



ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีต เสริม เหล็กโดยทฤษฎีอีลด์ไลน์ มาประยุกต์กับไมโครคอมพิวเตอร์ ทฤษฎีอีลด์ไลน์สามารถใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบแผ่นพื้นที่มีรูปร่างและสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ ได้กว้างขวาง แต่ในการวิจัยนี้จะมุ่งพิจารณาแผ่นพื้นที่มีลักษณะการใช้งานพบเห็นอยู่บ่อย ๆ

4.2 สมมุติฐานในการวิจัย

1. ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอีลาสติก (Elastic deformation) ของแผ่นพื้น ดังนั้นชิ้นส่วนที่ถูกแบบโดยอีลด์ไลน์จะมีลักษณะ เป็นพื้นแข็งเรียบ (Plane rigid segments)
2. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นพื้น เลยจนกว่าจะเกิดการวิบัติ เป็นชิ้นส่วนอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการเคลื่อนที่น้อย ๆ ของชิ้นส่วน สามารถวัดเทียบจากรูปทรงเรขาคณิตเดิมที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง
3. ค่าแรงดัดคานทานบนอีลด์ไลน์ขึ้นอยู่กับรูปแบบทิศทางการวางตัวของอีลด์ไลน์ และให้ถือว่ามีความคงที่ในระหว่างการเคลื่อนที่น้อย ๆ ของการวิบัติ
4. ไม่คิดผลของแรงเฉือนที่เกิดขึ้น เนื่องจากน้ำหนักเป็นจุดหรือที่รองรับ เป็นเสา ดังนั้นแรงเฉือนทะลวงอาจทำให้แผ่นพื้นวิบัติภายใต้น้ำหนักมีค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์โดยทฤษฎีอีลด์ไลน์

4.3 ชนิดของแผ่นพื้นที่พิจารณา

ในการศึกษานี้จะพิจารณาแผ่นพื้นสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองทาง (Orthotropic Rectangular Slabs) รวม 7 ชนิด

ชนิดที่ 1 มีที่รองรับทั้งสี่ด้านรับน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอและไม่มีความสมมาตรในการรับแรงคดชนิดลบของที่รองรับ อันเป็นลักษณะของแผ่นพื้นที่พบเห็นในอาคารทั่ว ๆ ไป (แสดงในรูปที่ 4.1 (ก))

ชนิดที่ 2 มีที่รองรับสามด้าน ขอบอิสระหนึ่งด้านรับน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอภายในแผ่นพื้นและรับน้ำหนักแนวเส้นที่ขอบอิสระของแผ่นพื้น ไม่มีความสมมาตรในการรับแรงคดชนิดลบของที่รองรับ มักพบในแผ่นพื้นระเบียงของอาคาร โดยมีน้ำหนักกำแพงเป็นน้ำหนักแนวเส้น (แสดงในรูปที่ 4.1 (ข))

ชนิดที่ 3 มีที่รองรับสองด้านติดกัน ส่วนด้านที่เหลือเป็นขอบอิสระรับน้ำหนักเหมือนแผ่นพื้นชนิดที่ 2 กรณีนี้มักพบในแผ่นพื้นมุมระเบียงของอาคาร มีกำแพงสองด้านเป็นน้ำหนักแนวเส้น (แสดงในรูปที่ 4.1 (ค))

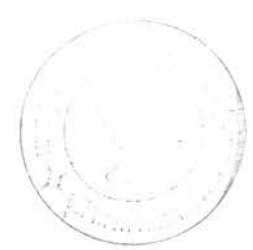
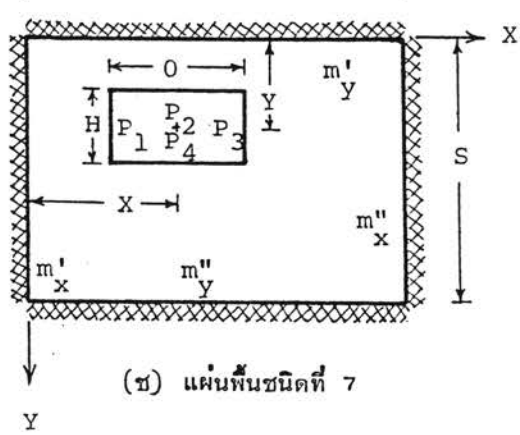
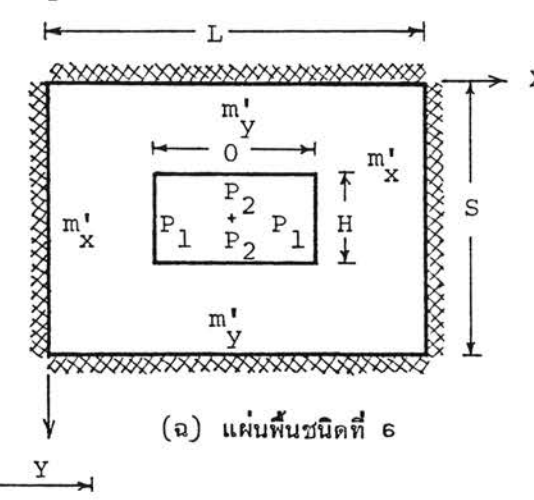
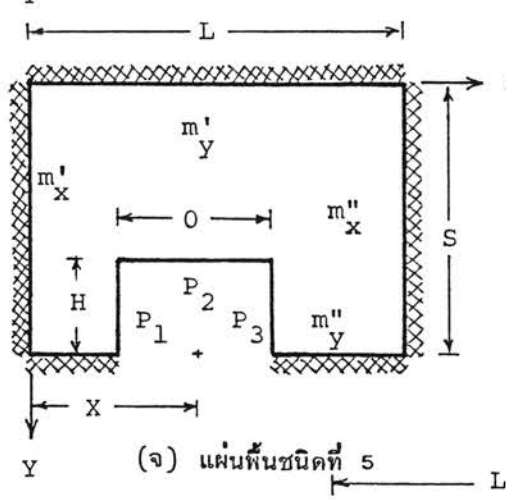
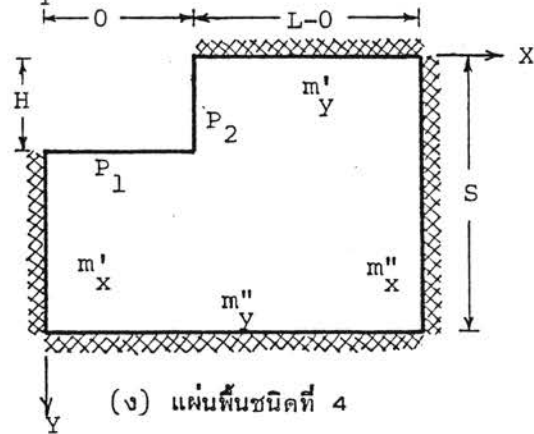
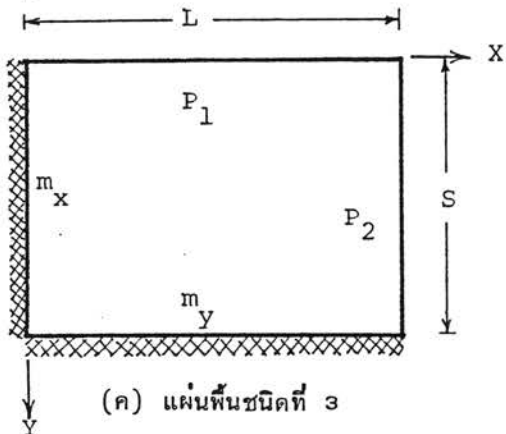
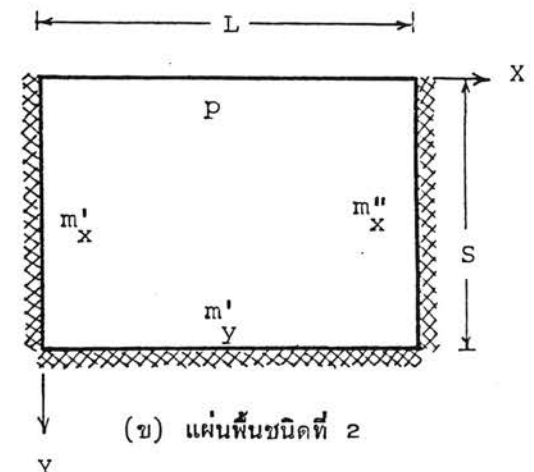
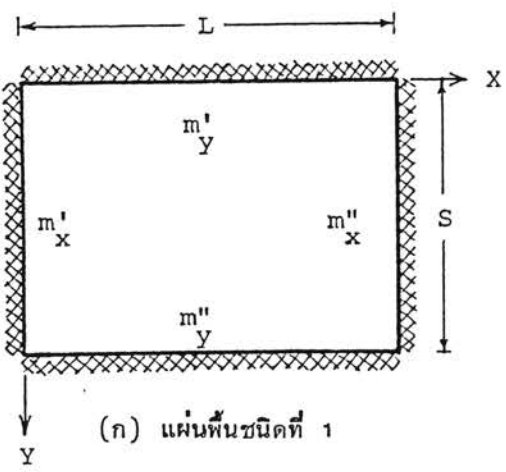
ชนิดที่ 4 มีที่รองรับทั้งสี่ด้าน มีช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใด ๆ ที่มุมของแผ่นพื้นรับน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอภายในแผ่นพื้นและรับน้ำหนักแนวเส้นที่ขอบของช่องเปิด ไม่มีความสมมาตรในการรับแรงคดชนิดลบของที่รองรับ มักพบในช่องเปิดสำหรับบรรได หรือแผ่นพื้นของโรงงาน (แสดงในรูปที่ 4.1 (ง))

ชนิดที่ 5 มีที่รองรับทั้งสี่ด้าน มีช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใด ๆ บนด้านสั้นหรือด้านยาวของแผ่นพื้น สภาพการใช้งานเหมือนแผ่นพื้นชนิดที่ 4 (แสดงในรูปที่ 4.1 (จ))

ชนิดที่ 6 มีที่รองรับทั้งสี่ด้าน มีช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใด ๆ อยู่ตรงกลางของแผ่นพื้น สภาพการใช้งานเหมือนแผ่นพื้นชนิดที่ 4 แต่มีความสมมาตรของการรับแรงคดชนิดลบของที่รองรับและการรับน้ำหนักแนวเส้นของช่องเปิดทั้งสองแกน (แสดงในรูปที่ 4.1 (ฉ))

ชนิดที่ 7 มีที่รองรับทั้งสี่ด้าน มีช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใด ๆ อยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ ภายในแผ่นพื้น สภาพการใช้งานเหมือนแผ่นพื้นชนิดที่ 4 (แสดงในรูปที่ 4.1 (ช))

โอกาสการเกิดอีลด์ไลน์รูปแบบต่าง ๆ ตลอดจนสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงคดด้านทานของแผ่นพื้นกับน้ำหนักประลัยนั้น ได้กล่าวถึงโดยละเอียดในภาคผนวก ก.



รูปที่ 4.1 แผ่นพื้นที่ทำการศึกษา

4.4 เทคนิคที่ใช้ในการศึกษา

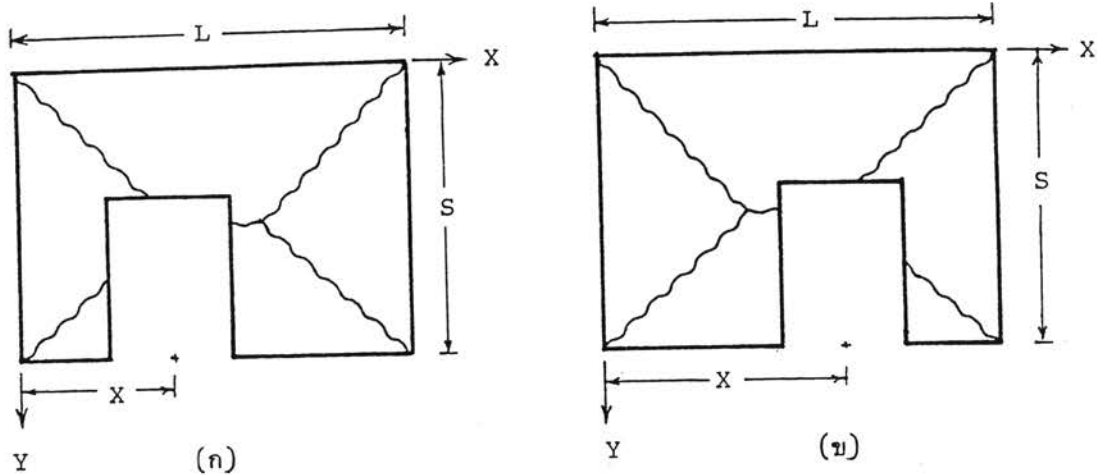
ในการวิเคราะห์หาแรงตัดประลัยในแผ่นพื้นโดยทฤษฎีอีลด์ไลน์นั้น เพื่อให้มั่นใจว่าแรงตัดประลัยที่วิเคราะห์ได้สามารถรับน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบได้ จะต้องพิจารณารูปแบบอีลด์ไลน์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ทุกกรณี ปัญหาที่ตามมาก็คือ เมื่อนำไปประยุกต์กับคอมพิวเตอร์ จะทำให้โปรแกรมมีความยาวมาก เป็นการสิ้นเปลืองหน่วยความจำของเครื่อง อีกทั้งกินเวลาในการคำนวณมากด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคต่าง ๆ เข้าช่วยในการลดหน่วยความจำที่จะต้องใช้และเวลาการทำงานของคอมพิวเตอร์

เทคนิคที่นำไปประยุกต์กับไมโครคอมพิวเตอร์แบ่งออกเป็น 4 ข้อด้วยกัน

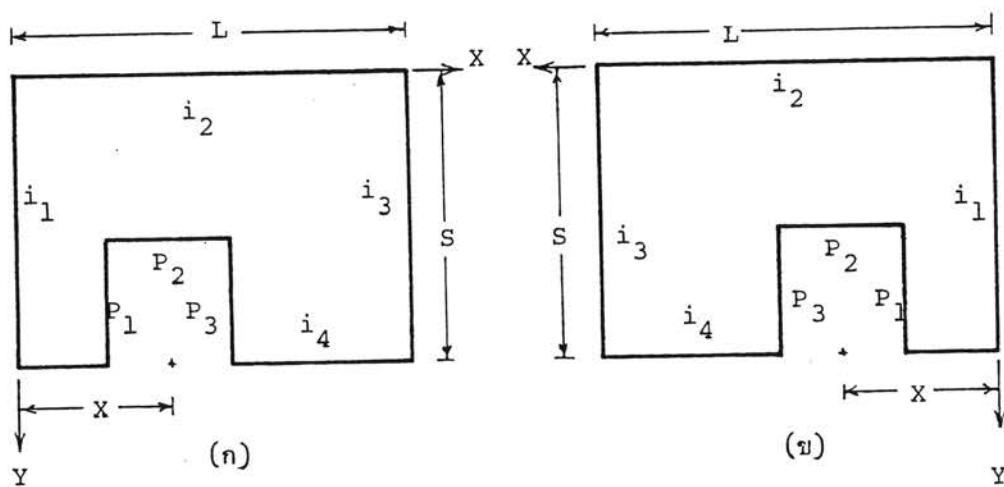
4.4.1 การกำหนดตำแหน่งของช่องเปิดเพื่อลดรูปแบบอีลด์ไลน์ใช้ในแผ่นพื้นชนิดที่ 5 และชนิดที่ 7

ในแผ่นพื้นชนิดที่ 5 มีช่องเปิดอยู่บนด้านของแผ่นพื้น พิจารณารูปที่ 4.2 ในกรณี X มีค่าใด ๆ จะเห็นว่ารูปแบบอีลด์ไลน์ (ก) และ (ข) จะเป็นเงาของกันและกัน ถ้ากำหนดให้ X มีค่าน้อยกว่าหรืออย่างมากเท่ากับครึ่งหนึ่งของ L แล้ว รูปแบบอีลด์ไลน์ 4.2(ข) จะ ให้น้ำหนักประลัยที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าที่ได้จากรูปแบบอีลด์ไลน์ 4.2 (ก) ดังนั้นสามารถตัดรูปแบบอีลด์ไลน์ 4.2 (ข) ออกไม่ต้องทำการวิเคราะห์ จากหลักการดังกล่าวสามารถลดรูปแบบอีลด์ไลน์ในแผ่นพื้นชนิดที่ 5 ลงได้ 5 รูปแบบ เหลือเพียง 11 รูปแบบ ดังแสดงในภาคผนวก ก. ในกรณีการใช้งานจริงค่า X มีค่ามากกว่าระยะครึ่งหนึ่งของ L การที่จะใช้รูปแบบอีลด์ไลน์ 4.2 (ก) ทำโดยใช้วิธีการเปลี่ยนข้อมูลจากรูป 4.3 (ข) มาเป็นข้อมูล 4.3 (ก) กล่าวคือ ในกรณีที่ $X > L/2$ ให้แทนค่า $i_1 = i_3, i_3 = i_1, P_1 = P_3, P_3 = P_1$ และ $X = L - X$ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ตามรูปแบบอีลด์ไลน์รูปที่ 4.2 (ก)

ในแผ่นพื้นชนิดที่ 7 มีช่องเปิดอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ ภายในแผ่นพื้น วิธีการลดรูปแบบใช้หลักการเดียวกับแผ่นพื้นชนิดที่ 5 แต่ในแผ่นพื้นชนิดที่ 7 นี้จะทำการแบ่งแผ่นพื้นออกเป็นสี่ส่วนและกำหนดให้จุดศูนย์กลางของช่องเปิดตกอยู่ในส่วนที่ใกล้จุดเริ่มต้นของพิภค (X,Y) กล่าวคือ X และ Y มีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของ L และ S ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) จากหลัก



รูปที่ 4.2 รูปแบบอีลด์ไลน์ที่เป็นเงาของกันและกันในแผ่นพื้นชนิดที่ 5



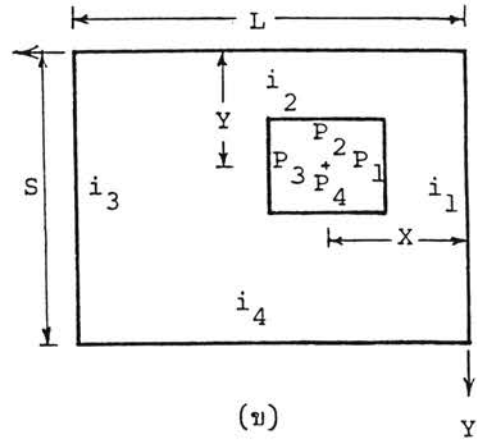
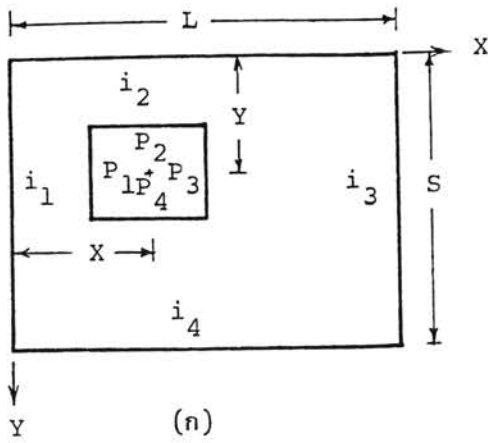
กรณี $X > L/2$

$$i_1 = i_3, i_3 = i_1$$

$$P_1 = P_3, P_3 = P_1$$

$$X = L - X$$

รูปที่ 4.3 แสดงช่องเปิดที่ตำแหน่งใด ๆ ของแผ่นพื้นชนิดที่ 5

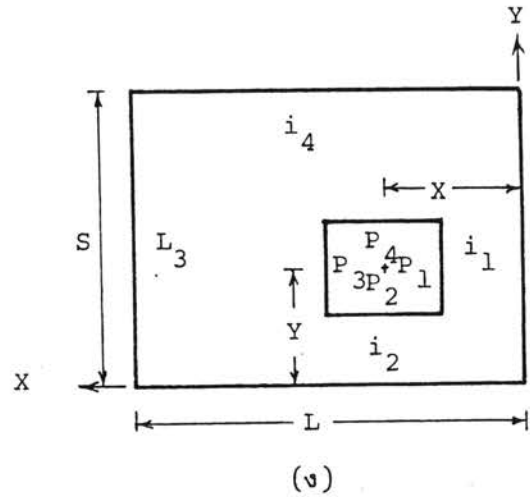
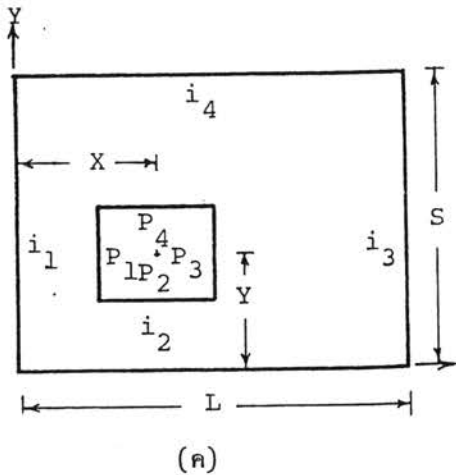


กรณี $X > L/2$

$$i_1 = i_3, i_3 = i_1$$

$$P_1 = P_3, P_3 = P_1$$

$$X = L - X$$



กรณี $Y > S/2$

$$i_2 = i_4, i_4 = i_2$$

$$P_2 = P_4, P_4 = P_2$$

$$Y = S - Y$$

กรณี $X > L/2$ และ $Y > S/2$

$$i_1 = i_3, i_2 = i_4$$

$$i_3 = i_1, i_4 = i_2$$

$$P_1 = P_3, P_2 = P_4$$

$$P_3 = P_1, P_4 = P_2$$

$$X = L - X, Y = S - Y$$

รูปที่ 4.4 แสดงช่องเปิดที่ค่าแห่งใด ๆ ของแผ่นพื้นชนิดที่ 7

การดังกล่าวนี้สามารถลดรูปแบบยิลด์ไลน์ในแผ่นพื้นชนิดที่ 7 ลงเหลือเพียง 16 รูปแบบ ดังแสดง
ในภาคผนวก ก (ประมาณหนึ่งในสี่ของรูปแบบยิลด์ไลน์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด) ในกรณีใช้งานจริง
ถ้าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของช่องเปิดอยู่ในตำแหน่งใด ๆ ต่างไปจากที่ระบุไว้ในรูปที่ 4.4 (ก)
ให้ทำการ เปลี่ยนข้อมูลให้สอดคล้องกับรูปที่ 4.4 (ก) แบ่งออกเป็น 3 กรณี

กรณีที่ 1 $X > L/2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) ให้แทนค่า $i_1 = i_3, i_3 = i_1, P_1 = P_3, P_3 = P_1$ และ $X = L - X$

กรณีที่ 2 $Y > S/2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค) ให้แทนค่า $i_2 = i_4, i_4 = i_2, P_2 = P_4, P_4 = P_2$ และ $Y = S - Y$

กรณีที่ 3 $X > L/2$ และ $Y > S/2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ง) ให้แทนค่า
 $i_1 = i_3, i_2 = i_4, i_3 = i_1, i_4 = i_2, P_1 = P_3, P_2 = P_4, P_3 = P_1, P_4 = P_2, X = L - X$
และ $Y = S - Y$

หลังจาก เปลี่ยนข้อมูลแล้ว ทำการวิเคราะห์ตามรูปแบบยิลด์ไลน์ที่มีโอกาส
จะเกิดขึ้นของรูปที่ 4.4 (ก)

หมายเหตุ โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถตรวจสอบตำแหน่งช่องเปิดของแผ่น
พื้นชนิดที่ 5 กับชนิดที่ 7 และ เปลี่ยนข้อมูลให้สอดคล้องกับรูปที่ 4.3 (ก) และ 4.4 (ก) ได้เพียง
แต่ผู้ใช้ป้อนข้อมูลตามที่ระบุไว้ในภาคผนวก ค เท่านั้น

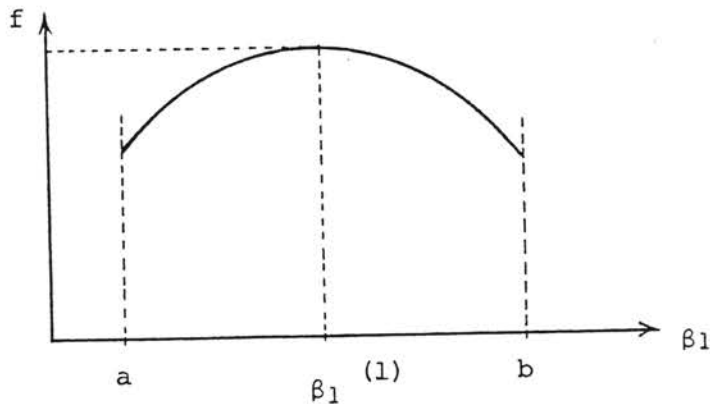
4.4.2 ใช้หลักการผลต่างอนุพันธ์ย่อยแบบทำซ้ำ

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเสมือนในการหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักประลัยกับแรง
ดัดประลัย ซึ่งออกมาอยู่ในรูปของสมการ (2.9) คืออยู่ในรูปของตัวแปรต่าง ๆ การหาชุดของตัว
แปรโดยตรงทางคณิตศาสตร์เพื่อทำให้ฟังก์ชัน f มีค่ามากที่สุดนั้นค่อนข้างยุ่งยากมาก จึงใช้วิธี
การสมมุติค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เป็นไปได้โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรทีละน้อย ๆ ภายในพิสัยของตัวแปร
นั้น ๆ หลักการของผลต่างอนุพันธ์ย่อยคือ ทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรทีละตัว โดยกำหนดให้ตัวแปร
อื่น ๆ คงที่ เช่นสมมุติให้ $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ เป็นตัวแปร การหาค่า β_1 จะกำหนดให้ $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ มีค่าคงที่เท่ากับ $\beta_2^{(0)}, \beta_3^{(0)}, \dots, \beta_n^{(0)}$ ตามลำดับ แล้วทำการ เปลี่ยนค่า

β_1 ที่ละน้อย ๆ ภายในพิสัยของ β_1 สมมุติว่าได้ $\beta_1 = \beta_1^{(1)}$ แล้วฟังก์ชัน f มีค่าสูงสุด จากนั้นทำการหาค่า β_2 ต่อไปตามกรรมวิธีเดียวกัน โดยกำหนดให้ $\beta_1, \beta_3, \dots, \beta_n$ มีค่าคงที่เท่ากับ $\beta_1^{(1)}, \beta_3^{(0)}, \dots, \beta_n^{(0)}$ ตามลำดับ เมื่อหาค่าตัวแปรแต่ละตัวครบรอบแรกจะได้ค่าโดยประมาณของชุดตัวแปรเป็น $\beta_1^{(1)}, \beta_2^{(1)}, \dots, \beta_n^{(1)}$ ต่อไปใช้ค่าชุดของตัวแปรที่หาได้ในรอบแรกเป็นค่าเริ่มต้นในการหาค่าประมาณของชุดตัวแปรในรอบที่สองตามกรรมวิธีดังกล่าว ได้ค่า $\beta_1^{(2)}, \beta_2^{(2)}, \dots, \beta_n^{(2)}$ ซึ่งจะให้ค่าของฟังก์ชัน f ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ใช้ลักษณะการทำงานดังกล่าวเป็นรอบไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ระดับความถูกต้องตามที่ต้องการ โปรแกรมที่ใช้จะกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่คิดว่าใกล้เคียงกับค่าที่ถูกต้องให้เอง จำนวนรอบในการทำงานจึงน้อย คือประมาณ 2 ถึง 4 รอบ ก็จะได้คำตอบที่ต้องการ

4.4.3 ใช้หลักการเขียนเส้นกราฟ

วิธีที่กล่าวในหัวข้อ 4.4.2 มีหลักการสำคัญคือ เพิ่มค่าตัวแปรทีละน้อย ๆ ภายในพิสัยของตัวแปรทีละตัว สามารถเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เปลี่ยนไปกับฟังก์ชัน f ได้ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรกับฟังก์ชัน f

จากรูปที่ 4.5 สมมุติให้ตัวแปร β_1 มีค่าระหว่าง a และ b ในขณะที่ β_1 เพิ่มจาก a ไป b ทีละน้อย ๆ นั้นจะให้ค่าฟังก์ชัน f สูงสุดที่ β_1 เท่ากับ $\beta_1^{(1)}$ และฟังก์ชัน f เริ่มลดลงเมื่อ β_1 มีค่าน้อยกว่า $\beta_1^{(1)}$ จากลักษณะของเส้นกราฟดังกล่าวเราหาค่า $\beta_1^{(1)}$ ได้ เมื่อนำไปประยุกต์กับคอมพิวเตอร์ ในขณะที่การเพิ่มค่าตัวแปร β_1 ทำให้ฟังก์ชัน f เริ่มลดลง สามารถ

สั่งให้คอมพิวเตอร์หยุดทำงานเกี่ยวกับการหาค่าตัวแปร β_1 ได้โดยไม่ต้องเพิ่มค่า β_1 ไปจนถึง b และถือว่าค่าก่อนหน้านั้น ($\beta_1^{(1)}$) เป็นค่าที่ถูกต้อง เป็นการตัดเวลาในการคำนวณซ้ำ ๆ ไปได้ส่วนหนึ่ง

4.4.4 วิธีการจัดกลุ่มตัวคงที่

สมการแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักประลัยและแรงดัดประลัยในภาคผนวก ก มีความยาวมาก คิดอยู่ในรูปของตัวแปร ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$) และตัวคงที่ต่าง ๆ ถ้าให้คอมพิวเตอร์คำนวณซ้ำ ๆ โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรทีละน้อย ๆ โดยใช้สมการดังกล่าวโดยตรงเลยก็จะเสียเวลาในการคำนวณมาก เพื่อให้ประหยัดเวลาอาจใช้วิธีการคำนวณซ้ำ ๆ ลงบางส่วน โดยการคำนวณกลุ่มของตัวคงที่ ที่บวก ลบ คูณ หาร และยกกำลังกันอยู่ เพียงครั้งเดียวออกมาเป็นตัวคงที่ตัวเดียวกัน แล้วจึงนำไปแทนค่าในสมการดังกล่าว ต่อจากนั้นจึงนำสมการไปคำนวณขั้นตอนต่อไป

4.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์สมการ

ในการวิเคราะห์สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดประลัยกับน้ำหนักประลัยโดยวิธีงานเสมือน สมการที่ได้จะคิดอยู่ในรูปของตัวแปรที่กำหนดค่าแห่งต่าง ๆ ของอีลด์ไลน์อันจะทำให้ค่าน้ำหนักประลัยน้อยที่สุด จำนวนตัวแปรอิสระจะเท่ากับจำนวนชิ้นส่วนที่ถูกแบ่งโดยอีลด์ไลน์ลดด้วยหนึ่ง

พิจารณาตัวอย่างรูปแบบอีลด์ไลน์รูปที่ 4.6 (ก) กำหนดให้แผ่นพื้นรับน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอเท่ากับ W_u และรับน้ำหนักแนวเส้นรอบช่องเปิด P_1, P_2, P_3 และ P_4 และให้

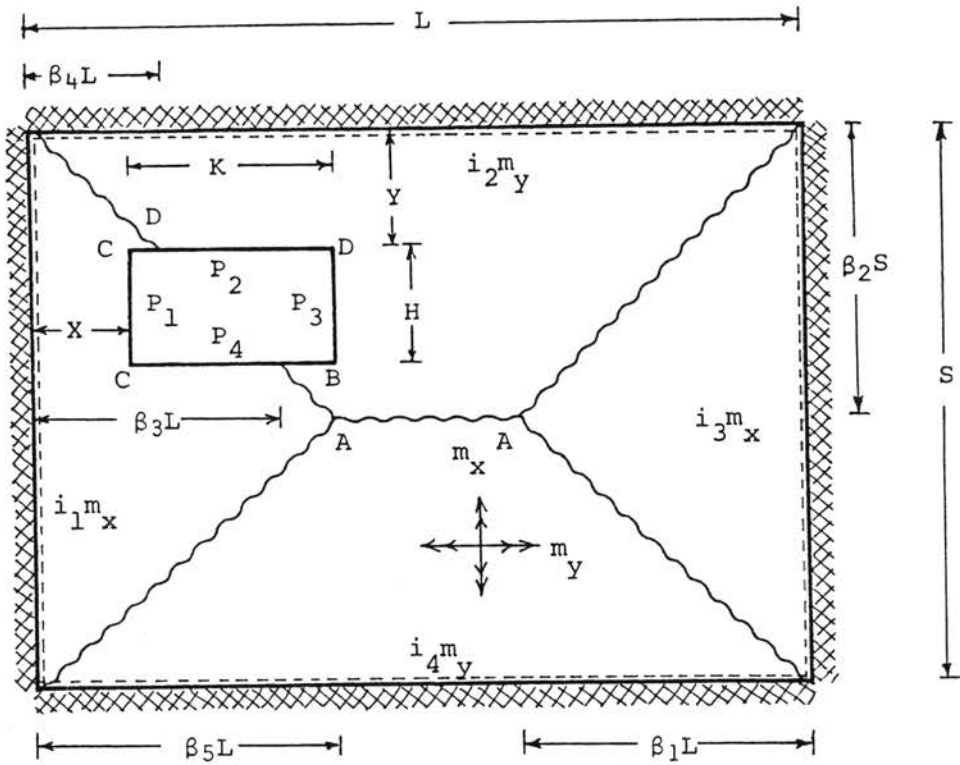
$$m_x = m_y / \mu$$

$$\text{สมมุติให้ระยะทรุดตัวที่จุด } A = \delta$$

$$B = \frac{\delta(Y+H)}{\beta_2 S} = \frac{\delta \beta_3}{\beta_5}$$

$$C = \frac{\delta X}{\beta_5 L} = \frac{\delta XY}{\beta_2 \beta_4 L S}$$

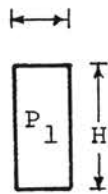
$$D = \frac{\delta Y}{\beta_2 S} = \frac{\delta \beta_4}{\beta_5}$$



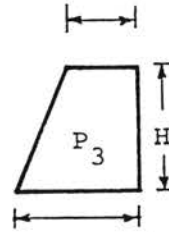
(ก)

$$\delta X / \beta_5 L = \delta XY / \beta_2 \beta_4 L S$$

$$\delta Y / \beta_2 S = \delta \beta_4 / \beta_5$$



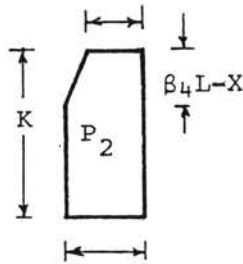
(ข)



$$\delta (Y+H) / \beta_2 S = \delta \beta_3 / \beta_5$$

(ง)

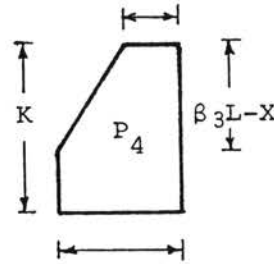
$$\delta X / \beta_5 L = \delta XY / \beta_2 \beta_4 L S$$



$$\delta Y / \beta_2 S = \delta \beta_4 / \beta_5$$

(ค)

$$\delta X / \beta_5 L = \delta XY / \beta_2 \beta_4 L S$$



$$\delta (Y+H) / \beta_2 S = \delta \beta_3 / \beta_5$$

(จ)

รูปที่ 4.6 (ก) แสดงรูปแบบอีลคไลน์

(ข) (ค) (ง) (จ) แสดงระยะทรุดตัวของน้ำหนักแนวเส้น

จากระยะทรุดตัวที่จุดต่าง ๆ ทำให้ได้ระยะทรุดตัวของน้ำหนักแนวเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข), (ค), (ง) และ (จ) เราสามารถหางานภายนอกเนื่องจากน้ำหนักแผ่กระจาย (W_{eu}) งานภายนอกเนื่องจากน้ำหนักแนวเส้น (W_{e1}) และงานภายในเนื่องจากแรงค้ำยันยึดโคลนที่หมุนไป (W_i) ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 W_{eu} = & W_u \delta \left[\frac{LS}{2} - \frac{\beta_1 LS}{6} - \frac{\beta_5 LS}{6} - (X+K-\beta_3 L) H \frac{(\beta_3+\beta_4)}{2\beta_5} \right. \\
 & - (\beta_4 L-X) H \frac{(X+\beta_4 L)}{2\beta_5 L} - \frac{(\beta_3 L-\beta_4 L) H}{2} \left(\frac{\beta_3}{3\beta_5} + \frac{2\beta_4}{3\beta_5} \right) \\
 & \left. - \frac{(\beta_3 L-\beta_4 L) H}{2} \left(\frac{\beta_3}{3\beta_5} + \frac{2\beta_4}{3\beta_5} \right) \right] \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

จากสมการ (4.1) จัดรูปใหม่เป็นสมการ (4.2)

$$\begin{aligned}
 W_{eu} = & \frac{W_u \delta}{6\beta_5 L} \left[\beta_5 S L^2 (3-\beta_1-\beta_5) - 3HL(X+K-\beta_3 L) (\beta_3+\beta_4) \right. \\
 & \left. - 3H(\beta_4^2 L^2 - X^2) - 2HL^2 (\beta_3-\beta_4) (\beta_3+2\beta_4) \right] \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{e1} = & \delta \left[\frac{P_1 H X}{\beta_5 L} + \frac{P_3 H}{2\beta_5} (\beta_3+\beta_4) + P_2 K \frac{\beta_4}{\beta_5} - \frac{P_2 (\beta_4 L-X)}{2} \left(\frac{\beta_4}{\beta_5} - \frac{X}{\beta_5 L} \right) \right. \\
 & \left. + P_4 K \frac{\beta_3}{\beta_5} - \frac{P_4 (\beta_3 L-X)}{2} \left(\frac{\beta_3}{\beta_5} - \frac{X}{\beta_5 L} \right) \right] \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

จากสมการ (4.3) จัดรูปใหม่เป็นสมการ (4.4)

$$\begin{aligned}
 W_{e1} = & \frac{\delta}{2\beta_5 L} \left[2P_1 H X + P_3 H L (\beta_3+\beta_4) + P_2 \{ 2\beta_4 K L - (\beta_4 L-X)^2 \} \right. \\
 & \left. + P_4 \{ 2\beta_3 K L - (\beta_3 L-X)^2 \} \right] \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_i = & (1+i_1)S \frac{m_y}{\mu} \frac{\delta}{\beta_5 L} - H \frac{m_y}{\mu} \frac{\delta}{\beta_5 L} + (1+i_2)Lm_y \frac{\delta}{\beta_2 S} - (\beta_3 L - \beta_4 L)m_y \frac{\delta}{\beta_2 S} \\
 & + (1+i_3) \frac{Sm_y}{\mu} \frac{\delta}{\beta_1 L} + (1+i_4)Lm_y \frac{\delta}{S(1-\beta_2)}
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

จากสมการ (4.5) จัดรูปใหม่เป็นสมการ (4.6)

$$\begin{aligned}
 W_i = & m_y \delta \left[\frac{(1+i_1)S-H}{\beta_5 \mu L} + \frac{L(1+i_2+\beta_4-\beta_3)}{\beta_2 S} + \frac{S(1+\beta_3)}{\beta_1 \mu L} \right. \\
 & \left. + \frac{L(1+i_4)}{S(1-\beta_2)} \right]
 \end{aligned} \quad (4.6)$$

เนื่องจากงานภายนอกเท่ากับงานภายใน ($W_i = W_{eu} + W_{el}$) จากสมการ (4.2), (4.4) และ (4.6) ได้ความสัมพันธ์ของแรงดัดประลัยกับน้ำหนักประลัย คือ

$$\begin{aligned}
 m_y = & \frac{W_u}{3A} \left[\beta_5 S L^2 (3-\beta_1-\beta_5) - 3HL(X+K-\beta_3 L) (\beta_3+\beta_4) \right. \\
 & \left. - 3H(\beta_4^2 L^2 - X^2) - 2HL^2 (\beta_3+\beta_4) (\beta_3+2\beta_4) \right] \\
 & + \frac{1}{A} \left[2P_1 HX + P_3 HL (\beta_3+\beta_4) + P_2 \{ 2\beta_4 KL - (\beta_4 L - X^2) \} \right. \\
 & \left. + P_4 \{ 2\beta_3 KL - (\beta_3 L - X)^2 \} \right]
 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } A = & 2\beta_5 L \left[\frac{(1+i_1)S-H}{\beta_5 \mu L} + \frac{L(1+i_2+\beta_4-\beta_3)}{\beta_2 S} \right. \\
 & \left. + \frac{S(1+i_3)}{\beta_1 \mu L} + \frac{L(1+i_4)}{S(1-\beta_2)} \right]
 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 4.6 (ก) แผ่นพื้นถูกแบ่งออกเป็นสี่ชิ้นส่วนย่อย ดังนั้นจึงมีตัวแปรอิสระเพียงสามตัว จะต้องขจัดออกไปสองตัว

พิจารณาสามเหลี่ยมคล้ายจากรูปที่ 4.6 (ก)

$$\frac{\beta_5 L}{\beta_2 S} = \frac{\beta_3 L}{Y+H} \quad \text{ได้} \quad \beta_5 = \frac{\beta_2 \beta_3 S}{Y+H} \quad (4.8)$$

$$\frac{\beta_4 L}{Y} = \frac{\beta_3 L}{Y+H} \quad \text{ได้} \quad \beta_4 = \frac{\beta_3 Y}{Y+H} \quad (4.9)$$

4.5.1 การหาขอบเขตของตัวแปรที่เป็นไปได้

ในตัวอย่างรูปแบบยิลด์ไลน์รูปที่ 4.6 (ก) มีตัวแปรอิสระคือ β_1, β_2 และ

β_3

จากรูป 4.6 (ก) จะเห็นว่า

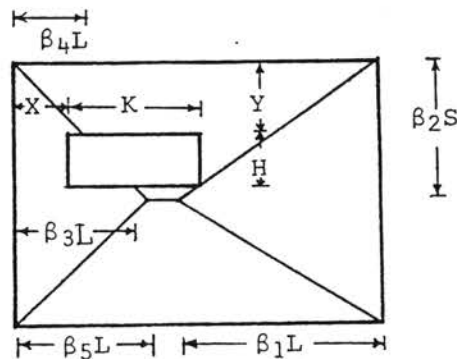
$$\beta_4 \geq \frac{X}{L} \quad \text{ได้} \quad \frac{\beta_3 Y}{Y+H} \geq \frac{X}{L}$$

$$\beta_3 \geq \frac{X(Y+H)}{YL} \quad (4.10)$$

$$\beta_1 \leq 1 - \beta_5 \quad \text{ได้} \quad \beta_1 \leq 1 - \frac{\beta_2 \beta_3 S}{Y+H} \quad (4.11)$$

$$\beta_2 \leq \frac{(Y+H)(1-\beta_1)}{\beta_3 S} \quad (4.12)$$

$$\beta_3 \leq \frac{(Y+H)(1-\beta_1)}{\beta_2 S} \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.7 แสดงพิสัยของตัวแปรที่กำหนดค่าตำแหน่งยิลด์ไลน์

พิจารณาสามเหลี่ยมคล้ายรูปที่ 4.7

$$\frac{\beta_1 L}{\beta_2 S} = \frac{L-X-K}{Y+H}$$

$$\text{ได้พิสัยของตัวแปร } \beta_1 \leq \frac{\beta_2 S(L-X-K)}{L(Y+H)} \quad (4.14)$$

$$\beta_2 \geq \frac{\beta_1 L(Y+H)}{S(L-X-K)} \quad (4.15)$$

จากสมการ (4.8) ถึงสมการ (4.15) และพิจารณารูปแบบยิลด์ไลน์ รูปที่ 4.6 (ก) ได้พิสัยของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$\beta_4 = \frac{\beta_3 Y}{Y+H}$$

$$\beta_5 = \frac{\beta_2 \beta_3 S}{Y+H}$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \text{มากกว่าศูนย์ ถึง } 1 - \frac{\beta_2 \beta_3 S}{Y+H} \\ &\leq \frac{\beta_2 S(L-X-K)}{L(Y+H)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_2 &= \frac{Y+H}{S} \quad \text{ถึง} \quad \text{น้อยกว่าหนึ่ง} \\ &\geq \frac{\beta_1 L(Y+H)}{S(L-X-K)} \leq \frac{(Y+H)(1-\beta_1)}{\beta_3 S} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_3 &= \frac{X(Y+H)}{YL} \quad \text{ถึง} \quad \frac{X+K}{L} \\ &\leq \frac{(Y+H)(1-\beta_1)}{\beta_2 S} \end{aligned}$$

4.5.2 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของรูปแบบยิลด์ไลน์

พิจารณาสมการ (4.10) β_3 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ $\frac{X(Y+H)}{YL}$ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.6 (ก) β_3 มีค่ามากที่สุดไม่เกิน $\frac{X+K}{L}$ ดังนั้นในกรณีที่ $\frac{X(Y+H)}{YL}$ มีค่ามากกว่า $\frac{X+K}{L}$ แล้ว รูปแบบยิลด์ไลน์ลักษณะในรูปที่ 4.6 (ก) จะไม่เกิดขึ้น

4.6 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในงานวิจัยนี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นเป็นภาษาแอปเปิลซอฟต์แวร์เบสิก ซึ่งเป็นภาษาที่ง่ายต่อการใช้งาน สามารถใช้กับไมโครคอมพิวเตอร์ชนิด Apple II มีหน่วยความจำ 48 เคไบต์ ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และมีราคาถูกอีกด้วย

ในโปรแกรมนี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็น 5 ส่วนด้วยกัน (ชุดของคำสั่งแสดงอยู่ในภาคผนวก ข) มีลักษณะการทำงานเกี่ยวโยงกันดังแสดงในแผนภูมิรูปที่ 4.8 เนื่องจากลักษณะของปัญหา มีข้อมูลและผลการคำนวณน้อย เพื่อความสะดวกจึงกำหนดให้การทำงานของโปรแกรมไม่มีการเก็บข้อมูลและผลการคำนวณเข้าแผ่นจานแม่เหล็ก แต่จะใช้วิธีการเรียกส่วนของโปรแกรมที่เหลือจากแผ่นจานแม่เหล็ก เข้ามาคำนวณข้อมูลในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์

การทำงานของโปรแกรม เมื่อสั่งให้ส่วนของโปรแกรม YTAD (Yield-Line Theory Analysis/Design Program) ซึ่งเป็นส่วนควบคุม ทำงาน เครื่องจะถามชนิดของแผ่นพื้นและสั่งให้ผู้ใช้ป้อนข้อมูลตามชนิดของแผ่นพื้นในลักษณะ ถาม-ตอบ จนครบ ต่อจากนั้นจะเรียกส่วนของโปรแกรมที่เหลือเข้ามาทำงานต่อตามขั้นตอนของแต่ละส่วน

4.6.1 ส่วนของโปรแกรม

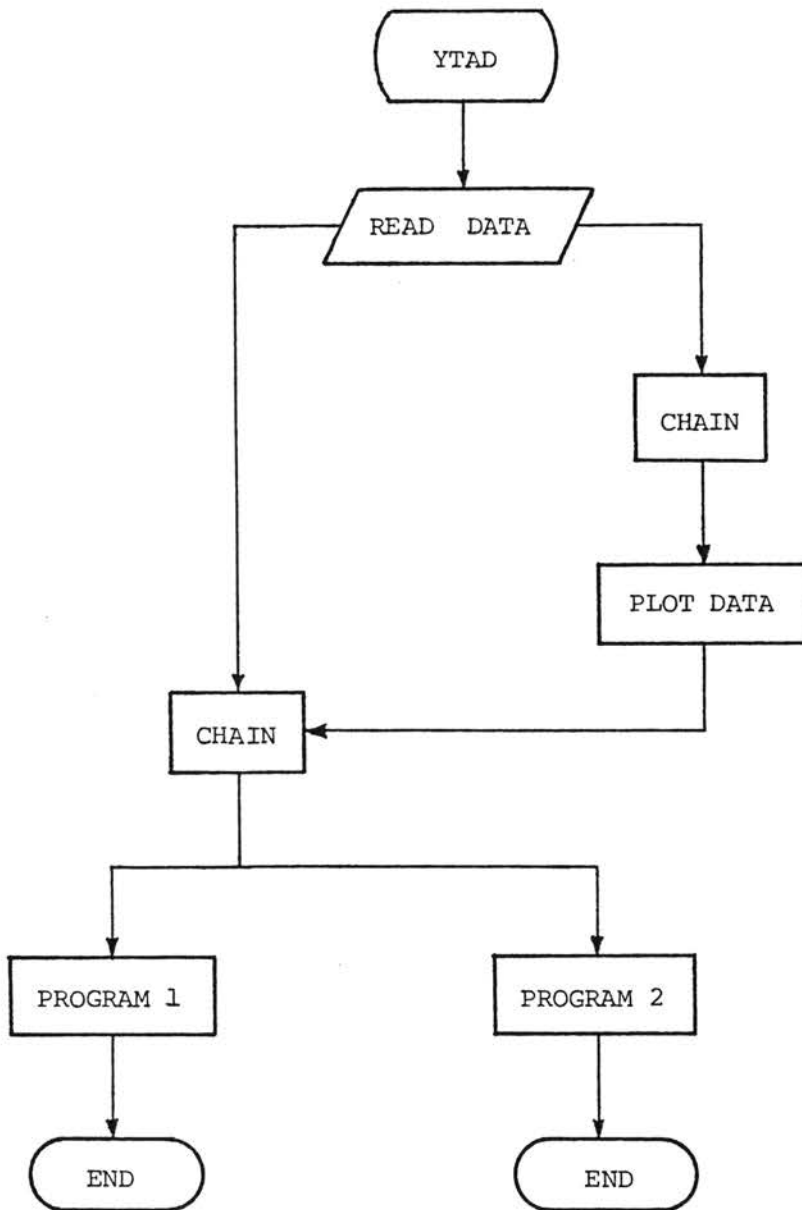
YTAD โปรแกรมส่วนนี้ทำหน้าที่อ่านข้อมูลต่าง ๆ ของแผ่นพื้นแต่ละชนิด กำหนดกำลังของวัสดุ กำหนดอัตราส่วนของวัสดุตามมาตรฐานการออกแบบ

CHAIN โปรแกรมส่วนนี้ทำหน้าที่เรียกส่วนของโปรแกรมใหม่จากแผ่นจานแม่เหล็ก เข้ามาทำงานต่อจากส่วนของโปรแกรม เดิมในหน่วยความจำของไมโครคอมพิวเตอร์ โดยไม่ทำให้ข้อมูล เปลี่ยนแปลง

PLOT DATA โปรแกรมส่วนนี้ทำหน้าที่วาดรูปทรงทางเรขาคณิตและสภาวะ
เงื่อนไขของที่รองรับของแผ่นพื้น

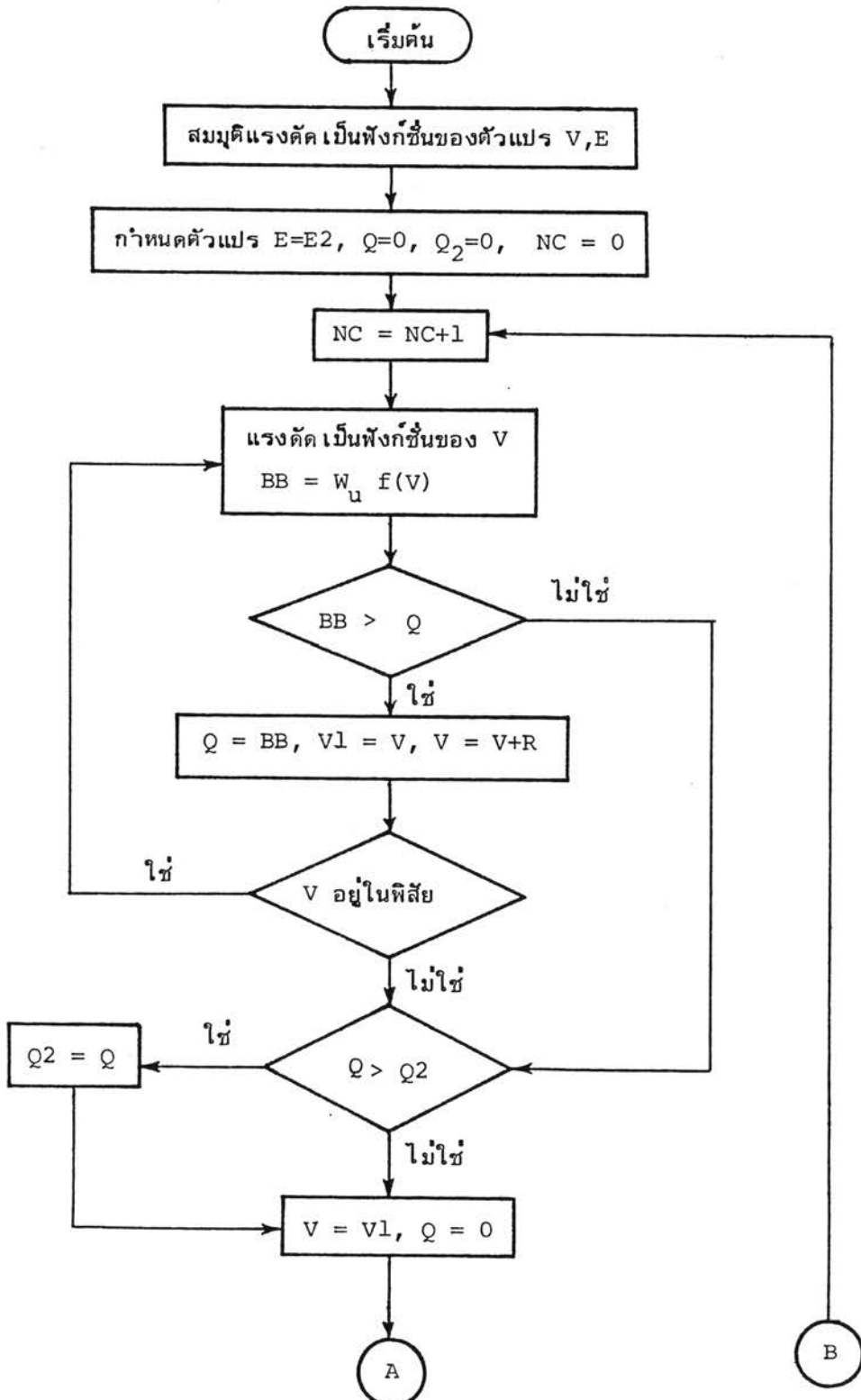
PROGRAM 1 โปรแกรมส่วนนี้ทำหน้าที่วิเคราะห์และออกแบบแผ่นพื้นชนิด
ที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ซึ่งมีส่วนการทำงานที่สำคัญคือ การวิเคราะห์แรงดัดของรูปแบบ
ยิลด์ไลน์ดังแสดงในแผนภูมิรูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของส่วนโปรแกรม
PROGRAM 1 แสดงในแผนภูมิรูปที่ 4.10

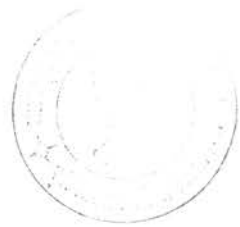
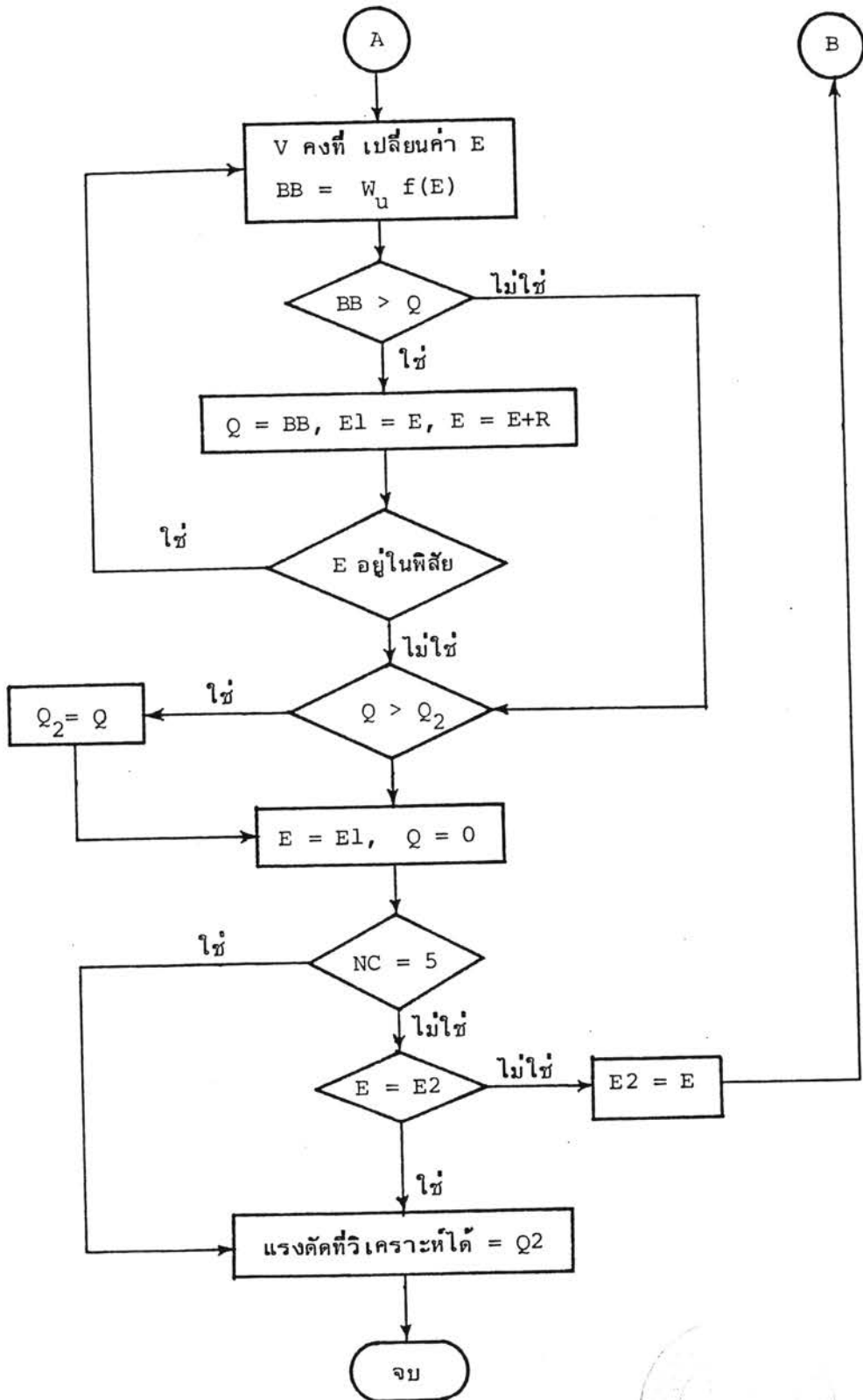
PROGRAM 2 โปรแกรมส่วนนี้ทำหน้าที่และมีแผนภูมิขั้นตอนการทำงานเหมือน
กับส่วนของโปรแกรม PROGRAM 1 แต่ใช้ในแผ่นพื้นชนิดที่ 6 และ 7



รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานเป็นส่วน ๆ ของโปรแกรม YTAD

รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์แรงตัดของรูปแบบยิลด์ไลน์ในส่วนโปรแกรม
PROGRAM 1, PROGRAM 2





รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของส่วนโปรแกรม PROGRAM 1 และ PROGRAM 2 โดยสังเขป

