บทที่ 2
ทฤษฎีการออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง

2.1 พฤติกรรมของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง

พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทางแบบนี้ จะใช้กับพื้นห้องที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวไม่มากเกินกว่าสองเท่าของด้านสั้นเท่านั้น โดยมีเหล็กเสริมเอกในสองทิศทางที่ตั้งฉากกันทั้งในแนวที่ขนานกับด้านสั้นและในแนวที่ขนานกับด้านยาวของแผ่นพื้น เพื่อใช้ต้านทานโมเมนต์ดัดในสองทิศทางที่เกิดจากการบรรทุกน้ำหนักนั้น และเพื่อถ่ายน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดจากแผ่นพื้นลงสู่ที่รองรับทั้ง 4 ด้าน ที่รองรับดังกล่าวอาจเป็น คาน กำแพง คสล. หรือคานเหล็กรูปพรรณ

พิจารณาแผ่นพื้นคอนกรีตที่มีขนาดด้านสั้นเท่ากับ S และมีด้านยาวเท่ากับ L โดยให้มีคานรองรับแผ่นพื้นทั้งสี่ด้านในลักษณะของที่รองรับแบบธรรมดา (Simple support) ถ้าสมมุติว่าแผ่นพื้นคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น ดังนั้นเมื่อแผ่นพื้นรับน้ำหนักบรรทุกแบบแผ่ w กก. / เมตร^2 แผ่นพื้นจะโค้งโก่งโดยมีลักษณะคล้ายจานหรือกระชอนและที่มุมทั้งสี่จะกระดกขึ้นได้ถ้าไม่มีการยึดรั้งกับขอบที่รองรับ จากลักษณะการโก่งตัวของแผ่นพื้นที่เกิดขึ้น ดังนั้นที่แต่ละจุดบนแผ่นพื้นจะมีการโค้งโก่งในสองทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน แต่เนื่องจากความโค้งขึ้นกับโมเมนต์ดัดที่กระทำ นั่นคือทุกจุดของแนวที่มีการโค้งโก่งจะต้องมีโมเมนต์ดัดกระทำเสมอ ซึ่งเป็นเหตุให้ต้องเสริมเหล็กในแผ่นพื้นทั้งสองทิศทางที่ตั้งฉากกันเพื่อต้านทานโมเมนต์ดัดที่กระทำ

โมเมนต์ดัดที่ที่กระทำในแต่ละทิศทางที่ตั้งฉากกัน เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำในทิศทางนั้น ๆ แต่เพื่อให้การพิจารณาถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำหรือโมเมนต์ดัดที่ที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทางของแผ่นพื้นง่ายขึ้น ดังนั้นจะสมมุติให้แผ่นพื้นประกอบขึ้นจากแถบเล็ก ๆ สองแถบซึ่งอาจสมมุติให้แถบนั้นมีความกว้างเท่ากับหนึ่งเมตร คือแถบ ab และแถบ cd ซึ่งเป็นแถบที่ขนานกับด้านสั้นและด้านยาวของแผ่นพื้น ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.1 เมื่อแถบทั้งสองนี้อยู่ที่กึ่งกลางของด้านยาว L และด้านสั้น S ของแผ่นพื้น ตามลำดับโดยตัดกันที่จุด e จะเห็นว่าค่าของระยะโก่งตัวในแต่ละทิศทางที่จุดตัดนี้ต้องมีค่าเท่ากันเสมอ ซึ่งหากพิจารณาต่อไปว่าแถบทั้งสองดังกล่าวเปรียบเสมือนเป็นคานช่วงเดียว ดังนั้นระยะโก่งที่กึ่งกลางคานจะเท่ากับ $5w\ell^4/384EI$ ถ้าแถบทั้งสองของแผ่นพื้นมีความหนาเท่ากัน โดยที่

L = ความยาวช่วงพื้นในทิศทางที่ยาวกว่า

S = ความยาวช่วงพื้นในทิศทางที่สั้นกว่า

W_{ab} = น้ำหนักบรรทุกแผ่ที่รองรับโดยแถบพื้นในทิศทาง L

W_{cd} = น้ำหนักบรรทุกแผ่ที่รองรับโดยแถบพื้นในทิศทาง S

W = น้ำหนักบรรทุกแผ่รวมทั้งสองทิศทาง = $W_{ab} + W_{cd}$

กรณีที่แผ่นพื้นนั่งบนคานที่รองรับแบบ Simple Support เมื่อพิจารณาคำนวณหาค่าการแอ่นตัวในแต่ละทิศทางจะได้ว่า

ค่าการโก่งตัวของแถบพื้นในทิศตามยาว L เท่ากับ

$$\Delta_L = \frac{SW_{ab}L^4}{384EI}$$

ค่าโก่งตัวของแถบพื้นในทิศทางตามขวาง S เท่ากับ

$$\Delta_S = \frac{SW_{ab}S^4}{384EI}$$

แต่เนื่องจากแถบพื้นทั้งสองทิศทางอยู่ติดกันเป็นเนื้อเดียวกันค่าการโก่งตัวจะต้องเท่ากับ

$$\Delta_L = \Delta_S$$

$$\frac{SW_{ab}L^4}{384EI} = \frac{SW_{ab}S^4}{384EI}$$

$$W_{ab} = W_{cd}S^4/L^4$$

เนื่องจาก $W = W_{ab} + W_{cd}$

ดังนั้น $W_{ab} = WL^4/(L^4 + S^4)$

$W_{cd} = WS^4/(L^4 + S^4)$

ถ้ากำหนดให้อัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของแผ่นพื้น ; m = L/S

$W_{ab} = W[1/(1+m^4)]$

$W_{cd} = W[m^4/(1+m^4)]$

โมเมนต์ดัดสูงสุดที่ขนานกับด้านสั้น $M_s = [1/(1+m^4)]WS^2/8$

โมเมนต์ดัดสูงสุดที่ขนานกับด้านยาว $M_L = [m^4/(1+m^4)]WL^2/8$

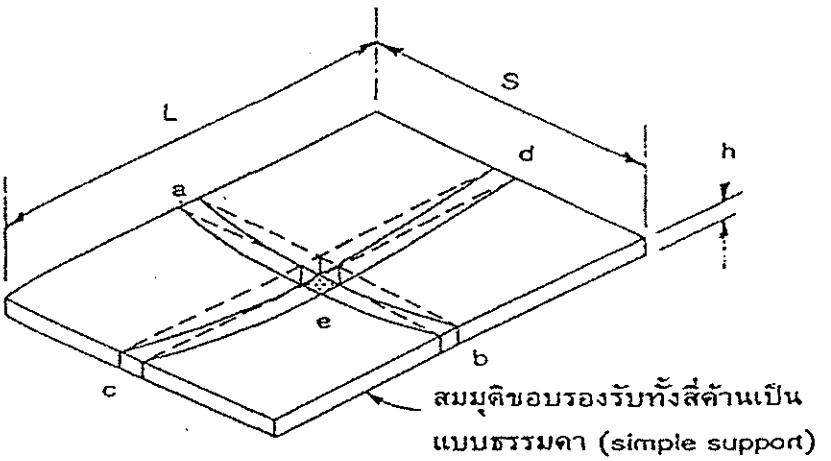
จะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นทั้งสองทิศทางจะขึ้นกับขนาดของแผ่นพื้นหรืออัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวของแผ่นพื้น (m) ดังนี้

m	=	1.0	M_S	=	$0.50\ WS^2/8$	M_L	=	$0.50\ WL^2/8$
m	=	0.75	M_S	=	$0.76\ WS^2/8$	M_L	=	$0.24\ WL^2/8$
m	=	0.5	M_S	=	$0.94\ WS^2/8$	M_L	=	$0.06\ WL^2/8$
m	=	0.4	M_S	=	$0.98\ WS^2/8$	M_L	=	$0.02\ WL^2/8$
m	=	0.3	M_S	=	$0.99\ WS^2/8$	M_L	=	$0.01\ WL^2/8$

จะเห็นว่าเมื่อค่า m = 1.0 แผ่นพื้นมีขนาดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโมเมนต์ดัด $M_S = M_L$

เมื่อค่า m ลดลง ค่า M_S จะเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่า M_L จะลดลงจนกระทั่งค่า m เท่ากับ 0.5 หลังจากนั้นแม้ว่าค่า m จะลดลงเรื่อย ๆ แต่ค่า M_S จะเพิ่มขึ้นช้า และค่า M_L จะลดลงอย่างช้า ๆ เช่นเดียวกัน

ดังนั้น Code of Practice จึงกำหนดให้แผ่นพื้น ซึ่งมีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวน้อยกว่า 0.5 ($m < 0.5$) สามารถออกแบบโดยคิดเสมือนว่าเป็นแผ่นพื้นทางเดียว (ด้านยาวของพื้นยาวกว่าด้านสั้นมาก ๆ) และแผ่นพื้นซึ่งมีอัตราส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวมากกว่า หรือเท่ากับ 0.5 ($m \geq 0.5$) ให้ออกแบบโดยวิธีแผ่นพื้นสองทาง



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักและการแอ่นตัวของแผ่นพื้นสองทาง

ซึ่งแสดงว่าแถบที่ขนานกับด้านสั้นต้องรับน้ำหนักบรรทุกมากกว่าแถบที่ขนานกับด้านยาวเสมอ และเมื่ออัตราส่วนของ L/S มีค่ามากกว่าสอง แถบที่ขนานกับด้านยาวจะมีส่วนในการรับน้ำหนักบรรทุกน้อยมาก กล่าวอีกนัยหนึ่งคือน้ำหนักบรรทุกส่วนใหญ่จะอยู่ที่แถบที่ขนานกับด้านสั้น

นอกจากนี้จะเห็นว่า ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของแถบที่ขนานกับด้านสั้น (M_S) มีค่ามากกว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดบนแถบที่ขนานกับด้านยาว (M_L) เสมอ โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนของ L/S มีค่ามากกว่าสอง ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดบนแถบที่ขนานกับด้านยาวจะมีค่าน้อยมาก ซึ่งเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ให้พิจารณาออกแบบแผ่นพื้นดังกล่าวเป็นแบบแผ่นพื้นเสริมเหล็กทางเดียว อนึ่ง ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดบนแถบที่ขนานกับด้านสั้น จะอยู่ที่กึ่งกลางของแถบที่ขนานกับด้านยาวด้วย และจะมีค่าลดลงเมื่อเลื่อนแถบที่ขนานกับด้านสั้นให้มาอยู่ใกล้ขอบที่รองรับมากขึ้น จนมีค่าเป็นศูนย์ที่ขอบรองรับซึ่งสมมุติในตอนแรกว่าเป็นแบบยึดหมุน ทำนองเดียวกัน ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดบนแถบที่ขนานกับด้านยาว ก็จะอยู่ที่กึ่งกลางของแถบที่ขนานกับด้านสั้นด้วย และจะมีค่าลดลงเมื่อเลื่อนแถบที่ขนานกับด้านยาวให้มาอยู่ใกล้ขอบที่รองรับมากขึ้น จนมีค่าเป็นศูนย์ที่ขอบรองรับนั้น สังเกตว่าโมเมนต์ดัดสูงสุด M_S ที่ขนานกับด้านสั้น หรือโมเมนต์ดัดสูงสุด M_L ที่ขนานกับด้านยาว สามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปของ CwS^2 กก. – ม./ม. ได้โดยที่ C เป็นค่าสัมประสิทธิ์หนึ่ง ๆ

ค่าต่าง ๆ ของน้ำหนักบรรทุกหรือโมเมนต์ดัดที่กระทำในแต่ละทิศทางที่พิจารณาข้างต้นเป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น เพราะพฤติกรรมจริงของแผ่นพื้น คสล. ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากแผ่นพื้นเป็นส่วนโครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนท และไม่เป็นวัสดุยืดหยุ่นตามข้อสมมุติ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของแผ่นพื้น การยึดรั้งกับขอบที่รองรับ ค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต รวมถึงการกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัดในช่วงอินอิลาสติก ฯลฯ และเมื่อเลื่อนแถบของ ab และ cd ให้ห่างออกไปจากกึ่งกลางของแผ่นพื้นในแต่ละด้านโดยให้เลื่อนเข้ามาใกล้กับขอบที่รองรับ จะพบว่าค่าโมเมนต์ดัดที่กระทำจะลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็นตามข้อสมมุติข้างต้น เนื่องจากในบริเวณนั้นมีโมเมนต์บิดเกิดขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อโมเมนต์ที่กระทำในทิศทางหนึ่งมีค่าสูงสุด แผ่นพื้นจะยังไม่วิบัติ เพราะมีการกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัดในช่วงอินอิลาสติก จนกว่าโมเมนต์ดัดในอีกทิศทางหนึ่งมีค่าสูงสุด นั่นหมายความว่า แผ่นพื้นจะวิบัติต่อเมื่อเหล็กเสริมในสองทิศทางเกิดการครากนั่นเอง ฉะนั้นในการคำนวณออกแบบแผ่นพื้นจึงกำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ควรจะเป็น ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และจากผลการทดลอง

2.2 การออกแบบโดยวิธีกำลัง (Strength Design Method : SDM)

การคำนวณออกแบบโดยวิธีนี้เป็นการพิจารณาหาขนาดของส่วนโครงสร้างคอนกรีตและปริมาณของเหล็กเสริมที่สภาวะก่อนที่ส่วนโครงสร้างนั้นจะเกิดการวิบัติ ทั้งนี้อนุญาตให้วิเคราะห์หาค่าแรงภายในต่าง ๆ ที่กระทำต่อส่วนของโครงสร้าง โดยอาศัยทฤษฎีอีลาสติกได้ ซึ่งให้ความปลอดภัยพอเพียงและช่วยให้การคำนวณออกแบบง่ายขึ้นมาก

เหตุผลของการเลือกใช้วิธีกำลังในการคำนวณออกแบบโครงสร้าง คสล. ได้แก่

1. วิธีกำลังสามารถคาดหมายกำลังต้านทานสูงสุดของส่วนโครงสร้างได้ถูกต้องกว่า เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่นเมื่อรับน้ำหนักมาก ๆ
2. วิธีกำลังไม่ต้องคำนึงถึงการล้าของคอนกรีต (Creep) แต่อย่างใด
3. วิธีกำลังช่วยให้เลือกใช้เหล็กเสริมที่มีกำลังจุดครากสูงมากขึ้น ทำให้ประหยัดมากขึ้น
4. วิธีกำลังสามารถคาดคะเนความเหนียวของส่วนโครงสร้างก่อนที่จะเกิดการวิบัติได้ดีกว่า

หลักเกณฑ์ของการคำนวณออกแบบโครงสร้าง คสล. โดยวิธีกำลังมีดังต่อไปนี้

ก) ในภาวะที่ส่วนโครงสร้างจะเกิดการวิบัติเนื่องจากการกระทำของน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว (factored load) หรือกำลังที่ต้องการ (required strength) ต้องมีค่าไม่เกินกว่ากำลังต้านทานที่ใช้ออกแบบ (design strength) นั่นคือ

กำลังที่ใช้ออกแบบ (design strength) $\geq$ กำลังที่ต้องการ (required strength)

ข) ในภาวะที่ส่วนโครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ค่าการโก่งตัวหรือความกว้างของรอยร้าว เนื่องจากโมเมนต์ดัด (flexural cracks) ต้องไม่มากกว่าพิกัดที่กำหนด

น้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว (factored load)

น้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่าแล้วหรือน้ำหนักประลัยจะได้จากการคูณน้ำหนักบรรทุกด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก (load factor) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับประเภทหรือชนิดของน้ำหนักบรรทุกนั้น

ถ้ากำหนดให้ U = น้ำหนักประลัยสูงสุดที่ได้จากน้ำหนักที่เพิ่มค่าแล้ว

D = น้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งาน

L = น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานที่กำหนด

W = แรงลม

E = แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว

มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. กำหนดให้พิจารณาหาน้ำหนักประลัย U เนื่องจากน้ำหนักหรือแรงกระทำต่าง ๆ ที่เพิ่มค่าแล้ว ดังต่อไปนี้เช่น

1. อาคารที่ไม่ได้คิดรับแรงลมหรือแรงจากแผ่นดินไหว

$$U = 1.4D + 1.7L$$

2. อาคารที่คิดให้รับแรงลมด้วย

$$U = 0.75\,(1.4D + 1.7L + 1.7W)$$

$$\text{หรือ } U = 0.9\,D + 1.3W$$ ให้ใช้ค่า U ที่ให้ค่าสูงสุด

3. สำหรับอาคารที่คิดรับแรงจากแผ่นดินไหว

$$U = 1.05D + 1.28L + 1.40E$$

$$\text{หรือ } U = 0.9D + 1.43E$$ ให้ใช้ค่า U ที่ให้ค่าสูงสุด

กำลังที่ต้องการ (required strength) หมายถึง กำลังที่ส่วนโครงสร้าง คสล. ต้องรับหรือต้านทาน เช่น แรงอัดประลัย (P_u) โมเมนต์ดัดประลัย (M_u)

กำลังที่ใช้ออกแบบ (design strength) หมายถึง กำลังต้านทานของส่วนโครงสร้างที่คำนวณได้จากข้อสมมติฐาน (nominal strength) แต่ถูกลดค่าลงโดยการคูณด้วยตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor : ϕ)

ตัวคูณลดกำลัง (Strength Reduction Factor : ϕ)

ขึ้นกับประเภทของส่วนโครงสร้าง มาตรฐาน ว.ส.ท. กำหนดค่าของตัวคูณลดกำลัง (ϕ) สำหรับการก่อสร้างที่มีการควบคุมงานและคุณภาพของวัสดุเป็นอย่างดี ดังต่อไปนี้

ϕ = 0.90 สำหรับแรงอัด (ไม่มีแรงตามแนวแกนกระทำ)

= 0.90 สำหรับแรงดึงตามแนวแกนหรือแรงดึงตามแนวแกนร่วมกับแรงดัด

= 0.85 สำหรับแรงเฉือนและแรงบิด

= 0.75 สำหรับแรงอัดหรือแรงอัดร่วมกับแรงดัดที่เสริมด้วยเหล็กปลอกเกลียว

= 0.70 สำหรับแรงอัดหรือแรงอัดร่วมกับแรงดัดที่เสริมด้วยเหล็กปลอกเดี่ยว

= 0.70 สำหรับแรงกดหรือแรงแบกทานบนคอนกรีต

2.3 การคำนวณออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง

โมเมนต์ดัด : ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นจะได้จากการพิจารณาแบ่งแผ่นพื้นขนาดกว้าง S และยาว L ให้เป็นแถบกลางและแถบเสาในแต่ละทิศทางดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2.2) ซึ่งค่าของระยะ S และ L เป็นค่าน้อยสุดของระยะจากศูนย์ถึงศูนย์ระหว่างที่รองรับ หรือระยะช่วงว่างบวกกับอีก 2 เท่าของความหนาของที่รองรับ

แถบกลาง (middle strip) ให้มีความกว้างเท่ากับครึ่งหนึ่งของช่วงพื้น

แถบเสา (column strip) ให้มีความกว้างเท่ากับครึ่งหนึ่งของช่วงพื้น นั่นคือ ในแต่ละซีกของช่วงพื้นเดียวกัน แถบเสาจะมีขนาดเท่ากับพื้นที่ 1 ใน 4 ของช่วงพื้นนั้น ซึ่งเรียกว่าครึ่งแถบเสา (half column strip : HCS)

ในกรณีที่ $L > 2S$ แถบกลางที่ขนานกับด้านสั้นให้มีความกว้างเท่ากับผลต่างระหว่างด้านทั้งสอง นั่นคือ มีค่าเท่ากับ $L - S$ ส่วนที่เหลือเป็นความกว้างของแถบเสา

ในการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง ให้พิจารณาจากแถบพื้นซึ่งกว้างเท่ากับ 1 เมตร ทั้งทางช่วงสั้นและช่วงยาว

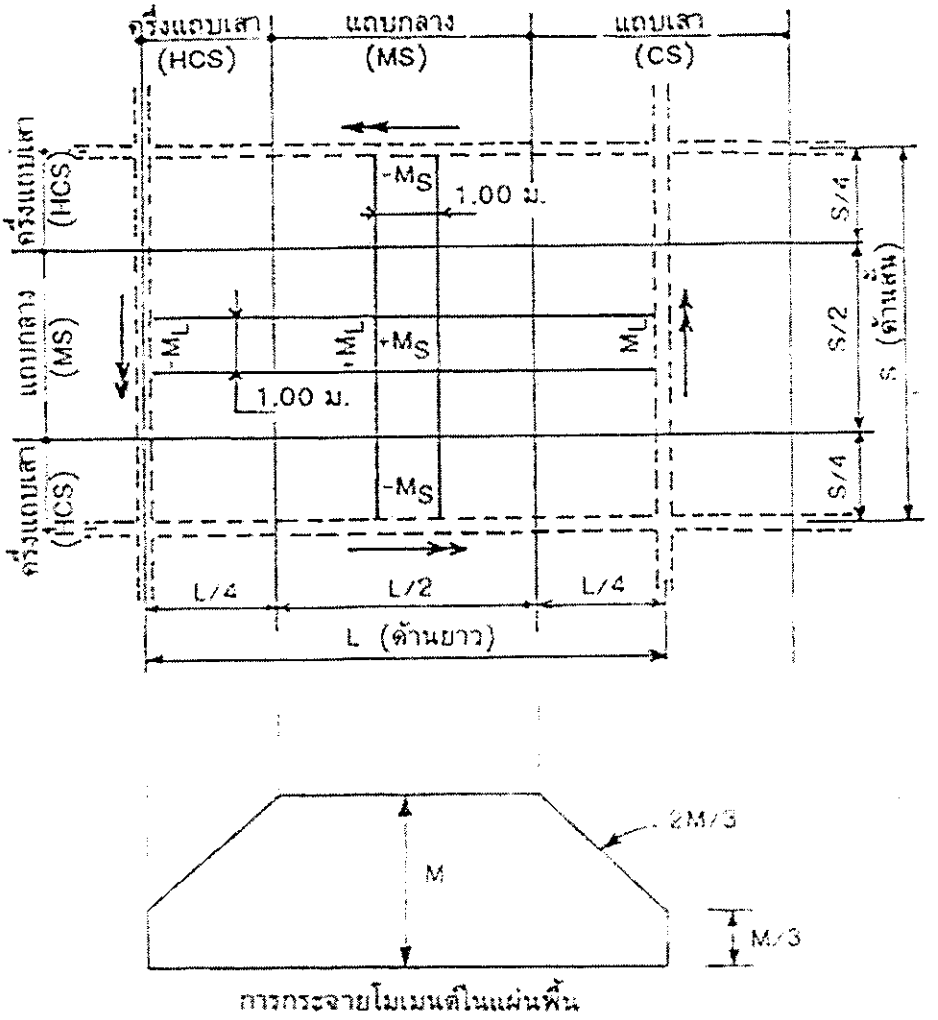
ถ้าให้ W_U = น้ำหนักบรรทุกรวมที่เพิ่มค่าแล้ว ซึ่งแผ่สม่ำเสมอบนแผ่นพื้น กก./ม.^{2}

C = สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ในแต่ละทิศทาง (ช่วงสั้น , ช่วงยาว) สำหรับแผ่นพื้นแบบเสริมเหล็ก 2 ทาง ซึ่งขึ้นกับความต่อเนื่องของแผ่นพื้น (5 กรณี) และอัตราส่วนระหว่างด้านสั้น S กับด้านยาว L ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น m ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1

ดังนั้น โมเมนต์ดัดในแถบกลาง (ทั้งของช่วงสั้น และช่วงยาว) คำนวณได้จาก

$$M_U = CW_U S^2 \quad \text{กก.} - \text{เมตร / เมตร} \qquad (2.3.1)$$

สังเกตว่า ค่าโมเมนต์ดัดในแถบกลางของแผ่นพื้นที่จะคำนวณได้จากสมการ (2.3.1) มีทั้งโมเมนต์ลบและโมเมนต์บวก โดยที่ค่าโมเมนต์ลบเป็นโมเมนต์ตรงขอบของคานที่รองรับ ส่วนค่าโมเมนต์บวกเป็นโมเมนต์ตามแนวกึ่งกลางของช่วงพื้น ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่ง M_S เป็นโมเมนต์ในแถบกลางที่มีทิศกระทำขนานกับด้านสั้น และ M_L เป็นโมเมนต์ในแถบกลางที่มีทิศกระทำขนานกับด้านยาว



รูปที่ 2.2 แถบกลางและแถบเสาของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง

สำหรับโมเมนต์ดัดในแถบเสาจะสมมุติให้มีค่าลดลงแบบเชิงเส้นจากค่าที่หาได้ในแถบกลางเหลือเพียงหนึ่งในสามที่ขอบของคานรองรับ ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของโมเมนต์ดัดในแถบเสามีค่าเท่ากับสองในสามของโมเมนต์ดัดในแถบกลาง

อนึ่ง หากค่าโมเมนต์ลบที่ด้านใดของที่รองรับมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 80 ของโมเมนต์อีกด้านหนึ่งให้นำค่าสองในสามของผลต่างของโมเมนต์นั้นกระจายออกไปตามสัดส่วนของความแข็งแกร่ง (สติฟเนส) ของแผ่นพื้นส่วนปริมาณของเหล็กเสริมเอกในแผ่นพื้นต้องไม่มากเกินกว่า 0.75 ρ_b ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้เกิดการวิบัติเป็นแบบแรงดึงเป็นหลัก แต่ต้องไม่น้อยกว่าอัตราส่วนของเหล็กเสริมต้านการยืดหดตัว

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ดัด : c

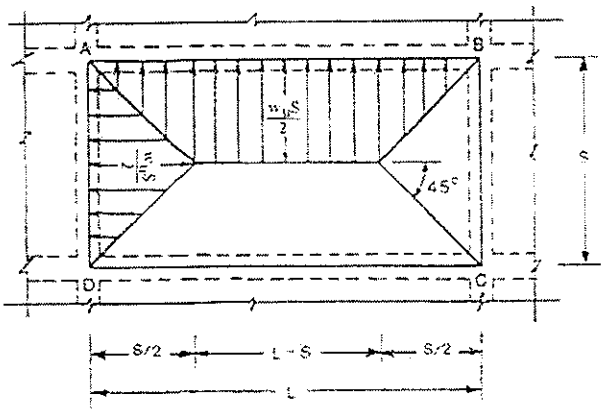
โมเมนต์	ช่วงสั้น						ช่วงยาว
	ค่าต่าง ๆ ของอัตราส่วน m						
	1.0	**0.9**	**0.8**	**0.7**	**0.6**	**0.5 และต่ำกว่า**	**สำหรับ m ทุกค่า**
กรณีที่ 1 ช่วงพื้นภายใน							
โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	0.033	0.040	0.048	0.055	0.063	0.083	0.033
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	-	-	-	-	-	-	-
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.025	0.030	0.036	0.041	0.047	0.062	0.025
กรณีที่ 2 ไม่ต่อเนื่องกันด้านเดียว							
โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	0.041	0.048	0.055	0.062	0.069	0.085	0.041
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.021	0.024	0.027	0.031	0.035	0.042	0.021
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.031	0.036	0.041	0.047	0.052	0.064	0.031
กรณีที่ 3 ไม่ต่อเนื่องกันสองด้าน							
โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	0.049	0.057	0.064	0.071	0.078	0.090	0.049
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.025	0.028	0.032	0.036	0.039	0.045	0.025
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.037	0.043	0.048	0.054	0.059	0.068	0.037
กรณีที่ 4 ไม่ต่อเนื่องกันสามด้าน							
โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	0.058	0.066	0.074	0.082	0.090	0.098	0.058
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.029	0.033	0.037	0.041	0.045	0.049	0.029
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.044	0.050	0.056	0.062	0.068	0.074	0.044
กรณีที่ 5 ไม่ต่อเนื่องกันทั้งสี่ด้าน							
โมเมนต์ลบ - ที่ด้านซึ่งต่อเนื่องกัน	-	-	-	-	-	-	-
- ที่ด้านซึ่งไม่ต่อเนื่องกัน	0.033	0.038	0.043	0.047	0.053	0.055	0.033
โมเมนต์บวกที่กึ่งกลางช่วง	0.050	0.057	0.064	0.072	0.080	0.083	0.050

ความหนาของพื้น คสล. : ต้องไม่น้อยกว่า 8 ซม. หรือ 1/ 180 ของเส้นรอบรูปของแผ่นพื้นนั้น

แรงเฉือน : แรงเฉือนในแผ่นพื้น คำนวณโดยสมมุติว่าน้ำหนักแผ่บนแผ่นพื้น (W_U) ถูกแบ่งไปยังที่รองรับโดยอาศัยเส้นที่ลาก 45° จากมุมทั้งสี่ตัดกับเส้นมีเดียนของช่วงพื้นที่ขนานกับด้านยาว ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้น น้ำหนักทั้งหมดบนด้านสั้น AD และ BC จะประกอบด้วยน้ำหนักรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ $\frac{W_U S}{2}$ กก./ม. นั่นคือ

แรงเฉือนทั้งหมดที่กระทำบนด้านสั้น AD และ BC = $\frac{1}{2}\frac{W_U S}{2}S = \frac{W_u S^2}{4}$ กก.

ทำนองเดียวกัน น้ำหนักทั้งหมดบนด้านยาว AB และ DC จะประกอบด้วยน้ำหนักรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ $\frac{W_U S}{2}$ กก./ม. ฉะนั้น แรงเฉือนทั้งหมดที่กระทำบนด้านยาว AB และ DC = $\frac{W_U S^2}{2}\left(\frac{2-m}{m}\right)$ กก. ในเมื่อ m = S / L



รูปที่ 2.3 การแบ่งน้ำหนักบรรทุกจากแผ่นพื้นลงคานที่รองรับ

การถ่ายน้ำหนักให้กับคานที่รองรับ : น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดจากแผ่นพื้นจะแบ่งไปลงบนคานที่รองรับโดยใช้ข้อสมมุติเช่นเดียวกับการหาแรงเฉือนข้างต้น ซึ่งจะหาได้เป็นน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอเท่าที่กระทำบนคานด้านสั้นและด้านยาว ดังนี้

น้ำหนักแผ่สม่ำเสมอบนคานด้านสั้น AD , BC = $\frac{W_U S}{3}$ กก./ม. (2.3.2)

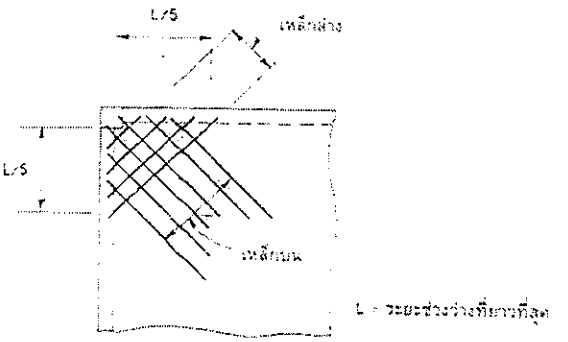
น้ำหนักแผ่สม่ำเสมอบนคานด้านยาว AB , DC = $\frac{W_U S}{3}\left(\frac{3-m^2}{2}\right)$ กก./ม. (2.3.3)

ค่าโมเมนต์ในคานที่รองรับ ให้คำนวณจากน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอข้างต้น รวมกับน้ำหนักของคานเอง และน้ำหนักบรรทุกอื่นบนคาน (ถ้ามี)

การเสริมเหล็ก : เหล็กเสริมเอกในแต่ละแถบของแผ่นพื้นมีทั้งเหล็กบนและเหล็กล่าง เหล็กล่างจะเสริมที่บริเวณกลางช่วงของแผ่นพื้นเนื่องจากต้องรับโมเมนต์บวก ส่วนเหล็กบนจะเสริมบริเวณขอบที่รองรับของแผ่นพื้นเนื่องจากต้องรับโมเมนต์ลบ อย่างไรก็ดี ที่บริเวณกลางช่วงพื้นจะจัดเหล็กเสริมที่ขนานกับด้านสั้นให้อยู่ที่ด้านล่างสุด และตรงขอบที่รองรับจะจัดให้อยู่ด้านบนสุด เพราะต้องรับน้ำหนักหรือโมเมนต์ดัดมากกว่าเหล็กเสริมที่ขนานกับด้านยาว

ตำแหน่งที่จะหยุดหรือดัดเหล็กที่รับโมเมนต์บวกหรือโมเมนต์ลบ ซึ่งปกติจะพิจารณาดัดเหล็กล่างจำนวนสองในสามของเหล็กที่รับโมเมนต์บวกทั้งหมดขึ้นไปเป็นเหล็กบนเพื่อให้รับโมเมนต์ลบแล้วปล่อยเลยเข้าไปในที่รองรับ ผ่านจุดดัดกลับของโมเมนต์ลบ แต่หากปริมาณของเหล็กที่ดัดขึ้นไปไม่เพียงพอที่จะต้านทานโมเมนต์ลบที่ต้องการ ให้ใส่เหล็กเสริมพิเศษเพิ่มขึ้น ส่วนเหล็กล่างที่เหลือ (จำนวนหนึ่งในสาม) ให้ปล่อยเลยเข้าไปในที่รองรับเป็นระยะไม่น้อยกว่า 15 ซม. จากขอบที่รองรับ

อนึ่ง เหล็กเสริมทั้งสองทางต้องวางเรียงห่างกันไม่เกิน 3 เท่าของความหนาของแผ่นพื้น และไม่เกิน 45 ซม. ทั้งนี้ต้องมีอัตราส่วนของเหล็กเสริมในแต่ละทิศทางไม่น้อยกว่าอัตราส่วนของเหล็กต้านการยืดหดตัวที่ระบุไว้



รูปที่ 2.4 เหล็กเสริมพิเศษที่มุมนอกของแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทาง

สำหรับที่มุมนอกของแผ่นพื้น (exterior corner) ต้องเสริมเหล็กพิเศษทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อกันรอยร้าวในแนวทแยงมุมที่เกิดจากโมเมนต์บิด โดยเรียงเหล็กเสริมพิเศษนี้ออกไปจากมุมในแต่ละทิศทางเป็นระยะหนึ่งในห้าของความยาวของด้านยาว ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเหล็กเสริมพิเศษที่ด้านบนจะวางเรียงขนานกับแนวทแยงจากมุมนั้น และเหล็กเสริมพิเศษที่ด้านล่างจะวางเรียงตั้งฉากกับเหล็กเสริมพิเศษที่ด้านบน อย่างไรก็ดี เพื่อความสะดวกในการก่อสร้างอาจเสริมเหล็กพิเศษสอง

ทางในแนวที่ขนานกับด้านสั้นและด้านยาวของแผ่นพื้นก็ได้ ทั้งนี้ปริมาณของเหล็กเสริมพิเศษที่มุมนอกที่ต้องการมีค่าเท่ากับปริมาณที่ต้องการสำหรับโมเมนต์บวกสูงสุดในแผ่นพื้นช่วงนั้น

2.4 สรุปการออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทางโดยวิธีกำลัง

ขั้นตอนที่ 1 สิ่งที่ต้องรู้ก่อนการออกแบบ

- ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต f_c'
- ค่ากำลังจุดครากของเหล็กเสริม f_y
- น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

ขั้นตอนที่ 2

- หาความหนาของแผ่นพื้น
- หาโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้วให้พิจารณาแผ่นพื้นกว้าง 1 เมตร ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกคงที่ของแผ่นพื้น = ความหนาของแผ่นพื้น x 2400 x 1 หน่วยเป็น kg/m
- หาค่าน้ำหนักบรรทุก W_U = 1.4 DL + 1.7 LL
- หาค่าโมเมนต์ดัดที่แผ่นพื้นต้องรับ $M_U = CW_US^2$ ค่า C

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบความหนาของแผ่นพื้นที่ใช้

- หาค่า $\rho_{max} = 0.5\rho_b$

$$\rho_b = 0.85\beta 1\frac{f_c'}{f_y}\frac{6120}{6120+f_y}$$

$$\beta_1 \begin{cases} = 0.85 & f_c' \leq 280 \text{ ksc} \\ = 0.85 - \dfrac{0.05(fc'-280)}{70} & 280 < f_c' < 560 \text{ ksc} \\ = 0.65 & f_c' \geq 560 \text{ ksc} \end{cases}$$

- หาค่าR_U $= \rho_{max} f_y\left[1-\dfrac{0.59\rho_{max}f_y}{fc'}\right]$

ดังนั้นต้องการความลึกประสิทธิผล

$$d = \sqrt{\frac{M_U}{\phi R_U b}}$$

เพราะฉะนั้นความลึกประสิทธิผลจริงของแผ่น = ความหนาของแผ่นพื้น $-2.5-d_2$ ถ้า $>d$ ที่ต้องการใช้ได้

ขั้นตอนที่ 4 หาปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการต่อความกว้าง 1 เมตร

- หาค่า $a = d - \sqrt{d^2 - \frac{2.353 M_U}{\phi fc' b}}$
- หาค่า $A_S = \frac{M_U}{\phi f_y \left(d - \frac{a}{2}\right)}$
- หาค่า $A_{S(min)} = 0.002bt$
- หาค่า $M_{S\,แถบกลาง}$ = ครึ่งหนึ่งของด้านสั้นและด้านยาว
- หาค่า $A_{S\,แถบกลาง} = A_S \times M_{S\,แถบกลาง}$
- หาจำนวนเหล็กที่ต้องใช้ = $\frac{A_{S\,แถบกลาง}}{\text{พื้นที่หน้าตัดเหล็กที่ใช้}}$
- หาค่า $A_{S\,ครึ่งแถบเสา} = 0.5 \times 2/3 \times A_{S\,แถบกลาง}$
- หาจำนวนเหล็กที่ต้องใช้ = $\frac{A_{S\,แถบกลาง}}{\text{พื้นที่หน้าตัดเหล็กที่ใช้}}$

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบแรงเฉือน

- หาค่าแรงเฉือนสูงสุด
- หาค่าแรงเฉือนประลัยที่หน้าตัดวิกฤต v_u (ที่ระยะเท่ากับ d จากขอบที่รองรับ)
- หาค่า $\phi v_c = \phi 0.53 \sqrt{fc' bd}$ เมื่อ $\phi = 0.85$

ถ้า $v_u < \phi v_c$ ใช้ได้

2.5 ข้อกำหนดมาตรฐานของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

2.5.1 ความหนาน้อยที่สุดของแผ่นพื้นสองทาง

มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007 – 34 และ ACI 318 – 63 กำหนดให้ความหนาที่น้อยที่สุดของแผ่นพื้นสองทางเพียง 2 ข้อคือ

1) ความหนาของแผ่นพื้นต้องไม่น้อยกว่า 8 ซม.

2) ความหนาของแผ่นพื้นต้องไม่น้อยกว่า 1/180 ของเส้นรอบรูปของแผ่นพื้น

สำหรับมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008 – 38 มีข้อกำหนดที่ 4205 (ค) 3 กำหนดให้แผ่นพื้นสองทางมีความหนาน้อยที่สุดดังนี้

4205 (ค) 3. ความหนาต่ำสุดของแผ่นพื้นที่มีคานหรือไม่มีคานพาดช่วงระหว่างที่รองรับทุกด้านและมีอัตราส่วนของด้านยาวต่อด้านสั้นไม่เกิน 2 ให้เป็นไปตามนี้

$$h = \frac{\ell_n\left(0.8 + \frac{f_y}{14{,}000}\right)}{36 + s\beta\left[\alpha_m - 0.12\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]} \qquad (42-11)$$

แต่ต้องไม่น้อยกว่า

$$h = \frac{\ell_n\left(0.8 + \frac{f_y}{14{,}000}\right)}{36 + 9\beta} \qquad (42-12)$$

และไม่จำเป็นต้องมากกว่า

$$h = \frac{\ell_n\left(0.8 + \frac{f_y}{14{,}000}\right)}{36} \qquad (42-13)$$

ค่าที่ได้จากสมการ (42 – 11) สมการ (42 – 12) หรือสมการ (42 – 13) ต้องปรับค่าตามข้อกำหนดข้อ 4205 (ค) 4 และข้อ 4205 (ค) 5 แต่ไม่ว่ากรณีใดก็ตามความหนาต้องไม่น้อยกว่า

3.1 สำหรับ $\alpha_m < 2.0$ _____ 12.5 ซม.

3.2 สำหรับ $\alpha_m > 2.0$ _____ 9.0 ซม.

และข้อกำหนดที่ 5205 (ค) 6 อนุญาตให้ใช้ความหนาน้อยกว่าที่กำหนดไว้ ถ้าคำนวณหาระยะแอ่นของแผ่นพื้นแล้วไม่เกินตารางที่ 4205 (ข)

ตาราง 4205 (ข) ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะแอ่นที่คำนวณได้

ชนิดขององค์อาคาร	ระยะแอ่นที่พิจารณา	พิกัดระยะแอ่น
หลังคาราบซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ระยะแอ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร L	$\frac{\ell^*}{180}$
พื้นซึ่งไม่รองรับหรือไม่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ระยะแอ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร L	$\frac{\ell}{360}$
หลังคาหรือพื้นซึ่งรองรับหรือติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างซึ่งคาดว่าจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแอ่นตัวมาก	ส่วนของระยะแอ่นทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังจากการยึดติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (ผลรวมของระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกค้างทั้งหมดและระยะแอ่นที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น) ≠	$\frac{\ell^+}{480}$
หลังคาหรือพื้นซึ่งรองรับหรือที่ติดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งคาดว่าจะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการโก่งตัวมาก		$\frac{\ell^!}{240}$

ตารางที่ 2.2 ค่าสูงสุดที่ยอมให้ของระยะแอ่นที่คำนวณได้

* พิกัดนี้ไม่ได้มีจุดมุ่งหมายในการป้องกันการเกิดแอ่งน้ำเนื่องจากการแอ่นตัว ควรตรวจสอบการเกิดแอ่งน้ำเนื่องจากการแอ่นตัวด้วย วิธีการคำนวณหาระยะแอ่นที่เหมาะสม โดยให้รวมถึงระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำในแอ่ง และผลของน้ำหนักบรรทุกค้างทั้งหมดที่กระทำเป็นเวลานาน ความโค้งหลังเต่า ความคลาดเคลื่อนในการก่อสร้าง และความเชื่อถือได้ของข้อกำหนดสำหรับการระบายน้ำ

\+ พิกัดนี้อาจยอมให้เกินได้ถ้ามีมาตรการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อชิ้นส่วนที่รองรับหรือยึดติดกันอย่างพอเพียง

≠ ระยะแอ่นที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ต้องคำนวณให้สอดคล้องกับข้อ 4205 (ข) 5 แต่อาจจะลดได้ด้วยค่าระยะแอ่นที่คำนวณได้ก่อนการยึดติดของชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ค่านี้ต้องคำนวณบนพื้นฐานของข้อมูลทางวิศวกรรมที่ยอมรับ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณลักษณะของการแอ่นตัวตามเวลาขององค์อาคารที่คล้ายคลึงกับองค์อาคารที่พิจารณา

∫ แต่ต้องไม่มากกว่าความคลาดเคลื่อนที่ให้ไว้สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง พิกัดนี้อาจยอมให้เกินได้ถ้ามีการเผื่อความโค้งหลังเต่าโดยที่ระยะแอ่นทั้งหมดลบด้วยความโค้งหลังเต่าแล้วต้องไม่เกินค่าพิกัดในตาราง

2.5.2 ปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยที่สุด

ปริมาณเหล็กเสริมที่น้อยสุดในแผ่นพื้นสองทางมีข้อกำหนดดังนี้

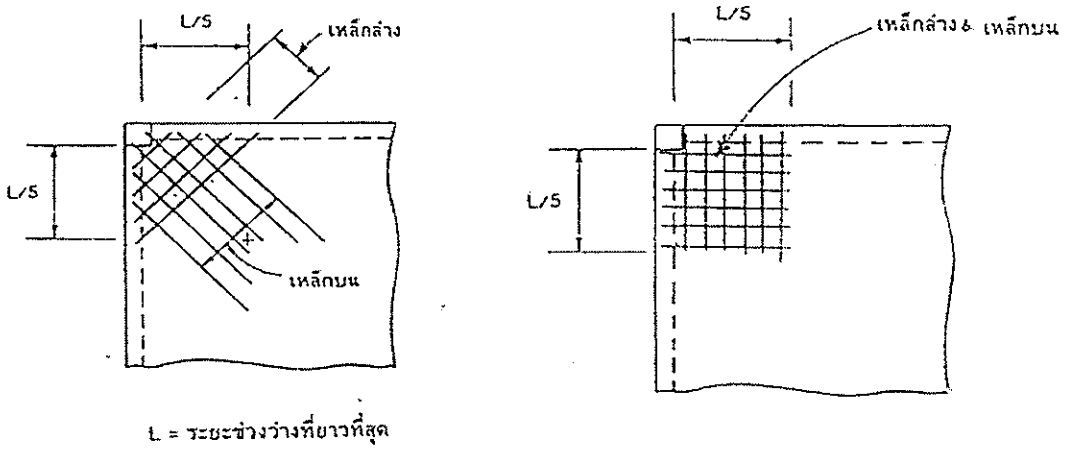
1) เหล็กเสริมในแผ่นพื้นสองทางต้องเรียงเหล็กระยะห่างไม่เกิน 3 เท่าของความหนาของแผ่นพื้น และห่างไม่มากกว่า 30 ซม. อนึ่งมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008 – 38 กำหนดระยะเรียงเหล็กห่างมากขึ้นเป็นไม่เกิน 5 เท่าของความหนาของแผ่นพื้น และห่างไม่มากกว่า 40 ซม.

2) ปริมาณของเหล็กเสริมต้องมีอัตราส่วนเนื้อที่ของเหล็กต่อหน้าตัดคอนกรีตทั้งหมดไม่น้อยกว่าเหล็กเสริมด้านทางการยืดห่ด เนื่องจากอุณหภูมิดังนี้

แผ่นพื้นที่เสริมด้วยเหล็กเส้นกลมชั้นคุณภาพ SR 24	.....0.0025
แผ่นพื้นที่เสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD 30	.....0.0020
แผ่นพื้นที่เสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD 40	.....0.0018

2.5.3 เหล็กเสริมพิเศษรับแรงบิด

เพื่อป้องกันรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่มุมริมนอกของแผ่นพื้น (Exterior Corner) มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007 – 37 ข้อ 7102 (ข) จึงกำหนดให้เสริมเหล็กพิเศษทั้งด้านบนและด้านล่างที่มุมริมนอกของแผ่นพื้น โดยเหล็กเสริมพิเศษที่ผิวบนให้ขนานกับแนวทแยงจากมุมนั้น ส่วนเหล็กเสริมพิเศษที่ผิวล่างให้ตั้งฉากกับแนวทแยงมุมนั้น (ดังรูปที่ 2.5) โดยให้เรียงเหล็กเป็นระยะทาง 1/5 ของด้านยาวของแผ่นพื้น อนึ่งเพื่อความสะดวกในการก่อสร้าง อาจเสริมเหล็กพิเศษที่ผิวบนและผิวล่างดังกล่าวเป็นตระแกรงให้ขนานกับแนวคานก็ได้ โดยปริมาณเหล็กที่เสริมพิเศษนี้ให้เท่ากับปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการสำหรับโมเมนต์ดัดบวกสูงสุดของแผ่นพื้นนั้น



(ก) ข้อกำหนดตาม ว.ส.ท. 1007 – 34 (ข) แนวทางปฏิบัติ

รูปที่ 2.5 เหล็กเสริมพิเศษที่มุมริมนอกของแผ่นพื้นสองทาง