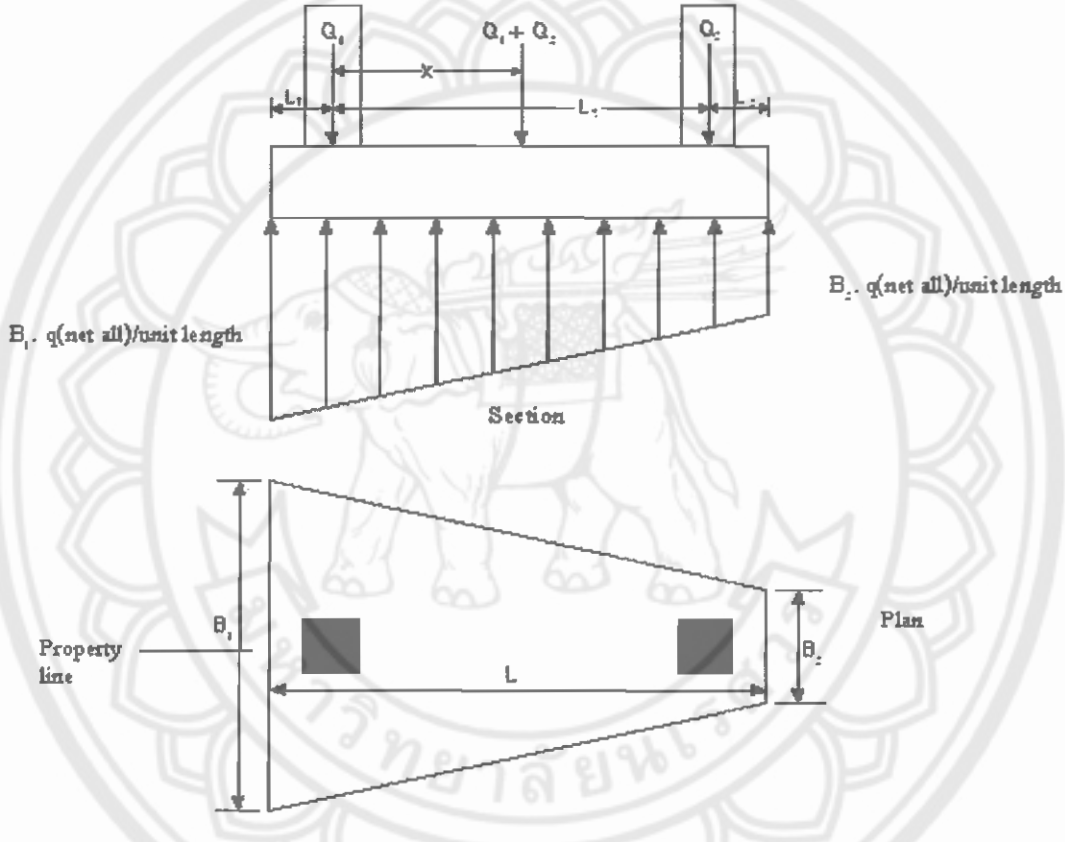
12) ทำการตรวจสอบว่า Bending Stress ที่ได้มานั้นใช้ได้หรือไม่

13) วาดแบบร่างรายละเอียดของ RCF และเหล็กเสริม

14) กำหนดรายละเอียดอื่นๆ ตามที่ออกแบบไว้

2.3 Trapezoidal Combined Footing (TCF)

Trapezoidal - shaped Combined Footing จะนำมาใช้ในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกลงสู่เสาดอม่อที่ชิดเขตมีมากกว่าน้ำหนักบรรทุกที่ลงสู่เสาภายในมากกว่า เนื่องจากไม่สามารถออกแบบเป็น RCF เพราะไม่สามารถจัดความยาวของฐานให้ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุก Q_1 และ Q_2 ลงตรงจุดศูนย์กลางของพื้นที่ฐานรากได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฐานให้เป็น Trapezoidal - shaped Combined Footing โดยมีด้านกว้างอยู่ชิดเขต และด้านแคบอยู่ทางด้านเสาด้านใน



รูปที่ 2.2 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)
- L_3 (ระยะจาก cl-cl ระหว่าง Q_1 ถึง Q_2)

Principals

1) ใช้วิธีการ trail and error
2) เริ่มการประมาณการโดย

2.1) สมมุติความกว้างของด้านที่สั้นกว่า (B_2) ของ TCF (ใช้ด้าน inside edge ของ TCF ในการออกแบบ)

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

3) หาความกว้างของด้านสั้น (B_2) และความกว้างของด้านยาว (B_1) ของ TCF โดยที่แรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อถ่ายผ่านจุด centroid ของ TCF
4) ทำการตรวจสอบว่า

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

4.2) B_2 ที่สมมุติไว้นั้นใช้ได้

5) เมื่อหาขนาดของ B_1 และ B_2 แล้วให้ TCF เสมือนว่าเป็นคาน RCF แต่แผนภาพแรงดันที่กระทำต่อ TCF beam นั้นจะเป็น linear varying (first degree) จาก B_1 และ B_2 ซึ่งไม่เท่ากับ RCF
6) ผลลัพธ์จะได้ว่า SFD และ BMD จะเป็น second – degree และ third – degree ตามลำดับ

Method

Sizing Analysis Steps

1) สมมติ B_2
2) หา net allowable soil pressure [bearing capacity,$q_{all(net)}$] โดยใช้ความกว้าง B สมมติไว้ หรือ presumptive bearing capacity อันใดอันหนึ่ง
3) คำนวณพื้นที่ของฐานราก (A = B x L)

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

where Q_1 , Q_2 = column loads

4) หาตำแหน่งแรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อ

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

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) ตรวจสอบขนาดที่ได้มาว่าสอดคล้องกับ Trapezoidal - shaped solutions หรือไม่

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

6) ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าขั้นตอนที่ 5 ยังใช้ไม่ได้ ให้ปฏิบัติ ดังนี้

6.1) กำหนดขนาด L_2 ขึ้นใหม่ จนกระทั่งเป็นไปตามขั้นตอนที่ 5

6.2) ถ้าขนาด L_2 ที่กำหนดขึ้นมาใหม่นั้นไม่สามารถเป็นไปดังที่แสดงไว้ในขั้นตอนที่ 5 ให้ทำการปรึกษากับสถาปนิก และกำหนด L_3 หรือ L_1 ขึ้นใหม่เพื่อความเหมาะสม

7) คำนวณหาค่า B_1 และ B_2 โดยที่แรงลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อถ่ายผ่านจุด centroid ของฐานราก (สำหรับการกระจายแบบสม่ำเสมอของแรงดันดินใต้ RCF) โดยใช้คุณสมบัติของ Trapezoidal

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

8) ตรวจสอบค่า B 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 ที่สมมติโดยประมาณ (obtained B ≈ assumed B) ให้ใช้ค่าที่มากกว่าเป็นขนาดความกว้างที่ใช้ก่อสร้างสำหรับ RCF

8.3) ถ้าค่า B ที่ได้มานั้นมีค่าน้อยกว่าค่า B ที่สมมติ (obtained B <<< assumed B) ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1-7 โดยใช้ค่า B ที่สมมติใหม่ (new assumed B) ซึ่ง previous assumed B > new assumed B > obtained B

Structural Analysis Steps

9) คำนวณและเขียนแผนภาพแรงเฉือน (SFD) และโมเมนต์ดัด (BMD)

Structural Design Steps

10) ออกแบบความหนา (t) ของ TCF 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) ทำการตรวจสอบว่า Bending Stress ที่ได้มานั้นใช้ได้หรือไม่

13) วาดแบบร่างรายละเอียดของ TCF และเหล็กเสริม

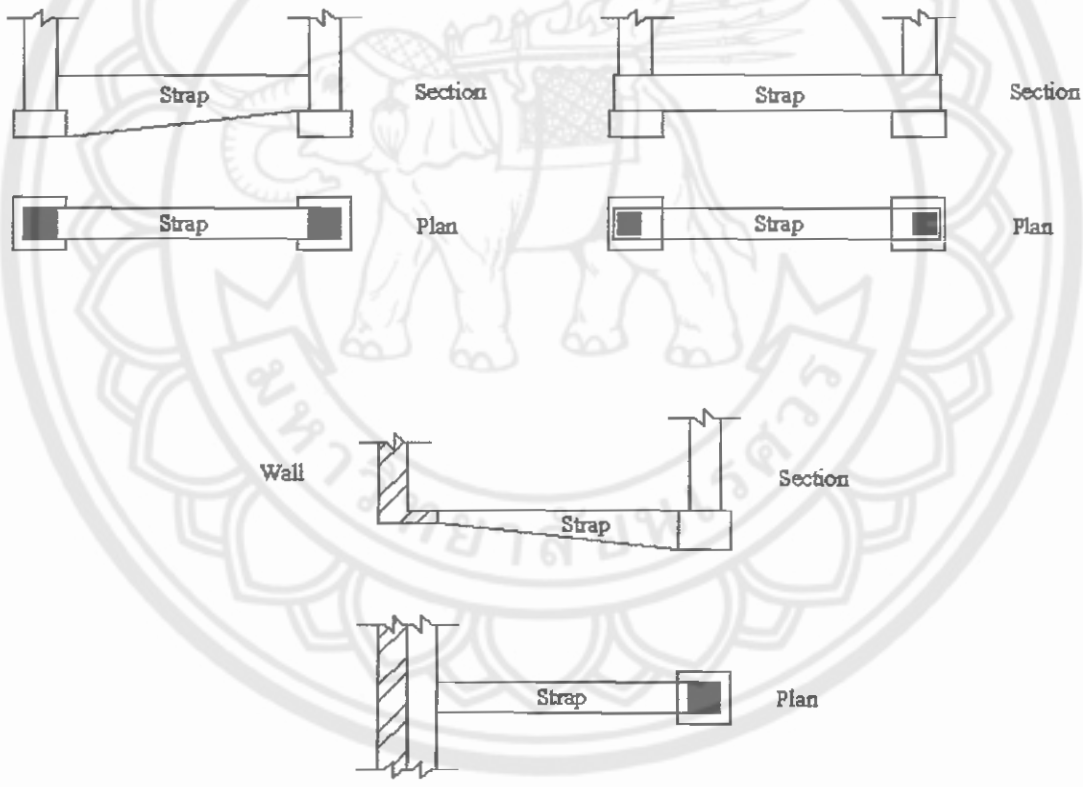
14) กำหนดรายละเอียดอื่นๆ ตามที่ออกแบบไว้

2.4 Cantilever or Strap Combined Footing

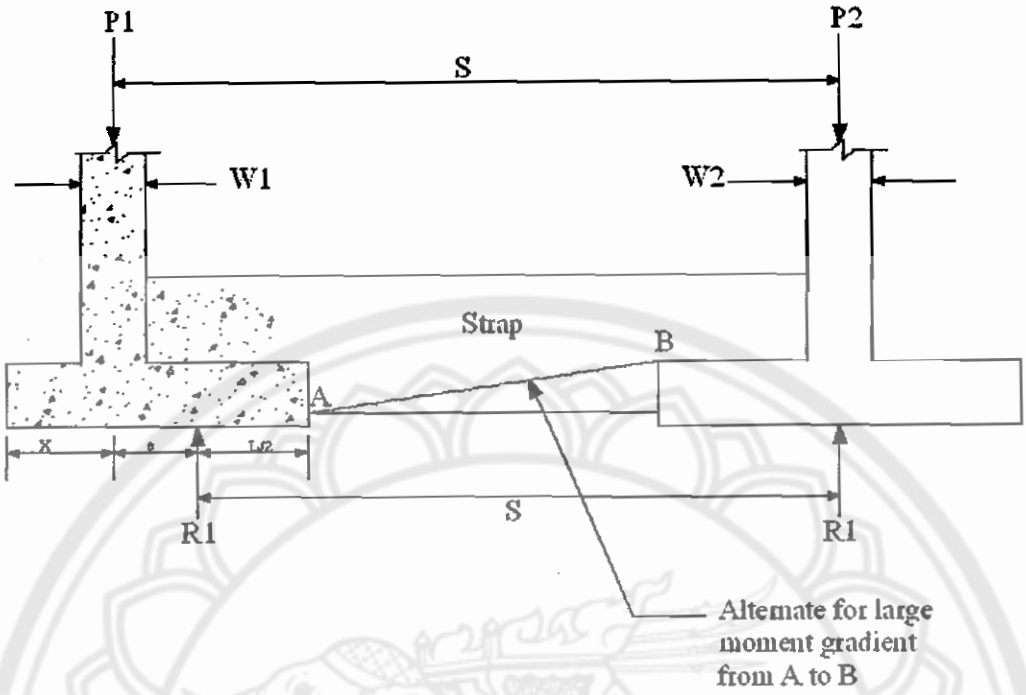
Cantilever or Strap Combined Footing เป็นการออกแบบฐานรากเพื่อแก้ปัญหา กรณีไม่สามารถสร้างฐานรากที่สมมาตรได้อีกวิธีหนึ่ง เหมาะสำหรับเสาของอาคารที่มีความจำเป็นต้องสร้างประชิดติดกับอาคารเดิมหรือแนวเขตที่ดิน ไม่สามารถวางตำแหน่งของฐานรากให้ตรงกับแนวเสาดอม่อได้ ในกรณีนี้จึงออกแบบให้มีคานคอนกรีดแบกรับน้ำหนักจากเสาดอม่อ ซึ่งน้ำหนักจากอาคารจะถูกถ่ายลงที่เสาดอม่อ แล้วถ่ายน้ำหนักลงบนคานก่อนที่จะลงสู่ฐานรากอีกทอดหนึ่ง

โดยตัวคานรัดนี้มีจุดประสงค์เพื่อเป็นชิ้นส่วนภายในของ Combined Footing แต่มีขนาดที่แคบกว่าทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการประหยัดวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดพื้นที่ของฐานราก CCF จะนำมาใช้แทน TCF หรือ RCF ก็ต่อเมื่อ

1. ความสามารถในการรับแรงแบกทานของดินมีสูง
2. ระยะห่างระหว่างเสาดอม่อมีมาก



รูปที่ 2.3 Cantilever Footing – use of strap beam



รูปที่ 2.4 Cantilever Footing – use of strap beam

Calculation of Footing Dimensions

Assumptions

1) คานรัดต้องมีลักษณะเป็น rigid
2) เพื่อลด differential settlement

   2.1) เสาตอม่อต้นในและต้นนอกจะต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับแรงดันดินที่เท่ากันโดยประมาณ

   2.2) ควรหลีกเลี่ยงการใช้ค่า B ที่มีขนาดต่างกันมากๆ
3) คานรัดไม่ควรสัมผัสกับผิวดินเนื่องจากสมมุติฐานที่ใช้ในการออกแบบนั้นไม่มีแรงปฏิกิริยาจากดินมากระทำต่อคานรัด
4) โดยทั่วไปแล้วในการออกแบบจะไม่พิจารณาน้ำหนักของคานรัด
5) ตรวจสอบ depth – to – span ระหว่างขอบของฐานราก
6) **คานรัดจะต้องยึดติดอย่างมั่นคงกับเสาตอม่อและฐานรากโดยใช้สลักหรือเหล็กเดือย ทั้งนี้ก็เพื่อให้เป็นชิ้นส่วนเดียวกับ**

Principals

1) **ใช้วิธีการ trail and error**
2) **เริ่มการประมาณการ net allowable soil pressure [bearing capacity,$q_{all(net)}$]**

3) หาแรงปฏิกิริยาของดินที่กระทำต่อเสาตอม่อต้นในและต้นนอก (R_1 และ R_2)

3.1) สมมุติตำแหน่ง eccentricity (e) บนฐานรากที่รับเสาตอม่อต้นนอก

3.2) หาค่า R_1 โดยหาโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของฐานรากที่รองรับเสาตอม่อตัวใน ซึ่งแนวของน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างจะตรงกันพอดีกับแรงปฏิกิริยา

3.3) หาค่า R_2 โดยอาศัยการหาโมเมนต์รอบ R_1

4) หาขนาดของฐานราก โดยที่แรงลัพธ์ของแรงดันดินจะอยู่ตรงกับจุด centroids ของฐานราก

5) ตรวจสอบ

5.1) แรงดันดินที่เท่ากันโดยประมาณที่กระทำต่อฐานรากทั้งเสาตอม่อตัวนอกและตัวใน

5.2) ค่า B จะต้องไม่ต่างกันมากในฐานรากที่รองรับเสาตอม่อทั้งสอง

6) โดยทั่วไปแล้วคานรัดจะมีรูปร่างที่ไม่ใหญ่มากนัก อย่างไรก็ตามสามารถทำให้มีลักษณะแข็งแกร่งที่สุด (greatest rigidity) โดยการให้ความกว้างของคานรัดอย่างน้อยที่สุดเท่ากับความกว้างที่เล็กที่สุดของเสาตอม่อ

สิ่งที่เพิ่มเติมอีกก็คือว่า ถ้าความลึกของฐานรากถูกจำกัด ในกรณีนี้จำเป็นต้องเพิ่มความกว้างของคานรัดเพื่อให้ได้ rigidity ที่ต้องการ

7) เมื่อหาขนาดของฐานรากและพื้นที่ A_1 และ A_2 แล้ว CCF จะมีพฤติกรรมเสมือนคาน ซึ่ง

7.1) แผนภาพของแรงดันดินที่กระทำต่อฐานรากมีความสม่ำเสมอ

7.2) น้ำหนักของคานรัดจะไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ 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) คำนวณระยะห่างระหว่างศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของเสาตอม่อทั้งสอง

$$S_1 = L_3 - e$$

L_3 = cl – cl distance between both columns

4) หาค่าแรงปฏิกิริยาของดินที่กระทำต่อฐานรากทั้งตัวนอกและตัวใน (R_1 และ R_2)

4.1) หาค่า R_1 โดยการหาโมเมนต์รอบจุด centroid ของฐานรากตัวใน

$$R_1S_1 = Q_1L_3$$

4.2) หาค่า R_2 โดยการหาโมเมนต์รอบ R_1

$$R_2S_1 + Q_1e = Q_2S_1$$

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

5.1) พื้นที่ฐานรากตัวใน (A_1)

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

5.2) พื้นที่ฐานรากตัวนอก (A_2)

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

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

6) ตรวจสอบแรงดันดินและค่าความแตกต่างของ B ในฐานรากทั้งตัวในและตัวนอก

7) ถ้าขั้นตอนที่ 6 ยังใช้ไม่ได้ ให้ทำการลดค่า e และกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3 – 6 อีกครั้งหนึ่ง

8) ถ้าขั้นตอนที่ 6 ใช้ได้แล้ว ให้ตรวจสอบว่า $q_{all(net)}$ นั้นใช้ได้หรือไม่

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 ที่สมมติโดยประมาณ (obtained B ≈ assumed B) ให้ใช้ค่าที่มากกว่าเป็นขนาดความกว้างที่ใช้ก่อสร้างสำหรับ RCF

8.3) ถ้าค่า B ที่ได้มานั้นมีค่าน้อยกว่าค่า B ที่สมมติ (obtained B <<< assumed B) ให้กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 1-7 โดยใช้ค่า B ที่สมมติใหม่ (new assumed B) ซึ่ง previous assumed B > new assumed B > obtained B

Structural Analysis Steps

9) คำนวณและเขียนแผนภาพแรงเฉือน (SFD) และโมเมนต์ดัด (BMD)

9.1) ให้คิด CCF เป็นเสมือนคาน

9.2) แผนภาพแรงดันดินที่กระทำต่อฐานรากจะเป็น uniform line load

9.3) น้ำหนักของคานรัดจะไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ SFD และ BMD

9.4) คิดน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อเป็น 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) ทำการตรวจสอบว่า Bending Stress ที่ได้มานั้นใช้ได้หรือไม่

13) วาดแบบร่างรายละเอียดของ CCF และเหล็กเสริม

14) กำหนดรายละเอียดอื่นๆ ตามที่ออกแบบไว้