

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ไฟไนลิเมนต์ข้อต่อชนิด Welded Unreinforced Flanges-Bolted Web (ExBSh1C)

4.1 บทนำ

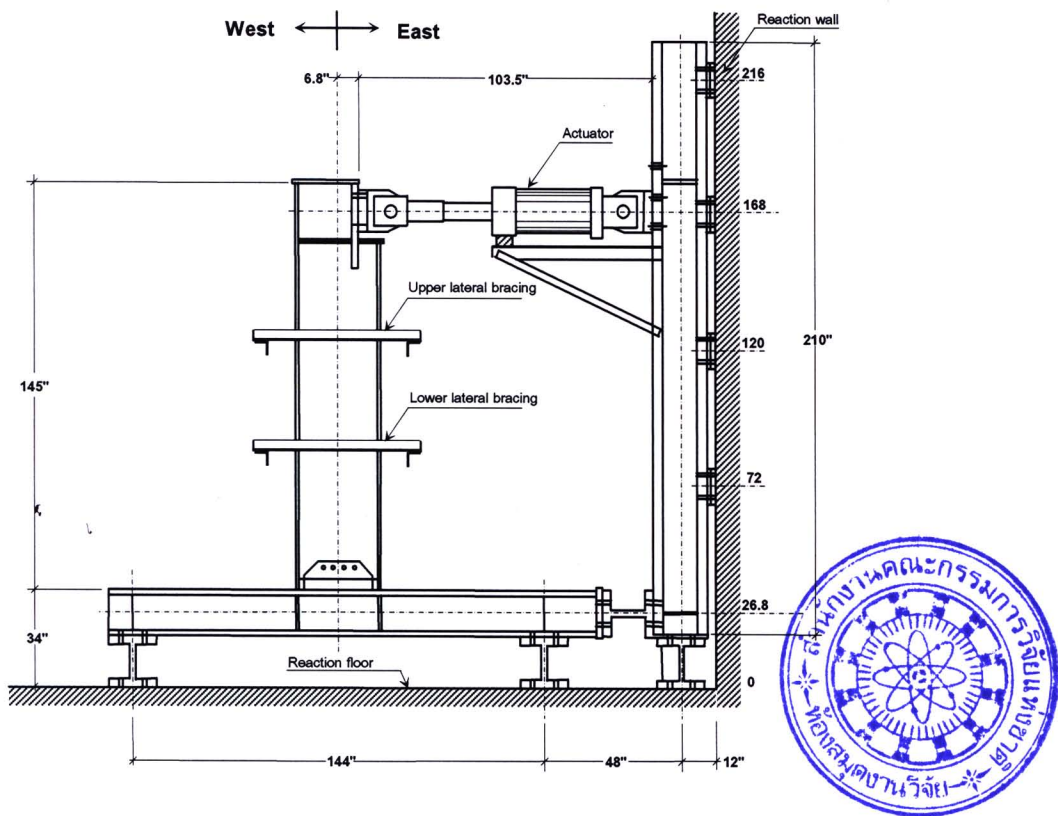
ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนลิเมนต์ของข้อต่อชนิด Welded Unreinforced Flanges-Bolted Web (ExBSh1C) โดยจะเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบข้อต่อคาน-เสาเหล็กทดสอบที่มหาวิทยาลัยแห่งรัฐมิชิแกน ทั้งนี้แบบจำลองไฟไนลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นตามลักษณะและข้อกำหนดที่นำเสนอในบทที่ 3 ซึ่งจะมีขนาดหน้าตัดและขนาดความยาวของคานและเสา เท่ากับชิ้นงานทดสอบจริงทุกประการ รวมถึงคุณสมบัติเหล็ก คุณสมบัติยึดรั้งที่ปลายเสาบนและล่าง ขนาดแผ่นปะกับ ขนาด Access Hole จำนวนน็อตที่ใช้และอื่นๆ ด้วย จุดประสงค์ของการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ กับค่าที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานทดสอบจริง เพื่อนำสรุปถึงความเที่ยงตรงของแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ ยังสามารถอธิบายพฤติกรรมต่างๆ ของแบบจำลองข้อต่อ เช่น ลักษณะการกระจายตัวของความเค้น ลักษณะการกระจายแรงกระทำจากคานสู่เสา และลักษณะการครากของบริเวณชิ้นส่วนต่างๆ ของข้อต่อ สิ่งเหล่านี้สามารถนำมาพิจารณาประกอบการประเมินศักยภาพการรับแรงของข้อต่อ และลักษณะการพังของข้อต่อได้ เมื่อได้แบบจำลองไฟไนลิเมนต์ที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ก็สามารถที่จะประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้กับข้อต่อคาน-เสาเหล็ก ที่มีรายละเอียดการก่อสร้างในประเทศไทยได้ต่อไป

4.2 ข้อต่อคาน-เสานชนิด Welded Unreinforced Flanges-Bolted Web ทดสอบที่มหาวิทยาลัยแห่งรัฐมิชิแกน และแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ ExBSh1C

รูปที่ 4.1 แสดงรูปวาดขนาดชิ้นงานทดสอบ การติดตั้งและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ โดยชิ้นงานเป็นข้อต่อคาน-เสาเหล็กของเสาด้านริม (Exterior Connection) ที่มีรายละเอียดการออกแบบ และก่อสร้างเป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบ AISC/CRFD 1994 คานมีความยาวจากปลายคานตรงบริเวณใส่แรงวิงจักร (ระยะการเคลื่อนที่ซ้าย-ขวา) ถึงตำแหน่งกึ่งกลางเสา เท่ากับ 136 นิ้ว และมีความสูงของเสาจากกึ่งกลางของตำแหน่งยึดรั้งบนถึงล่างเท่ากับ 144 นิ้ว คานที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ W30x99 และเสามีขนาดหน้าตัดเท่ากับ W14x145 ซึ่งเป็นหน้าตัด W-Flange ตามหนังสือมาตรฐาน AISC 2005 ทุกประการ ขนาดหน้าตัดแสดงโดยสรุปไว้ในตารางที่ 4.1 การใส่แรงวิงจักร

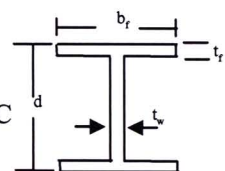
กระทำกับชิ้นงานทดสอบ จะกระทำได้โดยผ่านเครื่องกำเนิดแรง (Actuator) กระทำที่ปลายคาน แสดง
ดังรูป ลักษณะการใส่แรงวัฏจักรจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบกำหนดโดย SAC 1997 ดังแสดง
ในรูปที่ 3.5 เครื่องกำเนิดแรงจะทำการผลักชิ้นงานทดสอบไปทางด้านซ้าย จนถึงระยะ 0.53 นิ้ว และ
ผลักกลับทิศทางขวาจนถึงค่าลบ 0.53 นิ้ว ในระหว่างที่ผลักนี้ เครื่องจะบันทึกแรงตอบสนองของ
ชิ้นงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการผลัก และบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ เป็นคู่ลำดับระหว่างระยะทางที่ผลักกับ
แรงตอบสนองของข้อต่อคาน-เสา ชิ้นงานทดสอบจะถูกผลักเป็นรอบๆ โดยจะมีรอบของระยะการ
เคลื่อนที่เท่ากับ 0.71 นิ้วและ 1.07 นิ้ว อย่างละ 6 รอบ 1.42 นิ้วจำนวน 4 รอบ 2.13 นิ้ว 2.85 นิ้ว 4.27 นิ้ว
5.69 นิ้วและ 7.11 นิ้ว อย่างละ 2 รอบ ในระหว่างการผลักที่ระยะการเคลื่อนที่ตั้งแต่ 1.42 นิ้ว ถึง 7.11
นิ้วจะมีการสลับด้วยระยะการเคลื่อนที่ 0.71 นิ้ว จำนวน 2 รอบก่อนที่จะมีการเปลี่ยนระยะการผลักให้
มากขึ้นตามลำดับ

นอกจากนี้ ระยะการผลักชิ้นงานทดสอบ ยังมีความสัมพันธ์กับมุมการหมุนของข้อต่อโดยรวม
(Story Drift Angle) ด้วยดังนี้ ระยะการเคลื่อนที่แนวราบเท่ากับ 0.5 นิ้ว ข้อต่อจะมีการหมุนประมาณ
0.004 เรเดียน ที่ 0.71 นิ้ว ข้อต่อจะหมุนประมาณ 0.005 เรเดียน ที่ 1.07 นิ้ว ข้อต่อหมุนประมาณ 0.008
เรเดียน ที่ 1.42 นิ้วข้อต่อหมุนประมาณ 0.01 เรเดียน ที่ 2.13 นิ้ว เท่ากับ 0.016 เรเดียน ที่ 2.85 นิ้ว เท่ากับ
0.021 เรเดียน ที่ 4.27 นิ้ว เท่ากับ 0.032 เรเดียน ที่ 5.69 นิ้ว เท่ากับ 0.042 เรเดียน และ ที่ 7.11 นิ้ว ข้อต่อ
จะหมุนเท่ากับ 0.053 เรเดียน ค่าที่ได้จากการทดสอบ จะถูกนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรง
ตอบสนองของข้อต่อ กับค่าการเคลื่อนที่ของปลายคาน โดยลักษณะเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นวงรอบ
(loop) ตามจำนวนรอบของการเคลื่อนที่ของข้อต่อ ลักษณะเส้นกราฟประเภทนี้มีชื่อเฉพาะว่า
Hysteresis loop ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่ข้อต่อสามารถดูดซับได้ ในกรณีที่วงรอบขนาดใหญ่ จะ
หมายความว่าสามารถดูดซับพลังงานจากแผ่นดินไหวได้ดีกว่าวงรอบที่มีขนาดเล็ก



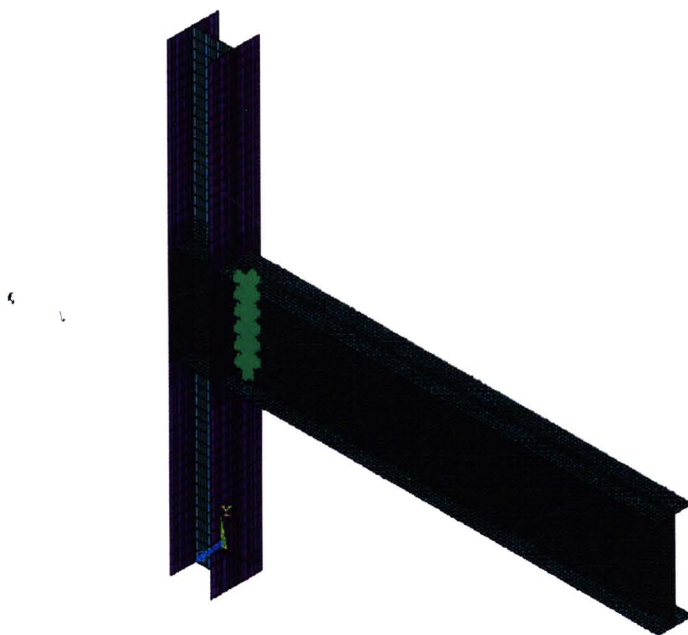
รูปที่ 4.1 แสดงขนาดและการติดตั้งชิ้นงานที่ทดสอบที่มหาวิทยาลัยแห่งรัฐมิชิแกน

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดหน้าตัดคานและเสาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ExBSh1C



ตัวอย่าง	ความลึก	แผ่นตั้ง	ปีก		ความยาว
	d	ความหนา	ความกว้าง	ความหนา	
		t_w	b_f	t_f	
	นิ้ว	นิ้ว	นิ้ว	นิ้ว	นิ้ว
คาน	29.65	0.52	10.45	0.67	136
เสา	14.75	0.68	15.5	1.09	144

รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นตามข้อกำหนดในบทที่ 3 มีขนาดหน้าตัด ขนาดความยาวคานและเสา รายละเอียดต่างๆ และคุณสมบัติอื่นๆ เหมือนกับชิ้นงานทดสอบในข้อ 4.1 ทุกประการ

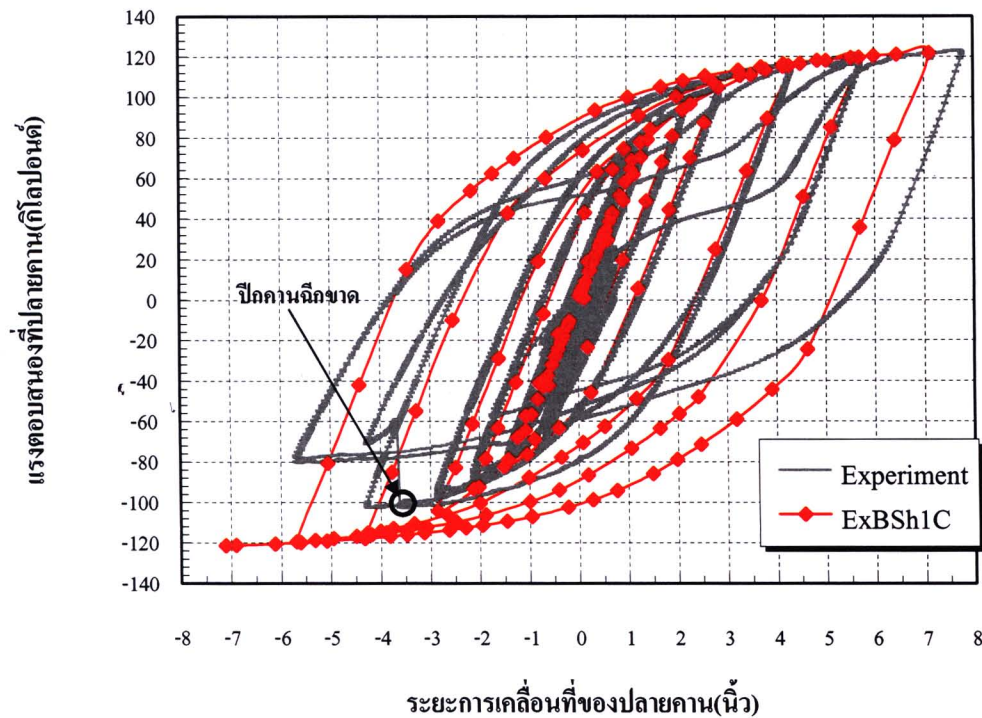


รูปที่ 4.2 แบบจำลองไฟไนลิเมนต์ ExBSh1C

4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนลิเมนต์กับผลการทดสอบชิ้นงาน

การเปรียบเทียบผล สามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษากราฟแรงตอบสนองของข้อต่อ วัดที่ปลายคาน กับระยะการเคลื่อนที่ของปลายคาน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เส้นกราฟแสดงในรูปที่ 4.3 มี 2 เส้น คือ เส้นกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนลิเมนต์ แสดงด้วยเส้นและจุดประ ส่วนผลการทดสอบจริงแสดงด้วยเส้นสีที่จางกว่า โดยภาพรวมจะพบว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนลิเมนต์ ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยเฉพาะในช่วงที่ยังไม่เกินพิกัดยืดหยุ่น (Elastic) เมื่อเกินพิกัดยืดหยุ่นแล้ว ก็ยังพบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ให้ผลดีมากขึ้นถึงสภาวะที่ปีกคานล่างของตัวอย่างทดสอบฉีกขาดในรอบที่ 2 ของการผลักลายคานเท่ากับ 4.27 นิ้ว จากนั้นชิ้นงานทดสอบก็จะมีค่ากำลัง (Stiffness) ลดลง จึงทำให้ผลการวิเคราะห์แตกต่างจากผลการทดสอบ อย่างไรก็ตาม ในส่วนของปีก

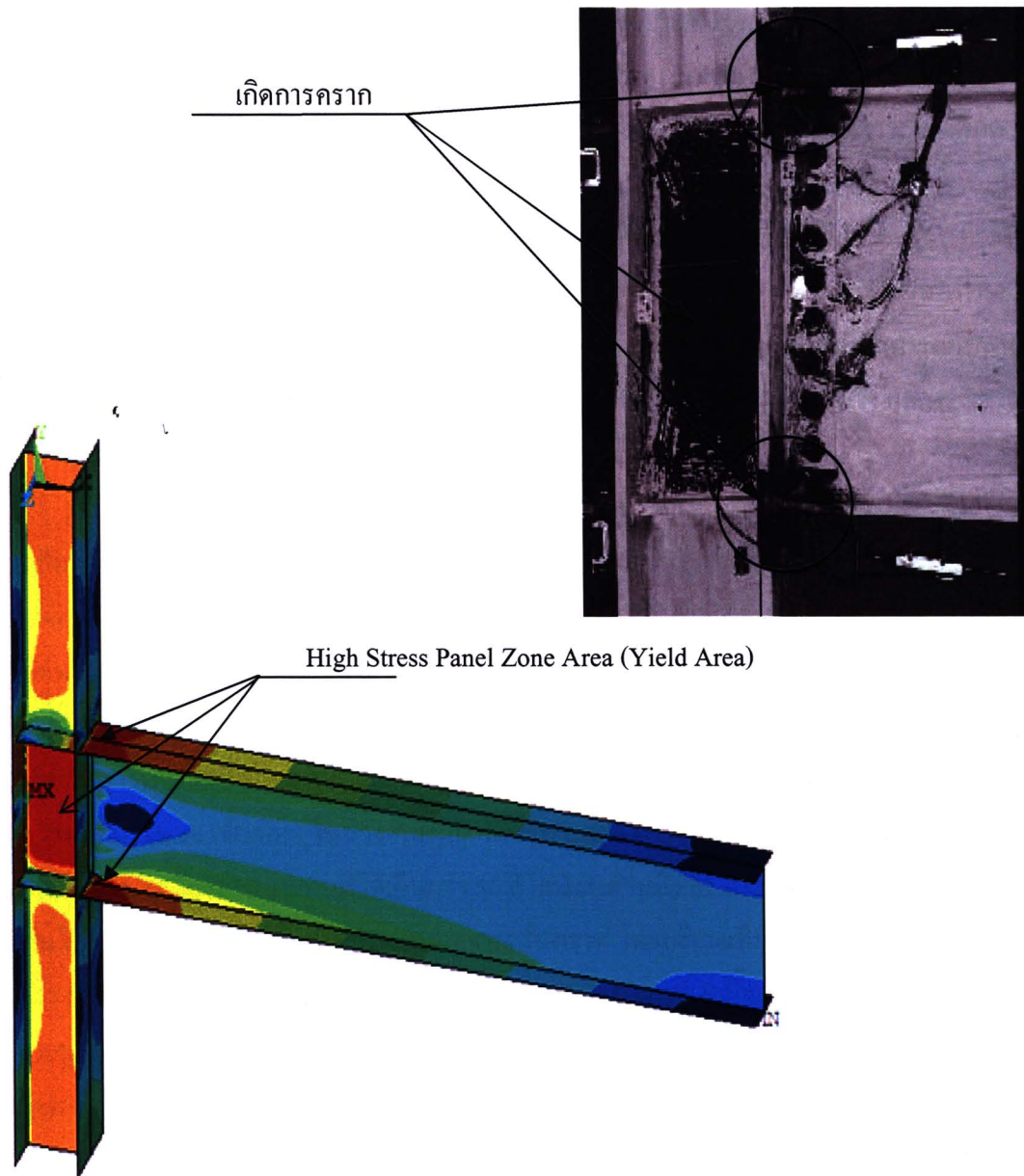
คานบน ซึ่งไม่ฝักใฝ่ฝ่ายใด ทำให้ในรอบของการผลัดที่เป็นบวก ข้อต่อมีค่าแรงตอบสนองสูงสุดประมาณ 120 กิโลปอนด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตอบสนองที่ตำแหน่งปลายคานกับระยะเคลื่อนที่ของปลายคาน

รูปที่ 4.4 แสดงค่าความเค้น von-Mises ของแบบจำลอง เทียบกับรูปถ่ายชิ้นงาน จากการทดสอบที่ระยะปลายคานเคลื่อนที่เท่ากับ 4.27 นิ้ว จากการทดสอบพบว่า บริเวณแผ่น Panel Zone ของชิ้นงานทดสอบเกิดการครากทั้งแผ่นและที่บริเวณรอยต่อระหว่างปีกคานบนและล่าง กับหน้าเสาที่เกิดการครากขึ้นอย่างมาก สังเกตได้จากการที่สีขาวที่ทาไว้ เกิดการหลุดร่อนออก เมื่อเทียบกับการกระจายตัวของค่าความเค้น von-Mises จะพบว่า ตรงตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่เกิดการครากมากๆ ค่าความเค้น von-Mises จะมีค่าสูงมากเช่นกัน คือมีค่าตั้งแต่ 50 ถึง 62 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว นั้นแสดงว่า บริเวณเหล่านี้เกิดการครากแล้วเช่นกัน ส่วนในบริเวณอื่นๆ ของแบบจำลอง ก็จะมีค่าความเค้น von-Mises ลดน้อยลงไปตามแถบสีที่แสดงในรูป และในบางบริเวณมีค่าน้อยมาก แสดงว่าบริเวณเหล่านี้อยู่ในช่วงพิกัดยึดหยุ่น

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองไฟในอติเม้นต์มีความถูกต้องสูง สามารถทำนายแรงตอบสนองของข้อต่อคาน-เสาเหล็กได้ดีมาก นอกจากนี้ยังสามารถแสดงพฤติกรรมการครากได้ตรงกับตำแหน่งที่เกิดการครากในชิ้นงานทดสอบ ถึงแม้ว่าแบบจำลองไฟในอติเม้นต์นี้ไม่สามารถทำนายแรงตอบสนองของข้อต่อ ณ เวลาที่ปีกคานเกิดการฉีกขาดได้ แต่แบบจำลองสามารถระบุบริเวณที่น่าจะเกิดการฉีกขาดได้ตรงกับตำแหน่งที่เกิดการฉีกขาดของปีกคานจริงในชิ้นงานทดสอบ กล่าวคือ บริเวณปีกคาน ตรงตำแหน่งที่ติดกับหน้าเสาทั้งด้านบนและล่าง ซึ่งก็คือตำแหน่งที่เกิดการฉีกขาดจริงในการทดสอบ จะมีค่าความเค้นสูงสุดมากกว่าที่บริเวณอื่น จึงอาจสันนิษฐานได้ว่า ตรงตำแหน่งนี้น่าจะเกิดการฉีกขาด ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับที่เกิดในผลการทดสอบ



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความเค้น von-Mises ของแบบจำลอง ExBS_h1C และรูปถ่ายจากการทดสอบที่ระยะ
ปลายคานเคลื่อนที่เท่ากับ 4.27 นิ้ว

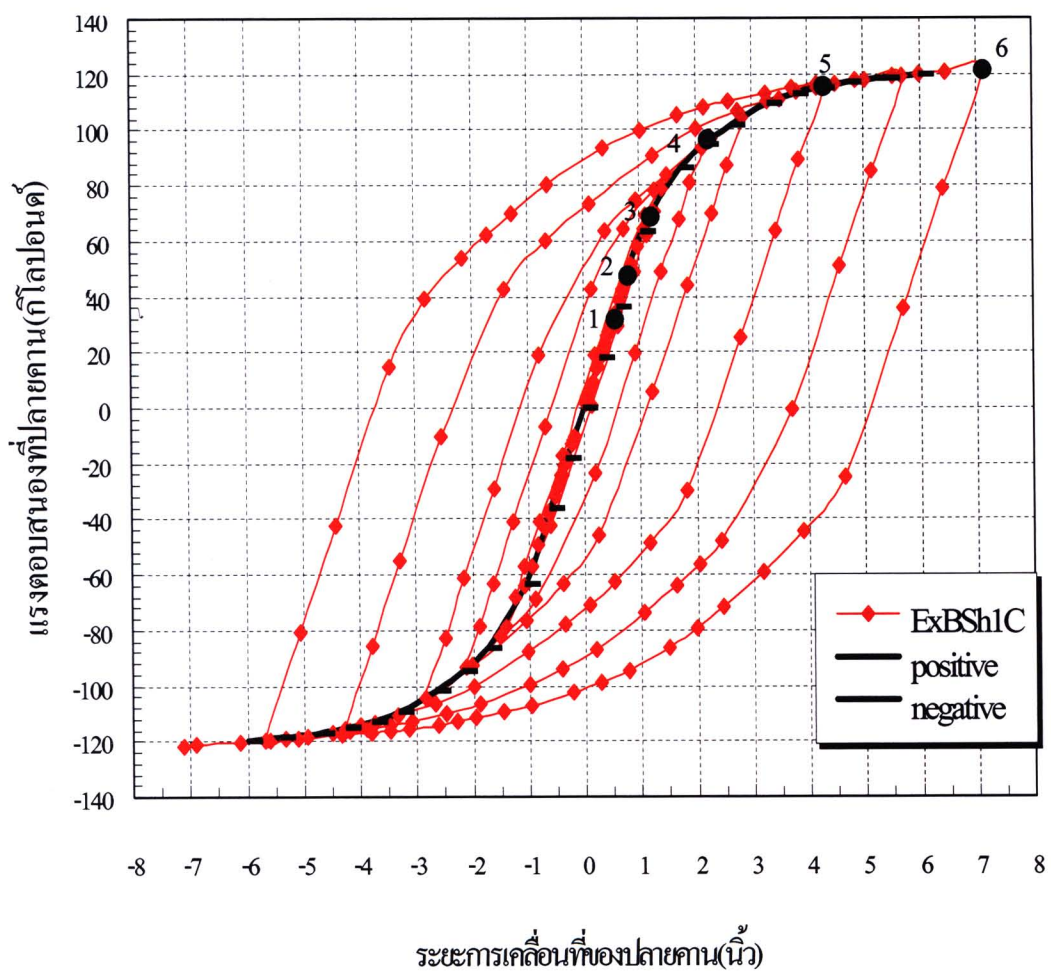
4.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมองค์รวมของแบบจำลอง ExBSH1C

ในขั้นต้นสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นนั้นมีความถูกต้องแม่นยำสูง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการเรียนรู้เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ข้อต่อนี้จะถูกนำเสนอถึงการตอบสนองของข้อต่อตามสถานะต่างๆ กัน เริ่มตั้งแต่ในสถานะที่ยังไม่เกิดพิกัดยืดหยุ่น (Elastic) จนถึงสถานะเกินพิกัดยืดหยุ่น (Inelastic) ในลักษณะการต่อเนื่องของการเคลื่อนที่ปลายคาน

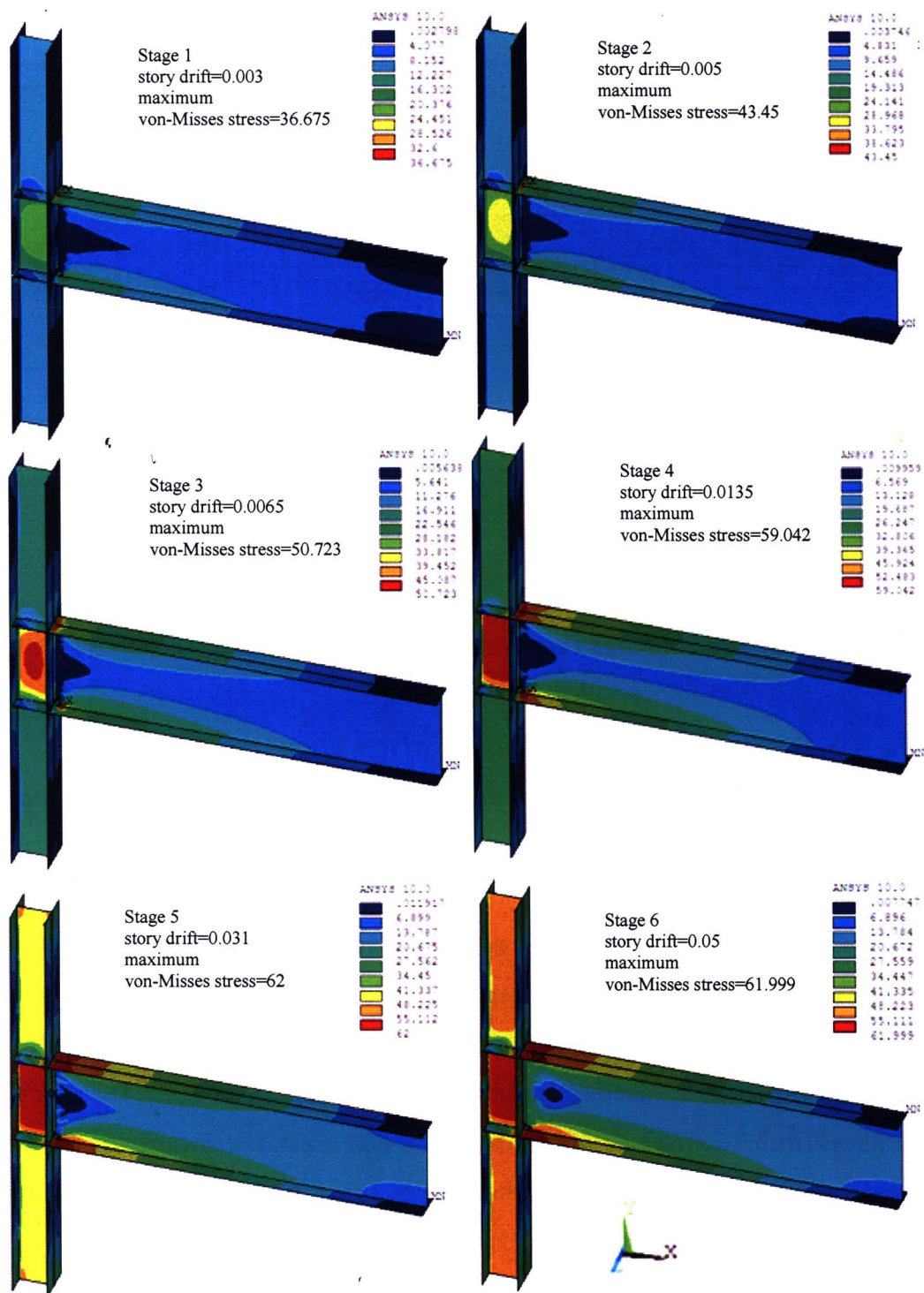
การนำเสนอผลการวิเคราะห์ จะทำโดยลากเส้นต่อจุดที่ค่าแรงตอบสนองที่ปลายคานสูงสุดในแต่ละรอบของการปลักในทิศทางเดียวกัน แสดงดังเส้นทึบในรูปที่ 4.5 จุด 1-6 แสดงค่าในรอบที่ระยะปลักเป็นบวก จุดเหล่านี้จะแสดงสถานะต่างๆ ของข้อต่อ ซึ่งแต่ละสถานะ ข้อต่อก็จะมีผลการตอบสนองที่ต่างกันออกไป และเนื่องจากความสมมาตรของผลตอบสนอง ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่า ผลการวิเคราะห์ทั้งในด้านที่เป็นบวกจะมีค่าเท่ากับด้านที่เป็นลบ เพียงแต่กลับทิศกันเท่านั้น

รูปที่ 4.6 แสดงค่าความเค้น von-Mises ที่สภาวะ 1 ถึง 6 ของแบบจำลอง ExBSH1C ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงตอบสนองที่ปลายคาน และระยะการเคลื่อนที่ของปลายคาน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากรูปที่ 4.5 ที่จุด 1 2 และ 3 เส้นกราฟยังคงเป็นเส้นตรง แสดงว่าพฤติกรรมของข้อต่อยังอยู่ในช่วงพิกัดยืดหยุ่น ดังนั้นค่าความเค้น von-Mises ในรูป 4.6 สภาวะ 1 2 และ 3 ควรจะมีค่าไม่เกิน 50 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่ออ่านจากแถบสีแสดงค่าความเค้นก็พบว่า ค่าที่อ่านได้อยู่ในช่วงไม่เกิน 50 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้วจริง ส่วนจุด 4 5 และ 6 ในรูปที่ 4.5 แสดงอยู่บนส่วนของเส้นกราฟที่เป็นเส้นโค้ง แสดงว่าพฤติกรรมของข้อต่ออยู่ในช่วงเกินพิกัดยืดหยุ่น แสดงว่าในรูปที่ 4.6 สภาวะ 4 5 และ 6 ค่าความเค้น von-Mises จะต้องอ่านค่าแถบสีได้เกินกว่า 50 กิโลปอนด์จนถึง 62 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งแถบสีที่อ่านได้ก็ให้ค่าสอดคล้องกับการประเมินผลจากเส้นกราฟ โดยบริเวณที่มีค่าความเค้น von-Mises เกินกว่า 50 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว แสดงว่าเกิดการคราก และการครากนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณแผ่น Panel Zone และบริเวณปีกคานบนและล่างที่อยู่ติดกับหน้าเสา ส่วนบริเวณที่ไกลออกมาจากหน้าเสา ค่าความเค้น von-Mises ก็จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ทั้งในบริเวณปีกคาน และแผ่นเอวของคาน เมื่อพิจารณาเป็นลักษณะแบบต่อเนื่องจะพบว่า ที่แผ่น Panel Zone จะเริ่มมีค่าความเค้นสูงสุดที่ตรงกลาง จากนั้นจะน้อยลงในบริเวณรอบนอก และน้อยที่สุดที่บริเวณติดกับแผ่น Continuity Plate เมื่อระยะการเคลื่อนที่ของปลายคานเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นสูงสุดนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนทั้ง แผ่น Panel Zone เกือบทั้งแผ่นเกิดความเค้นสูงสุดเท่ากับ 62 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว ลักษณะการกระจายตัวของค่าความเค้นในส่วนปีกคานบนและล่าง ตรงบริเวณใกล้กับข้อต่อ (หน้าเสา) ก็จะมีลักษณะเหมือนกันคือ ค่าความเค้นสูงสุดค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะการเคลื่อนที่ของปลายคานที่เพิ่มมากขึ้น ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเค้น

von-Mises สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุด ของแบบจำลอง ExBSh1C ซึ่งอ่านได้จากรูปที่ 4.6 ตาม
สภาวะต่างๆ จาก 1-6



รูปที่ 4.5 แรงตอบสนองที่ปลายคานกับระยะเคลื่อนที่ของปลายคาน ที่สภาวะ 1-6 ของแบบจำลอง
ExBSh1C



รูปที่ 4.6 แสดงค่าความเค้น von-Mises ที่สภาวะ 1-6 ของแบบจำลอง ExBSh1C

ตารางที่ 4.2 ค่าความเค้น von-Mises สูงสุดและตำแหน่งที่เกิด สภาวะ 1-6 ของแบบจำลอง ExBSh1C

สภาวะ	ระยะเคลื่อนที่ ปลายคาน (นิ้ว)	การหมุน ของข้อต่อ (เรเดียน)	แรง ตอบสนอง (กิโลปอนด์)	ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด	ตำแหน่งการเกิด ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด
1	0.53	0.003	20	36.675	ปีกคานติดกับหน้าเสา
2	0.71	0.005	62	43.452	Panel Zone และ ปีกคานติดกับหน้าเสา
3	1.08	0.0065	95	50.724	
4	2.147	0.0135	110	59.354	
5	4.303	0.031	116	62	
6	7.163	0.05	120	62	

4.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมองค์ประกอบย่อยของแบบจำลอง ExBSh1C

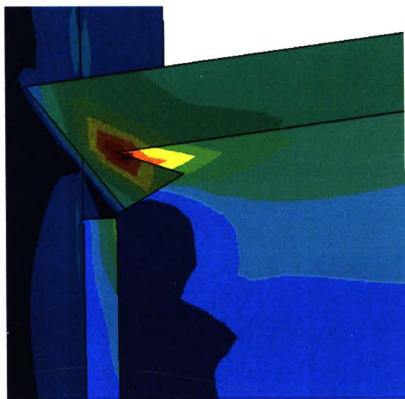
องค์ประกอบย่อยของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะกล่าวถึงคือ บริเวณ Access Hole บริเวณแผ่น Shear Tab บริเวณแผ่น Continuity Plate และปีกคานบน และบริเวณแผ่น Panel Zone โดยค่าที่จะนำเสนอเป็นค่าการกระจายของค่าความเค้น von-Mises ที่สภาวะการเคลื่อนที่ของปลายคานต่างๆ จากสภาวะ 1-6

รูปที่ 4.7 เป็นการกระจายตัวของค่าความเค้น von-Mises ที่บริเวณ Access Hole จากรูปจะเห็นว่าค่าความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ บริเวณปลายของ Access Hole ด้านที่ติดกับแผ่นปีกคานก่อน จากนั้นค่าความเค้นสูงสุดนี้จะค่อยๆ กระจายตัวออก 2 ทิศทางคือ ตามแนวกว้างของปีกคาน และ กระจายตัวลงสู่ส่วนเว้าของ Access Hole ในแผ่นเอวคาน ค่าความเค้นสูงสุดนี้จะกระจายจนเต็มหน้าตัดปีกคาน และกระจายมาทางด้านหลังของ Access Hole เต็มบริเวณปีกคานด้านหลัง ค่าความเค้นที่ได้จะมีค่าเกินจุดคราก ส่วนบริเวณแผ่นเอวคานที่ติดกับปีกคานเหนือส่วนเว้าของ Access Hole ก็จะทำให้เกิดความเค้นสูงสุดเกินจุดครากเช่นกัน คือมีค่าเกิน 50 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากผลการวิเคราะห์นี้ สามารถสรุปได้ว่า ที่บริเวณจุดต่อระหว่างปลาย Access Hole กับแผ่นปีกคาน สามารถเกิดการฉีกขาดของเหล็กได้ เพราะมีค่าความเค้นสูงสุดมาก และอยู่ในบริเวณที่แคบๆ การกระจายตัวของค่าความเค้นมีน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบชิ้นงานขนาดใหญ่ พบว่ารอยแตกจะเกิดขึ้นที่บริเวณนี้ก่อน และทำให้เกิดรอยแตก

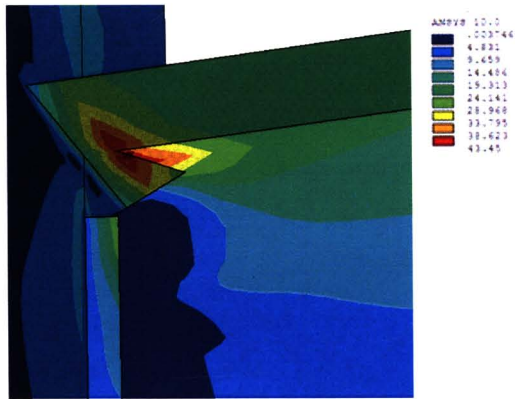
ทะลุผ่านความหนาของปีกคาน ขึ้นสู่ผิวด้านบนของปีกคาน จากนั้นรอยแตกนี้จะกระจายตัวออกด้านข้างทำให้ปีกคานขาดออกจากกัน แสดงดังรูปที่ 4.8 ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเค้น von-Mises สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุด ซึ่งอ่านได้จากรูปที่ 4.7 ตามสถานะต่างๆ จาก 1-6

ตารางที่ 4.3 ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด บริเวณ Access Hole ของแบบจำลอง ExBSh1C

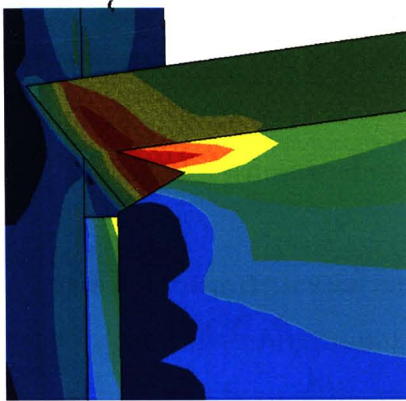
สถานะ	ระยะเคลื่อนที่ ปลายคาน (นิ้ว)	การหมุน ของข้อต่อ (เรเดียน)	แรง ตอบสนอง (กิโลปอนด์)	ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด	ตำแหน่งการเกิด ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด
1	0.53	0.003	20	36.675	ใต้ปีกคานบนติดกับ ปลาย Access Hole
2	0.71	0.005	62	43.45	
3	1.08	0.0065	95	50.723	
4	2.147	0.0135	110	59.042	
5	4.304	0.031	116	62	
6	7.158	0.05	120	61.999	



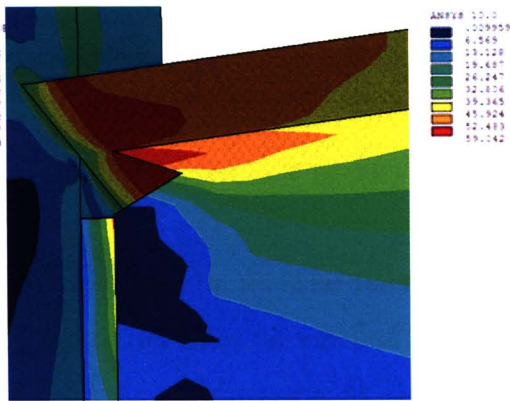
Stage 1
story drift=0.003
maximum von-Mises stress=36.675



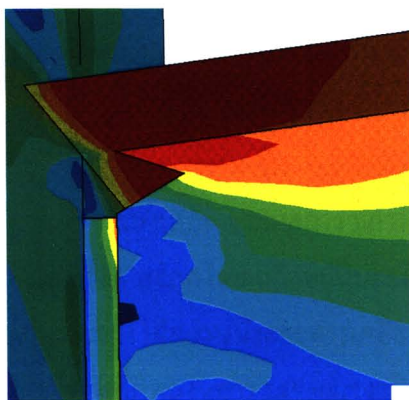
Stage 2
story drift=0.005
maximum von-Mises stress=43.45



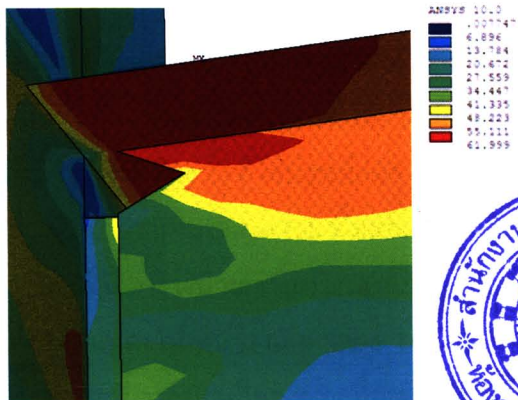
Stage 3
story drift=0.0065
maximum von-Mises stress=50.723



Stage 4
story drift=0.0135
maximum von-Mises stress=59.042



Stage 5
story drift=0.031
maximum von-Mises stress=62



Stage 6
story drift=0.05
maximum von-Mises stress=61.999



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเค้น von-Mises ที่บริเวณ Access Hole ที่สภาวะ 1-6 ของแบบจำลอง ExBSh1C



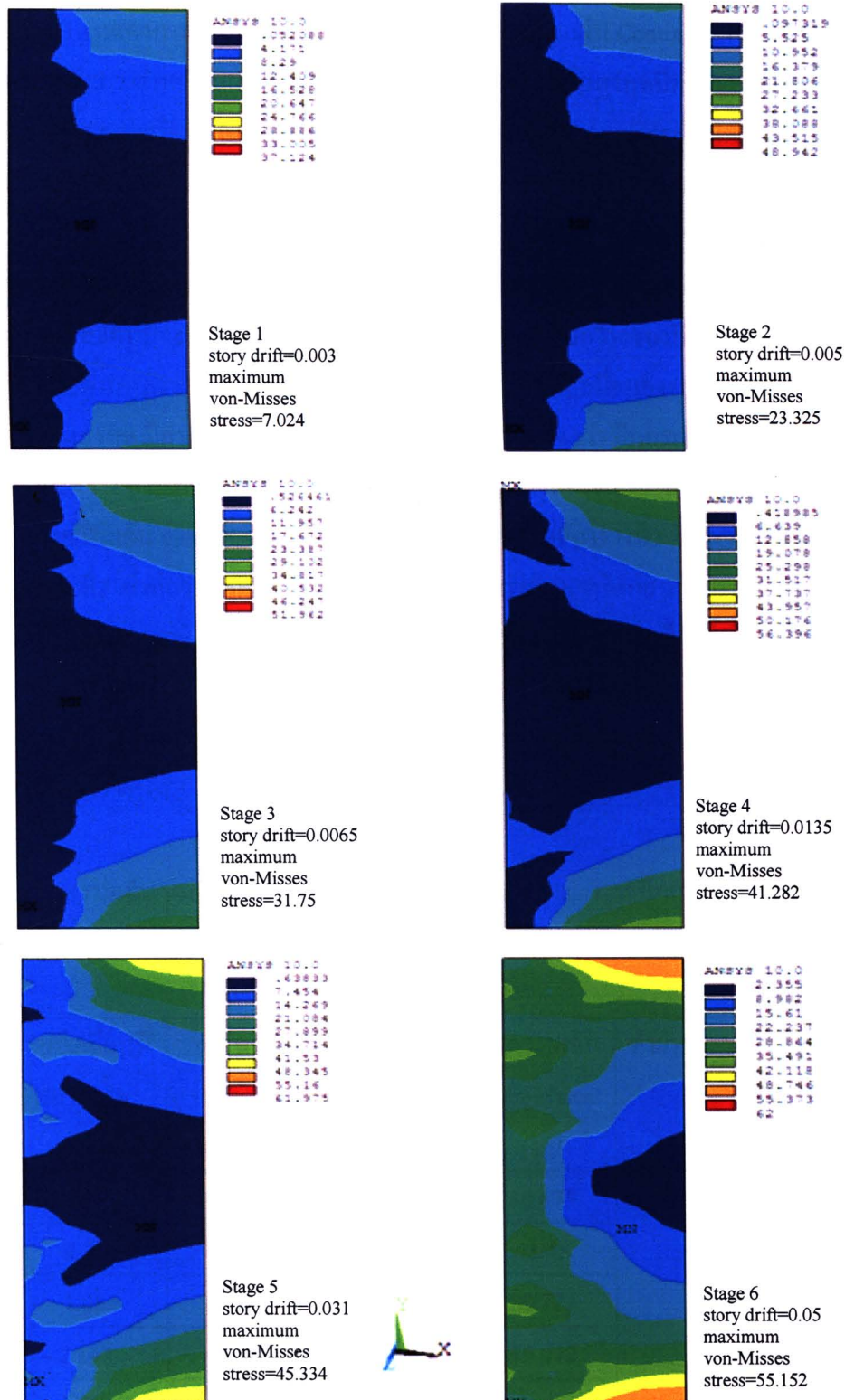
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการแตกของปีกคานด้านผิวบน ที่บริเวณ Access Hole ของชิ้นงานทดสอบ

รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายตัวของค่าความเค้น von-Mises ในแผ่น Shear Tab จากรูปจะเห็นว่าค่าความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่มุมบนและล่างด้านขวาของแผ่น Shear Tab และเมื่อค่าการเคลื่อนที่ของปลายคานเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นสูงสุดนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าประมาณ 55 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว แสดงว่าที่มุมบนและล่างขวาของแผ่น Shear Tab จะเกิดการร้าว อย่างไรก็ดีตาม เป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งว่า แผ่น Shear Tab บริเวณที่ติดกับหน้าเสา คือด้านซ้ายมือในรูป จะมีค่าความเค้น von-Mises ต่ำมาก และเป็นบริเวณที่มีค่าน้อยที่สุดในแผ่น Shear Tab เมื่อค่าการเคลื่อนที่มากขึ้น ค่าความเค้นบริเวณนี้จึงค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะเห็นว่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างช้า และเพิ่มขึ้นไม่มากนัก เมื่อถึงสถานะที่ 6 พบว่า ค่าความเค้น von-Mises ในบริเวณนี้มีค่าสูงสุดเพียง 20 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งยังไม่ถึงจุดร้าวของเหล็ก จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้นพบว่า แผ่น Shear Tab ทั้งแผ่นนั้น มีค่าความเค้น von-Mises สูงสุดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 25 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว ยกเว้นบริเวณเล็กๆ ที่มุมขวาด้านบนและล่าง เมื่อคานมีระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 7.2 นิ้ว แสดงให้เห็นว่า แผ่น Shear Tab อาจไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอในการส่งถ่ายแรงเฉือนเข้าสู่เสา นอกจากนี้ จากทฤษฎีของคาน ที่กำหนดไว้ว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดควรเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางแผ่น Shear Tab และค่าแรงเฉือนส่วนใหญ่จะต้องเกิดขึ้นในแผ่น Shear Tab และส่วนน้อยเท่านั้นที่จะเกิดขึ้นในปีกคาน แต่จากผลการวิเคราะห์ สามารถสรุปผลได้ตรงข้ามกับทฤษฎีของคาน กล่าวคือ ค่าแรงเฉือนส่วนใหญ่ ไม่ได้เกิดขึ้นในแผ่น Shear Tab และ

ค่าแรงเฉือนสูงสุดก็ไม่ได้เกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางของแผ่น Shear Tab ด้วย นอกจากนี้ผลที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานทดสอบขนาดใหญ่ ก็ยืนยันผลการวิเคราะห์ ดังนี้คือ แผ่น Shear Tab มีความเสียหายน้อยมากและแทบจะไม่เกิดการครากเลย เมื่อเทียบกับบริเวณปีกคานบนและล่าง ตรงบริเวณจุดต่อคาน-เสา แสดงว่า การออกแบบแผ่น Shear Tab อาจเกิดข้อผิดพลาด ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเชิงลึกให้มากขึ้น เพื่อนำไปสู่ข้อสรุปสำหรับการออกแบบแผ่น Shear Tab ที่เหมาะสม รวมถึงรูปแบบแผ่น Shear Tab ที่มีประสิทธิภาพในการรับแรงเฉือนได้ดียิ่งขึ้น ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดบนแผ่น Shear Tab ที่สภาวะ 1-6 ซึ่งอ่านได้จากรูปที่ 4.9 แสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด บนแผ่น Shear Tab ของแบบจำลอง ExBSh1C

สภาวะ	ระยะเคลื่อนที่ ปลายคาน (นิ้ว)	การหมุน ของข้อต่อ (เรเดียน)	แรง ตอบสนอง (กิโลปอนด์)	ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด	ตำแหน่งการเกิด ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด
1	0.53	0.003	20	7.024	มุมบนและล่างด้านขวามือ ของแผ่น Shear Tab
2	0.71	0.005	62	23.325	
3	1.08	0.0065	95	31.75	
4	2.147	0.0135	110	41.282	
5	4.304	0.031	116	45.334	
6	7.158	0.05	120	55.152	

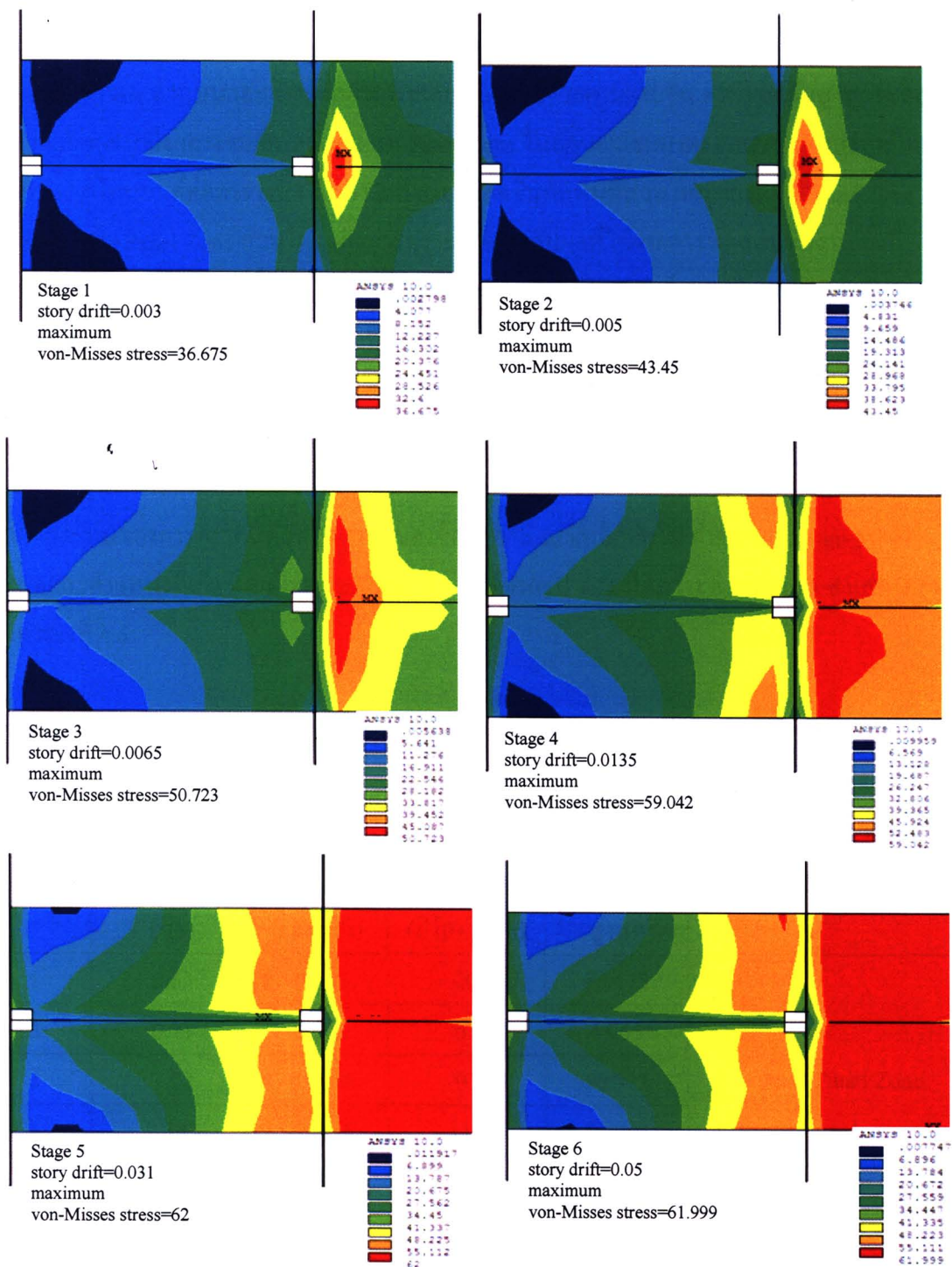


รูปที่ 4.9 แสดงค่าความเค้น von-Mises บนแผ่น Shear Tab ที่สภาวะ 1-6 ของแบบจำลอง ExBSh1C

รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวค่าความเค้น von-Mises ในแผ่น Continuity Plate และในปีกคานบนติดกับหน้าเสา สำหรับ แผ่น Continuity Plate นั้น ค่าความเค้นสูงสุดมีค่าประมาณ 55 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตรงบริเวณที่ติดกับปีกคาน มีระยะวัดจากหน้าเสาด้านที่ติดกับปีกคานประมาณหนึ่งในสี่ของระยะความลึกของเสา แสดงว่าบริเวณนี้ เหล็กจะเกิดการคราก ส่วนบริเวณอื่นที่เหลือของแผ่น Continuity Plate จะไม่เกิดการคราก ส่วนปีกคานบนนั้น จะเกิดค่าความเค้นสูงสุดที่บริเวณจุดกึ่งกลางความกว้างของปีกคาน ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่ตรงกับปลายของ Access Hole ติดกับปีกคานบนด้านผิวล่าง ค่าความเค้นนี้จะค่อยๆขยายตัวออกด้านข้าง จนเต็มความกว้างของปีกคาน และจากนั้น จะกระจายตัวมาทางด้านหลังห่างออกจากหน้าเสา ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเมื่อบมองจากผิวด้านล่างของปีกคาน ค่าความเค้นสูงสุด มีค่าเท่ากับ 62 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว แสดงว่า ปีกคานสามารถเกิดการครากขึ้นได้ในบริเวณกว้าง ถ้าบริเวณอื่นไม่เกิดการฉีกขาดเสียก่อน ทั้งนี้อาจเป็นเรื่องค่อนข้างยาก เพราะบริเวณที่เกิดค่าความเค้น von-Mises สูงสุดเท่ากับ 62 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่บริเวณกึ่งกลางของคานเกิดขึ้นในสภาวะที่ 2 ซึ่งถือว่าเร็วมาก ดังนั้น จุดนี้น่าจะเกิดการฉีกขาดได้ก่อนที่ค่าความเค้นจะสามารถกระจายตัวได้ถึงสภาวะที่ 6 คาดว่าน่าจะเกิดการฉีกขาดที่ประมาณสภาวะที่ 4 ซึ่งมีค่าการเคลื่อนที่ของปลายคานเท่ากับ 3.34 นิ้ว หรือข้อต่อหมุนไปประมาณ 0.022 เรเดียน ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด และตำแหน่งที่เกิดบนแผ่น Continuity Plate และปีกคานบนที่สภาวะ 1-6 ซึ่งอ่านได้จากรูปที่ 4.9 แสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด บนแผ่น Continuity Plate และปีกคานบนของแบบจำลอง ExBSh1C

สภาวะ	ระยะเคลื่อนที่ ปลายคาน (นิ้ว)	การหมุน ของข้อต่อ (เรเดียน)	แรง ตอบสนอง (กิโลปอนด์)	ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด	ตำแหน่งการเกิด ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด
1	0.53	0.003	20	36.675	ปีกคานบน ติดกับหน้าเสา
2	0.71	0.005	62	43.45	
3	1.08	0.0065	95	50.723	
4	2.147	0.0135	110	59.042	
5	4.304	0.031	116	62	
6	7.158	0.05	120	61.999	

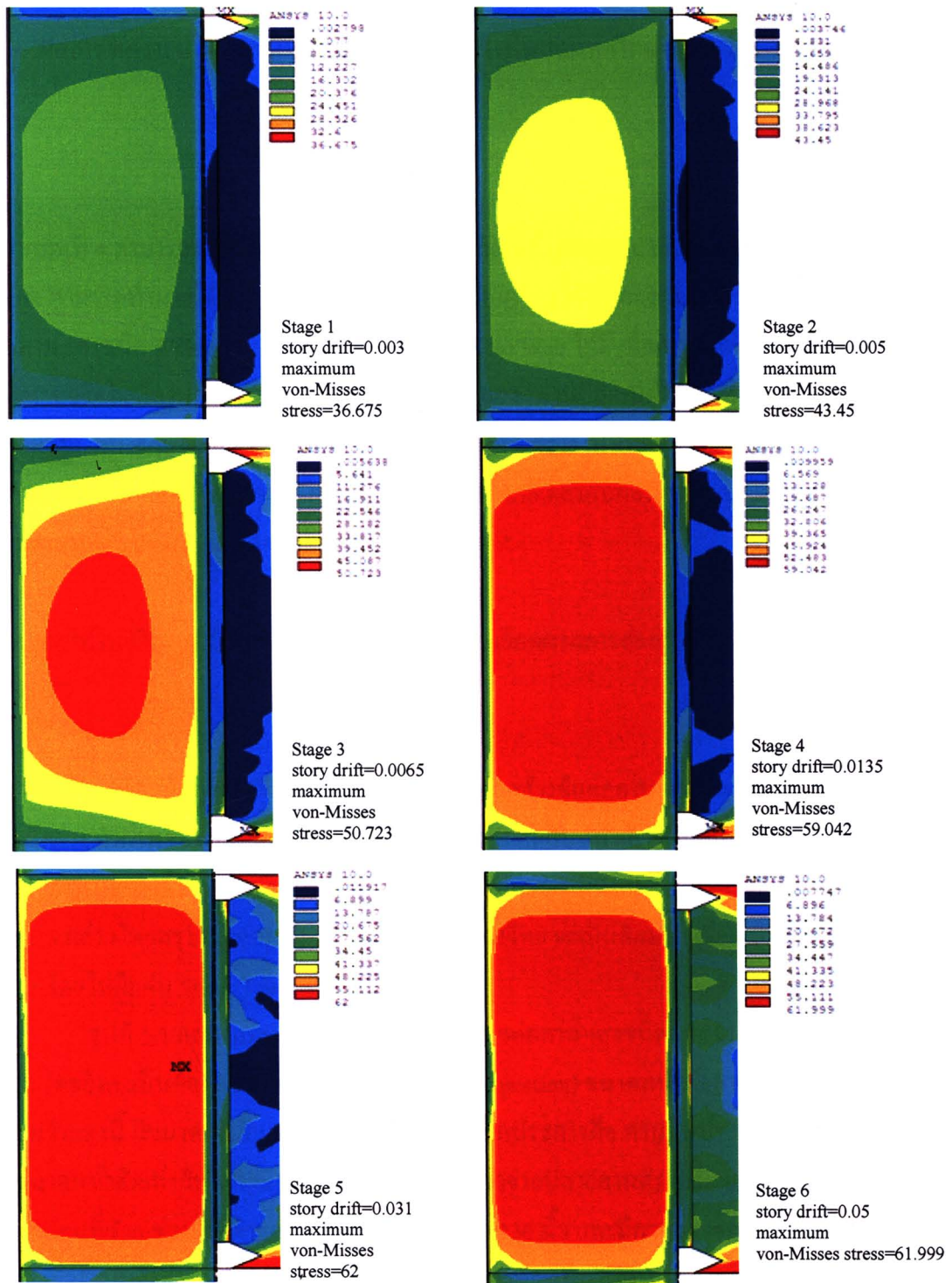


รูปที่ 4.10 แสดงค่าความเค้น von-Mises ในแผ่น Continuity Plate และปีกคานบนติดกับหน้าเสา ที่สภาวะ 1-6 ของแบบจำลอง ExBSh1C

รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของค่าความเค้น von-Mises บนแผ่น Panel Zone จากรูปค่าความเค้นสูงสุด จะเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางของแผ่น Panel Zone และมีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณติดกับ แผ่น Continuity Plate ด้านบนและล่าง เมื่อค่าการเคลื่อนที่ของปลายคานเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นสูงสุดจะค่อยๆ ขยายตัวออกจากกึ่งกลางจนเต็มบริเวณแผ่น Panel Zone ในลักษณะสมมาตร ค่าความเค้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 62 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่สภาวะที่ 6 และเกิดขึ้นกับพื้นที่ส่วนใหญ่ของแผ่น Panel Zone แสดงว่า แผ่น Panel Zone ส่วนใหญ่เกิดการคราก ซึ่งตรงกับผลที่ได้จากการทดสอบชิ้นงาน ทั้งนี้ เนื่องจากข้อต่อคาน-เสาชุดนี้ ถูกออกแบบให้แผ่น Panel Zone มีความแข็งแรงน้อย เมื่อเทียบกับความแข็งแรงของคาน จึงทำให้เกิดการครากเป็นบริเวณกว้างในแผ่น Panel Zone ทั้งนี้การเกิดการครากที่มากเกินไปในแผ่น Panel Zone อาจส่งผลด้านลบต่อพฤติกรรมรวมขององค์อาคาร เช่น ปัญหาแรงเยื้องศูนย์ อย่างไรก็ตาม ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนลิเมนต์ ไม่สามารถแสดงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับข้อต่อเนื่องจากการครากที่มากเกินไปของแผ่น Panel Zone จึงอาจต้องทำการวิเคราะห์ต่อไปในเชิงลึก เพื่อหาผลกระทบของการครากนี้ต่อพฤติกรรมของข้อต่อคาน-เสาหลักต่อไป ค่าความเค้น von-Mises สูงสุดและตำแหน่งที่เกิดในแผ่น Panel Zone ที่อ่านได้จากรูป 4.11 ที่สภาวะต่างๆ จาก 1-6 แสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด ในแผ่น Panel Zone ของแบบจำลอง ExBSH1C

สภาวะ	ระยะเคลื่อนที่ ปลายคาน (นิ้ว)	การหมุน ของข้อต่อ (เรเดียน)	แรง ตอบสนอง (กิโลปอนด์)	ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด	ตำแหน่งการเกิด ค่าความเค้น von-Mises สูงสุด
1	0.53	0.003	20	36.675	กลาง Panel Zone
2	0.71	0.005	62	43.45	
3	1.08	0.0065	95	50.723	
4	2.147	0.0135	110	59.042	
5	4.304	0.031	116	62	
6	7.158	0.05	120	61.999	



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความเค้น von-Mises ในแผ่น Panel Zone ที่สภาวะ 1-6 ของแบบจำลอง ExBSh1C