หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

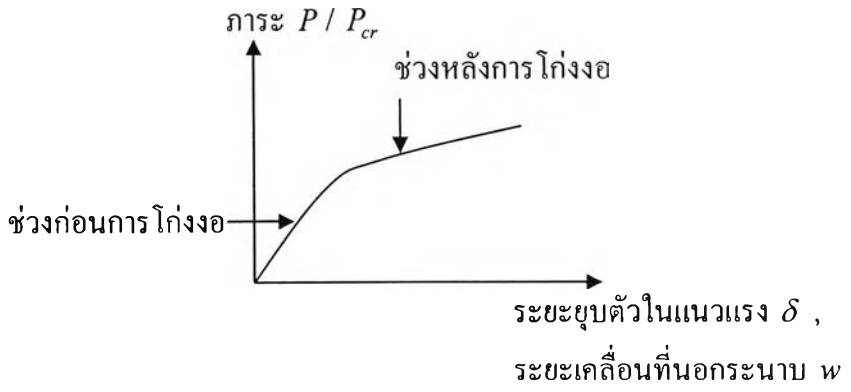
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับปัญหาการโก่งงอ

มีงานวิจัยในอดีตหลายชิ้นที่ศึกษาการหาค่าภาระการโก่งงอภายใต้ภาระชนิดต่าง ๆ ของโครงสร้างหลายประเภทโดยวิธีทดลองเช่นโครงสร้างแบบแผ่นบาง โครงสร้างเสาหน้าตัดต่างๆ และโครงสร้างกรอบ (frame) ด้วยวิธีทดลองและได้เปรียบเทียบค่าภาระการโก่งงอที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงการโก่งงอโดยวิธีทดลองเช่น พฤติกรรมการโก่งงอที่เกิดขึ้นจริงจากกราฟความสัมพันธ์แบบต่าง ๆ วิธีสำหรับการหาค่าภาระการโก่งงอจากกราฟพฤติกรรม ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าภาระการโก่งงอจากการทดลองกับค่าจากทางทฤษฎี การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาก็เพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งงอและผลจากการทดลองที่อาจเกิดขึ้น สำหรับงานวิจัยในอดีตที่กล่าวไว้ในบทนี้ส่วนใหญ่เป็นงานทางด้านการทดลองซึ่งได้แก่งานวิจัยต่อไปนี้

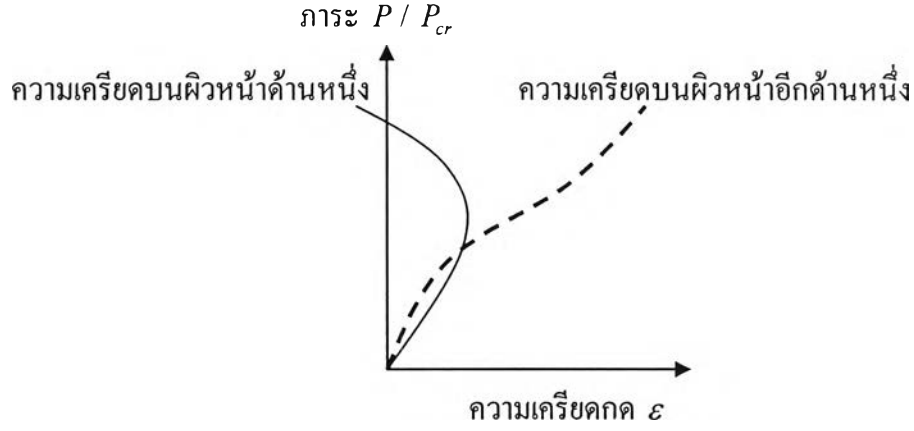
Chai และคณะ [1] ศึกษาการโก่งงอของโครงสร้างแผ่นบางภายใต้แรงกดในแนวระนาบทิศทางเดียวและเงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support บริเวณ 2 ด้านซึ่งไม่มีภาระกระทำ โดยด้านซึ่งถูกภาระกระทำมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ clamp support การทดลองนี้ศึกษาพฤติกรรมช่วงก่อนการโก่งงอ (pre-buckling) และหลังการโก่งงอ (post-buckling) พฤติกรรมดังกล่าวสามารถแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่โครงสร้างแผ่นบางได้รับกับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ระยะยุบตัวในแนวแรง ระยะเคลื่อนที่นอกระนาบและความเครียดบริเวณผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของชิ้นงาน เพื่อมาสอบทวนกับผลทางทฤษฎีโดยเป็นการทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างแผ่นบางจากทฤษฎีแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งก่อนทำการทดลองทางคณะผู้วิจัยได้ตรวจสอบระเบียบวิธีการหาค่าภาระการโก่งงอของตนเองจากการเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีทางตัวเลขของนักวิจัยท่านอื่นโดยผลออกมาเป็นที่น่าพอใจ

การศึกษานี้ Chai และคณะทดลองโครงสร้างแผ่นบางซึ่งเป็นวัสดุคอมโพสิต (composite material) ที่มีทิศการวางตัวของเส้นใยทิศเดียวกันจำนวน 20 แผ่น ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมี 2 ขนาดคือ 458 มม x 120 มม มีจำนวน 8 แผ่น ขนาด 458 มม x 90 มม มีจำนวน 12 แผ่น แต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1.75 มม ซึ่งค่าภาระกดในแนวระนาบและระยะยุบตัวในแนวแรงสามารถวัดโดยชุดป้อนภาระ (loading machine) อย่างอัตโนมัติ ส่วนระยะเคลื่อนที่นอกระนาบและความเครียดที่

ผิวหน้าของแผ่นทดสอบวัดโดย LVDT (linear variable differential transducer) และสเตรนเกจ (strain gage) แล้วจึงเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ 3 แบบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระในแนวระนาบ , P กับระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ , w กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P กับความเครียด , ε บนผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน สุดท้ายเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P กับระยะยุบตัวในแนวแรง , δ ลักษณะเส้นกราฟจากความสัมพันธ์ระหว่าง P - δ และกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง P - w เป็นเส้นโค้งที่มีความชันสองช่วง ความชันช่วงแรกมีค่ามากแล้วจึงมีค่าน้อยลงช่วงหลังดังแสดงในรูปที่ 2.1 ลักษณะเส้นกราฟพฤติกรรมการโก่งงอช่วงแรกเรียกว่าช่วงก่อนการโก่งงอ ลักษณะเส้นกราฟช่วงหลังเรียกว่าช่วงหลังการโก่งงอ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - ε ที่ผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.2 ค่าความเครียดบนผิวหน้าด้านหนึ่งของชิ้นงานเป็นความเครียดกด (compressive strain) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจนเมื่อภาระที่กระทำเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งขนาดของความเครียดกดจะลดลงเรื่อย ๆ ส่วนผิวหน้าในอีกด้านหนึ่งนั้นค่าความเครียดกดมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาขณะที่มีภาระกระทำ เนื่องจากเมื่อโครงสร้างแผ่นเริ่มบางได้รับแรงกดในแนวระนาบความเครียดบนผิวหน้าทั้ง 2 ด้านในช่วงก่อนการโก่งงอเป็นความเครียดกด แต่เมื่อหลังจากเกิดการโก่งงอของโครงสร้าง ผิวหน้าด้านหนึ่งจะมีค่าความเครียดกดลดลงเนื่องจากอิทธิพลของความเค้นดึงจากการโก่งงอ ความเครียดที่ผิวหน้าด้านนั้นจึงเริ่มเปลี่ยนจากความเครียดกดไปเป็นความเครียดดึง (tensile strain) ในที่สุด



รูปที่ 2.1 ลักษณะช่วงก่อนและหลังเกิดการโก่งงอ



รูปที่ 2.2 ความเครียดบริเวณผิวหน้าของแผ่นทดสอบ

การเปรียบเทียบกราฟพฤติกรรมการโก่งงอของโครงสร้างแผ่นคอมโพสิตบางซึ่งหาจากการทดลองกับระเบียบวิธีทางตัวเลขในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - δ พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะคล้ายคลึงกันจนถึงช่วงหลังการโก่งงอที่ภาระในแนวระนาบมีค่าประมาณ 3 เท่าของค่า P_{cr} ผู้วิจัยให้ความเห็นว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นหลังจากนั้นเกิดจากเงื่อนไขขอบเขตมีความไม่สมบูรณ์หรืออาจเกิดการเสียหายระหว่างชั้น (delamination) ของแผ่นวัสดุคอมโพสิต ส่วนกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง P - w ค่า w จากการทดลองให้ค่าที่สูงกว่าจากการคำนวณ ณ ค่าภาระเดียวกันเสมอ แต่เมื่อเพิ่มปัจจัยความไม่สมบูรณ์เช่นระยะโก่งงอก่อนการทดลอง (pre-existing curvature) ของชิ้นงานทดสอบเข้าไปในกราฟที่ได้จากทางทฤษฎี พฤติกรรมการโก่งงอมีความใกล้เคียงกัน ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - ε ที่ผิวหน้า ความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟที่ได้ทางทฤษฎีและการทดลองมีค่าไม่มากนัก ซึ่งลักษณะเส้นกราฟจะต่างกันที่ภาระต่ำ ๆ เท่านั้น โดยแต่ละแผ่นทดสอบก็จะมีเส้นกราฟพฤติกรรมการโก่งงอที่แตกต่างกันออกไป ไม่มีแนวโน้มชัดเจนว่าให้ค่าสูงหรือต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าของความเครียดระหว่างค่าทางทฤษฎีกับการทดลอง นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังหาค่าภาระการโก่งงอจากวิธีทดลอง โดยการประมาณความชันช่วงก่อนและช่วงหลังเกิดการโก่งงอของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - ε ที่ผิวหน้าของแผ่นของทดสอบด้านที่เกิดการเปลี่ยนของความเครียดกดไปเป็นความเครียดดึง จุดตัดของเส้นประมาณความชันทั้งสองนั้นเป็นค่าภาระการโก่งงอ โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -7 % และ +11 % เมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎี

งานวิจัยของ Chai และคณะ [2] อีกชิ้นหนึ่งศึกษาในหัวข้อการตอบสนองการโก่งงอบนโครงสร้างแผ่นบางที่มีคุณสมบัติภายในแบบสมมาตร โดยศึกษาถึงผลกระทบของทิศทางในการวางตัวของเส้นใยและขนาดชิ้นงานที่มีต่อเสถียรภาพของโครงสร้างแผ่นคอมโพสิตบางจากวิธีทดลองและมีการ

ตรวจสอบกับระเบียบวิธีทางตัวเลข โครงสร้างแผ่นบางที่ศึกษารับภาระกดทิศทางเดียวในแนวระนาบ และมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support บริเวณ 2 ด้านซึ่งไม่มีภาระกระทำและเงื่อนไขขอบเขตแบบ clamp support ที่ด้านซึ่งถูกภาระกระทำ

ผู้วิจัยศึกษาโครงสร้างแผ่นคอมโพสิตบางทั้งหมด 18 แผ่นมีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดได้แก่ 485 มม x 76 มม 485 มม x 90 มม และ 485 มม x 114 มม โดยที่แต่ละขนาดมีทิศทางการวางตัวของเส้นใยแตกต่างกัน 3 แบบแต่ละแบบมี 2 ตัวอย่างและชิ้นงานทดลองทุกแผ่นมีความหนาประมาณ 1.75 มม งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของระเบียบวิธีทางตัวเลขที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นและส่วนของการทดลอง ผู้วิจัยแก้ปัญหาการโก่งงอของโครงสร้างแผ่นคอมโพสิตบางโดยใช้ทฤษฎีแบบไม่เชิงเส้นร่วมกับการแก้ปัญหาตามวิธี Rayleight – Ritz สำหรับหาค่าภาระการโก่งงอและโหมดการโก่งงอซึ่งไม่สามารถหาได้จากผลเฉลยแม่นตรง ส่วนการทดลองนั้นค่าภาระการโก่งงอและโหมดการโก่งงอหาได้จากการถ่ายภาพซึ่งเรียกว่า TV-laser holography นอกจากนี้ใช้การระบุค่าภาระการโก่งงอจากกราฟพฤติกรรมการโก่งงอเมื่อโครงสร้างแผ่นบางได้รับแรงในแนวระนาบ ซึ่งวิธีแรกนั้นผู้วิจัยใช้การเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - δ โดยภาระที่กระทำ ณ ตำแหน่งที่ความชันเส้นกราฟเริ่มมีค่าลดลงจะถูกระบุว่าเป็นค่าภาระการโก่งงอ ส่วนในวิธีที่สองเป็นการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระในแนวระนาบกับความเครียดเฉลี่ยที่วัดโดยสเตรนเกจบริเวณผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบในบริเวณที่คาดว่าจะเกิดการเคลื่อนที่นอกระนาบสูงที่สุด โดยภาระที่ให้ ณ ตำแหน่งซึ่งความชันของเส้นกราฟเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีจากความชันซึ่งมีค่าลบไปเป็นค่าบวกจะถูกระบุว่าเป็นค่าภาระการโก่งงอ

จากการทดลองเพื่อตรวจสอบผลทางทฤษฎีสรุปได้ว่าทิศทางการวางตัวของเส้นใยมีผลต่อค่าภาระการโก่งงอของโครงสร้างมากซึ่งเป็นไปตามระเบียบวิธีทางตัวเลขที่ทำนายไว้ การศึกษานี้สรุปว่าสามารถใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลขที่ประดิษฐ์ขึ้นทำนายค่าภาระการโก่งงอได้ แต่ค่าภาระการโก่งงอที่ได้จากการทำนายให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองทุกแผ่นทดสอบ ซึ่งการหาค่าภาระการโก่งงอจากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - δ สามารถหาค่าภาระการโก่งงอได้เพียงบางแผ่นทดสอบเท่านั้น

งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งที่มีการทดลองหาค่าภาระการโก่งงอคืองานวิจัยของ Tuttle และคณะ [3] ในหัวข้อการโก่งงอของโครงสร้างแผ่นคอมโพสิตบางภายใต้ภาระแบบ 2 ทิศทาง โดยการศึกษานี้ทำการทดลองกับโครงสร้างแผ่นคอมโพสิตบาง ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support และภาระที่กระทำกับแผ่นทดสอบมีลักษณะสองทิศทางตั้งฉากกัน โดยภาระเป็นแรงกดในแนวระนาบทิศหนึ่งกับเป็นแรงดึงในอีกทิศหนึ่ง จุดประสงค์ของการศึกษาคือเพื่อหาค่าภาระการโก่งงอและโหมดการโก่งงอจากวิธีทดลองแล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากกระบวนการทางตัวเลข

ผู้วิจัยศึกษาโครงสร้างแผ่นคอมโพสิตบางทั้งหมด 12 แผ่นและมีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดคือ ขนาด 152 มม x 152 มม 229 มม x 152 มม และ 305 มม x 152 มม แต่ละขนาดจะมีทิศทางการวางตัวของเส้นใยแตกต่างกัน 4 แบบ โดยทุกแผ่นมีความหนาประมาณ 1.52 มม งานวิจัยนี้หาค่าภาระการโก่งงอและหาโหมดการโก่งงอทางทฤษฎีโดยใช้ระเบียบวิธีของ Galerkin ในการทดลองผู้วิจัยเก็บข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ระหว่าง P ซึ่งเป็นภาระจากแรงกดกับ w บริเวณที่คาดว่าจะเกิดการเคลื่อนที่สูงสุด โดยที่ค่าภาระถูกวัดโดยมาตรวัดภาระ (load cell) และค่าระยะเคลื่อนที่นอกระนาบสามารถอ่านค่าผ่านทางไดอัลเกจ (dial gage) แล้วจึงนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - w เส้นกราฟที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเป็นเส้นโค้งซึ่งลักษณะของความชันแบ่งออกได้เป็นสองช่วงโดยความชันในช่วงแรกมีค่ามากและความชันในช่วงหลังจะมีค่าน้อยลง พฤติกรรมการโก่งงอในช่วงแรกเรียกว่าช่วงก่อนการโก่งงอและลักษณะกราฟความชันที่ต่ำลงช่วงหลังเรียกว่าช่วงหลังการโก่งงอ การหาค่าภาระการโก่งงอนั้นทำโดยการลากเส้นตรงสองเส้น โดยที่เส้นแรกสัมผัสกับผลการทดลองช่วงก่อนการโก่งงอและเส้นที่สองเป็นเส้นที่ลากสัมผัสช่วงหลังการโก่งงอ ซึ่งจุดตัดของเส้นตรงทั้งสองจะเป็นค่าภาระการโก่งงอที่ได้จากการทดลอง สำหรับการหาโหมดของการโก่งงอนั้นใช้ระเบียบวิธีของมอล์ย (Moiré Method) [4] โดยอาศัยหลักการการซ้อนทับของแสง ในการทดลองยังมีการเปลี่ยนอัตราส่วนของแรงดึงต่อค่าภาระการโก่งงอที่ทำนายได้จากทฤษฎีเพื่อศึกษาผลของแรงดึงในด้านข้างต่อค่าภาระการโก่งงอที่ได้จากการทดลอง

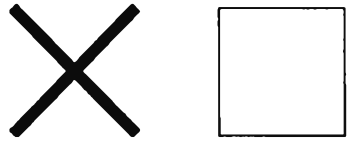
เมื่อเปรียบเทียบค่าภาระการโก่งงอและโหมดการโก่งงอที่ได้จากการศึกษาทั้ง 2 วิธีพอสรุปได้ว่าค่าภาระการโก่งงอที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายทางทฤษฎี โดยค่าที่ได้จากการทำนายมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ 1.61 % แต่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถึง $\pm$ 15.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าทางทฤษฎีและการทดลองแต่ละแผ่นทดสอบนั้นยังมีความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ โดยความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากเงื่อนไขขอบเขตไม่ใช่เงื่อนไขขอบเขตในการทดลองแบบ simple support อย่างแท้จริงหรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของแผ่นทดสอบและเมื่อเพิ่มแรงดึงที่ด้านข้างให้กับแผ่นทดสอบจะทำให้ค่าภาระการโก่งงอและโหมดการโก่งงอเพิ่มขึ้นตามที่ได้ทำนายจากทางทฤษฎี

จากงานวิจัยที่กล่าวมามีการหาค่าภาระการโก่งงอโดยระบุจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P กับ δ หรือ ε หรือ w เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าแตกต่างกันออกไปในแต่ละวิธี นอกจากนี้ยังมีวิธีสำหรับหาค่าภาระการโก่งงอวิธีอื่นอีกเช่นวิธี Southwell plot [5] วิธีนี้ต้องวัดค่า w ณ ค่า P นั้น ๆ แล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง w/P - w กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ความชันของเส้นกราฟจะประมาณเป็นค่าส่วนกลับของค่าภาระการโก่งงอ การเขียนกราฟลักษณะนี้ประยุกต์จากทฤษฎีด้านความมีเสถียรภาพของโครงสร้าง

เสาโดยได้จัดรูปสมการทางเสถียรภาพของโครงสร้างเสาให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้น นักวิจัยหลายท่านรวมทั้ง Southwell เองได้พยายามประยุกต์ใช้วิธีนี้กับโครงสร้างรูปร่างต่าง ๆ โดยเฉพาะกับโครงสร้างแผ่นบาง Chailleux และคณะ [6] ศึกษาเพื่อหาค่าภาระการโก่งงอของโครงสร้างแผ่นคอมโพสิตบางและโครงสร้างเสาคอมโพสิต โดยทดลองบนเงื่อนไขขอบเขตแบบต่าง ๆ สำหรับโครงสร้างเสาทดลองโดยมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support ด้านปลายทั้งสอง แบบ simple support ด้านหนึ่ง ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นแบบ clamp support และในแบบสุดท้ายเป็นเงื่อนไขขอบเขตแบบ clamp support ที่ปลายทั้ง 2 ด้าน ส่วนโครงสร้างแผ่นทดลองโดยมีเงื่อนไขขอบเขตทั้ง 4 ด้านแบบ simple support หรือแบบ simple support ด้านซึ่งไม่มีภาระกระทำและด้านซึ่งมีภาระกระทำเป็นเงื่อนไขขอบเขตแบบ clamp support ซึ่งงานวิจัยนี้วัดค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของชิ้นงานและใช้วิธี Southwell plot เพื่อหาค่าภาระการโก่งงอแล้วจึงเทียบกับค่าทางทฤษฎี ซึ่งค่าภาระการโก่งงอของโครงสร้างทั้ง 2 แบบที่ได้จากวิธี Southwell plot มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด ± 3 % เมื่อเทียบกับค่าในทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยหลายงานที่ใช้วิธี Southwell plot ในการหาค่าภาระการโก่งงอเช่นงานวิจัยของ Segall และ Springer [7] ซึ่งหาค่าภาระการโก่งงอจากการวัดความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ชิ้นงานที่ใช้สำหรับการทดลองเป็นแผ่นอะลูมิเนียมกับแผ่นคอมโพสิตบางโดยมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support ด้านที่ไม่มีภาระกระทำ ส่วนด้านซึ่งมีภาระกระทำเป็นเงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support หรือแบบ clamp support ค่าภาระการโก่งงอที่หาจากความถี่ของการสั่นสะเทือนของชิ้นงานและจากวิธี Southwell plot เมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎีสรุปได้ว่าการหาค่าภาระการโก่งงอโดยวัดการสั่นสะเทือนเป็นวิธีที่น่าเชื่อถือได้และง่ายต่อการทดลอง แต่การหาค่าภาระการโก่งงอโดยวิธีทดลองทั้ง 2 วิธีข้างต้นนั้นมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 10 % เมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎี สำหรับอีกงานวิจัยที่ใช้วิธี Southwell plot คืองานวิจัยของ Lagace และคณะ [8] ซึ่งศึกษาการโก่งงอของโครงสร้างแผ่นคอมโพสิตบางโดยวิธีทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของทิศทางการวางตัวของเส้นใยที่มีต่อการโก่งงอของโครงสร้างภายใต้แรงในแนวระนาบทิศทางเดียว แผ่นทดสอบถูกทดลองโดยมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ clamp support บนด้านซึ่งมีภาระกระทำ ด้านที่ไม่มีภาระกระทำมีเงื่อนไขขอบเขตทั้งหมด 3 แบบคือ simple support หรือแบบ clamp support หรือแบบ free support ค่าภาระการโก่งงอหาโดยวิธี Southwell plot แล้วจึงนำมาเทียบกับค่าทางทฤษฎี โดยสรุปแล้วผลการทดลองที่ได้จากวิธี Southwell plot ให้ค่าที่แตกต่างกับค่าทางทฤษฎีสูงมาก

งานวิจัยของ Parsa และ Hollaway [9] ศึกษาพฤติกรรมการโก่งงอของโครงสร้างประกอบซึ่งจัดเป็นวัสดุคอมโพสิตขั้นสูง (advance composite) โดยศึกษาพฤติกรรมของการโก่งงอจากการทดลองและจากระเบียบวิธีทางตัวเลขเมื่อโครงสร้างนี้ได้รับแรงกดในแนวระนาบทิศทางเดียวมีเงื่อนไข

ขอบเขตแบบ simple support บนด้านที่มีภาระการทำและมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ free support บนด้านที่ไม่มีภาระกระทำ โครงสร้างประกอบในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแผ่นหนารูปสี่เหลี่ยมจตุรัสและแบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังรูปที่ 2.3 ส่วนที่ 1 คือโครง skeletal มีลักษณะเป็นท่อกลม 2 เส้นวางตัวไขว้กัน ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถทำ prestressed ได้ ผิวหน้าทั้งสองของส่วนนี้จะถูกประกบปิดด้วยส่วนที่ 2 คือโครงสร้างแผ่นบาง 2 แผ่น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือศึกษาความแตกต่างของความแข็งแรงระหว่างโครงสร้างประกอบแบบที่ทำ prestressed และไม่ทำ prestressed โดยการทำ prestressed จะต้องใช้แรงกดมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่าภาระการโก่งงอของโครง skeletal ซึ่งค่าภาระการโก่งงอของโครง skeletal ได้จากการทดลองจริงโดยหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - ε พฤติกรรมการโก่งงอของโครงสร้างประกอบทางทฤษฎีซึ่งหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างภาระในแนวระนาบกับความเครียดบนผิวหน้าหรือระยะเคลื่อนที่นอกระนาบของแผ่นประกบ สำหรับพฤติกรรมการโก่งงอจากการทดลองทางผู้วิจัยวัดความเครียดและระยะเคลื่อนที่นอกระนาบซึ่งเกิดขึ้นบนแผ่นประกบในตำแหน่งเดียวกับที่หาจากกระบวนทางตัวเลขแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - ε และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - w

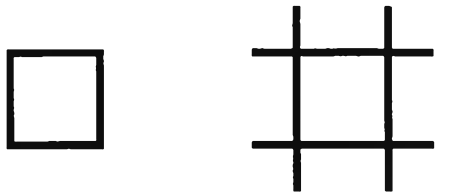


โครง skeletal แผ่นประกบ

รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบทั้งสองของโครงสร้างแผ่นหนา

จากการทำนายพฤติกรรมการโก่งงอโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ของโครงสร้างประกอบที่มีการทำ prestressed และไม่มีการทำ prestressed พบว่าโครงสร้างประกอบที่มีการทำ prestressed ค่าภาระการโก่งงอเพิ่มขึ้น 103.3 % และค่าภาระการพังทลายสูงสุด (ultimate load) เพิ่มขึ้น 14.6 % เมื่อเทียบกับโครงสร้างประกอบที่ไม่ทำ prestressed ส่วนในการทดลองจริงค่าภาระการโก่งงอจากกราฟความสัมพันธ์ทั้ง 2 แบบข้างต้นเฉลี่ยแล้วมีค่าเพิ่มขึ้น 95.1 % และภาระการพังทลายสูงสุดเพิ่มขึ้น 7.2 % เมื่อเทียบกับโครงสร้างประกอบที่ไม่ทำ prestressed การทำนายโหมดการโก่งงอโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ให้ผลที่ต่างกับการทดลองจริงมาก ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าทางทฤษฎีและจากการทดลองอาจเกิดจากการทำ prestressed ซึ่งส่งผลให้ความแข็งเกร็ง (stiffness) ของแผ่นทดสอบมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอและทำให้ความสมบูรณ์ของโครงสร้างลดลง

งานวิจัยของ Hashem และ Yuan [10] ศึกษาโครงสร้างเสาซึ่งทำจากวัสดุคอมโพสิตโดยการวิเคราะห์และทดลอง โครงสร้างที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างรูปเสาแบบกลวงซึ่งเป็นวัสดุคอมโพสิตมีหน้าตัด 2 แบบคือแบบ Box และ Universal ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งโครงสร้างเสาทั้ง 2 แบบเกิดจากการประกอบกันของโครงสร้างแผ่นบางและเชื่อมติดกันถาวร โครงสร้างเสาหน้าตัดแบบ Universal เกิดจากการประกอบโครงสร้างแผ่นบางที่มีคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน 2 คู่ โดยคู่หนึ่งมีความแข็งแรงกว่าอีกคู่หนึ่ง ส่วนโครงสร้างเสาหน้าตัดแบบ Box เกิดจากการประกอบกันของโครงสร้างแผ่นบางซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่เหมือนกันหมด วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาถึงรูปแบบการเสียรูปและความแข็งแรงของโครงสร้างภายใต้ภาระในแนวแกนโดยวิธีทดลองและทางทฤษฎี แล้วนำผลจากทั้ง 2 วิธีมาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างเสากลวงหน้าตัดแบบ Box และ Universal

โครงสร้างรูปเสาแบบกลวงที่ศึกษาทั้ง 2 แบบข้างต้นมีความยาว 2 ขนาดคือยาว 18 นิ้วและ 96 นิ้ว โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือส่วนของการทดลองและการวิเคราะห์ทางทฤษฎีผ่านทางระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความเค้น ความเครียด ระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ ค่าภาระการโก่งงอ รูปแบบการเสียหาย เงื่อนไขขอบเขตนั้นแบ่งได้ออกเป็น 2 กรณีคือศึกษาโครงสร้างเสาความยาว 18 นิ้วโดยมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support ด้านหนึ่งและอีกด้านเป็นแบบ clamp support และโครงสร้างเสาที่มีความยาว 96 นิ้วโดยมีเงื่อนไขขอบเขตทั้ง 2 ด้านเป็นแบบ simple support การทดลองเริ่มต้นโดยการบันทึกค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทางกายภาพทั้งหมดซึ่งเป็นพารามิเตอร์ค่าเดียวกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี จากนั้นจึงเริ่มเพิ่มภาระให้กับโครงสร้างและบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ระยะเคลื่อนที่นอกระนาบบริเวณกึ่งกลางระดับความสูง ¼ ของความสูงของโครงสร้างเสา ความเครียดที่ผนังของโครงสร้างเสาวัดโดยใช้สเตรนเกจ 2 ตัวติดที่ผิวหน้าด้านนอก 2 ผนังที่ติดกัน ณ ระยะครึ่งหนึ่งของความสูงสำหรับโครงสร้างเสาหน้าตัดแบบ Box ส่วนหน้าตัดแบบ Universal ใช้สเตรนเกจทั้งหมด 6 ตัว โดยติดไว้ที่ผิวหน้าด้านนอกของผนังสองผนังที่ติดกันบนโครงสร้างเสา ณ ระยะครึ่งหนึ่งของความสูงด้านละตัวและติดสเตรนเกจที่ครีบของผนังที่มีสเตรนเกจติดไว้แล้วบนผิวหน้าสองด้านของครีบตำแหน่งเดียวกัน ณ ระยะครึ่งหนึ่งของความสูง เมื่อวัดค่าพารามิเตอร์

ที่ต้องการทราบจากทั้งหมด 44 การทดลองแล้วจึงนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - w กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - ε ในบริเวณต่าง ๆ

ในการทดลองนั้นรูปแบบการเสียหายที่เกิดขึ้นมี 2 ประเภทคือการโก่งงอบนผนังด้านใดด้านหนึ่งและการเสียหายเนื่องจากการอัดตัว โดยการโก่งงอที่ผนังด้านใดด้านหนึ่งเกิดจากการโก่งงอบางตำแหน่ง (local buckling) ซึ่งเริ่มเกิดบนผนังของโครงสร้างเสาโดยเฉพาะหน้าตัดแบบ Universal บริเวณผนังคู่ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า โดยรูปร่างของการโก่งงอมีลักษณะเป็นรูปครึ่งหนึ่งของกราฟไซน์ การโก่งงอบางตำแหน่งลักษณะนี้เริ่มเกิดขึ้นจากบริเวณตรงกึ่งกลางของโครงสร้างเสาแล้วขยายตัวออกไปเรื่อยๆส่งผลให้ผนังด้านนั้นทั้งหมดเกิดการโก่งงอขึ้น ความเสียหายแบบนี้อาจอธิบายได้ว่าเกิดจากการที่เส้นใยภายในของโครงสร้างแผ่นที่ทำจากวัสดุคอมโพสิตทนต่อแรงอัดหรือความเค้นซึ่งเพิ่มขึ้นบริเวณนั้นไม่ได้ บางการทดลองเมื่อโครงสร้างเสาเกิดการโก่งงอแล้วทำให้ชั้นของโครงสร้างแผ่นที่เป็นผนังเกิดการแยกตัวออกจากกันซึ่งเป็นความเสียหายระหว่างชั้นของวัสดุแบบคอมโพสิต ซึ่งการทำนายพฤติกรรมการโก่งงอจากระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์นั้นค่าภาระการโก่งงอที่ได้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเฉลี่ยประมาณ 1.45 % และ 36.0 % บนโครงสร้างเสาที่มีความสูง 18 นิ้วและ 96 นิ้วตามลำดับ โดยความคลาดเคลื่อนแสดงให้เห็นว่าระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ไม่สามารถทำนายค่าภาระการโก่งงอหรือพฤติกรรมการโก่งงอโครงสร้างที่เกิดโหมดการโก่งงอมากกว่า 1 ซึ่งคือโครงสร้างเสาที่มีความสูง 96 นิ้วหรือต้องใช้วิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นในการทำนายพฤติกรรมดังกล่าว ส่วนโหมดการโก่งงอที่ทำนายได้มีค่าแม่นยำมาก โดยโครงสร้างเสาซึ่งมีความสูง 18 นิ้วเกิดการโก่งงอในโหมด 1 และโครงสร้างเสาซึ่งมีความสูง 96 นิ้วเกิดการโก่งงอในโหมด 7 ส่วนการทำนายค่าภาระสูงสุดที่ทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการอัดตัวมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมากเมื่อเทียบกับผลการทดลอง

จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การเปรียบเทียบค่าภาระการโก่งงอรวมทั้งพฤติกรรมการโก่งงอโดยวิธีทดลองกับค่าซึ่งได้จากการทำนายทางทฤษฎีนั้นมีมาตั้งแต่อดีตแล้ว เนื่องจากการทำนายทางทฤษฎีอาจต้องมีการตั้งสมมติฐานต่าง ๆ เพื่อให้มีความสะดวกต่อการคำนวณสำหรับการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์จึงจำเป็นต้องมีการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของระเบียบวิธีที่ได้สร้างขึ้น ดังนั้นการหาพฤติกรรมของโครงสร้างต่าง ๆ เมื่อเกิดการโก่งงอจึงจำเป็นต้องนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบในทางตรงกันการทำนายทางทฤษฎีเหล่านี้อาจช่วยกำหนดขอบเขตหรือเงื่อนไขต่าง ๆ ของการทดลองได้และอาจเป็นแนวทางเพื่อยืนยันความถูกต้องของพฤติกรรมที่ได้จากการทดลองเช่น งานวิจัยที่มีการทำนายพฤติกรรมการโก่งงอโดยชิ้นทดสอบมีความไม่สมบรูณ์ การทำนายพฤติกรรมการโก่งงอในช่วงการโก่งงอมาก ๆ (far beyond buckling) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วพฤติกรรมเหล่านี้เกิดขึ้นในการทดลองจริง งานวิจัยทางด้านทฤษฎีจึงอาจเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ผลจากการ

ทดลองเช่นงานวิจัยของ Rhodes [11] ซึ่งศึกษาพฤติกรรมการโก่งงอช่วงหลังการโก่งงอบนโครงสร้างแผ่นบางและโครงสร้างผนังบาง งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัญหาทางทฤษฎีจากหลาย ๆ งานวิจัยรวมทั้งของผู้วิจัย โดยสนใจพฤติกรรมช่วงหลังการโก่งงอของโครงสร้างแผ่นบางภายใต้ภาระในแนวระนาบทิศทางเดียว ในอดีตการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมการโก่งงอต้องใช้ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างมาวิเคราะห์ ความเค้นและความเครียดที่ใช้สำหรับวิเคราะห์อยู่ในรูปฟังก์ชันของระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ โดยเป็นการวิเคราะห์แบบมองข้ามผลกระทบของปัจจัยในแนวระนาบได้แก่ความแข็งแรง (strength) และความแข็งเกร็ง (stiffness) ซึ่งมีผลกระทบต่อระยะเคลื่อนที่นอกระนาบโดยเฉพาะช่วงหลังจากการเกิดโก่งงอของโครงสร้าง Rhodes จึงใช้ฟังก์ชันตัวใหม่เพื่อนำมาวิเคราะห์ทางทฤษฎีสำหรับทำนายพฤติกรรมการโก่งงอและคำนึงถึงผลกระทบของภาระในแนวระนาบซึ่งกระจายตัวไม่สม่ำเสมอต่อพฤติกรรมการโก่งงอ นอกจากนี้ยังศึกษาพฤติกรรมการโก่งงอในช่วงการโก่งงอมาก ๆ ซึ่งประยุกต์มาจากงานวิจัยอื่น

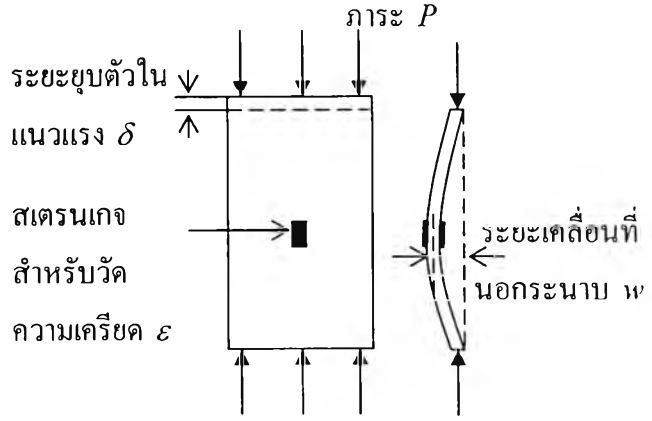
จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นการสร้างสมการเพื่อทำนายพฤติกรรมการโก่งงอที่ผ่านมาส่วนใหญ่ใช้พจน์ของความเครียดในรูปฟังก์ชันของระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ แต่ในงานวิจัยนี้ใช้พจน์ของความเครียดในรูปฟังก์ชันของระยะยุบตัวในแนวแรงร่วมกับระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ ซึ่งสุดท้ายได้สมการพฤติกรรมการโก่งงอที่สามารถรองรับเงื่อนไขขอบเขตแบบ simple support แบบ clamp support รวมทั้งแบบ free support กราฟพฤติกรรมซึ่งเขียนจากสมการของงานวิจัยนี้ให้ผลใกล้เคียงกับกราฟพฤติกรรมจากสมการของงานวิจัยที่ผ่านมา สาเหตุที่คลาดเคลื่อนอาจเกิดจากต้องมีการสมมติรูปแบบภาระที่กระทำในรูปฟังก์ชันความเค้น (stress function) แตกต่างกันซึ่งมีผลต่อกระบวนการคำนวณของสมการ

สำหรับผลกระทบเนื่องจากภาระในแนวระนาบซึ่งกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ Rhodes ได้ใช้ระเบียบวิธีการแบบเดิมที่ใช้ในการสร้างสมการเพื่อทำนายพฤติกรรมการโก่งงอเพียงแต่เพิ่มพจน์ของระยะการเยื้องศูนย์ในแนวระนาบที่มีผลต่อความเครียดในระนาบนั้น รูปแบบภาระที่ศึกษามี 2 รูปแบบ คือภาระแบบกระจายตัวไม่สม่ำเสมอกับภาระแบบกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและมีโมเมนต์บิดกระทำ ซึ่งภาระที่เกิดขึ้นจากการทดลองจริงมีลักษณะอยู่ระหว่างภาระทั้ง 2 แบบนี้ เมื่อได้สมการพฤติกรรมของการโก่งงอแล้วจึงนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - δ ลักษณะของเส้นกราฟที่ได้มีความแตกต่างกันระหว่างภาระที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอกับภาระที่ไม่สม่ำเสมอ กราฟช่วงก่อนการโก่งงอจะซ้อนทับกันสนิทสำหรับภาระทั้งสองแบบแต่ช่วงหลังการโก่งงอเส้นกราฟมีความชันต่างกันชัดเจน อย่างไรก็ดีสำหรับค่าภาระการโก่งงอของภาระทั้งสองแบบให้ค่าเท่ากันเสมอ

ส่วนพฤติกรรมการโก่งงอช่วงการโก่งงอมาก ๆ ซึ่งเป็นช่วงที่ภาระเพิ่มขึ้นเกินภาระการโก่งงอมาก ๆ และระยะเคลื่อนที่นอกระนาบอาจมีค่ามากกว่า 1 เท่าของความหนาของแผ่นบาง โดยผู้วิจัย

ประยุกต์รวมสมการสำหรับทำนายพฤติกรรมการโก่งงอจากหลายงานวิจัยแล้วจึงแสดงเป็นสมการการโก่งงอช่วงเกิดการโก่งงอมาก ๆ สมการดังกล่าวจะเป็นฟังก์ชันของความเค้น ความเครียด โหมดการโก่งงอ ระยะเคลื่อนที่นอกระนาบและระยะเคลื่อนที่นอกระนาบเริ่มต้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงาน แล้วนำสมการนี้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P - w และกราฟระหว่าง P - δ โดยมีการเพิ่มค่าระยะเคลื่อนที่นอกระนาบเริ่มต้นขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อดูผลกระทบต่อพฤติกรรมการโก่งงอ จากกราฟพฤติกรรมการโก่งงอที่ได้พบว่าลักษณะของกราฟพฤติกรรมช่วงเกิดการโก่งงอมาก ๆ มีลักษณะเหมือนกับช่วงหลังการโก่งงอไม่ว่าระยะเคลื่อนที่นอกระนาบเริ่มต้นมีค่าเท่าใด แต่ระยะเคลื่อนที่นอกระนาบเริ่มต้นกลับมีผลต่อกราฟพฤติกรรมการโก่งงอช่วงก่อนการโก่งงอและขณะที่มีการโก่งงอซึ่งก็คือมีผลต่อค่าภาระการโก่งงอของแผ่นทดสอบนั้น ๆ

แม้ว่าจะมีการศึกษาโดยการทดลองเพื่อหาค่าภาระการโก่งงอโดยการบ่งชี้จากพฤติกรรมของแผ่นทดสอบเมื่อได้รับแรงกดในระนาบมาก่อนมากมาย แต่งานวิจัยแต่ละชิ้นจะใช้เพียงหนึ่งหรืออย่างมาก 2 วิธีในการหาภาระการโก่งงอโดยการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างแผ่นบางเช่นระยะการเคลื่อนที่นอกระนาบ ระยะยุบตัวในแนวแรง ความเครียดที่ผิวหน้าของแผ่นทดสอบ ณ ภาระที่กระทำขณะนั้นโดยผ่านกระบวนการวัดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แล้วนำมาค่าที่วัดได้เหล่านั้นไปเขียนกราฟและหาค่าภาระการโก่งงอ ซึ่งในการศึกษานี้จึงหาค่าภาระการโก่งงอที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธีการหาค่าวิธีต่าง ๆ กัน 4 วิธีคือ วิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ วิธี end-shortening วิธีผลต่างความเครียดและวิธี Southwell plot ทั้งนี้หวังว่าจะสามารถหาวิธีที่ง่ายต่อการระบุค่าภาระการโก่งงอและมีความแม่นยำสูงโดยไม่ถูกจำกัดจากเงื่อนไขขอบเขต รวมถึงหาข้อได้เปรียบเสียเปรียบในแต่ละวิธีเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเรื่องการโก่งงอต่อไปในอนาคต



รูปที่ 2.5 พารามิเตอร์ในการเขียนกราฟพฤติกรรมการโก่งงอ