บทที่ 3

การออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กโดยอาศัยผลการวิเคราะห์จากทฤษฎียีลด์ไลน์

3.1 กล่าวนำ

หลักการของทฤษฎียีลด์ไลน์ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำทฤษฎียีลด์ไลน์มาประยุกต์ในการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

เป็นที่ยอมรับว่า ประเทศเดนมาร์กและสวีเดนมีประสบการณ์เกี่ยวกับการออกแบบแผ่นพื้นโดยทฤษฎียีลด์ไลน์มากที่สุด และทฤษฎีนี้ยอมรับโดยมาตรฐานการออกแบบของประเทศทั้งสองมาเป็นเวลานาน มาตรฐานการออกแบบของอังกฤษเริ่มใช้ทฤษฎียีลด์ไลน์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2500 และในปัจจุบันมาตรฐานการออกแบบของอังกฤษ[17] กล่าวถึงการหาอัตราส่วนระหว่างแรงดัดที่ขอบของที่รองรับกับแรงดัดในช่วงกลางแผ่นพื้น ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับการหาโดยทฤษฎีอีลาสติก ค่าที่แนะนำให้ใช้อยู่ระหว่าง 1.0 และ 1.5 มาตรฐานการออกแบบ ACI 318-1983[18] กล่าวว่า การออกแบบระบบแผ่นพื้นจะใช้วิธีใดก็ได้ถ้าแสดงให้เห็นว่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบมีค่าอย่างน้อยเท่ากับกำลังที่ต้องการซึ่งถือเป็นการยอมรับทฤษฎียีลด์ไลน์โดยปริยายนั่นเอง

3.2 กำลังและสภาพการใช้งาน

ปัญหาการออกแบบแผ่นพื้นโดยทฤษฎียีลด์ไลน์ในแง่ของสภาพการใช้งานคือ ทฤษฎีนี้สามารถวิเคราะห์แรงดัดประลัยของแผ่นพื้นที่จะนำไปออกแบบได้ แต่ไม่สามารถหาระยะโก่งและตรวจสอบการแตกร้าวของแผ่นพื้น การแก้ปัญหาเกี่ยวกับสภาพการใช้งานดังกล่าวจึงต้องทำโดยการออกแบบตามข้อกำหนดที่มาตรฐานการออกแบบได้บัญญัติไว้

3.2.1 การจัดน้ำหนักบรรทุกและแรงดัดต้านทาน

เมื่อทราบขนาด รูปทรงทางเรขาคณิต สภาวะเงื่อนไขที่ขอบที่รองรับและน้ำหนักใช้งานแล้วจะทำการวิเคราะห์แรงดัดต้านทาน

น้ำหนักในแนวดิ่งที่จะนำไปออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบ ACI 1983[18] คือ

$$W_u = 1.4\,D + 1.7\,L \qquad (3.1)$$

เมื่อ D คือน้ำหนักถาวร (Dead Load) และ L คือน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

การหาปริมาณเหล็กเสริมต้านทานแรงดัดประลัย (M_u) ต่อหน่วยความกว้างของแผ่นพื้น ใช้สมการออกแบบเหล็กเสริมจากเอกสารอ้างอิง[19]

$$M_u = \gamma\, A_s f_y (d - 0.59\, A_s \frac{f_y}{f'_c}) \qquad (3.2)$$

เมื่อ γ คือตัวลดค่ากำลังรับแรงดัดจากมาตรฐานออกแบบ ACI 1983[18] มีค่าเท่ากับ 0.9 ; A_s คือเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึงต่อหน่วยความกว้าง ; f_y คือกำลังที่จุดคลากของเหล็กเสริม ; f'_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน และ d คือความลึกประสิทธิผลจากผิวรับแรงอัดถึงเหล็กเสริมรับแรงดึง

สำหรับปัญหาการโก่งของแผ่นพื้น ถ้าไม่มีการคำนวณตรวจสอบในระหว่างการออกแบบ ให้ใช้ความหนาของแผ่นพื้นอย่างน้อยเท่ากับที่มาตรฐานการออกแบบ ACI 1983 ระบุไว้

3.2.2 การเสริมเหล็ก

ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดเท่ากับเหล็กอุณหภูมิและระยะห่างมากสุดของเหล็กเสริมไม่เกินค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐานการออกแบบ ACI 1983 การจัดเหล็กเสริมตามทฤษฎียีลด์ไลน์ อาจจัดให้มีระยะห่างเท่ากันตลอดในการรับแรงดัดแต่ละทิศทาง แต่อาจแตกต่างกันสำหรับเหล็กเสริมในสองทิศทาง หรืออาจจะแตกต่างกันในกรณีเหล็กบนและเหล็กล่างในทิศทางเดียวกันได้

สำหรับปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดที่ยังคงทำให้แผ่นพื้นมีความเหนียวพอ เพียงนั้น CEB-FIP[20] กำหนดการออกแบบโดยทฤษฎียีลด์ไลน์ไว้ว่า ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงสูงสุดจะต้องไม่เกินหนึ่งในสี่ของปริมาณาเหล็กเสริม ที่เมื่อหน้าตัดรับแรงดัดแล้ว เหล็กเสริมถึงจุดคลากขณะที่คอนกรีตรับแรงอัดเกิดความเค้น 0.0035 และจากการรวบรวมผลงานวิจัยต่าง ๆ ให้ใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงสูงสุดในการออกแบบโดยทฤษฎียีลด์ไลน์ไม่เกิน 0.4 Pb โดยที่ Pb คือปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุลย์ของการประลัย[19]

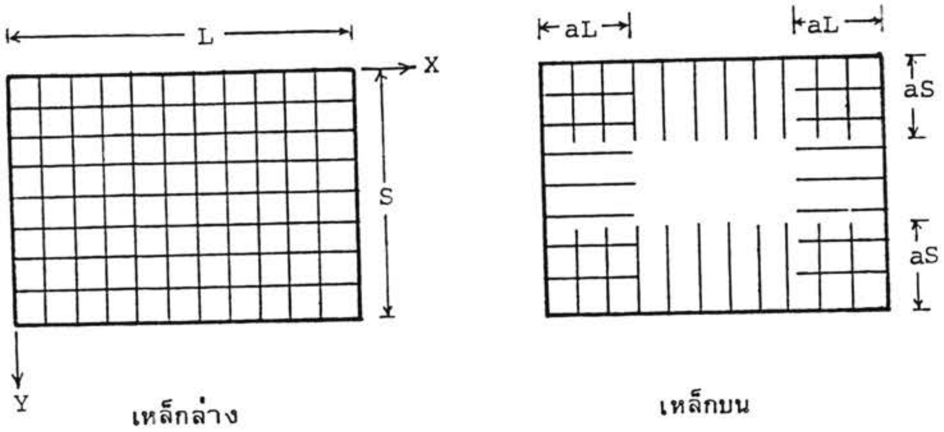
ในกรณีแผ่นพื้นมีช่องเปิด การเสริมเหล็กพิเศษรอบช่องเปิดที่ผิวบนและผิวล่างของแผ่นพื้น ใช้ปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับเหล็กที่ถูกตัดหายไปในช่องเปิด[18]

3.3 <u>ความยาวของเหล็กเสริมรับแรงตัดชนิดลบ</u>

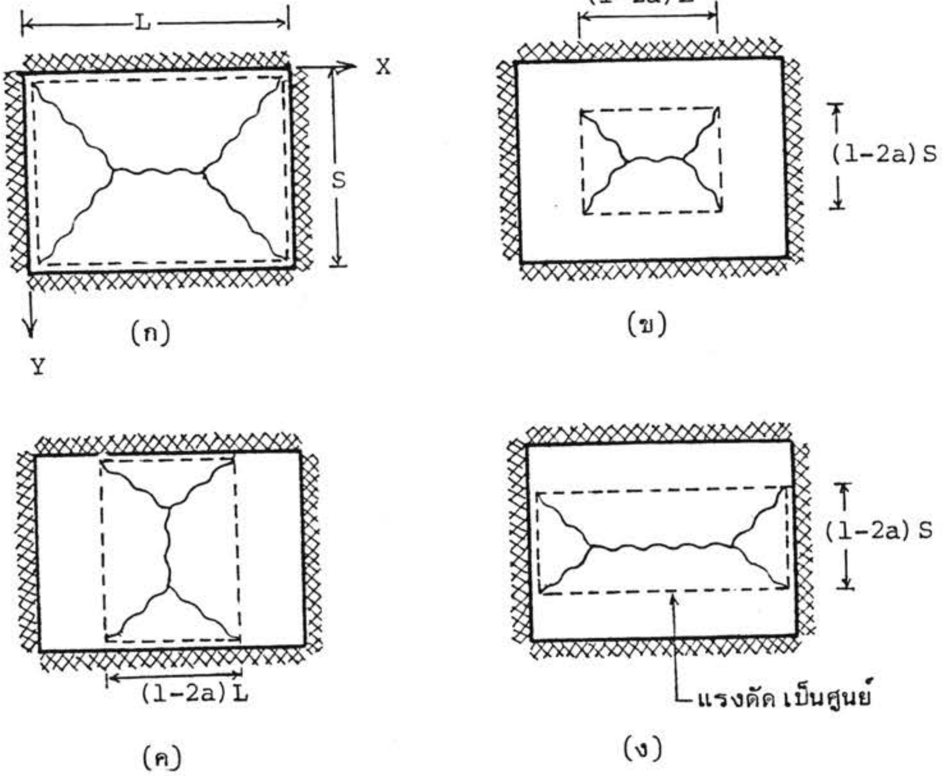
ในทางทฤษฎีจะสมมุติว่า การเสริมเหล็กบนและเหล็กล่างกระทำสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ของแผ่นพื้น แต่ในทางปฏิบัติเพื่อให้ประหยัดเหล็กแล้ว เกือบทุกกรณีจะมีการหยุดเหล็กบนห่างจากที่รองรับ ซึ่งในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการหาความยาวของเหล็กบน เพื่อรับแรงตัดชนิดลบของที่รองรับในแผ่นพื้นสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองทาง รับน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอ โดยยึดถือหลักว่า ความยาวต่ำสุดของเหล็กบนจะต้องไม่ทำให้เกิดรอยร้าวที่ผิวบนของแผ่นพื้น ณ ตำแหน่งที่หยุดเหล็ก

3.3.1 แผ่นพื้นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีที่รองรับทั้งสี่ด้าน

พิจารณาการเสริมเหล็กในรูปที่ 3.1 ความยาวของเหล็กบนเป็นอัตราส่วนของด้านซึ่งถูกกำหนดโดยค่า a รูปที่ 3.2 (ก) แสดงรูปแบบยีลด์ไลน์พื้นฐานของแผ่นพื้นที่ใช้ในการออกแบบ รูปที่ 3.2 (ข), (ค) และ (ง) แสดงรูปแบบยีลด์ไลน์ที่อาจเป็นไปได้เนื่องจากการหยุดเหล็กบน ในส่วนของแผ่นพื้นที่ไม่มีเหล็กบน อาจถือว่าแรงดัดต้านทานมีค่าเป็นศูนย์คือไม่คิดกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ดังนั้นในรูปที่ 3.2 (ข), (ค) และ (ง) ซึ่งรูปแบบยีลด์ไลน์เป็นส่วนภายในของแผ่นพื้นจะมีแนวที่หยุดเหล็กบนเป็นที่รองรับแบบง่าย ไม่สามารถรับแรงดัดชนิดลบได้ เมื่อเป็นเช่นนี้แล้วความยาวต่ำสุดของเหล็กบนจะต้องเพียงพอที่จะทำให้แรงดัดประลัยในรูปแบบยีลด์ไลน์ รูปที่ 3.2 (ข), (ค) และ (ง) มีค่าสูงสุดไม่เกินแรงดัดประลัยที่หาได้จากรูปแบบยีลด์ไลน์ รูปที่ 3.2 (ก)



รูปที่ 3.1 เหล็กเสริมในแผ่นพื้นขอบยึดแน่นสี่ด้าน



รูปที่ 3.2 รูปแบบยีลด์ไลน์เนื่องจากการหยุดเหล็กบนของแผ่นพื้นขอบยึดแน่นสี่ด้าน

การวิเคราะห์ตรวจสอบแรงตัดประลัยเมื่อหยุดเหล็กบน เช่น ในรูปแบบยีลด์ไลน์ รูปที่ 3.2 (ข) ทำโดยแทนค่า L ด้วย (1-2a)L แทนค่า S ด้วย (1-2a)S และล้อมรอบด้วยที่รองรับแบบง่าย วิเคราะห์แรงตัดประลัยออกมาแล้วต้องมีค่าไม่เกินแรงตัดประลัยในรูปแบบยีลด์ไลน์ รูปที่ 3.2 (ก) เงื่อนไขข้อนี้ทำให้หาค่า a ซึ่งเป็นตัวกำหนดความยาวเหล็กบนได้

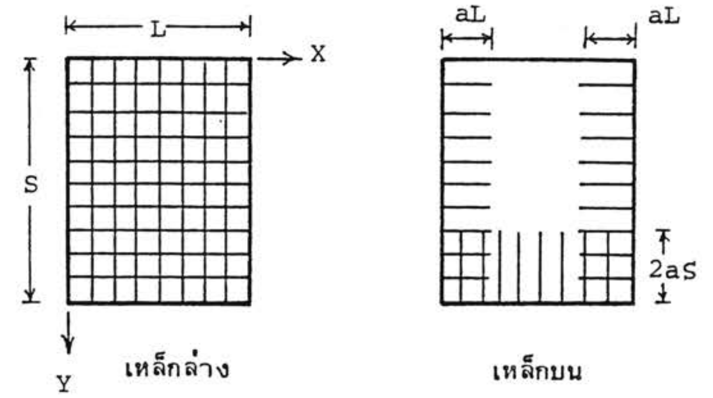
3.3.2 แผ่นพื้นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีที่รองรับสามด้านและขอบอิสระหนึ่งด้าน

ขอบยึดแน่นของแผ่นพื้นมีการเสริมเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.3 การใช้เหล็กบนในทิศทาง Y ยาวเป็นสองเท่าของทิศทาง X ก็เพื่อให้สอดคล้องกับทฤษฎีอีลาสติก ในการวิเคราะห์หาความยาวต่ำสุดของเหล็กบนใช้หลักการเดียวกันกับแผ่นพื้นทีมีที่รองรับทั้งสี่ด้าน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3.1 คือใช้การเปรียบเทียบน้ำหนักประลัยที่หาได้จากรูปแบบยีลด์ไลน์ รูป 3.4 (ข), (ค) และ (ง) กับค่าที่หาได้จากรูปแบบยีลด์ไลน์ รูปที่ 3.4 (ก)

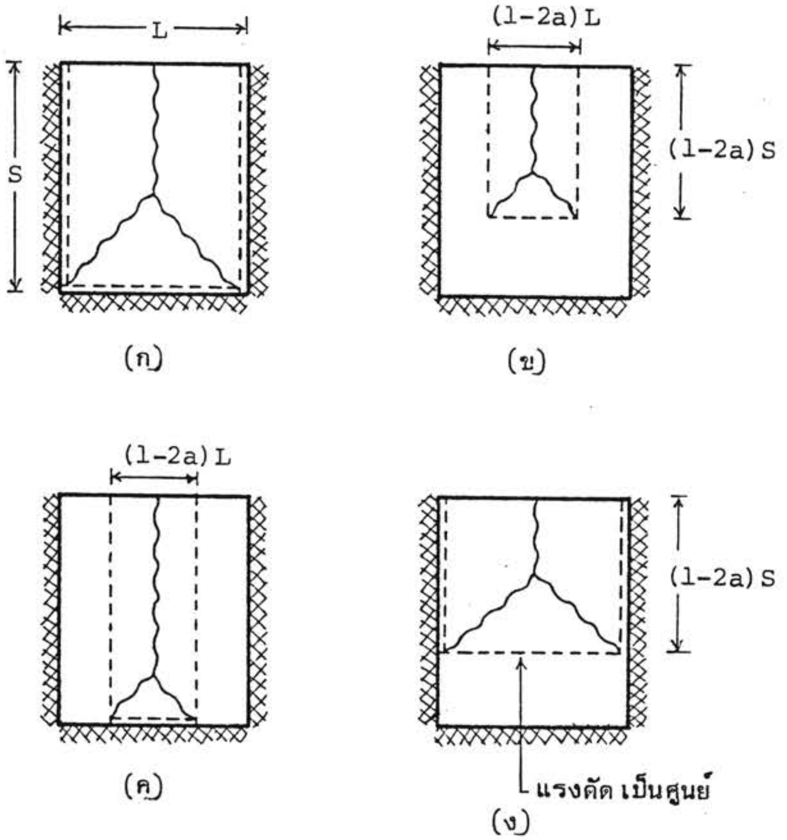
ส่วนในกรณีที่แผ่นพื้นมีที่รองรับแบบง่ายอยู่ด้านใด ด้านนั้นจะไม่มีเหล็กบน (ค่า a เป็นศูนย์)

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์หาความยาวของเหล็กบนตามกรรมวิธีที่กล่าวมาได้แล้ว จะต้องเพิ่มความยาวขึ้นอีกเท่ากับ 12 เท่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม หรือระยะความลึกประสิทธิผล โดยเลือกใช้ค่าที่มากกว่า ตามที่มาตรฐานการออกแบบ ACI 1983 ระบุไว้

ตัวอย่างการออกแบบแผ่นพื้นรูปร่างต่าง ๆ สามารถติดตามจากเอกสารอ้างอิง 21



รูปที่ 3.3 เหล็กเสริมในแผ่นพื้นขอบอิสระหนึ่งด้านยึดแน่นสามด้าน



รูปที่ 3.4 รูปแบบยีลด์ไลน์เนื่องจากการหยุดเหล็กบนของแผ่นพื้นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
ขอบอิสระหนึ่งด้านยึดแน่นสามด้าน