

บทที่ 6

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

6.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองในบทนี้เป็นการวิเคราะห์กระบวนการการหาค่าภาระการโค้งงอและพฤติกรรมการโค้งงอจากกราฟความสัมพันธ์ 4 แบบซึ่งกราฟทั้งหมดที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ก และมีการเป็นการเปรียบเทียบค่าภาระการโค้งงอจากการทดลองวิธีต่างๆ โดยพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงและแสดงการกระจายตัวของการวัดค่าภาระการโค้งงอ ทั้งนี้เพื่อหาข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของแต่ละวิธี

6.1.1 การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ

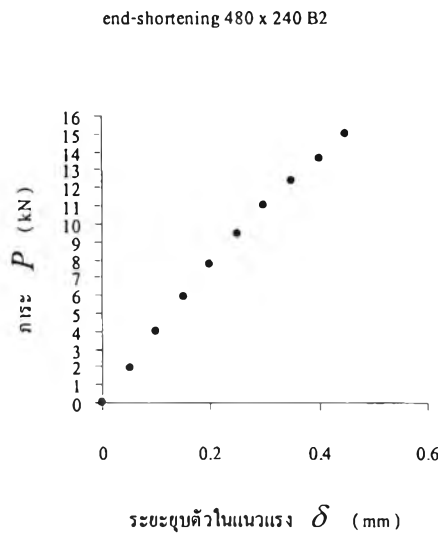
รูปแบบของเส้นกราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายกันและสามารถระบุค่าภาระการโค้งงอได้โดยง่ายมีเพียงการทดลองเดียวจาก 48 การทดลองที่ระบุค่าภาระการโค้งงอไม่ได้ การทดลองที่ไม่สามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้คือกรณีแผ่นทดสอบขนาด 270 มม x 180 มม ตัวอย่างทดสอบ A ในการทดลองครั้งที่ 2 ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก เนื่องจากไม่สามารถสร้างเส้นสัมผัสช่วงก่อนและหลังการโค้งงอได้

กราฟพฤติกรรมการโค้งงอจากการทดลองจะเกิดการเคลื่อนที่นอกระนาบ w ทันทีเมื่อแผ่นทดสอบถูกกดด้วยภาระ P ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมในอุดมคติที่จะไม่มีเกิดการโค้งงอที่ภาระต่ำกว่าค่าภาระการโค้งงอ อย่างไรก็ตามยังสามารถสร้างเส้นสัมผัสกราฟ 2 เส้นได้โดยง่าย กราฟที่หาค่าภาระการโค้งงอไม่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่ไม่มีส่วนเปลี่ยนแปลงความชันอย่างชัดเจนจึงทำให้ไม่สามารถสร้างเส้นสัมผัสช่วงก่อนและหลังการโค้งงอได้ นอกจากนี้การทดลองครั้งที่ 2 บนชิ้นงานส่วนใหญ่พบว่าความชันของกราฟช่วงก่อนการโค้งงอมีค่าน้อยลงจากการทดลองครั้งแรกส่งผลให้ค่าภาระการโค้งงอส่วนใหญ่มีค่าน้อยลงในการทดลองครั้งที่ 2 ดังแสดงให้เห็นในภาคผนวก ก อาจเนื่องจากความแข็งเกร็ง (stiffness) ของแผ่นทดสอบมีค่าลดลงจากการทดลองครั้งแรก ซึ่งอาจหมายความว่าชิ้นงานที่ใช้ทดสอบเกิดความไม่สมบูรณ์ก่อนการทดลองครั้งที่ 2

6.1.2 การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธี end-shortening

เส้นกราฟพฤติกรรมการโค้งงอที่ได้จากการทดลองจริงมักไม่ได้รูปแบบพฤติกรรมการโค้งงอ

ที่ติดตั้งงานวิจัยก่อนหน้านี้ กราฟส่วนใหญ่ที่เขียนได้มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชันต่างกันไม่มากนักช่วงก่อนและหลังการโค้งงอ ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพฤติกรรมการโค้งงอมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชันแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในรูปที่ 6.1 เป็นพฤติกรรมการโค้งงอของแผ่นทดสอบขนาด 480 มม x 240 มม ทดลองครั้งที่ 2 บนตัวอย่างทดสอบ B ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสร้างเส้นสัมผัสเพื่อสัมผัสกับเส้นกราฟช่วงก่อนและหลังการโค้งงอสำหรับระบุค่าภาระการโค้งงอทำได้ยาก บางการทดลองจึงไม่สามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้



รูปที่ 6.1 พฤติกรรมที่ใกล้เคียงเส้นตรงของวิธี end-shortening

สาเหตุที่ความชันของกราฟก่อนและหลังเกิดการโค้งงอมีค่าแตกต่างกันน้อยอาจมาจากวิธีจับยึดที่ด้านข้างของแผ่นทดสอบซึ่งในที่นี้เป็นแบบ simple support ทำให้แผ่นทดสอบมีการยวบตัวในแนวระนาบได้น้อยกว่าชิ้นงานที่ปล่อยอิสระ นอกจากนี้โหมดการโค้งงออาจมีผลต่อการหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธี end-shortening ในทางปฏิบัติการโค้งงอในโหมดที่ 1 แผ่นทดสอบจะมีการยวบตัวในแนวระนาบได้ยากกว่าการโค้งงอในโหมดที่ 2 ทำให้ค่าภาระการโค้งงอจากการทดลองสำหรับการโค้งงอในโหมดที่ 1 มีค่าสูงกว่าการโค้งงอในโหมดที่ 2 กรณีที่แผ่นทดสอบคู่หนึ่งมีค่าภาระการโค้งงอทางทฤษฎีเท่ากัน ซึ่งสังเกตจากค่าภาระการโค้งงอของแผ่นทดสอบขนาด 480 มม x 240 มม ตัวอย่างทดสอบ A การทดลองครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 10.2 kN และเกิดการโค้งงอในโหมดที่ 2 กับแผ่นทดสอบขนาด 240 มม x 240 มม บนตัวอย่างทดสอบ A การทดลองครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 12 kN และเกิดการโค้งงอในโหมดที่ 1 หรือในแผ่นทดสอบคู่อื่นที่มีค่าภาระการโค้งงอเท่ากันแต่โหมดการโค้งงอต่างกันดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ตามทฤษฎีแล้วแผ่นทดสอบทั้งสองควรมีค่าภาระการโค้งงอเท่ากัน แต่ผล

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าภาระการโค้งงอจากการทดลองสำหรับการโค้งงอในโหมดที่ 1 มีค่าที่สูงกว่าการโค้งงอในโหมดที่ 2 อาจมาจากความแข็งเกร็ง (stiffness) ต่อการยุบตัวของแผ่นทดสอบที่มีการโค้งงอในโหมดที่ 1 มีค่ามากกว่า

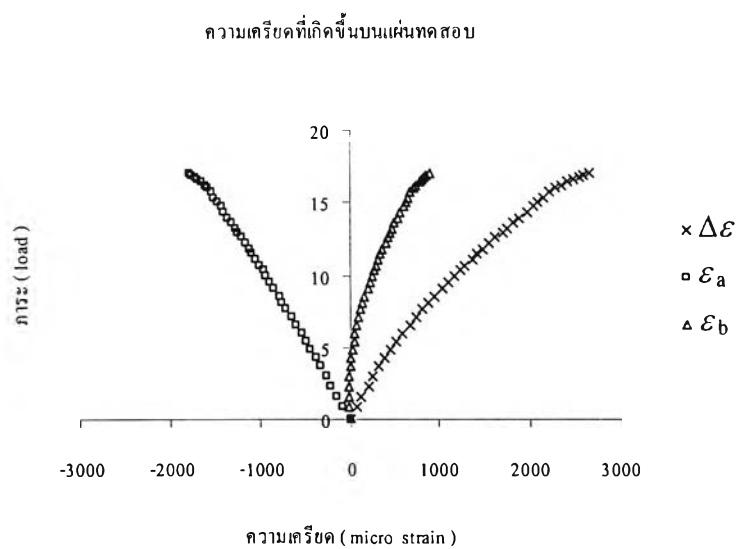
6.1.3 การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธีผลต่างความเครียด

การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธีผลต่างความเครียดเป็นการหาจากการเขียนกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง P และ $\Delta\varepsilon$ ซึ่งวัดในบริเวณซึ่งคาดว่าจะเกิดการเคลื่อนที่ของกระนาบสูงสุด กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่ประมาณได้โดยเส้นตรง 2 เส้นที่มีความชันต่างกัน พฤติกรรมการโค้งงอที่พบในการทดลองส่วนใหญ่คล้ายกันและหาภาระการโค้งงอได้ง่าย มีเพียงบางกรณีเท่านั้นที่ไม่สามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้ กราฟซึ่งไม่สามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่ไม่สามารถสร้างเส้นสัมผัสเส้นกราฟในช่วงก่อนและหลังการโค้งงอได้

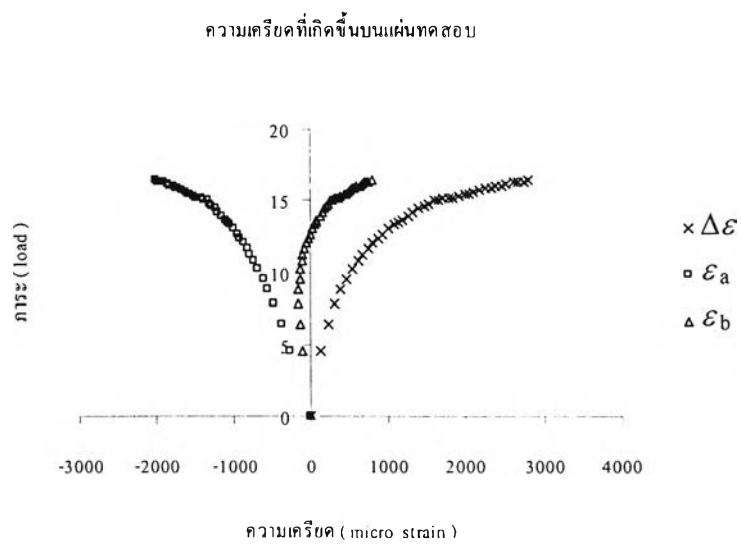
จากการทดลองพบว่าผลต่างของความเครียด $\Delta\varepsilon$ จะเกิดขึ้นทันทีที่แผ่นทดสอบรับภาระ กล่าวคือความเครียดที่ผิวหน้าทั้งสองมีค่าต่างกันซึ่งแตกต่างจากทฤษฎี ซึ่งกล่าวว่าเมื่อแผ่นทดสอบรับภาระกดในแนวระนาบแล้วความเครียดด้านทั้งสองจะต้องมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ค่าภาระการโค้งงอจากการทดลองครั้งที่ 2 มีค่าต่ำกว่าจากการทดลองครั้งที่ 1 หรือบางครั้งไม่สามารถระบุค่าภาระการโค้งงอได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาความเครียดที่ผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบที่ไม่สามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.2 โดยพบว่าลักษณะความเครียดที่เกิดบนผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน ($\varepsilon_a, \varepsilon_b$) มีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นตรงซึ่งต่างจากเส้นกราฟที่ได้จากแผ่นทดสอบที่สามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้ โดยลักษณะของกราฟที่สามารถหาค่าภาระการโค้งงอนั้นความเครียดบนผิวหน้าแผ่นทดสอบจะเป็นเส้นโค้งที่มีความชันได้ 2 ช่วงอย่างชัดเจนดังรูปที่ 6.3

6.1.4 การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธี Southwell plot

กราฟพฤติกรรมการณ์โค้งงอมีความคล้ายกันเป็นส่วนใหญ่และระบุค่าภาระการโค้งงอได้ทุกการทดลองแต่ก็มีกราฟจากบางการทดลองมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเล็กน้อย ค่าภาระการโค้งงอที่ระบุได้จากทุกการทดลองมีค่ามากกว่าค่าทางทฤษฎีอย่างชัดเจน ลักษณะทั่วไปของกราฟความสัมพันธ์ที่เขียนได้คือ มีลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่จำเป็นต้องตัดแกนตั้งที่ศูนย์เสมอไป ซึ่งในทฤษฎีการหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธี Southwell plot ลักษณะเส้นกราฟที่ไม่ตัดแกนตั้งที่ศูนย์บ่งถึงความไม่สมบูรณ์ของแผ่นทดสอบ ในทางปฏิบัติอาจมีปัจจัยอื่นมาเพิ่มความไม่สมบูรณ์ของการทดลองอีกซึ่งอาจทำให้ค่าภาระการโค้งงอที่หาได้มีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ตัวอย่างเช่นจากการทดลองครั้งที่ 1 และ 2

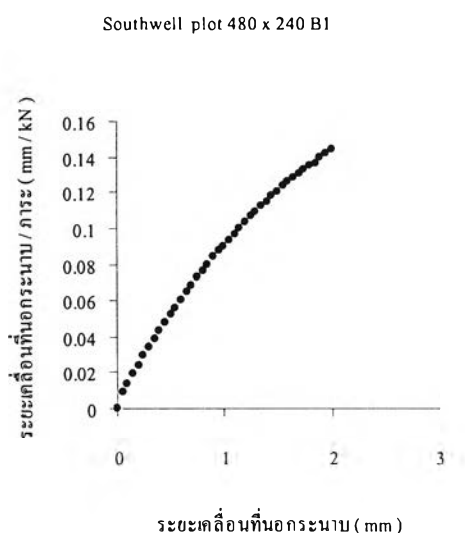


รูปที่ 6.2 ความเครียดบนแผ่นทดสอบซึ่งไม่สามารถหาค่าภาระการโก่งงอได้

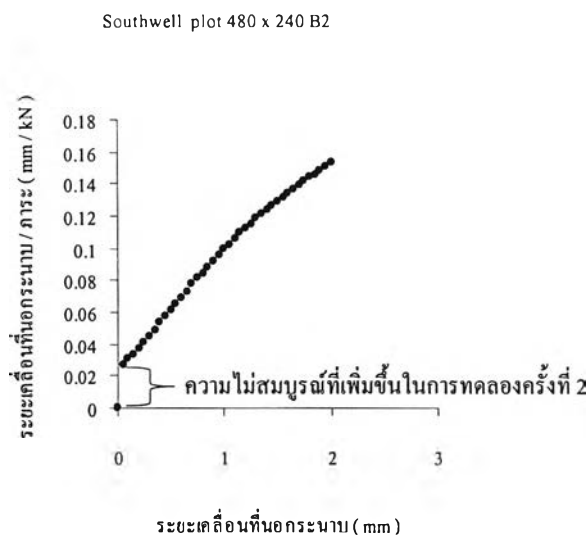


รูปที่ 6.3 ความเครียดบนแผ่นทดสอบซึ่งสามารถหาค่าภาระการโก่งงอได้

ของแผ่นทดสอบขนาด 480 มม x 240 มม ของตัวอย่างทดสอบ B กราฟทั้งสองมีลักษณะคล้ายกันคือเป็นส่วนของเส้นตรงที่มีความโค้งเล็กน้อยแต่การทดลองครั้งที่ 2 จุดตัดแกนในตั้งมีค่าสูงกว่าจากการทดลองครั้งที่ 1 และความชันของกราฟมีค่าน้อยลงดังรูปที่ 6.4 และ 6.5 ซึ่งแสดงว่าการทดลองครั้งที่ 2 แผ่นทดสอบมีความไม่สมบูรณ์มากขึ้นอาจเนื่องมาจากการทดลองในครั้งที่ 1 การหาค่าภาระการโก่งงอจากวิธีนี้ให้ค่าสูงกว่าค่าทางทฤษฎีมากไม่ว่าจะเป็นค่าภาระการโก่งงอจากการทดลองในครั้งใดก็ตาม ค่าของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงนี้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [8] นอกจากนี้ยังอาจอธิบายได้ว่าวิธี Southwell plot ประยุกต์มาจากสมการทางเสถียรภาพของเสาที่มีเงื่อนไขขอบเขตบริเวณด้านปลายทั้งสองเป็นแบบ simple support โดยไม่มีเงื่อนไขขอบเขตด้านข้างเหมือนกับกรณีของแผ่นบาง ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มความแม่นยำของการหาค่าภาระการโก่งงอโดยวิธีนี้ เงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support ที่ใช้จับยึดชิ้นงานต้องยอมให้ชิ้นงานยุบตัวในแนวระนาบได้สะดวกที่สุด ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่นอกระนาบ ณ ตำแหน่งที่วัดค่าพารามิเตอร์มีการเคลื่อนตัวคล้ายกับการเคลื่อนที่นอกระนาบของเสา ทั้งนี้เพื่อให้สมมติฐานของการเคลื่อนที่นอกระนาบของแผ่นบางใกล้เคียงกับเสามากที่สุด (สมการที่ 3.18 เหมือนกับสมการที่ 3.25)



รูปที่ 6.4 พฤติกรรมของแผ่นทดสอบจากวิธี Southwell plot ในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 6.5 พฤติกรรมของแผ่นทดสอบจากวิธี Southwell plot ในการทดลองครั้งที่ 2

6.1.5 การเปรียบเทียบการหาค่าภาระการโค้งงอ

หัวข้อที่ผ่านมากล่าวถึงลักษณะเฉพาะของกราฟพฤติกรรมการโค้งงอที่เขียนจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ ค่าภาระในแนวระนาบ ระยะเคลื่อนที่นอกกระนาบ ระยะยุบตัวในแนวแรงและผลต่างของความเครียดที่ผิว กราฟส่วนใหญ่ที่ได้มีรูปแบบที่แน่นอนและคล้ายกันในแต่ละวิธี ซึ่งเป็นการยืนยันความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) ของการทดลองได้ ส่วนในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์เชิงความไม่แน่นอน (uncertainty analysis) เพื่อยืนยันผลจากการทดลองที่ได้ โดยมีการวิเคราะห์ความสอดคล้องของค่าภาระการโค้งงอซึ่งได้จากการทดลองกับค่าในทางทฤษฎี การวิเคราะห์ผลของความแตกต่างของค่าภาระการโค้งงอที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 สุดท้ายเป็นการแสดงความแม่นยำและการกระจายตัวของข้อมูลของการหาค่าภาระการโค้งงอในแต่ละวิธี

จากค่าภาระการโค้งงอของแผ่นทดสอบทุกขนาดดังแสดงในตารางที่ 5.2 ถึง 5.7 สามารถนำมาหาค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของค่าภาระการโค้งงอจากการทดลองเพื่อแสดงความสอดคล้องของค่าภาระการโค้งงอจากวิธีต่าง ๆ กับค่าทางทฤษฎีดังตารางที่ 6.1 ถึง 6.6 ในแต่ละตารางแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนบนและส่วนล่าง ส่วนบนแสดงค่าภาระการโค้งงอของแต่ละการทดลอง ส่วนล่างแสดงค่าเฉลี่ยของค่าภาระการโค้งงอ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (standard deviation of the means, SDOM) ค่าช่วงของความแม่นยำ (precision interval) และค่าขอบเขตบนกับขอบเขตล่างของค่าภาระการโค้งงอในแต่ละวิธีซึ่งคือค่าเฉลี่ยของค่าภาระการโค้งงอบวกหรือลบกับค่าช่วง

ของความแม่นยำตามลำดับ โดยค่าช่วงของความแม่นยำหาจากผลคูณระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยกับค่าแปรผัน t (t variable) ที่ระดับความเป็นไปได้ 95 % [14] ค่าภาระการโก่งงอในวิธีใดที่ค่าขอบเขตบนและค่าขอบเขตล่างครอบคลุมค่าภาระการโก่งงอทางทฤษฎี จะถือว่าค่าภาระการโก่งงอจากการทดลองวิธีนั้นมีความสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี [15]

จากตารางทั้งหมดพอสรุปได้ว่าค่าภาระการโก่งงอซึ่งหาจากวิธีระยะเคลื่อนที่บนกระดานและวิธีผลต่างความเครียดให้ค่าที่สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีกล่าวคือ ค่าภาระการโก่งงอทางทฤษฎีอยู่ในช่วงค่าขอบเขตบนและค่าขอบเขตล่างสำหรับทุกขนาดแผ่นทดสอบ ในขณะที่วิธีระยะยุบตัวในแนวแรงและวิธี Southwell plot ส่วนใหญ่แล้วหาค่าภาระการโก่งงอได้ห่างจากค่าทางทฤษฎีซึ่งสังเกตได้จากค่าภาระการโก่งงอทางทฤษฎีที่มีค่าอยู่นอกช่วงค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของชุดข้อมูล แต่ก็มีบางขนาดแผ่นทดสอบที่วิธีระยะยุบตัวในแนวแรงสามารถหาค่าภาระการโก่งงอแล้วค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของชุดข้อมูลครอบคลุมค่าทางทฤษฎี ซึ่งเป็นกรณีการหาค่าภาระการโก่งงอของแผ่นทดสอบขนาด 270 มม x 180 มม กับ 180 มม x 180 มม เท่านั้น

ตารางที่ 6.1 ขอบเขตของค่าภาระการโก่งงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 480 x 240 มม²

แผ่นทดสอบ	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta \varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	9.4	10.2	10.4	13.8
A2	10.4	9.4	10.6	12.9
B1	8.8	11.7	9.0	14.5
B2	8.0	9.4	8.0	13.7
C1	7.9	9.8	8.5	14.8
C2	8.4	10.6	8.5	15.3
D1	10.7	11.0	11.0	13.7
D2	10.1	10.7	11.7	14.8
เฉลี่ย	9.21	10.30	9.71	14.19
SDOM	0.39	0.30	0.49	0.28
ช่วงของความแม่นยำ	0.92	0.72	1.15	0.66
ขอบเขตบน	10.13	11.02	10.86	14.85
ขอบเขตล่าง	8.29	9.58	8.56	13.53
ทฤษฎี	8.78	8.78	8.78	8.78

ตารางที่ 6.2 ขอบเขตของค่าภาระการโก่งงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 360 x 240 มม²

แผ่นทดสอบ	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta \varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	10.5	10.0	9.2	17.1
A2	10.4	10.5	8.6	24.4
B1	8.9	12.0	11.4	17.8
B2	8.0	11.6	10.9	19.6
C1	11.1	10.7	10.2	15.9
C2	10.4	11.7	9.0	19.2
D1	10.1	12.0	9.4	15.6
D2	9.6	11.8	8.6	15.8
เฉลี่ย	9.88	11.29	9.66	18.18
SDOM	0.35	0.27	0.37	1.04
ช่วงของความแม่นยำ	0.84	0.65	0.88	2.46
ขอบเขตบน	10.71	11.93	10.55	20.63
ขอบเขตล่าง	9.04	10.64	8.78	15.72
ทฤษฎี	9.53	9.53	9.53	9.53

ตารางที่ 6.3 ขอบเขตของค่าภาระการโก่งงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 240 x 240 มม²

แผ่นทดสอบ	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta \varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	9.0	12.0	8.7	14.1
A2	6.3	10.8	6.6	14.0
B1	9.6	N/A	9.8	15.5
B2	8.7	N/A	8.7	16.2
C1	10.3	9.2	9.9	15.2
C2	9.4	11.5	8.9	15.6
D1	10.0	N/A	9.6	15.3
D2	9.0	12	8.6	17.8
เฉลี่ย	9.04	11.10	8.85	15.46
SDOM	0.43	0.52	0.37	0.43
ช่วงของความแม่นยำ	1.03	1.45	0.88	1.01
ขอบเขตบน	10.07	12.55	9.73	16.47
ขอบเขตล่าง	8.01	9.65	7.97	14.46
ทฤษฎี	8.78	8.78	8.78	8.78

ตารางที่ 6.4 ขอบเขตของค่าภาระการโค้งงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 360 x 180 มม²

แผ่นทดสอบ	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	13.7	12.3	12.9	17.1
A2	9.8	13.1	8.8	19.0
B1	10.7	13.3	10.7	20.4
B2	10.2	12.0	9.8	20.7
C1	12.1	13.3	12.2	18.5
C2	9.0	N/A	8.2	21.9
D1	13.8	12.7	13.3	16.7
D2	10.8	13.9	10.2	18.5
เฉลี่ย	11.26	12.94	10.76	19.10
SDOM	0.63	0.25	0.66	0.63
ช่วงของความแม่นยำ	1.48	0.60	1.57	1.50
ขอบเขตบน	12.74	13.55	12.33	20.60
ขอบเขตล่าง	9.78	12.34	9.19	17.60
ทฤษฎี	12.01	12.01	12.01	12.01

ตารางที่ 6.5 ขอบเขตของค่าภาระการโค้งงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 270 x 180 มม²

แผ่นทดสอบ	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	13.7	12.2	13.5	17.8
A2	N/A	13.2	N/A	32.2
B1	14.4	12.0	14.3	17.5
B2	8.3	10.9	N/A	24.8
C1	12.9	12.0	12.6	17.3
C2	11.0	N/A	N/A	22.5
D1	12.9	15.3	12.8	17.4
D2	7.9	N/A	7.9	25.7
เฉลี่ย	11.59	12.60	12.22	21.90
SDOM	0.98	0.62	1.12	1.92
ช่วงของความแม่นยำ	2.40	1.59	3.10	4.55
ขอบเขตบน	13.99	14.19	15.32	26.45
ขอบเขตล่าง	9.18	11.01	9.12	17.35
ทฤษฎี	13.03	13.03	13.03	13.03

ตารางที่ 6.6 ขอบเขตของค่าภาระการ โกงงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 180 x 180 มม²

แผ่นทดสอบ	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta \epsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	12.9	N/A	12.9	18.8
A2	9.9	14.4	9.7	23.6
B1	11.3	14.8	11.0	18.4
B2	7.4	11.2	6.0	17.8
C1	13.9	N/A	12.9	20.6
C2	11.3	N/A	10.7	22.2
D1	10.8	N/A	10.5	16.6
D2	7.1	N/A	6.3	17.9
เฉลี่ย	10.58	13.47	10.00	19.49
SDOM	0.85	1.14	0.93	0.85
ช่วงของความแม่นยำ	2.00	4.90	2.20	2.02
ขอบเขตบน	12.58	18.37	12.20	21.51
ขอบเขตล่าง	8.57	8.56	7.80	17.47
ทฤษฎี	12.01	12.01	12.01	12.01

การวิเคราะห์เชิงความไม่แน่นอนส่วนต่อไปเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าภาระการ โกงงอที่หาได้จากการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ของแต่ละแผ่นทดสอบ เนื่องจากค่าภาระการ โกงงอที่หาได้จากการทดลองครั้งที่ 2 มีค่าลดลงและอาจส่งผลกระทบต่อค่าภาระการ โกงงอโดยรวม โดยเป็นการวิเคราะห์ถึงนัยสำคัญของค่าภาระการ โกงงอที่แตกต่างกันในการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 การวิเคราะห์ดังกล่าวจะใช้ข้อมูลดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.7 ถึง 6.12 โดยทุกตารางแสดงค่าภาระการ โกงงอของแผ่นทดสอบจากการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 แต่ละตารางแบ่งได้เป็น 3 ส่วนโดยใน 2 ส่วนแรกแสดงค่าเฉลี่ยของค่าภาระการ โกงงอ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยและช่วงของความแม่นยำจากการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ ส่วนสุดท้ายแสดงผลต่างของค่าเฉลี่ยของค่าภาระการ โกงงอกับผลรวมของค่าช่วงของความแม่นยำของการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ซึ่งการรวมค่าช่วงของความแม่นยำเป็นการรวมแบบกำลังสอง (quadratic sum) [14] สำหรับนัยสำคัญของความแตกต่างระหว่างค่าภาระการ โกงงอจากการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 นั้นหาได้โดยการเปรียบเทียบค่าผลต่างของค่าเฉลี่ยกับผลรวมของช่วงของความแม่นยำจากการทดลองทั้ง 2 ครั้ง ค่าภาระการ โกงงอจากการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 จะต่างกันแบบมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อผลต่างของค่าเฉลี่ยมีค่าที่มากกว่าผลรวมของช่วงของความแม่นยำ [15]

จากตารางทั้งหมดสรุปได้ว่าค่าภาระการ โกงงอที่หาโดยวิธีต่าง ๆ จากการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าแตกต่างกันไม่มากนักและสามารถนำค่าทั้งหมดมาวิเคราะห์ความแม่นยำและการกระจาย

ตัวของข้อมูลต่อไป จากการเปรียบเทียบค่าผลต่างของค่าเฉลี่ยกับผลรวมของช่วงของความแม่นยำจากการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ทุกขนาดของแผ่นทดสอบพบว่า ค่าภาระการโก่งงอของแผ่นทดสอบขนาด 360 มม x 180 มม และ 270 มม x 180 มม มีค่าต่างกันพอสมควร ความแตกต่างของค่าภาระการโก่งงอจากการทดลองทั้ง 2 ครั้งเกิดขึ้นในวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบและวิธีผลต่างความเครียด อาจเนื่องจากแผ่นทดสอบมีความไม่สมบูรณ์ก่อนการทดลองซึ่งเป็นผลมาจากการทดลองในครั้งที่ 1 นอกจากนี้บนแผ่นทดสอบบางขนาดจะมีบางวิธีที่ไม่สามารถหานัยสำคัญของความแตกต่างของค่าภาระการโก่งงอที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 ครั้งเนื่องจากมีข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับวิเคราะห์

ตารางที่ 6.7 ความแตกต่างของค่าภาระการโก่งงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บนแผ่นทดสอบขนาด 480 x 240 มม²

การทดลองครั้งที่ 1	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta \epsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	9.4	10.2	10.4	13.8
B1	8.8	11.7	9.0	14.5
C1	7.9	9.4	8.5	14.8
D1	10.7	11.0	11.0	13.7
เฉลี่ย	9.20	10.58	9.73	14.20
SDOM	0.59	0.50	0.59	0.27
ช่วงของความแม่นยำ	1.87	1.58	1.86	0.85
การทดลองครั้งที่ 2	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta \epsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A2	10.4	9.4	10.6	12.9
B2	8.0	9.4	8.0	13.7
C2	8.4	10.6	8.5	15.3
D2	10.1	10.7	11.7	14.8
เฉลี่ย	9.23	10.03	9.70	14.18
SDOM	0.60	0.36	0.87	0.54
ช่วงของความแม่นยำ	1.91	1.15	2.78	1.72
ผลต่างของค่าเฉลี่ย	0.03	0.55	0.03	0.02
ผลรวมของช่วงของความแม่นยำ	2.67	1.96	3.34	1.92

ตารางที่ 6.8 ความแตกต่างของค่าภาระการโก่งงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บน
แผ่นทดสอบขนาด 360 x 240 มม²

การทดลองครั้งที่ 1	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta \epsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	10.5	10.0	9.2	17.1
B1	8.9	12.0	11.4	17.8
C1	11.1	10.7	10.2	15.9
D1	10.1	12.0	9.4	15.6
เฉลี่ย	10.15	11.18	10.05	16.60
SDOM	0.46	0.50	0.50	0.51
ช่วงของความแม่นยำ	1.48	1.58	1.59	1.64
การทดลองครั้งที่ 2	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta \epsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A2	10.4	10.5	8.6	24.4
B2	8.0	11.6	10.9	19.6
C2	10.4	11.7	9.0	19.2
D2	9.6	11.8	8.6	15.8
เฉลี่ย	9.60	11.40	9.28	19.75
SDOM	0.57	0.30	0.55	1.77
ช่วงของความแม่นยำ	1.80	0.96	1.75	5.63
ผลต่างของค่าเฉลี่ย	0.55	0.22	0.78	3.15
ผลรวมของช่วงของ ความแม่นยำ	2.33	1.85	2.36	5.86

ตารางที่ 6.9 ความแตกต่างของค่าภาระการโค้งงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บน
แผ่นทดสอบขนาด 240 x 240 มม²

การทดลองครั้งที่ 1	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	9.0	12.0	8.7	14.1
B1	9.6	N/A	9.8	15.5
C1	10.3	9.2	9.9	15.2
D1	10.0	N/A	9.6	15.3
เฉลี่ย	9.73	10.60	9.50	15.03
SDOM	0.28	1.40	0.27	0.31
ช่วงของความแม่นยำ	0.89	17.79	0.87	1.00
การทดลองครั้งที่ 2	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A2	6.3	10.8	6.6	14.0
B2	8.7	N/A	8.7	16.2
C2	9.4	11.5	8.9	15.6
D2	9.0	12.0	8.6	17.8
เฉลี่ย	8.35	11.43	8.20	15.90
SDOM	0.70	0.35	0.54	0.79
ช่วงของความแม่นยำ	2.22	1.50	1.71	2.50
ผลต่างของค่าเฉลี่ย	1.38	0.83	1.30	0.88
ผลรวมของช่วงของ ความแม่นยำ	2.39	17.85	1.92	2.69

ตารางที่ 6.10 ความแตกต่างของค่าภาระการโก่งอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บน
แผ่นทดสอบขนาด 360 x 180 มม²

การทดลองครั้งที่ 1	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	13.7	12.3	12.9	17.1
B1	10.7	13.3	10.7	20.4
C1	12.1	13.3	12.2	18.5
D1	13.8	12.7	13.3	16.7
เฉลี่ย	12.58	12.90	12.28	18.18
SDOM	0.74	0.24	0.57	0.84
ช่วงของความแม่นยำ	2.34	0.78	1.82	2.66
การทดลองครั้งที่ 2	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A2	9.8	13.1	8.8	19.0
B2	10.2	12.0	9.8	20.7
C2	9.0	N/A	8.2	21.9
D2	10.8	13.9	10.2	18.5
เฉลี่ย	9.95	13.00	9.25	20.03
SDOM	0.38	0.55	0.46	0.78
ช่วงของความแม่นยำ	1.20	2.37	1.46	2.49
ผลต่างของค่าเฉลี่ย	2.63	0.10	3.03	1.85
ผลรวมของช่วงของ ความแม่นยำ	2.63	2.49	2.33	3.64

ตารางที่ 6.11 ความแตกต่างของค่าภาระการโก่งงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บน
แผ่นทดสอบขนาด 270 x 180 มม²

การทดลองครั้งที่ 1	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	13.7	12.2	13.5	17.8
B1	14.4	12.0	14.3	17.5
C1	12.9	12.0	12.6	17.3
D1	12.9	15.3	12.8	17.4
เฉลี่ย	13.48	12.88	13.30	17.50
SDOM	0.36	0.81	0.39	0.11
ช่วงของความแม่นยำ	1.15	2.58	1.23	0.34
การทดลองครั้งที่ 2	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A2	N/A	13.2	N/A	32.2
B2	8.3	10.9	N/A	24.8
C2	11.0	N/A	N/A	22.5
D2	7.9	N/A	7.9	25.7
เฉลี่ย	9.07	12.05	7.90	26.30
SDOM	0.84	1.15	N/A	2.08
ช่วงของความแม่นยำ	3.63	14.61	N/A	6.61
ผลต่างของค่าเฉลี่ย	4.41	0.82	N/A	8.80
ผลรวมของช่วงของ ความแม่นยำ	3.81	14.84	N/A	6.62



ตารางที่ 6.12 ความแตกต่างของค่าภาระการโก่งงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บน
แผ่นทดสอบขนาด 180 x 180 มม²

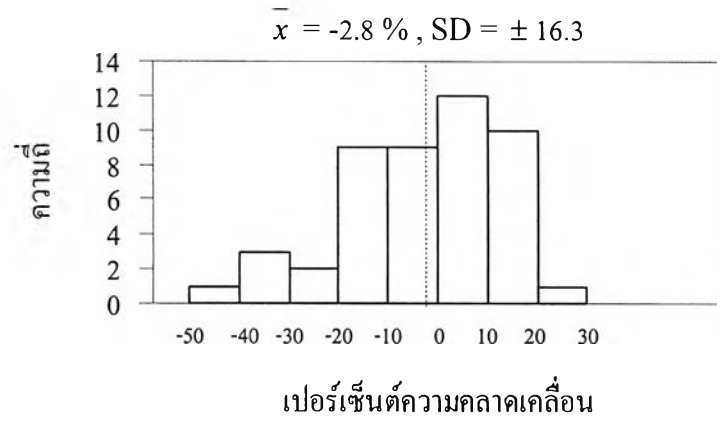
การทดลองครั้งที่ 1	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A1	12.9	N/A	12.9	18.8
B1	11.3	14.8	11.0	18.4
C1	13.9	N/A	12.9	20.6
D1	10.8	N/A	10.5	16.6
เฉลี่ย	12.23	14.80	11.83	18.60
SDOM	0.72	N/A	0.63	0.82
ช่วงของความแม่นยำ	2.28	N/A	2.00	2.61
การทดลองครั้งที่ 2	วิธี $P - w$ (kN)	วิธี $P - \delta$ (kN)	วิธี $P - \Delta\varepsilon$ (kN)	วิธี $w/P - w$ (kN)
A2	9.9	14.4	9.7	23.6
B2	7.4	11.2	6.0	17.8
C2	11.3	N/A	10.7	22.2
D2	7.1	N/A	6.3	17.9
เฉลี่ย	8.93	12.80	8.18	20.38
SDOM	1.01	1.60	1.19	1.49
ช่วงของความแม่นยำ	3.21	20.33	3.78	4.73
ผลต่างของค่าเฉลี่ย	3.30	2.00	3.65	1.78
ผลรวมของช่วงของ ความแม่นยำ	3.94	N/A	4.28	5.40

การเปรียบเทียบค่าการกระการโค้งงอส่วนสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการหาค่าการกระการโค้งงอจากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (\bar{x}) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) โดยหาจากค่าของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทั้ง 48 กรณีในแต่ละวิธี [14]

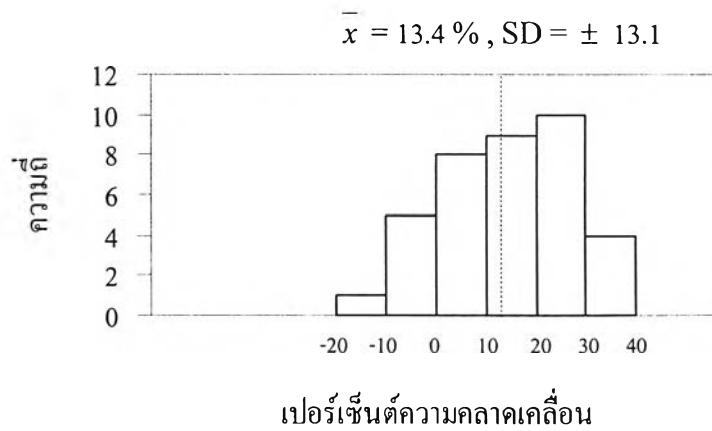
เปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าการกระการโค้งงอบนแผ่นทดสอบแต่ละขนาดเมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎีแสดงอยู่ในตารางที่ 6.13 ช่องแรกของตารางเป็นขนาดของแผ่นทดสอบ 4 ช่องต่อมาคือค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแผ่นทดสอบแต่ละขนาดเมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎี โดยที่แถวสุดท้ายแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละวิธี จากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังที่แสดงไว้ในตารางสรุปได้ว่า ค่าการกระการโค้งงอจากทุกวิธีนั้นมีการกระจายของข้อมูลในระดับหนึ่งโดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) มีค่าไม่เกิน ± 17.7 มีเพียงวิธี Southwell plot วิธีเดียวเท่านั้นที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงคือ ± 25.7 จากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (\bar{x}) สรุปได้ว่า การหาค่าการกระการโค้งงอโดยวิธีระยะเคลื่อนที่นอกกระนาบและวิธีผลต่างความเครียดให้ค่าที่ใกล้เคียงค่าทางทฤษฎีมากโดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ -2.8% และ -3.2% ตามลำดับ วิธี Southwell plot ไม่เหมาะสมในการหาค่าการกระการโค้งงอในเงื่อนไขการทดลองที่ศึกษาอยู่ และวิธี end-shortening สามารถหาค่าการกระการโค้งงอได้ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีบางกรณี โดยสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 13.4% เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากทุกการทดลองของแต่ละวิธี โดยใช้หลักการกระจายตัวของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสามารถแสดงในรูปของฮิสโทแกรมดังรูปที่ 6.6 ถึง 6.9

ตารางที่ 6.13 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าการกระการโค้งงอบนแผ่นทดสอบขนาดต่าง ๆ กับค่าการกระการโค้งงอทางทฤษฎี

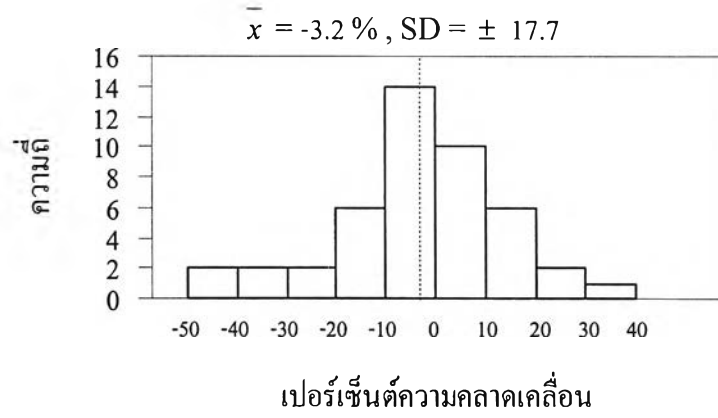
ขนาด (มม x มม) \ วิธี	ระยะเคลื่อนที่ นอกกระนาบ	end- shortening	ผลต่าง ความเครียด	Southwell plot
480 x 240	4.7	17.6	10.4	61.2
360 x 240	3.9	18.8	1.7	91.3
240 x 240	2.7	26.1	0.6	75.7
360 x 180	-6.1	7.9	-10.3	59.2
270 x 180	-10.9	-3.1	-6.0	68.5
180 x 180	-11.9	12.2	-16.7	62.4
$x \pm SD$	-2.8 ± 16.3	13.4 ± 13.1	-3.2 ± 17.7	69.7 ± 25.7



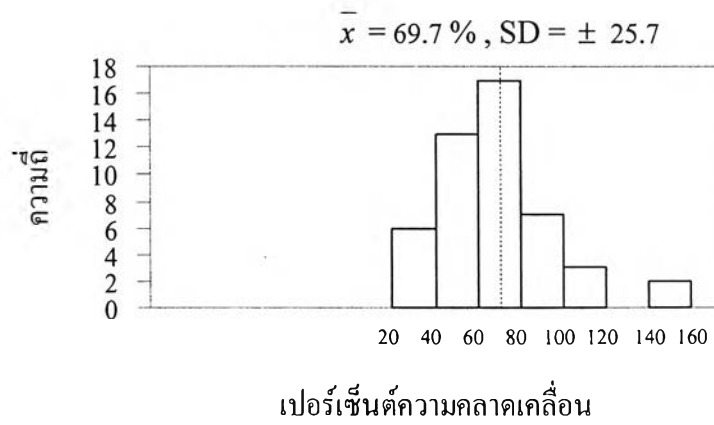
รูปที่ 6.6 ฮิสโทแกรมของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน โดยวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ



รูปที่ 6.7 ฮิสโทแกรมของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน โดยวิธี end-shortening



รูปที่ 6.8 ฮิสโทแกรมของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน โดยวิธีผลต่างความเครียด



รูปที่ 6.9 ฮิสโทแกรมของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน โดยวิธี Southwell plot

จากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงไว้ในตารางและรูปข้างต้นเมื่อพิจารณาแผ่นทดสอบทุกขนาด พบว่าค่าการกระการโค้งงอโดยวิธี end-shortening และโดยวิธี Southwell plot มีค่าที่สูงกว่าค่าทางทฤษฎี ส่วนวิธีระยะเคลื่อนที่นอกกระนาบและวิธีผลต่างความเครียดให้ค่าการกระการโค้งงอได้ต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละวิธีพบว่า ค่าการกระการโค้งงอโดยวิธีระยะเคลื่อนที่นอกกระนาบและวิธีผลต่างความเครียดให้ค่าใกล้เคียงกับค่าในทางทฤษฎีมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาถึงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้ง 2 วิธีจะพบว่า มีการกระจายตัวของผลการทดลองเมื่อเทียบกับทฤษฎีพอสมควร โดยค่าการกระการโค้งงอจากวิธี end-shortening มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ ขณะที่การหาค่าการกระการโค้งงอจากวิธี Southwell plot มีความคลาดเคลื่อนและการกระจายตัวของผลการทดลองสูง อย่างไรก็ตามการกระจายของข้อมูลของกราฟข้างต้นยังคงมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ดีของการวัดเพื่อเก็บข้อมูล

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการกระการโค้งงอเมื่อเทียบกับค่าในทางทฤษฎีแต่ละโหมดการโค้งงอดังแสดงในตารางที่ 6.14 พบว่าในตารางดังกล่าวเปรียบเทียบผลการทดลองของชิ้นทดสอบที่มีการโค้งงอในโหมดที่ 1 และโหมดที่ 2 โดยชิ้นงานที่มีการโค้งงอโหมดที่ 1 ได้แก่ชิ้นงานขนาด 240 มม x 240 มม และ 180 มม x 180 มม ส่วนบนชิ้นงานขนาด 480 มม x 240 มม 360 มม x 240 มม 360 มม x 180 มม และขนาด 270 มม x 180 มม มีการโค้งงอในโหมดที่ 2 ซึ่งจากตารางพบว่าส่วนใหญ่แผ่นทดสอบที่มีการโค้งงอในโหมดที่ 2 มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการโค้งงอในโหมดที่ 1 ยกเว้นการหาค่าการกระการโค้งงอโดยวิธี Southwell plot ที่มีความคลาดเคลื่อนสูงพอ ๆ กันทั้งกรณีที่เป็นการโค้งงอในโหมดที่ 1 และโหมดที่ 2

ตารางที่ 6.14 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าการกระการโค้งงอของแผ่นทดสอบที่เกิดการโค้งงอแบบโหมดต่าง ๆ กับค่าการกระการโค้งงอทางทฤษฎี

โหมด การโค้งงอ \ วิธี	ระยะเคลื่อนที่ นอกกระนาบ	end- shortening	ผลต่าง ความเครียด	Southwell plot
โหมดที่ 1	-4.6	20.9	-8.0	69.1
โหมดที่ 2	-1.8	11.3	-0.5	70.0

จากหัวข้อที่ 6.1.1 ถึง 6.1.5 ได้กล่าวถึงพฤติกรรมการโค้งงอโดยรวม ลักษณะกราฟการโค้งงอเมื่อรวมความไม่สมบูรณ์ของแผ่นทดสอบ ความยากง่ายในการหาค่าภาระการโค้งงอ ผลของขนาดแผ่นทดสอบที่มีต่อพฤติกรรมการโค้งงอ การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนและการกระจายตัวของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของวิธีการหาค่าภาระการโค้งงอทั้ง 4 วิธี เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $P - w$ กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $P - \Delta\epsilon$ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $w/P - w$ ลักษณะของกราฟพฤติกรรมการโค้งงอทั้ง 3 แบบสามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้โดยสะดวกเนื่องจากพฤติกรรมการโค้งงอมีความคล้ายกันกับพฤติกรรมการโค้งงอจากงานวิจัยที่ผ่านมาแต่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าภาระการโค้งงอทางทฤษฎีที่แตกต่างกันไป กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $P - \delta$ มีการเปลี่ยนแปลงของความชันไม่ชัดเจนเท่ากับวิธี $P - w$ และ $P - \Delta\epsilon$ ซึ่งไม่มีการรายงานในงานวิจัยก่อน ๆ อาจแสดงได้ว่า การทดลองและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการศึกษานี้ส่งผลกระทบต่อกราฟพฤติกรรมดังกล่าวมากกว่างานวิจัยในอดีต วิธี Southwell plot ให้ค่าภาระการโค้งงอสูงกว่าค่าทางทฤษฎีมากโดยสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้แล้วยังมีการกระจายตัวของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูง เมื่อเป็นเช่นนี้การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบและวิธีผลต่างความเครียดจึงเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้หาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธีทดลองและเมื่อวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของทั้ง 2 วิธีพบว่าวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบสามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้ง่ายและลักษณะของกราฟพฤติกรรมชัดเจนกว่ารวมถึงใช้พารามิเตอร์ที่วัดได้ง่ายกว่าวิธีผลต่างความเครียด ซึ่งวิธีผลต่างความเครียดหาค่าภาระการโค้งงอได้ยากกว่าบางการทดลองและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการเขียนกราฟหาได้ยากกว่ารวมทั้งต้องมีความชำนาญและใช้อุปกรณ์การวัดมากกว่าทำให้ค่าใช้จ่ายในการทดลองสูงขึ้นตาม นอกจากนี้แล้วชุดข้อมูลของวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบคือระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ ณ ภาระขณะนั้นสามารถนำไปใช้เขียนกราฟความสัมพันธ์ลักษณะเช่นเดียวกับวิธี Southwell plot เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแผ่นทดสอบ [5] และเมื่อพิจารณาร่วมกับงานวิจัยอื่นซึ่งหาค่าภาระการโค้งงอจากการทดลองโดยวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ พอสรุปได้ว่าสามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้แม่นยำและมีความเหมาะสมกว่าวิธีอื่น ๆ

6.2 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการโค้งงอของโครงสร้างแผ่นบาง โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือเป็นการศึกษาพฤติกรรมการโค้งงอโดยการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข งานวิจัยด้านการทดลองส่วนใหญ่เป็นการหาค่าภาระการโค้งงอโดยหาจากกราฟพฤติกรรมการโค้งงอ ซึ่งเป็นการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $P - w$ $P - \Delta\epsilon$ หรือ $P - \delta$ งานวิจัยเหล่านี้หาค่า

ภาระการโค้งงอจากกราฟความสัมพันธ์แบบใดแบบหนึ่งเท่านั้น ไม่มีการศึกษาว่า การหาค่าภาระการโค้งงอด้วยกราฟของความสัมพันธ์แบบต่าง ๆ ให้ค่าแตกต่างกันอย่างไร เหมาะสมเพียงใดกับเงื่อนไขขอบเขตที่กำลังศึกษา ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมการโค้งงอของโครงสร้างแผ่นบางโดยหาค่าภาระการโค้งงอจากกราฟความสัมพันธ์แบบต่าง ๆ แล้วจึงเปรียบเทียบเพื่อหาความแม่นยำของค่าภาระการโค้งงอจากกราฟพฤติกรรมเหล่านั้น

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการโค้งงอของโครงสร้างแผ่นบางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยการเปรียบเทียบค่าภาระการโค้งงอที่หาจากกราฟความสัมพันธ์แบบต่าง ๆ กับค่าภาระการโค้งงอจากผลเฉลยแม่นยำตรงจากทฤษฎีแบบเชิงเส้น โครงสร้างแผ่นบางที่ศึกษาเป็นแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งมีความหนา 2.04 มม และมีขนาดดังต่อไปนี้ 180 มม x 180 มม 270 มม x 180 มม 360 มม x 180 มม 240 มม x 240 มม 360 มม x 240 มม และ 480 มม x 240 มม โดยแต่ละขนาดมีตัวอย่างทดสอบจำนวน 4 แผ่น ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ simple support ทั้ง 4 ด้าน โดยทำการทดลองเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ ความเครียดที่ผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบ ระยะยุบตัวในแนวแรง δ ภาระในแนวระนาบขณะนั้น แล้วจึงนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ 4 แบบ คือ กราฟความของสัมพันธ์ระหว่าง $P - w$, $P - \delta$, $P - \Delta \epsilon$ และ $w/P - w$ โดยการหาค่าภาระการโค้งงอจากกราฟความสัมพันธ์แบบแรกเรียกว่าวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ แบบที่สองเรียกว่าวิธี end-shortening แบบที่สามเรียกว่าวิธีผลต่างความเครียดและในแบบสุดท้ายเรียกว่าวิธี Southwell plot การหาค่าภาระการโค้งงอจากกราฟพฤติกรรม 3 วิธีแรกทำโดยการสร้างเส้นสัมผัส 2 เส้นสัมผัสกับกราฟช่วงก่อนและช่วงหลังการโค้งงอ ภาระ ณ จุดตัดของเส้นสัมผัส 2 เส้นคือค่าภาระการโค้งงอสำหรับวิธีสุดท้ายค่าภาระการโค้งงอคือค่าส่วนกลับของความชันของเส้นกราฟพฤติกรรม

วิทยานิพนธ์นี้ทำการทดลองโดยใช้อุปกรณ์การทดลอง 2 ส่วนคือชุดทดลองการโค้งงอกับชุดอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ หลักการทำงานสำคัญของชุดทดลองการโค้งงอคือชุดทดลองสามารถให้ภาระในแนวระนาบและปรับเปลี่ยนตำแหน่งของเงื่อนไขขอบเขตตามขนาดแผ่นทดสอบได้ ส่วนของอุปกรณ์การวัดที่ใช้ประกอบด้วยสเตรนเกจสำหรับวัดความเครียดบนผิวหน้าของแผ่นทดสอบกับไดอัลเกจสำหรับวัดระยะเคลื่อนที่นอกระนาบและระยะยุบตัวในแนวแรง โดยใช้มาตรวัดภาระเพื่อวัดภาระในแนวระนาบที่แผ่นทดสอบได้รับ สเตรนเกจและมาตรวัดภาระจะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปที่สเตรนมิเตอร์แบบตัวเลขเพื่อแสดงผลของพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด ขั้นตอนการทดลองเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์เหล่านี้แบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงแรกเก็บค่าพารามิเตอร์ของระยะเคลื่อนที่นอกระนาบและความเครียดที่ผิวหน้าของแผ่นทดสอบ ณ ภาระขณะนั้น สำหรับช่วงที่สองเป็นการเก็บค่าพารามิเตอร์ของระยะยุบตัวในแนวแรง ณ ภาระนั้น ๆ โดยการทดลองทั้ง 2 ช่วงมีเงื่อนไขขอบเขตและสภาวะของการทดลอง

เหมือนกัน การทดลองเพื่อเก็บข้อมูลของค่าพารามิเตอร์สำหรับเขียนกราฟพฤติกรรมแบบต่าง ๆ ทำ 2 ครั้งต่อ 1 แผ่นทดสอบ การหาโหมดการโค้งงอจากการทดลองทำ 1 ครั้งต่อ 1 ขนาดแผ่นทดสอบเพื่อตรวจสอบกับโหมดการโค้งงอทางทฤษฎี ซึ่งพบว่าโหมดการโค้งงอจากการทดลองตรงกับทางทฤษฎีเสมอ

การหาค่าภาระการโค้งงอจากการทดลองในแผ่นทดสอบแต่ละขนาด โดยระบุจากกราฟความสัมพันธ์วิธีต่าง ๆ ให้ค่าต่างกัน โดยรวมแล้วค่าภาระการโค้งงอจากวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบกับวิธีผลต่างความเครียดมีค่าที่ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีโดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ -2.8 และ -3.2 % ตามลำดับ ค่าภาระการโค้งงอจากวิธี end-shortening มีค่าที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎีโดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 13.4 % ขณะที่ค่าภาระการโค้งงอจากวิธีสุดท้ายคือวิธี Southwell plot มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงถึง 69.7 % บนแผ่นทดสอบที่มีขนาดเดียวกันมีค่าภาระการโค้งงอจากการทดลองโดยเรียงจากน้อยไปมากได้แก่ค่าภาระการโค้งงอจากวิธีผลต่างความเครียด วิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ วิธี end-shortening และวิธี Southwell plot ตามลำดับ โหมดการโค้งงอมีผลต่อค่าภาระการโค้งงอที่หาจากกราฟพฤติกรรม โดยสังเกตได้จากความคลาดเคลื่อนที่เกิดกับการโค้งงอแบบโหมด 1 มากกว่าโหมด 2 ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากความแข็งแรง (stiffness) ของแผ่นทดสอบ

รูปแบบของกราฟพฤติกรรมการโค้งงอทั้ง 4 วิธีส่วนใหญ่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ๆ ในอดีต โดยเฉพาะรูปแบบกราฟพฤติกรรมการโค้งงอจากวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบและวิธีผลต่างความเครียด ทั้ง 2 วิธีดังกล่าวสามารถหาค่าภาระการโค้งงอได้ง่ายกว่าวิธีอื่น ๆ เนื่องจากความแตกต่างของความชันของเส้นกราฟช่วงก่อนและหลังการโค้งงอมีความชัดเจนซึ่งทำให้สามารถสร้างเส้นสัมผัสเส้นกราฟพฤติกรรมช่วงก่อนและหลังการโค้งงอเพื่อระบุภาระในแนวระนาบ ณ จุดตัดของเส้นสัมผัสทั้งสองได้ง่าย สำหรับการหาค่าภาระการโค้งงอจากกราฟของพฤติกรรมการโค้งงอโดยวิธี Southwell plot หาได้ง่ายเช่นเดียวกันแต่ค่าภาระการโค้งงอจากค่าส่วนกลับความชันของเส้นกราฟพฤติกรรมมีค่าสูงกว่าค่าจากทฤษฎีมาก ส่วนการหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธี end-shortening ได้ค่าอยู่ในระดับที่น่าพอใจแต่เส้นกราฟไม่มีความแตกต่างของความชันที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามมีบางการทดลองเท่านั้นที่ไม่สามารถหาค่าภาระการโค้งงอจากกราฟพฤติกรรมได้ เมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัวของการวัดโดยวิธีต่าง ๆ พบว่ามีเพียงวิธี Southwell plot เท่านั้นที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงคือ ± 25.7 ส่วนวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ วิธี end-shortening และวิธีผลต่างความเครียดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ ± 16.3 , ± 13.1 และ ± 17.7 ตามลำดับ ดังนั้นการทดลองเพื่อหาค่าภาระการโค้งงอจากกราฟพฤติกรรมการโค้งงอมีความไม่แน่นอนค่อนข้างสูงเนื่องมาจากการวัดแต่ละครั้งมีปัจจัยต่าง ๆ มากมายที่ทำให้เงื่อนไขการทดลองเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

งานวิจัยในอนาคตที่เกี่ยวข้องกับพื้นฐานความรู้ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้อาจมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากนักเช่นการศึกษาวิธีการหาค่าภาระการโค้งงอที่มีความเหมาะสมกับเงื่อนไขขอบเขตในแบบต่างๆ จากการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้พบว่าเงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support ด้านที่ไม่มีภาระกระทำมีผลต่อค่าภาระการโค้งงอที่หาจากวิธี end-shortening ฉะนั้นการศึกษาค่าผลของเงื่อนไขขอบเขตที่มีต่อวิธีการหาค่าภาระการโค้งงอโดยการทดลองอาจมีความสำคัญต่องานวิจัยทางด้านนี้ หรือทำการศึกษาถึงผลกระทบของโหมดการโค้งงอที่มีต่อค่าภาระการโค้งงอที่หาโดยวิธีทดลอง ส่วนอีกกรณีหนึ่งซึ่งมีผลต่อค่าภาระการโค้งงอที่หาโดยวิธีทดลองคือความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดสอบและเงื่อนไขต่างๆ ของการทดลอง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอาจศึกษาถึงวิธีลดความไม่สมบูรณ์เหล่านี้เช่น การพัฒนาการป้อนภาระให้กับชิ้นทดสอบให้อยู่ในแนวระนาบอย่างแท้จริง นอกจากนี้อาจศึกษาวิธีการหาค่าภาระการโค้งงอโดยใช้วิธีทางอ้อมเช่น การวัดค่าความถี่ธรรมชาติจากการสั่นสะเทือนของชิ้นงานแล้วนำไปหาค่าภาระการโค้งงอซึ่งอาจหาได้ง่ายและสะดวกกว่า