

การประเมินอายุความล้าและการออกแบบปรับปรุงอายุการล้าของตัวสเปเดอร์
Fatigue Life Assesment and Improvement of a Spader



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เลขหมู่..... 55022
เลขทะเบียน..... - 4 ใ.ย. 2548
วัน,เดือน,ปี.....

b.....
i.....

การประเมินอายุความล้าและการออกแบบปรับปรุงอายุการล้าของตัวสเปเดอร์

Fatigue Life Assesment and Improvement of a Spader

โดย

นาย เก่งกล้า เรืองฤทธิ์

นาย ศักรินทร์ ไวยกุล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประเมินค่าอายุการล้าและการออกแบบปรับปรุงอายุการล้าของตัวสเปเดอร์

Fatigue Life Assesment and Improvement of a Spader

ผู้จัดทำ

1. นาย เก่งกล้า เรืองฤทธิ์ รหัสประจำตัว 44015370
2. นาย ศักรินทร์ ไวยกุล รหัสประจำตัว 44015410



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินค่าอายุการล้าและการออกแบบปรับปรุงอายุการล้าของตัวสเปเดอร์

นาย เก่งกล้า เรืองฤทธิ์ รหัสประจำตัว 44015370

นาย ศักกรินทร์ ไวยกุล รหัสประจำตัว 44015410

อ.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอวิธีการประเมินอายุการล้าและวิธีการปรับปรุงอายุการล้าของตัวสเปเดอร์โดยวิธีการ finite element method วิธีการปรับปรุงอายุการล้าด้วยการเจาะรูเพิ่มเข้าไปที่ชิ้นงานได้ถูกนำมาใช้วิธีการเจาะรูเพิ่มที่นำมาใช้มี 2 วิธีคือเจาะรูขนานกับเจาะรูวางซึ่งขนาดของรูและระยะห่างระหว่างรูมีผลต่ออายุการล้ามากจากผลการวิเคราะห์พบว่า การเจาะรูวางด้วยขนาด 13 มิลลิเมตรและระยะห่างระหว่างรู 70 มิลลิเมตร จะช่วยเพิ่มอายุการล้าได้ถึง 4 เท่า นอกจากนี้ยังได้ทำการพิสูจน์ผลที่ได้ด้วยการทำการทดลองโดยทำการทดสอบแรงดึงซึ่งพบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่มีการเจาะรูวางนั้นจะมีค่าน้อยที่สุด



Fatigue life Assesment and Improvement of a Spader

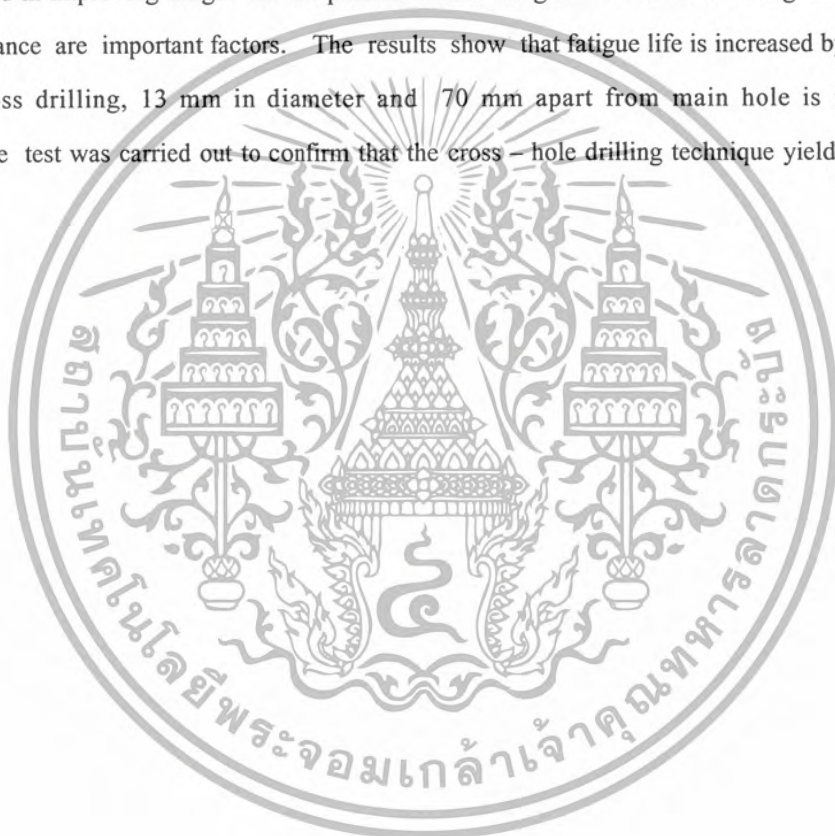
Mr .Kengkla Rueangrit 44015370

Mr. Sakarin Waiyakul 44015410

Mr. Monsak Pimsarn Adviser

Abstract

This project presents fatigue life assesment and improvement by using finite element method. The methods employed in improving fatigue life are parallel-hole drilling and cross-hole drilling. Hole diameter and drilling distance are important factors. The results show that fatigue life is increased by a factor of 4, when the cross drilling, 13 mm in diameter and 70 mm apart from main hole is introduced. Moreover, tensile test was carried out to confirm that the cross – hole drilling technique yields the lowest stress.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการเรียนวิชา Project 1,2 ซึ่งนับได้ว่าเป็นโอกาสอันดีที่จะได้นำความรู้ที่ได้ศึกษามาโดยตลอดในภาคทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานในวิชา Project 1,2 นี้ เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้และประสบการณ์ในการทำงาน เพื่อเป็นพื้นฐานในการจะก้าวออกไปสู่การปฏิบัติงานจริงในโลกอุตสาหกรรมภายนอกสถาบันต่อไป

คณะผู้จัดทำของกราบพระคุณท่านอาจารย์มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ผู้ควบคุม และให้คำปรึกษาในการจัดทำปริญญาบัตรนี้เป็นอย่างสูง จนปริญญาบัตรนี้เสร็จสมบูรณ์ขึ้นมา

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณผู้มีพระคุณที่สุดในโลกนี้ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุน และให้โอกาสคณะผู้จัดทำโดยตลอดจนถึงทุกวันนี้คือ บิดา มารดา บังเกิดเกล้าของคณะผู้จัดทำ ซึ่งคณะผู้จัดทำซาบซึ้งในพระคุณของท่านเป็นอย่างสูง ซึ่งเป็นพระคุณอันหาที่เปรียบประมาณมิได้ และขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้



นาย เก่งกล้า เรืองฤทธิ์
นาย ศักรินทร์ ไวยกุล
เมษายน 2547

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ภาพรวมของโครงการ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีความกล้า	3
2.1 กลไกความเสียหายเนื่องจากการด้า	3
2.2 ภาระการเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดคงที่	4
2.3 ภาระการเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดไม่คงที่	5
2.4 ขอบเขตของปัญหาความกล้า	5
2.5 เส้นกราฟความเค้น-อายุความกล้า	6
2.6 การสร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุความกล้า	8
2.7 ผลของความเค้นเฉลี่ย	9
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมความกล้า	13
2.9 แนวทางของความเค้นสำหรับชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะ	16
2.10 ผลของความเค้นเฉลี่ย	24
2.11 การสร้างเส้นกราฟความเค้นอายุ	28
2.12 ผลของความเค้นเฉลี่ย	30
2.13 แนวทางของความเครียด	31
2.14 เส้นกราฟความเครียด-อายุ	37
2.15 การประมาณค่าคงตัวในสมการของเส้นกราฟความเครียด-อายุ	42
2.16 ผลของความเค้นเฉลี่ย	42
บทที่ 3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	45
3.1 บทนำ	45
3.2 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	46

3.3 ความรู้พื้นฐานที่จำเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.4 การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	50
3.5 ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	50
3.6 ข้อควรระวังของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	51
3.7 หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	52
3.8 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์	55
3.9 การกำหนดจุดต่อและความกว้างแถบ	58
3.10 ฟังก์ชันการกระจัด	60
3.11 การนำไปสู่ผลเฉลยแม่นยำ	64
3.12 ข้อเสนอแนะสำหรับการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์	65
3.13 หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด	66
3.14 วิธีของกาลเลอร์กิน	68
บทที่ 4 ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดสอบชิ้นงานจำลอง	70
4.1 ลักษณะการทำงานของสเปคเตอร์	70
4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	71
4.3 การทดสอบชิ้นงานจำลอง	76
4.4 การเตรียมชิ้นงานทดลอง	76
4.5 วิธีการทดสอบ	77
4.6 ผลการทดสอบ	77
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์	78
5.1 ผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	78
5.2 อัตราส่วนของอายุการใช้งาน	110
บทที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์และวิจารณ์ผล	120
เอกสารอ้างอิง	121
ภาคผนวก	122

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงขั้นตอนต่างๆ ของความเสียหายเนื่องจากความล้า	3
2.2 แสดงคำนิยามต่างๆ ของการเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิฟูดคองที่	5
2.3 แสดงลักษณะของสภาวะทดสอบที่ใช้สร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุ	6
2.4 แสดงเส้นกราฟความเค้น-อายุการล้าจากการทดสอบที่พล็อตบนสเกลแบบต่าง ๆ	6
2.5 แสดงลักษณะทั่วไปของเส้นกราฟความเค้น-อายุและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	7
2.6 และ 2.7 แสดงผลของความเค้นเฉลี่ยบนเส้นกราฟความเค้น-อายุ และแสดงเส้นกราฟอายุคงที่ หรือ Haigh' diagramตามลำดับ	10
2.8 แสดงผลของอัตราส่วนภาระบนเส้นกราฟความเค้น-อายุ	10
2.9 แสดงเส้นโค้งอายุการล้าอนันต์	11
2.10 แสดงบริเวณปลอดภัยภายใต้เกณฑ์ความเสียหายเนื่องจากความล้า และการครากในกรณีที่มีความเค้นเฉลี่ยเป็นความเค้นดึง	12
2.11 แสดงบริเวณปลอดภัยภายใต้เกณฑ์ความเสียหายเนื่องจากความล้า และการครากในกรณีที่มีความเค้นเฉลี่ยเป็นความเค้นดึง หรือความเค้นกด	12
2.12 ความชันของความเค้นในชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ และขนาดเล็กภายใต้ภาระตัด	13
2.13 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนแผ่นแบนเจาะรูกลมรับภาระดึงสม่ำเสมอ	16
2.14 และ 2.15 แสดงค่า fatigue notch factor ที่อายุความล้าต่างๆ และแสดงบริเวณต่างๆของเส้นกราฟอายุความล้าตามลำดับ	17
2.16 แสดงแผ่นแบนเจาะรูกลมที่มีความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต กำหนด $\sigma_u = 100\text{Ksi}$	20
2.17 แสดงบริเวณที่รับความเค้นสูงในชิ้นงานที่มีรอยเจาะขนาดใหญ่และขนาดเล็ก	20
2.18 แสดงแผ่นแบนเจาะรูที่เกิดการครากทั้งหน้าตัด	22
2.19 แสดงพฤติกรรมตอบสนองของวัสดุในชิ้นส่วนที่มีรอยบาก	23
2.20 แสดงค่า fatigue notch factor ที่ค่าความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง	23
2.21 แสดงผลการทดสอบวัสดุ AISI 4340 ในชิ้นงานที่มีรอยเจาะและไม่มีรอยเจาะ	24
2.22 แสดงรูปแบบของการครากที่เป็นไปได้ภายใต้ความเค้นเปลี่ยนแปลง ซึ่งความเค้นเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์	24
2.23 แสดงเส้นกราฟความเค้น-อายุของชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะ โดยวิธีของ Collins	29
2.24 แสดงลักษณะของเส้นกราฟความเค้น-อายุ ที่สร้างโดยวิธีของ Juvinall	29
2.25 แสดงชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึง	32
2.26 แสดงปริมาตรของวัสดุระหว่าง gauge length ในตอนเริ่มต้นและระหว่างการเสียรูป	33
2.27 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเส้นกราฟ True stress-strain	34
2.28 แสดงพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุภายใต้ความเครียดเปลี่ยนแปลง	34
2.29 แสดงพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุต่อความเครียดเปลี่ยนแปลง	34

รูปที่	หน้า
2.30 แสดง stable hysteresis loop	35
2.31 แสดงเส้นกราฟ cyclic stress-strain	35
2.32 แสดงเส้นกราฟ cyclic และ Monotonic stress-strain	36
2.33 แสดง cyclically harden และ cyclically soften	36
2.34 แสดงเส้นกราฟความเคียดยืดหยุ่น-อายุ, ความเคียดพลาสติก-อายุ และความเคียดรวม-อายุ	38
3.1 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย	45
3.2 ท่อนโลหะรับแรงตามแนวแกน	47
3.3 เอลิเมนต์มิติเดียว	52
3.4 เอลิเมนต์สองมิติ (ก) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม	53
3.5 เอลิเมนต์สามมิติ (ก) ชนิดปริซึมหรือชนิดทรงหกหน้า (ข) ชนิดกรวยสามเหลี่ยม หรือชนิดทรงสี่หน้า	53
3.6 (ก) เอลิเมนต์ทรงกระบอก (ข) เอลิเมนต์แผ่น โลหะโค้งสองมิติ (ค) เอลิเมนต์กรวยสมมาตรสองมิติ	54
3.7 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติที่ประกอบด้วยจุดต่อต่างๆ	54
3.8 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	55
3.9 ตำแหน่งของจุดต่อที่สำคัญ	55
3.10 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม โค้งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมย่อย	56
3.11 การขยายขนาดของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	57
3.12 การยึดจุดต่อ (ก) ยึดแบบสลัก (ข) ยึดแบบล้อหมุน	57
3.13 ความกว้างแถบของระบบที่มี HB=8	58
3.14 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานที่ประกอบด้วย 3 เอลิเมนต์ 8 จุดต่อ	58
3.15 ความกว้างแถบของคานในรูป 2.12(ข)(HB=12)	59
3.16 (ก) โครงข้อหมุนประกอบด้วย 12 จุดต่อ(ข) สกายไลน์เมทริกซ์ของโครงข้อหมุน (ค) ความกว้างแถบที่ใช้ในการคำนวณ	59
3.17 การสมมติฟังก์ชันการกระจัดสำหรับปัญหามิติเดียว	61
3.18 เอลิเมนต์เชิงซ้อน (ก) เอลิเมนต์มิติเดียว (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิติ (ค) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมกรวย 3 มิติ	62
3.19 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติ (ก) เอลิเมนต์เชิงเส้น (ข) เอลิเมนต์กำลังสอง (ค) เอลิเมนต์กำลังสาม	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
3.20 เอลิเมนต์ชนิดปริซึม (ก) เอลิเมนต์เชิงเส้น (ข) เอลิเมนต์กำลังสอง (ค) เอลิเมนต์กำลังสาม	64
3.21 การประกอบเอลิเมนต์ที่ไม่ต่อเนื่อง (ก) ก่อนการยึดตัว (ข) ขณะยึดตัวหรือหัดตัวจะเกิดช่องว่างขึ้น	65
3.22 ท่อนโลหะภายใต้การกระทำของโหลดในทิศทาง x	66
3.23 แรงกระทำบนท่อนโลหะ	67
3.24 ท่อนโลหะรับแรงตามแนวแกน	69
4.1 แสดงลักษณะและชิ้นส่วนของสเปเดอร์	70
4.2 แสดงรูสลักที่ตู้คอนเทนเนอร์	70
4.3 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งสเปเดอร์	70
4.4 แสดงการทำงานของสเปเดอร์ขณะยกตู้คอนเทนเนอร์	71
4.5 แสดงสลักตัวสเปเดอร์และตัวสเปเดอร์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	71
4.6 แสดงคุณสมบัติของวัสดุในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	72
4.7 แสดงสเปเดอร์ก่อนการประกอบและหลังการประกอบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	72
4.8 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	73
4.9 แสดงการกำหนดพื้นผิวให้กับสลักของสเปเดอร์	73
4.10 แสดงการกำหนดจุดสัมผัสระหว่างสเปเดอร์และสลักของสเปเดอร์	73
4.11 แสดงการกำหนดคสภาวะขอบ	74
4.12 แสดงสภาวะขอบของสเปเดอร์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	74
4.13 แสดงภาระของสเปเดอร์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	75
4.14 แสดงสเปเดอร์เมื่อสร้าง Mesh	75
4.15 แสดงชิ้นงานที่นำมาทดสอบ	76
4.16 แสดงเครื่องมือที่ใช้ทำการทดสอบ	77
5.1 contour แสดงอัตราส่วนของอายุความล้ากรณีเจาะรูแนวเดียวกับสลัก (วัสดุASM1020)	118
5.2 contour แสดงอัตราส่วนของอายุความล้ากรณีเจาะรูทำมุม 90 องศา กับสลัก (วัสดุASM1020)	118
5.3 contour แสดงอัตราส่วนของอายุความล้ากรณีเจาะรูแนวเดียวกับสลัก (วัสดุASM1040)	119
5.4 contour แสดงอัตราส่วนของอายุความล้ากรณีเจาะรูทำมุม 90 องศา กับสลัก (วัสดุASM1040)	119

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันมีปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียหายของวัสดุในงานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์มากมาย จึงมีผู้ศึกษาถึงทฤษฎีความเสียหายของวัสดุมากมายหลายท่าน และเกิดขึ้นเป็นทฤษฎีความเสียหาย ที่ใช้ในงานทางด้าน การคำนวณ และการออกแบบ แต่ก็มีหนึ่งในทฤษฎีความเสียหายที่มีความสำคัญมาก และบ่อยครั้งวัสดุจะเสียหาย เนื่องจากสาเหตุนี้ นั่นคือทฤษฎีการเสียหายอันเนื่องมาจากความล้า แต่การจะวิเคราะห์ถึงปัญหาทางด้านความล้า นั้น อาจจะได้จากการทดลอง หรือทดสอบกับชิ้นทดลองจริงซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีความแน่นอนที่ยอมรับได้ ในทางวิศวกรรมแต่มีค่าใช้จ่ายสูง ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และถูกนำไปใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมมากขึ้น เช่นกัน จึงได้มีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งรวมถึงปัญหาที่เกิดจากความเสียหายเนื่องจากความล้าด้วย ซึ่งเป็นค่าการลดค่าใช้จ่ายจากการทดลองกับชิ้นงานจริง เพิ่มความสะดวกและให้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้ และเพียงพอต่อการนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรม เช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาปัญหาความเสียหายเนื่องจากความล้า

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งนำไปใช้งานในการวิเคราะห์ปัญหาเนื่องจากความล้า

1.2.3 ทำการออกแบบชิ้นงานที่เคยได้รับความเสียหายเนื่องจากความล้ามาแล้ว โดยทำการออกแบบชิ้นงานนั้นใหม่ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานจากการเสียหายครั้งที่ผ่านมา

1.3 ภาพรวมของโครงการ

โครงการนี้เป็นการออกแบบปรับปรุงอายุการล้าของตัวสเปคเตอร์ สเปคเตอร์คือ สลักชนิดหนึ่งที่ใช้ในการยกตู้คอนเทนเนอร์ โดยตัวสเปคเตอร์นี้จะอยู่ที่ก้านยกตู้คอนเทนเนอร์ เมื่อทำการยกตู้คอนเทนเนอร์ ตัวสเปคเตอร์จะทำหน้าที่เป็นสลักยึดที่มุมทั้ง 4 ของตู้คอนเทนเนอร์ และทำให้ตู้คอนเทนเนอร์สามารถถูกยกและเคลื่อนย้ายได้

การที่จะออกแบบปรับปรุงอายุการล้า ของตัวสเปคเตอร์นั้น เราจะต้องทราบค่าความเค้นต่างๆที่เกิดขึ้นกับตัวสเปคเตอร์ก่อน แล้วค่อยนำค่าเหล่านั้นไปใช้ในการคำนวณหาอายุการล้าของตัวสเปคเตอร์อีกทีหนึ่ง การหาค่าความเค้นนั้นเราจะคำนวณ โดยใช้ภาระมากที่สุดที่ตัวสเปคเตอร์ได้รับจากสภาวะจริงมาใช้ในการคำนวณหาโดยการสร้างแบบจำลองของตัวสเปคเตอร์ขึ้นและสภาวะเงื่อนไขให้ตรงตามสภาพความเป็นจริงที่สุดเท่าที่ตัวโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสามารถทำได้ แล้วนำค่าความเค้นที่ได้ไปคำนวณหาอายุการล้าของตัวสเปคเตอร์ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง ต่อจากนั้นทำการปรับปรุงอายุการล้าของตัวสเปคเตอร์ โดยการเจาะรูกลมที่ตัวสเปคเตอร์ ในการหาอายุการล้าสูงสุดที่ได้จากการปรับปรุง เราทำโดยการแปรผันค่ารูเจาะ แปรผัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะรูเจาะและทิศทางที่เจาะรู แล้วนำมาพล็อตกราฟ เพื่อหาค่าอายุการล้าที่มากที่สุดว่าอยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง ตำแหน่งใด ที่ระยะรูเจาะเท่าไร และทิศทางรูเจาะแบบใด ซึ่งก็จะได้อายุการล้าจากการปรับปรุงแล้ว ซึ่งมีอายุการล้ายาวนานกว่าที่ยังไม่ปรับปรุง และนอกจากนั้นยังได้ทำการทดลองดึงวัสดุที่เป็นโลหะโดยให้ตัววัสดุ หรือ specimen รับแรงดึงโดยเจาะรูที่ specimen 3 แบบ แบบละ 2 ชิ้น แบบแรกเจาะรูกลมบนตัว specimen 1 รู , แบบที่ 2 เจาะรูบนตัว specimen 2 รู โดยมีแนวรูทั้งสองขนานกัน และแบบที่ 3 เจาะรูบนตัว specimen 2 รู โดยแนวรูเจาะทั้งสองทำมุม 90 องศา โดยเส้นผ่านรูเจาะของ specimen ลดลงตามอัตราส่วนที่อ้างอิงจากตัวสเปคเตอร์ และทำการวัดค่าโดยใช้ strain gauge ติดที่ขอบรูของ specimen ทุกตัว จากผลการทดลองพบว่ารูเจาะที่ช่วยในการกระจายความเค้นดีที่สุดคือการเจาะรูแบบที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับการจำลองตัวสเปคเตอร์ให้รับภาระด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งให้ผลของการกระจายความเค้นที่ดีที่สุดที่การเจาะรูแบบที่ 3 เช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีความล้า

เมื่อวัตถุได้รับภาวะที่มีความเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาภาระดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดความเค้นที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาด้วย การเปลี่ยนแปลงขนาดของความเค้นไปตามเวลานี้สามารถก่อให้เกิดความเสียหายในระดับจุลภาคของวัสดุได้แม้ว่าขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นนั้น จะมีค่าต่ำกว่าความต้านแรงดึง (ultimate strength) ของวัสดุค่อนข้างมากก็ตาม ความเสียหายที่เกิดขึ้นในระดับจุลภาค (microscopic level) นี้จะสะสมเรื่อยไปทีละน้อยจนเกิดเป็นความเสียหายในระดับมหภาค (macroscopic level) ปรากฏเป็นรอยร้าว (crack) ซึ่งหากชิ้นส่วนยังคงอยู่ภายใต้ภาระเปลี่ยนแปลงต่อไปรอยร้าวจะมีการเติบโตจนกระทั่งชิ้นส่วนเกิดความเสียหายในท้ายที่สุด เราเรียกกระบวนการภาระสะสมความเสียหายนี้ว่า "ความล้า (fatigue)"

2.1 กลไกความเสียหายเนื่องจากความล้า

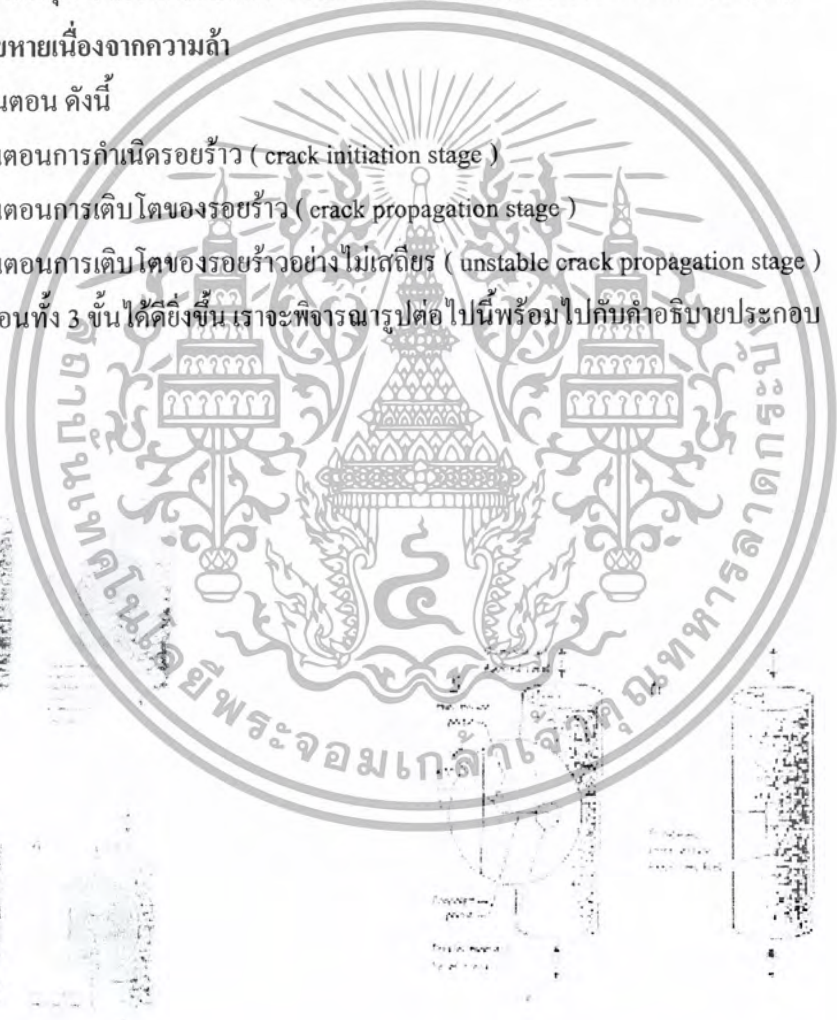
แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 ขั้นตอนการกำเนิดรอยร้าว (crack initiation stage)

2.1.2 ขั้นตอนการเติบโตของรอยร้าว (crack propagation stage)

2.1.3 ขั้นตอนการเติบโตของรอยร้าวอย่างไม่เสถียร (unstable crack propagation stage)

เพื่อให้เข้าใจขั้นตอนทั้ง 3 ขั้น ได้ดียิ่งขึ้น เราจะพิจารณาต่อไปนี่ย่รวมไปกับคำอธิบายประกอบ



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนต่างๆ ของความเสียหายเนื่องจากความล้า

- ก) แสดงชิ้นส่วนที่รับภาระเปลี่ยนแปลงแนวแกน (axial loading) ซึ่งมีค่าความเค้นสูงสุดน้อยกว่าความต้านแรงดึงของวัสดุ ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะที่บริเวณใกล้ๆ กับขอบ ซึ่งเราสมมุติให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าขึ้น ณ จุดนี้เส้นแรงเงาแทนทิศการวางตัวของระนาบของอะตอมภายในเกรน เราเรียกพื้นที่ระหว่างอะตอมในระนาบติดกันที่อ่อนแอที่สุดว่าระนาบไถล (slip plane)
- ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อ slip plane อยู่แนวเดียวกับทิศทางที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด (45 องศา กับแนวแรงในกรณีนี้) จะถูกทำให้เสียหายก่อน โดยในตอนต้นระนาบเหล่านี้จะเกิดการครากเล็กน้อย และเกรนที่แข็งแรงกว่ารอบๆ จะบีบบังคับให้เกิดการครากในเกรนที่อ่อนแอในทิศทางของ slip plane ต่อไปเรื่อยๆ ในแต่ละรอบการกระทำของภาระ
- ค) ขณะที่ภาระเปลี่ยนแปลงการทำต่อไปจะเกิด slip plane เพิ่มขึ้นในเกรนที่อ่อนแออื่นๆ นอกจากนี้เกรนที่อ่อนแอเหล่านั้นจะเกิด strain hardening ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น
- ง) เมื่อถึงจุดๆ หนึ่งวัสดุในเกรนที่อ่อนแอจะแข็งแรงพอที่จะก่อให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้น ซึ่งจะต่อเนื่องเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นกรณีสิ้นสุดขั้นตอนการกำเนิดรอยร้าว
- จ) ในช่วงการกำเนิดรอยร้าว นั้น รอยร้าวขนาดเล็กจะมาต่อเชื่อมกับในแนวของความเค้นเฉือนสูงสุด แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงการขยายตัวของรอยร้าว รอยร้าวจะเติบโตในทิศทางตั้งฉากกับภาระที่มากระทำในขั้นตอนนี้ รอยร้าวจะเติบโตเนื่องจากปลายรอยร้าวอยู่ภายใต้ความเค้นสูง
- ฉ) ในขั้นตอนนี้รอยร้าวจะเติบโตผ่านหน้าตัดของชิ้นงานส่วนมากขึ้นจนกระทั่งเหลือพื้นที่ที่น้อยเกินกว่าที่จะรองรับภาระที่มากระทำทำให้ชิ้นส่วนเกิดการเสียหาย เนื่องจากเกิดความเค้นเกินขีดจำกัด

2.2 ภาระเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดคงที่

ภาระกระทำเป็นรอบแบบแอมพลิจูดคงที่ (constant amplitude loading) หมายถึง ภาระเป็นรอบที่มีขนาดของภาระสูงสุด และขนาดของภาระต่ำสุดคงที่ตลอดระยะเวลาที่ภาระกระทำ

พิสัยความเค้น (stress range) เป็นผลต่างระหว่างค่าความเค้นสูงสุด และต่ำสุดเขียนแทนด้วย $\Delta\sigma$ ความเค้นเฉลี่ย (mean stress) เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความเค้นสูงสุด และต่ำสุดเขียนแทนด้วย σ_m แอมพลิจูดความเค้น (stress amplitude) เป็นค่าครึ่งหนึ่งของพิสัยความเค้น เขียนแทนด้วย σ_a

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (2.3)$$

R คือ อัตราส่วนความเค้น (stress ratio)

A คือ อัตราส่วนแอมพลิจูด (amplitude ratio)

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (2.4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} \quad (2.5)$$

จากนิยามที่กำหนดเราสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} \times (1 - R) \quad (2.6)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2} \times (1 + R) \quad (2.7)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2} \times (1 - R) \quad (2.8)$$

$$R = \frac{1 - A}{1 + A} \quad (2.9)$$

$$A = \frac{1 - R}{1 + R} \quad (2.10)$$

รูปที่ 2.2 แสดงค่านิยามต่างๆ ของการเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดคงที่

2.3 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดไม่คงที่

การเปลี่ยนแปลงแบบแอมพลิจูดไม่คงที่ (variable amplitude loading) คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของภาระสูงสุด และต่ำสุดเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาที่มีการกระทำ

2.4 ขอบเขตของปัญหาความล้า

เราสามารถจำแนกปัญหาความล้า โดยอาศัยจำนวนรอบของภาระที่กระทำต่อชิ้นส่วน จนกระทั่งชิ้นส่วนเกิดความเสียหายเป็นเกณฑ์ออกได้เป็น 2 ช่วง คือ

2.4.1 Low-cycle fatigue (LCF)

2.4.2 High-cycle fatigue(HCF)

ปัญหาความล้าในช่วงของ LCF จะหมายถึง ปัญหาที่อายุความล้า หรือจำนวนรอบของภาระที่กระทำต่อชิ้นส่วนจนกระทั่ง เสียหายนี้น้อยซึ่งหมายความว่า ขนาดของภาระที่มากกระทำจะต้องมีค่ามาก ดังนั้น ปัญหาความล้าในช่วงของ LCF จะเกี่ยวกับการคราก (yielding) ของวัสดุและแนวทางที่เหมาะสมในการเข้าถึงปัญหาก็คือ แนวทางของความเครียด ในทางตรงกันข้ามปัญหาความล้าในช่วงของ HCF จะถือว่าพฤติกรรมของวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น(elastic region) และแนวทางในการเข้าถึงปัญหาที่เหมาะสมก็คือ แนวทางของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป สำหรับอายุความล้าที่แบ่งกันระหว่าง LCF และ HCF นั้น ไม่สามารถจะระบุลงไปได้อย่างชัดเจน แต่ในที่นี้จะถือว่าอายุความล้าที่แบ่งขอบเขตระหว่าง LCF และ HCF มีค่าเท่ากับ 1,000 รอบ

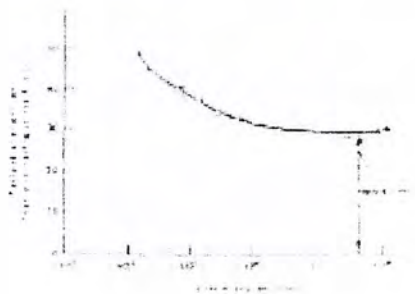
2.5 เส้นกราฟความเค้น-อายุความล้า

พื้นฐานสำคัญของการเข้าถึงปัญหาความล้าโดยแนวทางของความเค้นนั้นก็คือ เส้นกราฟความเค้น-อายุความล้า (Stress-life curve : S-N curve) การสร้างเส้นกราฟดังกล่าวทำได้โดยนำชิ้นงานทดลองไปทดสอบ ณ สถานะทดสอบที่มีค่าความเค้นเฉลี่ยเป็นศูนย์ แต่มีค่าความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงต่างกัน จดบันทึกจำนวนรอบตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเสียหายเช่นนี้เรื่อยไป โดยทั่วไปแล้ว เส้นกราฟดังกล่าวจะมีแกนตั้งเป็น "ความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง (alternating stress)" และแกนนอนเป็น "อายุความล้า (fatigue life)"



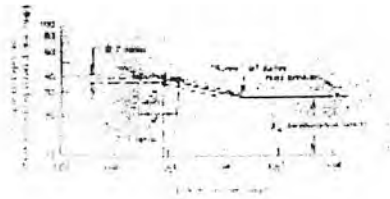
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของสถานะทดสอบที่ใช้สร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุ

ก) พล็อตบนสเกลแบบเชิงเส้น



ข) พล็อตบนสเกลแบบ semi-log

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) พล็อตบนสเกลแบบ log-log

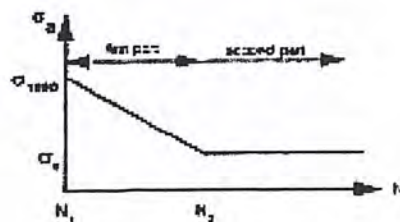
รูปที่ 2.4 แสดงเส้นกราฟความเค้น-อายุการล้าจากการทดสอบที่พล็อตบนสเกลแบบต่าง ๆ

สเกลของแกนตั้ง และแกนอนของเส้นกราฟความเค้นอายุเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้นหรือแบบล็อก แต่ ถ้าพิจารณารูป (2.4ก) จะพบว่าเมื่อขนาดของความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น จำนวนรอบจนกระทั่งเสียหายจะลดลงอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถเห็นบริเวณช่วงต้นกราฟได้ชัดเจน ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้เส้นกราฟ S-N นิยม พล็อตบนสเกลแบบ semi-log หรือแบบ log-log

จากรูป (2.4) จะเห็นว่าเส้นกราฟความเค้น-อายุนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ช่วงแรกมี ลักษณะเป็นฟังก์ชันลด กล่าวคือเมื่อความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงอายุความล้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น หรือในทางตรงกันข้าม เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นอายุความล้าจะลดลง และในช่วงที่สองจะเป็นเส้นตรงราบที่มีค่าแกนตั้ง (ความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง) คงที่ และเราเรียกค่าคงที่ดังกล่าวนี้ว่า "ขีดจำกัดความทนทาน (endurance limit)" หรือ "ขีดจำกัดความล้า (fatigue limit)" ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ σ_e บริเวณทั้งสองนั้นถูกแบ่งด้วยจุดที่เรียกว่า "knee point" สำหรับจุดใด ๆ ที่มีอายุความล้าจำกัด ($N < 10^6$ รอบ) ค่า σ_e สามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า "Fatigue strength"

ดังที่ได้กล่าวไว้ตอนต้นว่า แนวทางของความเค้นนั้นเหมาะสมกับปัญหา HCF ทำให้เค้นราบ(อายุความล้า) มิได้มีจุดเริ่มต้นที่อายุความล้าเท่ากับศูนย์ แต่จะเริ่มต้นที่ค่า N_1 แทน ในที่นี้ จะกำหนดให้ N_1 เท่ากับ 1,000 รอบ และแทนความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงที่อายุความล้า N_1 ด้วยสัญลักษณ์ σ_{1000} โดยที่ค่า σ_{1000} นี้สามารถประมาณได้จากค่าความต้านแรงดึงของวัสดุ ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนถัดไป ถ้าหาค่า N_2 ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการหักมุมจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ แต่โดยปรกติแล้วเรานิยมใช้ค่า N_2 เท่ากับ 10^6 รอบ

ในกรณีวัสดุที่ไม่มี Knee point เช่น อลูมิเนียมนั้น ในที่นี้จะถือว่าวัสดุนั้นมีค่าขีดจำกัดความทนทาน เท่ากับความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง σ_e อายุความล้า N_2 เท่ากับ 5×10^6 รอบ



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะทั่วไปของเส้นกราฟความเค้น-อายุและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเส้นกราฟความเค้น-อายุ ความล้าในช่วง $N_1 < N < N_2$ สามารถประมาณได้เป็นเส้นตรงบนสเกลแบบ semi-log สมการที่ใช้แทนชุดข้อมูลด้านซ้ายมือของ Knee point จะอยู่ในรูป

$$\sigma_a = C + D \cdot \log(N) \quad (2.11)$$

แต่ถ้าจุดข้อมูลในช่วงเดิมสามารถประมาณได้เป็นเส้นตรงบนสเกลแบบ log-log แล้วสมการที่ใช้แทนจะข้อมูลด้านซ้ายมือของ Knee point จะอยู่ในรูป

$$\sigma_a = A(N)^B \quad (2.12)$$

สำหรับกรณีที่มี $N_1 = 1000$ รอบ และ $N_2 = 10^6$ รอบ ค่าคงตัว A และ B จะหาได้จาก

$$A = 10^{\log\left(\frac{\sigma_{1000}^2}{\sigma_c}\right)} \quad (2.13)$$

และ

$$B = -\frac{1}{3} \cdot \log\left(\frac{\sigma_{1000}}{\sigma_c}\right) \quad (2.14)$$

2.6 การสร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุครวมล้า

เราสามารถสร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุ ได้ก็ต่อเมื่อทราบค่า σ_{1000} และค่า σ_c ของวัสดุ ซึ่งค่าทั้งสองนี้สามารถหาได้จากการทดสอบ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับ σ_{1000} และค่า σ_c เราสามารถประมาณค่าดังกล่าวได้จาก σ_u ค่าประมาณของ σ_{1000} และค่า σ_c ของวัสดุบางชนิดแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

ความสัมพันธ์ที่ใช้หา σ_{1000}

$$2.6.1 \text{ กรณีรับภาระดัด} \quad \sigma_{1000} \approx 0.9\sigma_u \quad (2.15)$$

$$2.6.2 \text{ กรณีรับภาระแนวแกน} \quad \sigma_{1000} \approx 0.75\sigma_u \quad (2.16)$$

$$2.6.3 \text{ กรณีภาระบิด} \quad \sigma_{1000} \approx 0.9\tau_u \quad (2.17)$$

โดยที่ $\tau_u \approx 0.8\sigma_u$ สำหรับเหล็กกล้า

ความสัมพันธ์ที่ใช้หา σ_c

Steel

$$\sigma_c \approx 0.5\sigma_u \text{ for } \sigma_u < 1400 \text{ MPa} \quad (2.18)$$

$$\sigma_c \approx 700 \text{ MPa for } \sigma_u > 1400 \text{ MPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Iron

$$\begin{aligned}\sigma_e &\approx 0.4\sigma_u \text{ for } \sigma_u < 400 \text{ MPa} \\ \sigma_e &\approx 160 \text{ MPa for } \sigma_u > 400 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (2.19)$$

Cast Iron; Cast Steel

$$\begin{aligned}\sigma_e &\approx 0.45\sigma_u \text{ for } \sigma_u < 600 \text{ MPa} \\ \sigma_e &\approx 275 \text{ MPa for } \sigma_u > 600 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (2.20)$$

Wrought Aluminium Alloy

$$\begin{aligned}\sigma_{5 \times 10^8} &\approx 0.4\sigma_u \text{ for } \sigma_u < 330 \text{ MPa} \\ \sigma_{5 \times 10^8} &\approx 130 \text{ MPa for } \sigma_u > 330 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (2.21)$$

Cast Aluminium Alloy

$$\sigma_{5 \times 10^8} \approx 0.16\sigma_u \text{ for } \sigma_u < 300 \text{ MPa} \quad (2.22)$$

Copper Alloy

$$\begin{aligned}\sigma_{5 \times 10^8} &\approx 0.4\sigma_u \text{ for } \sigma_u < 280 \text{ MPa} \\ \sigma_{5 \times 10^8} &\approx 100 \text{ MPa for } \sigma_u > 280 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (2.23)$$

Magnesium Casting Alloy & Magnesium Wrought Alloy

$$\sigma_{10^6} \approx 0.38\sigma_u \text{ for } \sigma_u < 280 \text{ MPa} \quad (2.24)$$

สำหรับกรณีของเหล็กกล้า เราสามารถประมาณค่าขีดจำกัดความทนทานได้จากความแข็ง(Hardness)ของวัสดุดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma_e &\approx 0.25 \text{ BHN for } \text{BHN} < 400 \text{ MPa} \\ \sigma_e &\approx 1000 \text{ ksi for } \text{BHN} > 400 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (2.25)$$

2.7 ผลของความเค้นเฉลี่ย (Mean stress effect)

การศึกษาผลของความเค้นเฉลี่ยต่อพฤติกรรมการล้าของวัสดุนั้นกระทำได้โดยการทดสอบวัสดุที่ระดับความเค้นเฉลี่ยต่างๆกัน โดยที่แต่ละค่าของความเค้นเฉลี่ยจะทดสอบที่ค่าความเค้นส่วนเปลี่ยนต่างๆด้วยผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำไปพล็อตบนเส้นกราฟความเค้น-อายุ เกิดเป็นชุดของเส้นกราฟที่ระดับความเค้นเฉลี่ยต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถแสดงผลการทดสอบในรูปของเส้นกราฟอายุคงที่ (constant life diagram) หรือเรียกว่า Haigh's diagram โดยการลากเส้นแนวตั้ง ณ ค่าอายุความล้าหนึ่งๆ ไปตัดกับเส้นโค้ง ความเค้น-อายุความล้า ณ ความเค้นเฉลี่ยค่าต่างๆ เราจะได้จุดตัดที่มีค่าความเค้นเฉลี่ย และความเค้นส่วนเปลี่ยนต่างๆและท้ายสุดก็นำจุดที่ตัดเหล่านั้นมาพล็อตบนกราฟที่มีความเค้นเฉลี่ยเป็นแกนราบ และความเค้นส่วนเปลี่ยนเป็นแกนตั้ง ซึ่งจะพบว่าเส้นกราฟอายุความล้าคงที่ที่จะวางตัวในลักษณะซึ่งเส้นกราฟที่มีอายุความล้ามากกว่าจะอยู่ใกล้จุดกำเนิด (จุดตัดของแกน) มากกว่า

จากรูป (2.7) จะเห็นว่าเมื่อความเค้นดึงเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ความเค้นส่วนเปลี่ยนจะต้องลดลง เมื่อยังคงให้ชิ้นส่วนมีอายุความล้าคงที่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เมื่อความเค้นดึงมีค่า เพิ่มขึ้นความรุนแรง เนื่องจากความเค้นก็จะเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีความเค้นเฉลี่ยเป็นความเค้นกดจะกล่าวถึงในภายหลัง



รูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงผลของความเค้นเฉลี่ยบนเส้นกราฟความเค้น-อายุ และแสดงเส้นกราฟอายุคงที่ หรือ Haigh's diagram ตามลำดับ

อีกรูปแบบหนึ่งในการแสดงผลของความเค้นเฉลี่ยต่อพฤติกรรมการล้าก็คือ แสดงชุดของเส้นกราฟความเค้น-อายุที่อัตราส่วนภาระ R ต่างๆ (รูปที่ 2.8.)



รูปที่ 2.8 แสดงผลของอัตราส่วนภาระบนเส้นกราฟความเค้น-อายุ

จากที่ได้กล่าวมา จะเห็นว่าการสร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุ ความล้า นั้นจำเป็นต้องทำการทดสอบ

จำนวนมาก เสียค่าใช้จ่ายสูง ค้ำเหตุนี้เองจึงได้นักวิจัยหลายท่าน เช่น Soderberg, Goodman เป็นต้น พัฒนา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปเซประยชณดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายพฤติกรรมการล้า ณ สภาวะความเค้นเฉลี่ยและความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงใดๆ โดยอาศัยข้อมูลการทดสอบที่สภาวะความเค้นเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ หรือที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ -1

เส้นโค้งอายุความล้าอนันต์ หรือเส้นอายุความล้าคงที่ ที่มีอายุความล้าเท่ากับ 10^6 รอบ (ค่าคงที่ที่แท้จริงจะขึ้นกับพฤติกรรมการล้าของวัสดุ) นักวิจัยท่านต่างๆ สามารถเขียนได้ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

Gerber
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \tag{2.26}$$

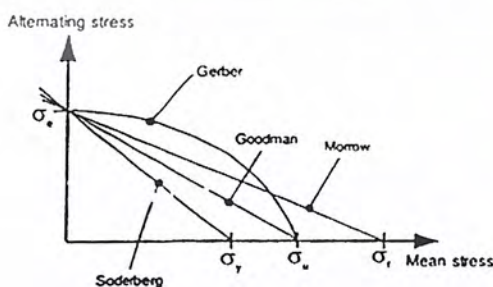
Goodman
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \tag{2.27}$$

Soderberg
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1 \tag{2.28}$$

Morrow
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1 \tag{2.29}$$

โดยที่ σ_f คือ True fracture stress ($\sigma_f \approx \sigma_u + 345 MPa$) เมื่อนำสมการเหล่านี้มาพล็อตจะได้

ดังนี้



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นโค้งอายุความล้าอนันต์

ณ ความเค้นเฉลี่ย และความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงค่าหนึ่ง คือจุดจุดหนึ่งบนกราฟ ในรูป (2.10) หากจุด
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรู๊เพ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ดึงกล่าวอยู่เหนือเส้นอายุความล้าอนันต์ แสดงว่าสภาวะนั้น จะทำให้ชิ้นส่วนมีอายุความล้าจำกัด (finite life)
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในทางตรงกันข้าม หากจุดนั้นอยู่ใต้เส้นอายุความล้าอนันต์ จะแสดงว่ามีอายุความล้ามากกว่าค่าถือว่ามีความล้าอนันต์ หรืออาจกล่าวให้ง่ายก็คือ ยิ่งปลอดภัยขึ้น ดังนั้นเราจะเห็นได้ชัดเจนว่า เกณฑ์ของ Soderberg นั้นปลอดภัยที่สุด เพราะพื้นที่ปลอดภัยมีน้อยทำให้โอกาสที่ จุดจะตกอยู่เหนือเส้นมีสูงอย่างไรก็ดีจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเกณฑ์ของ Soderberg นั้นมีความปลอดภัยมากเกินไปไม่นิยมใช้

Bannatine et.al ได้กล่าวถึงเกณฑ์ของการออกแบบทั้ง 4 ไว้ดังต่อไปนี้

2.7.1 เกณฑ์ของ Soderberg นั้นปลอดภัยที่สุดแต่ไม่นิยมใช้กัน

2.7.2 ข้อมูลการทดสอบส่วนใหญ่ จะอยู่ระหว่างเส้นโค้งของ Goodman และ Gerber

2.7.3 สำหรับวัสดุเปราะค่า σ_f จะมีค่าใกล้เคียงกับ σ_u ทำให้เกณฑ์ของ Morrow และ Goodman ใกล้เคียงกัน

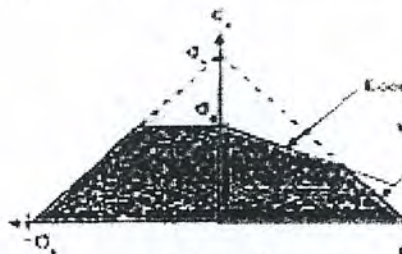
2.7.4 สำหรับวัสดุเหนียว σ_f จะมีค่ามากกว่า σ_u มาก ทำให้ความชันของเส้นกราฟของ Morrow น้อย แสดงว่าเกณฑ์ของ Morrow จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉลี่ยน้อยกว่าเกณฑ์อื่นๆ

เนื่องจากความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ $\sigma_a + \sigma_m$ ทำให้ชิ้นส่วนอาจเกิดความเสียหายเนื่องจากการครากได้ถ้า $\sigma_a + \sigma_m \geq \sigma_y$ ดังนั้นเพื่อป้องกันมิให้เกิดความเสียหาย เนื่องจากครากเส้นตรง $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_y$ จึงถูกเพิ่มเติมใน Haigh diagram ดังรูป (2.10)



รูปที่ 2.10 แสดงบริเวณปลอดภัยภายใต้เกณฑ์ความเสียหายเนื่องจากความล้า และการคราก ในกรณีที่ความเค้นเฉลี่ยเป็นความเค้นดึง

การทดสอบแสดงให้เห็นว่า การที่ความเค้นเฉลี่ยเป็นความเค้นกดชิ้นส่วนจะมีอายุความล้าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ดี เพื่อให้ปลอดภัยยิ่งขึ้น เรามักจะแทนเส้นตรงที่จำกัดขอบเขตความเสียหาย เนื่องจากความล้าด้วยเส้นแนวระดับ และเมื่อพิจารณาถึงการคราก เนื่องจากความเค้นกด เราจะได้ Haigh diagram ดังรูป (2.11)



รูปที่ 2.11 แสดงบริเวณปลอดภัยภายใต้เกณฑ์ความเสียหายเนื่องจากความล้า และการคราก ในกรณีที่ความเค้นเฉลี่ยเป็นความเค้นดึง หรือความเค้นกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำนายพฤติกรรมครากร้า หรือการสร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุ ความล้าที่ภาวะความเค้น เหล็กเดี่ยวใดๆสามารถกระทำได้โดยดัดแปลงสมการที่ (2.26-2.29) เสียใหม่ แต่เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ เราจะพิจารณาเฉพาะสมการของ Goodman

$$\text{เส้นอายุความล้าอนันต์ของ Goodman เขียนได้ในรูป } \frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1$$

โดย σ_e แทนขีดจำกัดความทนทานที่ความเค้นเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ (เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง) หากจัดรูปสมการเสียใหม่ ดังแสดงในสมการที่ (2.30) จะได้ขนาดของความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง ณ ความเค้นเฉลี่ยใดๆที่มีอายุความล้าคงเดิม (ซึ่งเท่ากับอายุความล้าอนันต์ เพราะใช้ σ_e)

$$\sigma_{a,mean \neq 0} = \sigma_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right) \quad (2.30)$$

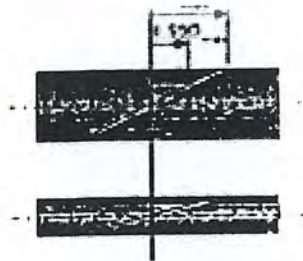
หากเราเปลี่ยน σ_e เป็นค่า fatigue strength อื่นๆ ณ สภาวะความเค้น เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเขียนได้ในรูป $\sigma_{a,mean=0} = A.N^B$ สมการที่ (2.30) จะกลายเป็น

$$\sigma_{a,mean \neq 0} = A \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right) N^B \quad (2.31)$$

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมความล้า (Factors influence Fatigue)

2.8.1 ผลของขนาด

พฤติกรรมความล้าของวัสดุนั้น ถูกควบคุมโดยพันธะที่อ่อนแอ (weak link) ในเนื้อวัสดุ ดังนั้นเมื่อขนาด (หรืออีกนัยหนึ่งคือ ปริมาตร) ของวัสดุแตกต่างกัน ความน่าจะเป็นที่จะมี weak link ก็จะต่างกันด้วย มีนักวิจัย กล่าวว่าความเค้นที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นสูงสุด เป็นความเค้นที่ควบคุมพฤติกรรมความล้าทำให้ได้ว่า หากมีเนื้อวัสดุรับความเค้นขนาดดังกล่าวมากขึ้น โอกาสเกิดความเสียหายก็จะมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.12 ความชันของความเค้นในชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ และขนาดเล็กภายใต้ภาระดัด

พิจารณาชิ้นส่วนที่มีขนาดต่างกัน และรับภาระดัดจนเกิดความเค้นสูงสุดที่ผิวเท่ากัน ดังแสดงในรูป (2.12) จากการพิจารณาการกระจายความเค้นพบว่า ชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเค้น (stress gradient) น้อยกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นปริมาตรของวัสดุที่รับความเค้นมากกว่าหรือเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นสูงสุดในชิ้นงานขนาดใหญ่จะมากกว่าในชิ้นงานขนาดเล็ก ทำให้โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดรอยร้าวล้ามีมากกว่า

สำหรับค่าปรับแก้ตัวประกอบขนาด C_{size} นั้นแสดงอยู่ในสมการที่ (2.32) โดยที่ d คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นส่วนที่สนใจ

$$\begin{aligned} C_{temp} &= 1 \quad \text{for } d \leq 8 \text{ mm} \\ C_{temp} &= 1.189d^{-0.097} \quad \text{for } 8\text{mm} \leq d \leq 250\text{mm} \\ C_{temp} &= 0.6 \quad \text{for } d \geq 250\text{mm} \end{aligned} \quad (2.32)$$

ในกรณีที่ชิ้นส่วนที่พิจารณามีลักษณะหน้าตัดไม่ใช่หน้าตัดกลมแล้ว จะต้องทำการหาค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล (equivalent diameter) เสียก่อน

สำหรับชิ้นส่วนหน้าตัดกลมภายใต้ภาวะดัดขณะหมุน (rotating bending)

$$\begin{aligned} A_{95} &= \pi \left[\frac{d^2 - (0.95d)^2}{4} \right] \\ &= 0.0766 d^2 \end{aligned} \quad (2.33)$$

และสำหรับหน้าตัดแบบอื่นๆ

$$deg = \sqrt{\frac{A_{95}}{0.0766}} \quad (2.34)$$

2.8.2 ผลของชนิดของภาระที่กระทำ (Loading effect)

เราได้ทราบแล้วว่าชิ้นงานทดสอบชนิดเดียวกันที่รับภาระแนวแกน และภาระดัดจะมีค่าขีดจำกัดความทนทานต่างกัน เนื่องจากมีปริมาตรของวัสดุที่รับความเค้น σ_{95} แตกต่างกัน จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนของค่าขีดจำกัดความทนทานที่ได้จากการทดสอบแนวแกน และการทดสอบแบบดัด มีค่าอยู่ระหว่าง 0.6-0.9 และอัตราส่วนที่ได้จากการทดสอบการบิด และการทดสอบแบบดัด มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-0.6 ดังนั้นค่าแนะนำสำหรับค่าปรับแก้ตัวประกอบภาระมีค่าเท่ากับ

$$C_{load} = 1 \quad \text{สำหรับภาระดัด} \quad (2.35)$$

$$C_{load} = 0.7 \quad \text{สำหรับภาระแนวแกน} \quad (2.36)$$

$$C_{load} = 0.577 \quad \text{สำหรับภาระบิด} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 ผลของความหยาบของผิว

ความขรุขระต่างๆบนผิวของวัสดุจะเสริมให้ความเค้นมีค่ามากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ค่าขีดจำกัดความทนทานที่ได้จากชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเตรียมผิวชิ้นงานอย่างดี เมื่อต้องนำค่าดังกล่าวไปใช้จริง โดยใช้ค่าปรับแก้ตัวประกอบความหยาบของผิว (Surface correction factor)

Shigley และ Mischke ได้เขียน C_{surf} ในรูปของตัวแปร σ_u ดังนี้ โดยค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆอยู่ในตาราง

$$C_{surf} = A(\sigma_u)^b \quad (2.38)$$

โดยถ้าค่า C_{surf} มากกว่า 1 ให้ปรับค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในสมการค่าปรับแก้ตัวประกอบความหยาบของผิว

ลักษณะผิว	MPa		Ksi	
	A	b	A	b
Ground	1.58	-0.085	1.34	-0.085
Machined or cold-drawn	4.51	-0.265	2.7	-0.265
Hot-rolled	57.7	-0.718	14.4	-0.718
As-forged	272	-0.995	39.9	-0.995

2.8.4 ผลของอุณหภูมิ (Temperature effect)

สำหรับเหล็กกล้า ค่าขีดจำกัดความทนทานมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเราจะไม่พบขีดจำกัดความทนทาน เนื่องจากอะตอมภายในสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายไม่ว่าความเค้นที่กระทำจะมีค่าน้อยเพียงใดก็ตาม นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลวของวัสดุแล้ว การคืบ(Creep) จะเป็นกลไกความเสียหายที่เด่นกว่า และในอาณานิเวศน์นี้การเข้าถึงปัญหาโดยแนวทางของความเค้น จะไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้ การเข้าถึงปัญหาในบริเวณดังกล่าว ต้องอาศัยแนวทางของความเครียดที่คำนึงถึงผลของความล้าและความคืบร่วมกัน อีกสิ่งหนึ่งที่เรควรทราบก็คืออุณหภูมิที่สูงนั้นเปรียบเหมือนการอบคืนตัว (annealing) ทำให้สูญเสียความเค้นกดตกค้างได้

สำหรับค่าปรับแก้ตัวประกอบอุณหภูมิสำหรับวัสดุบางชนิดแสดงอยู่ในสมการที่ (2.39-2.41)

วัสดุ AISI 4340

$$C_{temp} = 1 - 0.5 \left(\frac{T - 70}{930} \right)^n ; 70^\circ F \leq T \leq 1000^\circ F, n = 3.5 \quad (2.39)$$

$$C_{temp} = 1 ; T \leq 70^\circ F$$

วัสดุ Titanium Alloy

$$C_{temp} = 1 - 0.5 \left(\frac{T - 70}{930} \right)^n ; 70^\circ F \leq T \leq 1000^\circ F, n = 1.3 \quad (2.40)$$

$$C_{temp} = 1 ; T \leq 70^\circ F$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ AISI 2024

$$C_{temp} = 1 - 0.5 \left(\frac{T - 70}{430} \right)^n; 70^0 F \leq T \leq 500^0 F, n = 1.5 \quad (2.41)$$

$$C_{temp} = 1; T \leq 70^0 F$$

ความสัมพันธ์อื่น ๆ ของค่าปรับแก้ตัวประกอบอุณหภูมิสำหรับเหล็กกล้า คือ

$$C_{temp} = \left(\frac{620}{460 + T} \right); T > 160^0 F \quad (2.42)$$

$$C_{temp} = 1; T \leq 160^0 F$$

2.9 แนวทางของความเค้นสำหรับชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะ

พารามิเตอร์พื้นฐาน

พารามิเตอร์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปัญหาความล้าในชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะมี 3 ตัวคือ

1. ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (stress concentration factor)
2. ตัวประกอบรอยเจาะล้า (fatigue notch factor)
3. ความไวรอยเจาะ (notch sensitivity)

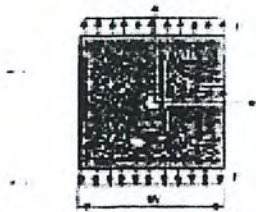
รายละเอียดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวมีดังต่อไปนี้

2.9.1 ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น

พารามิเตอร์ "ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น" K_t เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกระดับความรุนแรงของรอยเจาะ (notch) นิยามโดยอัตราส่วนของความเค้นสูงสุดต่อความเค้นอ้างอิงซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ

- ก) อ้างอิงกับ nominal stress

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\left(\frac{P}{w.t} \right)} \quad (2.43)$$



รูปที่ 2.13 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนแผ่นแบนเจาะรูกลมรับภาระดึงสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) อ้างอิงกับความเค้นบนหน้าตัดสุทธิ
พื้นที่หน้าตัดสุทธิคือ พื้นที่หน้าตัดที่ทำพื้นที่ของรอยเจาะทิ้งไป

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\left(\frac{p}{t(w-d)}\right)} \tag{2.44}$$

สำหรับแนวทางของความเค้น นิยมใช้ความเค้นอ้างอิงเป็นความเค้นบนหน้าตัดสุทธิดังนี้

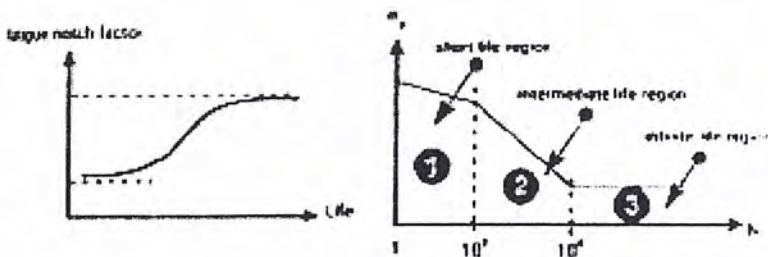
$$\sigma_{max} = k_t s \tag{2.45}$$

โดย s แทนความเค้นบนหน้าตัดสุทธิ สำหรับค่า k_t ของชิ้นส่วน และรอยเจาะภายใต้ภาวะแบบต่างๆ คูได้
จากตาราง ตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นที่มีอยู่ทั่วไป

2.9.2 ตัวประกอบรอยเจาะล้า และความไวรอยเจาะ

ตัวประกอบรอยเจาะล้า (fatigue notch factor) เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกผลของรอยเจาะที่มีต่อ
พฤติกรรมการล้า พารามิเตอร์นี้กำหนดขึ้นจาก อัตราส่วนของค่า fatigue strength กรณีไม่มีรอยเจาะต่อค่า
fatigue strength กรณีที่มีรอยเจาะ จากการทดสอบพบว่าค่า fatigue notch factor ขึ้นกับอายุความล้าของ
ชิ้นส่วน (หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือเมื่อแอมพลิจูดความเค้นเปลี่ยนไป ผลของรอยเจาะต่อพฤติกรรมความล้าจะ
เปลี่ยนไป) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จากรูปที่ 2.14 เราจะเห็นว่าลักษณะของการแปรเปลี่ยนค่า fatigue notch factor
มีอยู่ 3 ลักษณะที่ช่วงอายุความล้าต่างๆทำให้เราแยกพิจารณาเส้นกราฟความเค้น-อายุ ออกเป็น 3 ส่วน
(รูปที่ 2.15) คือ

1. ช่วงอายุความล้าสั้น (Short life region) อยู่ในช่วงอายุความล้าตั้งแต่ 1 ถึง 1,000 รอบ
2. ช่วงอายุความล้าปานกลาง (Intermediate life region) หรือช่วงอายุความล้าจำกัดที่ กล่าวถึงก่อนหน้านี้อยู่ในช่วงอายุความล้า ตั้งแต่ 1,000 ถึง 10^6 รอบ
3. ช่วงอายุความล้าอนันต์ (Infinite life region) คือช่วงอายุความล้าตั้งแต่ 10^6 รอบขึ้นไป



รูปที่ 2.14 และ 2.15 แสดงค่า fatigue notch factor ที่อายุความล้าต่างๆ

และแสดงบริเวณต่างๆของเส้นกราฟอายุความล้าตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามช่วงอายุความล้าสั้น และปานกลางสามารถนำมาพิจารณาร่วมกันได้ ดังนั้นเราจะแยกการพิจารณาค่า fatigue notch factor ออกเป็น 2 ช่วงด้วยกันคือ

- ก. ช่วงอายุ ความล้าอนันต์ ($N \geq 10^6$ รอบ)
- ข. ช่วงอายุ ความล้าจำกัด ($N \leq 10^6$ รอบ)

2.9.3 Fatigue notch factor ในช่วงอายุความล้าอนันต์

กำหนดให้ k_f แทน fatigue notch factor ในช่วงอายุ-ความล้าอนันต์ จากนิยามข้างต้นเราจะได้ว่า ในกรณีนี้พารามิเตอร์ดังกล่าวคือ อัตราส่วนของค่าขีดจำกัดความทนทานกรณีไม่มีรอยเจาะต่อค่าขีดจำกัดความทนทานกรณีที่มีรอยเจาะ หรือเขียนในรูปสมการได้เป็น

$$k_f = \frac{\sigma_e(\text{unnotched})}{\sigma_e(\text{notched})} \quad (2.46)$$

นิยามพารามิเตอร์ความไวของรอยเจาะ (notch-sensitivity) q คือ

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1} \quad (2.47)$$

หรือ
$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (2.48)$$

ความหมายของคำว่า "ความไวรอยเจาะ" ก็คือ ถ้ารอยเจ้านั้นมีผลต่อการล้าของวัสดุเต็มที่แล้ว q จะมีค่าความไว q จะเท่ากับ 1 และจะได้ k_f เท่ากับ k_t ในทางตรงกันข้ามหากรอยเจาะไม่มีผลต่อการล้าของวัสดุว่าความไวจะเท่ากับศูนย์ และจะได้ค่า k_f มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นความไวรอยเจาะจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

สำหรับวัสดุเหนียวจะได้รับผลกระทบจากรอยเจ้าน้อยกว่าวัสดุเปราะ เนื่องจากในวัสดุเหนียวจะเกิดการครากทำให้ปลายรอยร้าวที่ (blunt) ระดับความเค้น หรือความรุนแรงที่ปลายรอยร้าวลดลง ดังนั้นความไวรอยเจาะในวัสดุเหนียวจะน้อยกว่าในวัสดุเปราะ หรือกล่าวรวมๆก็คือ ความไวรอยเจาะจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความต้านแรงดึง (Ultimate Strength) เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ค่า q นั้นประมาณได้จาก empirical relation ของ Peterson ซึ่งเขียนอยู่ในรูป

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\rho}} \quad (2.49)$$

โดยค่า α แทนค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ และ ρ จะแทนรัศมีของปลายรอยเจาะ สำหรับค่า α ของวัสดุบางชนิด แสดงอยู่ในตารางที่ 1 ข้างล่างนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าของตัว α ของวัสดุชนิดต่าง

วัสดุ	BHN	α (มม)
Aluminium alloys	-	0.51
Annealed or Normalized low-carbon steel	$\cong 170$	0.25
Quenched and Tempered steels	$\cong 360$	0.064
Highly Hardened steels	$\cong 600$	0.025

สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steels) ที่มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมากกว่า หรือเท่ากับ 550 MPa เราสามารถประมาณค่า α ได้จากสมการ

$$\alpha = 0.025 \left[\frac{2070 \text{ MPa}}{\sigma_u} \right]^{1.8} \text{ มม.} \quad (2.50)$$

ค่า α ที่หาได้ข้างต้นนั้นใช้ในกรณีรับภาระตัด หรือภาระแนวแกนในกรณีของภาระปิดในคูณค่าดังกล่าวด้วย 0.6

Neuber เป็นนักวิจัยอีกท่านที่เสนอสมการที่ใช้หาค่า ρ โดยสมการของ Neuber เขียนอยู่ในรูป

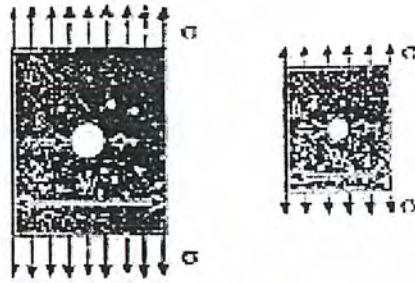
$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\beta}} \quad (2.51)$$

โดย β ของเหล็กกล้าที่มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุดไม่เกิน 1520 MPa สามารถคำนวณได้จากสมการ

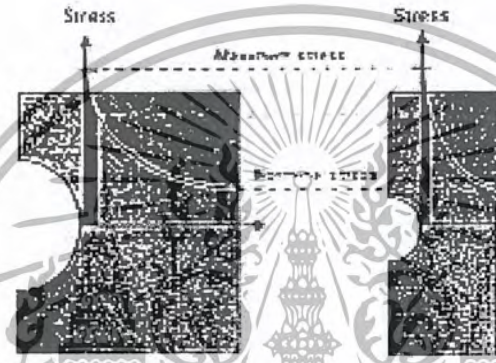
$$\log(\beta) = -\frac{\sigma_u - 134 \text{ MPa}}{586} \quad (2.52)$$

มีสิ่งหนึ่งที่นำสังเกตก็คือ ความไวรอยเจานั้นนอกจากจะขึ้นกับสมบัติของวัสดุ α และ β ยังขึ้นกับรัศมีของรอยเจาะด้วย ดังนั้นแผ่นแบนที่มีความคล้ายคลึงกันทางเรขาคณิต หรือมีค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้นเท่ากัน ก็จะมีพฤติกรรมการล้าต่างกัน โดยรอยเจาะที่มีรัศมีของรอยเจาะ น้อยกว่าจะมีค่าความไวรอยเจำน้อยกว่าที่เป็นเช่นนั้นก็เพราะ รอยเจาะขนาดเล็กจะมีเนื้อวัสดุที่รับความเค้นสูงน้อยกว่ารอยเจาะขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงแผ่นแบนเจาะรูกลมที่มีความคล้อยทางเรขาคณิต กำหนด $\sigma_u = 100 \text{Ksi}$



รูปที่ 2.17 แสดงบริเวณที่รับความเค้นสูงในชิ้นงานที่มีรอยเจาะขนาดใหญ่และขนาดเล็ก

2.9.4 Fatigue notch factor ในช่วงอายุความล้าจำกัด

กำหนดให้ k_f แทน fatigue notch factor ในช่วงอายุความล้าจำกัด จากนิยามข้างต้นเราจะเห็นได้ว่าในกรณีนี้พารามิเตอร์ดังกล่าวคือ อัตราส่วนของค่า fatigue strength (หรือแอมพลิจูดความเค้น หรือความเค้นส่วนเปลี่ยน) กรณีไม่มีรอยเจาะต่อค่า fatigue strength กรณีมีรอยเจาะ หรือ เขียนในรูปสมการได้เป็น

$$k_f'(N) = \frac{\sigma_a(\text{unnotched})}{\sigma_a(\text{notched})} \tag{2.53}$$

พิจารณาวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ ideally plastic หรือวัสดุที่ไม่มี strain hardening เมื่อวัสดุชนิดดังกล่าวถูกกระทำโดยความเค้นเปลี่ยนแปลงกลับไปมา (reversed loading) หรือความเค้นเปลี่ยนแปลงที่ความเค้นเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีอายุความล้าจำกัดนั้น วัสดุจะมีพฤติกรรม การตอบสนองได้ทั้งสิ้น 3 กรณีคือ

1. กรณีไม่มีการคราก
2. กรณีเริ่มการคราก หรือมีการครากเฉพาะที่ (local yielding)
3. กรณีมีการครากเป็นบริเวณกว้าง หรือทั้งหน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้ภาวะเปลี่ยนแปลงแบบกลับไปกลับมา การครากที่กล่าวถึงนั้นจะเป็นการครากภายใต้ภาวะเปลี่ยนแปลงเรียกว่า reversed yielding ซึ่งคำว่า reversed หมายถึงการครากด้านความเค้นกด ดังนั้นลักษณะของการครากชนิดนี้ก็คือ จะมีความเค้นกดคงที่ขนาดเท่ากับ $-\sigma_y$ ในบริเวณที่เกิดการคราก โดยมีเงื่อนไขของการเกิดการครากคือ ความเค้นส่วนเปลี่ยนที่เกิดขึ้น ณ รอยเจาะ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความต้านแรงดึงครากของวัสดุ

กำหนดให้ s แทนความเค้นเปลี่ยนแปลงที่มากกระทำต่อชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะ และไม่มีรอยเจาะ และ s_a แทนแอมพลิจูดของภาวะที่มากกระทำ

พิจารณาชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะกรณีไม่มีการคราก (รูปที่ 2.19ก) สำหรับกรณีนี้ $k_t s_a \leq \sigma_y$ ดังนั้นความเค้นส่วนเปลี่ยนที่จุด A โดยสมการที่ 2.45 จะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_A = k_t s_a \quad (2.54)$$

เมื่อความเค้นที่จุด A ถูกขยายขึ้น k_t เท่าจากเค้น s_a ค่า fatigue strength ของชิ้นส่วนจะลดลง k_t เท่า ดังนั้น

$$\sigma_a^{(notched)} = \frac{s_a}{k_t} \quad (2.55)$$

สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่มีรอยเจาะจะได้ $\sigma_a^{(unnotched)} = s_a$ ดังนั้น fatigue notch factor ในสมการที่ 3.9 จะเท่ากับ

$$k_f' = k_t \quad (2.56)$$

พิจารณาชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะกรณีมีการครากเฉพาะที่ (รูปที่ 2.19ข) สำหรับกรณีนี้ $k_t s_a > \sigma_y$ และ ความเค้นที่จุด A จะไม่สอดคล้องกับสมการที่ 2.45 อีกต่อไปแต่จากข้อกำหนดที่ว่าวัสดุเป็น ideally plastic เราจะได้ความเค้นส่วนเปลี่ยนที่จุด A จะมีค่าเท่ากับ $\sigma_A = \sigma_y$

โดย σ_y แทนความต้านแรงดึงครากของวัสดุ จากนั้นอาศัยสมการที่ 2.45 เพื่อหาว่าความเค้นที่จุด A ถูกขยายขึ้นกี่เท่า เราจะได้

$$k_t = \frac{\sigma_y}{s_a} \quad (2.57)$$

โดย k_t เปรียบเสมือนกับตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น ในทำนองเดียวกันเราจะได้

$$\sigma_a^{(notched)} = \frac{S_a}{\left(\frac{\sigma_y}{S_a}\right)} = \frac{S_a^2}{\sigma_y} \tag{2.58}$$

และในชิ้นส่วนที่ไม่มีรอยเจาะ จะได้

$$\sigma_a^{(unnotched)} = S_a \tag{2.59}$$

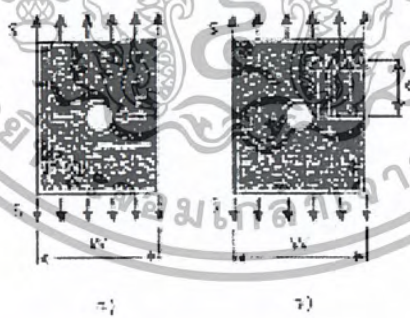
ดังนั้น fatigue notch factor ในสมการที่ 2.53 จะเท่ากับ

$$k_f' = \frac{\sigma_y}{S_a} \tag{2.60}$$

สำหรับกรณีสุดท้าย กรณีเกิดรากลเป็นบริเวณกว้าง หรือทั้งหน้าตัด (รูป 2.19ก) พิจารณาแผ่นแบนรับความเค้นเปลี่ยนแปลง s (รูปที่ 2.18ก) การรากลทั้งหน้าตัดจะเกิดเมื่อความเค้นทั้งหน้าตัดเท่ากับความต้านแรงดึงครากของวัสดุ (รูปที่ 2.18ข) โดยการสมมูลแรงจะได้

$$sw = (w - d)\sigma_y \tag{2.61}$$

หรือกรณีเกิด reversed yielding



รูปที่ 2.18 แสดงแผ่นแบนเจาะรูที่เกิดการรากลทั้งหน้าตัด

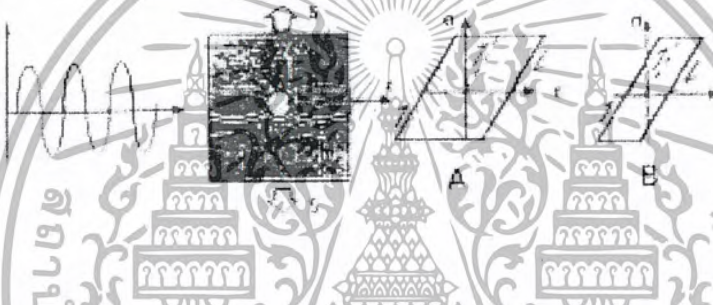
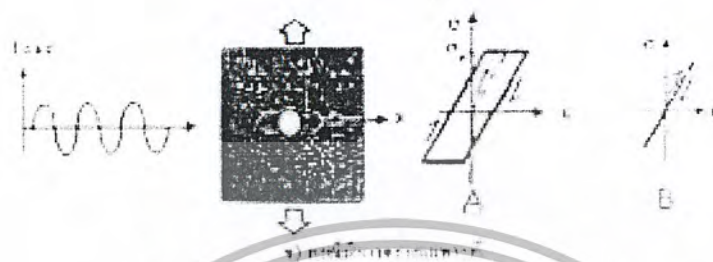
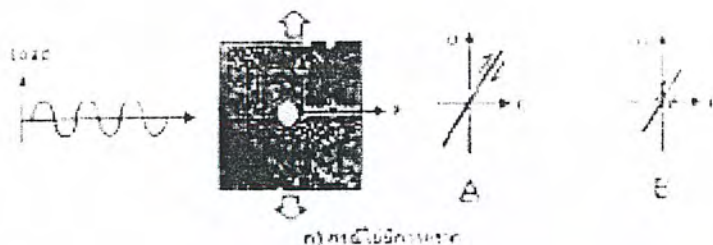
$$s_a w = \frac{(w - d)}{w} \sigma_y \tag{2.62}$$

หรือ

$$s_a \approx \sigma_y \tag{2.63}$$

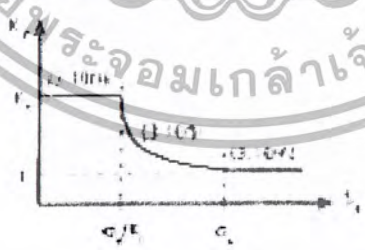
ดังนั้นจากสมการที่ 1.19 ข เราจะได้ $k_f \approx 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงพฤติกรรมตอบสนองของวัสดุในชิ้นส่วนที่มีรอยบาก

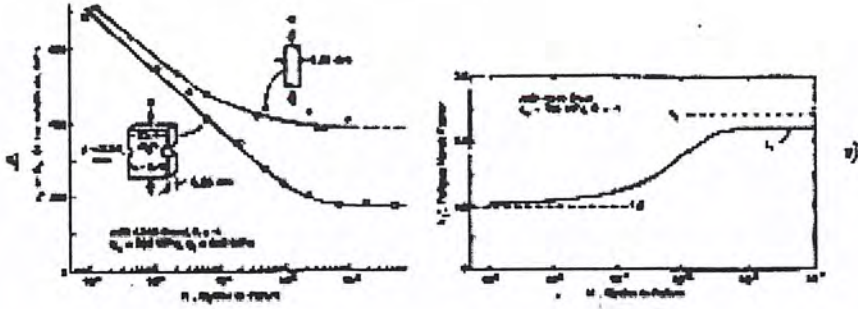
รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า fatigue notch factor (กรณีอายุความล้าจำกัด) k_f' กับความเค้นเปลี่ยนแปลงที่มากกระทำ s_n ที่ได้จากสมการที่ 2.60 ถึง 2.60ค



รูปที่ 2.20 แสดงค่า fatigue notch factor ที่ค่าความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงต่างๆ

รูปที่ 2.21ก แสดงการเปรียบเทียบเส้นกราฟความเค้นอายุของชิ้นงานที่มีรอยและ ไม่มีรอยเจาะที่
ทำจากวัสดุ AISI 4340 ณ อัตราส่วนภาระ เท่ากับ-1 จากนั้นค่า fatigue strength ที่อายุความล้าต่างๆในชิ้นงาน
ทั้งสองแบบได้ถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ 2.53 ซึ่งผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.21ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



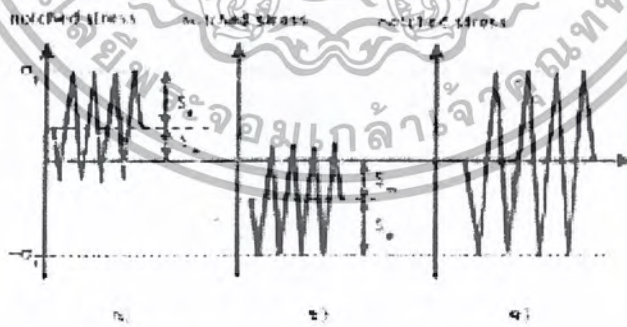
รูปที่ 2.21 แสดงผลการทดสอบวัสดุ AISI 4340 ในชิ้นงานที่มีรอยเจาะและไม่มีรอยเจาะ

2.10 ผลของความเค้นเฉลี่ย

กำหนดพารามิเตอร์ตัวใหม่ k_{fm} แทน fatigue notch factor ที่จะกล่าวต่อไปนั้นมี 2 วิธี วิธีแรกเป็นการประมาณจากพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุเปราะ และวัสดุเหนียวต่อความเค้นที่มากระทำ ส่วนวิธีสองจะลงไปในรายละเอียดของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ทั้งกรณีไม่เกิดการคราก และเกิดการครากขึ้นที่บริเวณรอยเจาะ

สิ่งหนึ่งที่เราคควรทราบก็คือเมื่อมีความเค้นเปลี่ยนแปลงซึ่งความเค้นเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์มากระทำต่อชิ้นส่วน วัสดุสามารถจะเกิดการครากได้ 2 อย่างคือ

1. การครากเนื่องจากความเค้นสูงสุดที่รอยเจาะ มีค่ามากกว่าความต้านแรงดึงครากของวัสดุ ทั้งด้านความเค้นดึง (รูปที่ 2.22ก) หรือด้านความเค้นอัด (รูป 2.22ข)
2. การครากเนื่องจากแอมพลิจูดความเค้นที่รอยเจาะมีค่ามากกว่าความต้านแรงดึงครากของวัสดุหรือที่เรียกว่า reversed yielding เหมือน ในหัวข้อที่แล้ว (รูปที่ 2.22ค)



รูปที่ 2.22 แสดงรูปแบบของการครากที่เป็นไปได้ภายใต้ความเค้นเปลี่ยนแปลงซึ่งความเค้นเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์

2.10.1 วิธีในการหา fatigue notch factor แบบที่ 1

เนื่องจากผลของรอยเจาะที่มีต่อพฤติกรรมตอบสนองด้านความล้าของวัสดุเปราะ และวัสดุเหนียวนั้นแตกต่างกัน จึงจะแยกการหาค่า fatigue notch factor ออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

ก) วัสดุเปราะ

พิจารณาชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะ และอยู่ภายใต้ภาวะเปลี่ยนแปลงที่มีความเค้นเฉลี่ยไม่เท่ากับ ศูนย์ สมมติว่าค่าความเค้นสูงสุด และต่ำสุด ไม่ก่อให้เกิดการคราก(ทั้งการครากเนื่องจากความเค้นดึง หรือการครากเนื่องจากความเค้นกด)ที่รอยเจาะ กล่าวคือ $k_t|s_{max}|σ_y$ และ $k_t|s_{min}|σ_y$ เราสามารถคำนวณหาความเค้นที่ รอยเจาะ ได้จากสมการที่ 3.2 ความเค้นเฉลี่ยและความเค้นส่วนเปลี่ยนมีค่าเท่ากับ

$$σ_a = k_t s_a \tag{2.64}$$

และ

$$σ_m = k_t s_m \tag{2.65}$$

จากสมการที่ 2.31 เส้นกราฟความเค้น-อายุการล้าที่ความเค้นเฉลี่ยใดๆ สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่มีรอยเจาะ

คือ

$$σ_{a,mean≠0} = A \left[1 - \frac{σ_m}{σ_u} \right] N^B \tag{2.31}$$

แทนสมการที่ 2.64 และ 2.65 ลงในสมการที่ 2.31 จะได้เส้นกราฟความเค้น-อายุที่ความเค้นเฉลี่ยใดๆ สำหรับชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะ (โดยเกณฑ์ของ Goodman) คือ

$$S_a = \frac{A}{K_t} \left(1 - \frac{K_t S_m}{σ_u} \right) N^B \tag{2.66}$$

ข้อสังเกตอย่างหนึ่งเกี่ยวกับสมการที่ 2.31 ที่นำมาแสดงอีกครั้งก็คือหากทำการจัดรูปสมการเสียใหม่เป็น

$$\left[1 - \frac{σ_m}{σ_u} \right] σ_a = AN^B \tag{2.67}$$

จะพบว่าเทอมทางด้านขวามือของสมการที่ 2.67 จะแทนเส้นกราฟความเค้นอายุที่ความเค้นเฉลี่ยเป็น ศูนย์ แต่เทอมทางด้านซ้ายมือก็มีความหมายคล้ายๆกับความเค้นส่วนเปลี่ยนที่ถูกปรับแก้(ด้วยตัวส่วน)ดังนั้น เทอมทางด้านซ้ายมือก็คือความเค้นส่วนเปลี่ยนสมมูล หรือความเค้นส่วนเปลี่ยนที่มีความเค้นเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ แต่มีผลเทียบเท่ากับการผสมผสานระหว่างความเค้นส่วนเปลี่ยน และความเค้นเฉลี่ยที่มากระทำร่วมกันต่อ ชิ้นส่วน

ข) วัสดุเหนียว

ผลของรอยเจาะต่อพฤติกรรมการล้าในวัสดุเหนียวจะไม่รุนแรงเท่ากับในวัสดุเปราะ เนื่องจากการคราก ทำให้ผลของความเค้นเฉลี่ยไม่เด่นชัด หรือพฤติกรรมไม่ไวต่อความเค้นเฉลี่ยนั่นเอง ดังนั้น

เราจะได้ออกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_a = K_t S_a \quad (2.68)$$

และ

$$\sigma_m = S_m \quad (2.69)$$

ดังนั้นเส้นกราฟความเค้น-อายุคือ

$$S_a = \frac{A}{K_t} \left[1 - \frac{S_m}{\sigma_u} \right] N^B \quad (2.70)$$

ตัวแปร K_t ในสมการที่ 2.66 และ 2.70 สามารถใช้ K_t แทนได้หากพิจารณาบริเวณอายุความล้าอ่อนตัว หรือใช้ K_f แทนหากพิจารณาบริเวณอายุความล้าจำกัด สมการทั้งสองสามารถเขียนรวมกันใหม่ได้เป็น

$$S_a = \frac{A}{K_{fnotch}} \left[1 - \frac{K_{fm} S_m}{\sigma_u} \right] N^B \quad (2.71)$$

โดย $K_m = 1$ สำหรับวัสดุเหนียวและ $K_{fm} = K_f$ หรือ K_t สำหรับวัสดุเปราะ

2.10.2 วิธีในการหา Fatigue notch factor แบบที่ 2

นิยามพารามิเตอร์ K_{fm} คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉลี่ยที่รอยเจาะ σ_m กับความเค้นเฉลี่ยของความเค้นที่มากกระทำ (nominal stress) S_m (รูปที่ 2.23ก) หรือเขียนในรูปสมการได้เป็น

$$K_{fm} = \frac{\sigma_m}{S_m} \quad (2.72)$$

สำหรับกรณีที่ไม่เกิดการคราก (รูปที่ 2.23ข) หรือ $K_t S_{max} < \sigma_y$ จากสมการที่ (1.21ข) เราจะได้

$$K_{fm} = K_t \quad (2.73)$$

พิจารณากรณีที่เกิดการครากเฉพาะที่ (รูปที่ 2.24ค) หรือ $K_t S_{max} \geq \sigma_y$ โดยอาศัยหลักการซ้อนทับของ Rice ความเค้นเฉลี่ยที่รอยเจาะจะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_m = \sigma_y - K_t S_a \quad (2.74)$$

และ

$$K_{fm} = \frac{\sigma_y - K_t S_a}{|S_m|} \quad (2.75)$$

สำหรับกรณีสุดท้าย เมื่อความเค้นเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงมีความรุนแรงจนทำให้เกิด reversed yielding (รูปที่ 2.23ง) หรือ $K_f S_a > \sigma_y$ เราจะได้ความเค้นสูงสุด และต่ำสุดที่รอยเจาะมีค่าเท่ากับ σ_y และ $-\sigma_y$ ตามลำดับดังนี้

$$\sigma_m = 0 \tag{2.76}$$

และ

$$K_{fm} = 0 \tag{2.77}$$



รูปที่ 2.23 แสดงพฤติกรรมตอบสนองของวัสดุในชิ้นส่วนที่มีรอยบากภายใต้
ภาระที่ความเค้นเฉลี่ย ไม่เท่ากับศูนย์

Juvinall และ Marshek ได้ปรับสมการที่ 2.73, 2.75 และ 2.77 เสียใหม่โดยแทนที่ K , ด้วย K_f ดังนั้นจะได้

$$K_{fm} = K_f \quad (\text{ไม่มีการคราก}; K_f S_{\max} < \sigma_y) \tag{2.78}$$

$$K_{fm} = \frac{\sigma_y - K_f S_a}{|S_m|} \quad (\text{มีการครากเฉพาะที่}; K_f S_{\max} > \sigma_y) \tag{2.79}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_{fm} = 0 \quad (\text{เกิด reversed yieldig ; } K_f S_a) \sigma_y) \quad (2.80)$$

สำหรับวัสดุเหนียว แนวทางแบบที่หนึ่ง จะได้ค่า K_{fm} เท่ากับ 1 แต่เราจะเห็นว่าค่า K_{fm} มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง K_f หรือ 0 ถึง K_f ดังนั้นการใช้ค่า K_{fm} เท่ากับ 1 จึงเป็นการประมาณหยาบๆ แต่อย่างไรก็ดี ก็มีใช้กันอย่างกว้างขวาง

2.11 การสร้างเส้นกราฟความเค้นอายุ

วิธีการสร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้มี 2 วิธีคือ

1. วิธีของ Collins
2. วิธีของ Juvinall

ภาพรวมของทั้งสองวิธี ก็คือการประมาณค่าขีดจำกัดความล้า และ fatigue strength ที่อายุความล้า 1 รอบ (กรณีวิธีของ Collins) หรือ fatigue strength ที่อายุความล้า 1 รอบ และ 1000 รอบ (กรณีวิธีของ Juvinall) วิธีการทั้งสองเป็นเพียงความพยายาม ในการประมาณพฤติกรรมการล้าของวัสดุ ดังนั้นอายุความล้าที่คำนวณจากวิธีทั้งสองอาจมีค่าแตกต่างกันมาก อีกทั้งไม่สามารถ บอกได้ว่าวิธีใดดีกว่ากัน (นำมาเปรียบเทียบกันไม่ได้) Dowling กล่าววิธีของ Juvinall นั้นค่อนข้างจะปลอดภัย (Conservative) กว่า และประยุกต์ใช้ได้ครอบคลุมกว่าวิธีของ Collins

Collins ได้แนะนำวิธีในการสร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุ สำหรับเหล็ก หรือ เหล็กกล้าที่มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด σ_u น้อยกว่า 1200 MPa

กำหนดให้เส้นกราฟความเค้น-อายุ ถูกสร้างบนพิกัดแบบล็อก-เชิงเส้น และสมการที่แทนเส้นกราฟดังกล่าวอยู่ในรูป

$$S_a = C + D \cdot \log(N) \quad (2.81)$$

โดยสมการที่ 2.81 จะมีจุดเริ่มต้นที่ $N = 1$ รอบ และจุดสิ้นสุดที่ $N = 10^6$ รอบ

วิธีของ Collins จะกำหนดให้

$$S_a = \sigma_u \quad \text{ที่ } N = 1 \quad (2.82)$$

$$S_a = \frac{\sigma_e}{K_f} \quad \text{ที่ } N = 10^6 \quad (2.83)$$

เมื่อ σ_e แทนค่าขีดจำกัดความทนทาน (ที่ปรับแก้แล้ว) จากสมการที่ 2.82 และ 2.83 เราจะได้

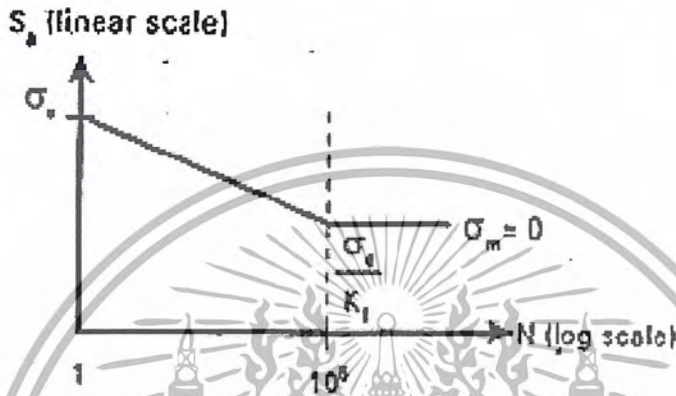
$$C = \sigma_u \quad \text{และ} \quad D = \frac{1}{6} \left[\frac{\sigma_e}{K_f} - \sigma_u \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสมการที่ 2.81 จะเขียนได้เป็น

$$S_a = \sigma_u + \frac{1}{6} \left[\frac{\sigma_e}{K_f} - \sigma_u \right] \log(N) \quad (2.84)$$

ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 2.23

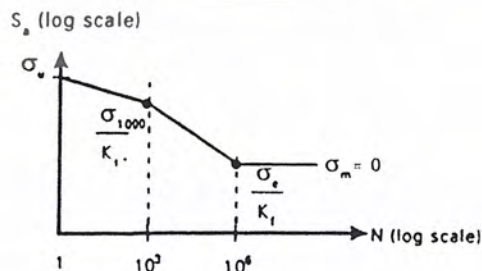


รูปที่ 2.23 แสดงเส้นกราฟความเค้น-อายุของชิ้นส่วนที่มีรอยเจาะ โดยวิธีของ Collins

วิธีของ Juvinall

สำหรับวิธี Juvinall เส้นกราฟความเค้น-อายุจะถูกสร้างบนพีคแบบบล็อก-ล๊อค ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ด้วยกัน(รูปที่ 3.16) คือ

1. ส่วนที่ 1 เริ่มตั้งแต่ $N=1$ ถึง $N=10^3$
2. ส่วนที่ 2 เริ่มตั้งแต่ $N=10^3$ ถึง N_e ซึ่งแทนจำนวนรอบที่ถือว่าชิ้นส่วนมีอายุความล้าอนันต์ (โดยทั่วไป 10^6 รอบสำหรับวัสดุที่มีขีดจำกัดความทนทาน หรือ 5×10^8 รอบ สำหรับวัสดุที่มีขีดจำกัดความทนทานไม่ชัดเจน)
3. ส่วนที่ 3 เริ่มตั้งแต่ $N = N_e$ เป็นต้นไป



รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะของเส้นกราฟความเค้น-อายุ ที่สร้างโดยวิธีของ Juvinall

สมการของเส้นกราฟความเค้น-อายุจะเขียนอยู่ในรูปของ

$$S_{a1} = A_1 N^{B_1} \text{ สำหรับส่วนที่ 1} \quad (2.85)$$

และ

$$S_{a2} = A_2 N^{B_2} \text{ สำหรับส่วนที่ 2} \quad (2.86)$$

เมื่อ S แทน nominal stress และตัวห้อย 1 และ 2 แทนเส้นกราฟ ส่วนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยการแทนค่าพิกัดที่ทราบลงในสมการที่ 3.23ก และ 3.23ข เราจะได้ค่าคงตัว A_1, B_1, A_2, B_2 คือ

$$A_1 = \sigma_u \quad (2.87)$$

$$B_1 = \frac{1}{3} \log \left[\frac{\sigma_{1000}}{K_f \sigma_u} \right] \quad (2.88)$$

$$A_2 = \left[\frac{\sigma_{1000}}{K_f} \right] \left[\frac{\sigma_{1000}}{\sigma_e} \cdot \frac{K_f}{K_{f'}} \right]^{\frac{3}{\log(N_e)-3}} \quad (2.89)$$

$$B_2 = \log \left[\frac{\sigma_{1000} \cdot K_f}{\sigma_e \cdot K_{f'}} \right] \frac{3}{3 - \log(N_e)} \quad (2.90)$$

2.12 ผลของความเค้นเฉลี่ย

การสร้างเส้นกราฟความเค้น-อายุที่ระดับความเค้นเฉลี่ยใดๆสามารถกระทำได้โดยอาศัยหลักการของความเค้น ส่วนเปลี่ยนสมมูล ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.31 แต่เนื่องจากรูปแบบของสมการที่แทนเส้นกราฟความเค้น-อายุ อยู่ในรูปของ nominal stress, s ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ดังนี้

จากความสัมพันธ์ของ Goodman ณ ตำแหน่งอายุความล้าอนันต์จะได้ $\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1$

$$\sigma_e = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}}$$

สำหรับสภาวะของภาระใดๆ ที่ทำให้ชิ้นส่วนมีอายุความล้าจำกัด ด้านขวามือของสมการข้างต้นจะแทนความเค้นส่วนเปลี่ยนสมมูลที่รอยเจาะดังนี้

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคิดผลของ fatigue notch factor สมการข้างต้นจะกลายเป็น

$$\frac{\sigma_{eq}}{K_f} = \frac{S_a}{1 - \frac{K_{fm} S_m}{\sigma_u}}$$

$$\frac{\sigma_{eq}}{K_f} = \frac{S_a}{1 - \frac{K_{fm} S_m}{\sigma_u}}$$

$$S_{eq} = \frac{S_a}{1 - \frac{K_{fm} S_m}{\sigma_u}} \quad (2.91)$$

โดยสมการที่ 3.26 นั้นเปรียบเทียบกับ equivalent alternating (nominal) stress ดังนั้นเส้นกราฟความเค้นอายุ ในรูปของ nominal stress ณ ความเค้นเฉลี่ยใดๆ จะเขียนได้เป็น

$$S_a = \left[1 - \frac{K_{fm} S_m}{\sigma_u} \right] (C + D \log(N)) \quad \text{สำหรับวิธีของ Collins} \quad (2.92)$$

หรือ

$$S_a = \left[1 - \frac{K_{fm} S_m}{\sigma_u} \right] AN^B \quad \text{สำหรับวิธีของ Juvinall} \quad (2.93)$$

2.13 แนวทางของความเครียด

ความสัมพันธ์พื้นฐาน

2.13.1 Engineering stress-strain

ในการทดสอบแรงดึง (tension test) ชิ้นงานทดสอบจะถูกดึงด้วยแรงแนวแกน จนกระทั่งขาด แรงดึง และระยะห่างระหว่างจุดอ้างอิง (รูปที่ 2.25) ที่เวลาต่างๆจะถูกบันทึก และสามารถหา engineering stress, S และ engineering strain, e ได้จาก

$$S = \frac{P}{A_o} \quad (2.94)$$

และ

$$e = \frac{l - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (2.95)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย A_0 แทนขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบก่อนที่จะเกิดการเสียรูปแนวแกน l_0 แนวระยะห่างเริ่มต้นของจุดอ้างอิง 2 จุด บนชิ้นงานทดสอบ (รูปที่ 2.25) ซึ่งเรียกว่า ความยาวเกจ (gauge length)



รูปที่ 2.25 แสดงชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึง

2.13.2 ความเค้นจริง-ความเครียดจริง (True stress-strain)

ในการหาค่าความเค้น และความเครียดระหว่างการทดสอบแรงดึง หากเราใช้ขนาดพื้นที่หน้าตัดขณะใดๆ A และความยาวเกจขณะใดๆ l แทนการใช้พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น และความยาวเกจเริ่มต้น เพื่อมาคำนวณหาค่าความเค้น และความเครียดแล้ว เราจะเรียกค่าที่ได้ว่า ความเค้นจริง (true stress) และความเครียดจริง (true strain) ตามลำดับ และค่าทั้งสองสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.96)$$

และ

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.97)$$

2.13.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering stress-strain กับ True stress-strain

จาก

$$\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

$$\epsilon = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right)$$

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (2.98)$$

สมมติให้ปริมาตรของวัสดุระหว่าง gauge length ในตอนเริ่มต้น และขณะที่เกิดการเสียรูป (รูปที่ 2.26) มีค่าเท่ากันแล้ว จะได้

$$A_0 l_0 = A l \quad (2.99)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{A_o}{A} = \frac{l}{l_o}$$

หรือ
$$\frac{A_o}{A} = 1 + e \quad (2.100)$$

จาก
$$\sigma = \frac{P}{A}$$

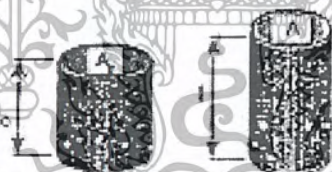
แต่ $P = SA_o$ ดังนั้นจะได้

$$\sigma = S \frac{A_o}{A} \quad (2.101)$$

แทนสมการที่ 2.100 ลงในสมการที่ 2.101 จะได้

$$\sigma = S(1 + e) \quad (2.102)$$

สมการที่ (2.98) และ (2.102) จะเป็นจริง ก่อนที่ชิ้นงานทดสอบจะเกิด necking เท่านั้น ตัวอย่างเส้นกราฟ true stress-strain ที่สร้างขึ้นโดยอาศัย สมการที่ (2.98) และ (2.102) นั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 2.27

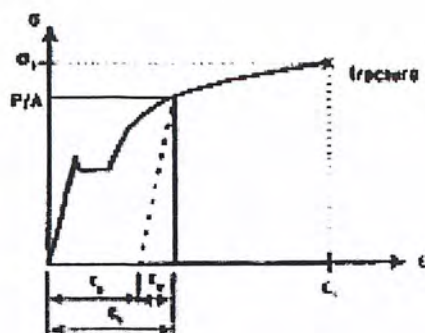


รูปที่ 2.26 แสดงปริมาตรของวัสดุระหว่าง gauge length ในตอนเริ่มต้นและระหว่างการเสียรูป

ณ จุดที่ชิ้นส่วนถูกกระทำด้วยแรง P และเกิดความเค้นจริง ในขณะนั้น P/A (รูปที่ 2.27) เราจะได้ว่า ความเครียดรวม ϵ_t ที่เกิดขึ้นคือ ผลบวกของความเครียดยืดหยุ่น (elastic strain) ϵ_e และความเครียดพลาสติก (plastic strain) ϵ_p คือเขียนในรูปสมการได้เป็น

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (2.103)$$

หรือ
$$\epsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_p \quad (2.104)$$



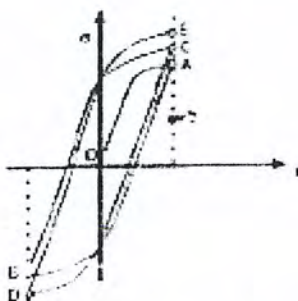
รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะ โดยทั่วไปของเส้นกราฟ True stress-strain

2.13.4 พฤติกรรมของวัสดุภายใต้การเปลี่ยนแปลง

ภายใต้ความเค้นเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดคงที่ ในช่วงที่ภาระมีขนาดเพิ่มขึ้น (loading ; OA) พฤติกรรมการตอบสนองต่อภาระของวัสดุจะเป็นไปตามเส้นกราฟความเค้น-ความเครียด (เส้น OA ในรูปที่ 2.28) จนกระทั่งถึงจุดที่มีความเครียดสูงสุด (จุด A) จากนั้นเมื่อภาระมีขนาดลดลง (unloading ; AB) พฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่า Young modulus แต่ในช่วงนี้วัสดุจะเกิดการครากก่อนที่จะถึงความต้านแรงดึงครากค้ำนกค (จุด x) ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีชื่อเรียกว่า Bauschinger effect อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงค่าความเครียดกดสูงสุด (เส้น AB) หากชิ้นงานทดสอบยังคงอยู่ภายใต้ความเครียดเปลี่ยนแปลงต่อไป พฤติกรรมการตอบสนองจนกระทั่งถึงจุด E จะมีลักษณะคร่าวๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.29

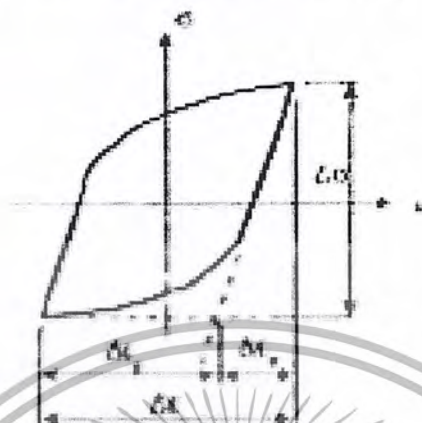


รูปที่ 2.28 แสดงพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุภายใต้ความเครียดเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.29 แสดงพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุต่อความเครียดเปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ดีเมื่อจำนวนรอบของความเครียดเปลี่ยนแปลงที่ค่ามากพอ เส้นทางเดินต่างๆ ในรูปที่ 2.29 จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และอาจถือว่าพฤติกรรมการตอบสนองมีเสถียรภาพ(stable) เมื่อนำเส้นทางเดิม ในช่วง OA ออกไปเราจะได้วงปิด ซึ่งมีชื่อเรียกว่า stable hysteresis loop (รูปที่ 2.30)



รูปที่ 2.30 แสดง stable hysteresis loop

ภายใต้การทดสอบที่มีแอมพลิจูดความเครียดต่างๆกันเราก็จะได้ stable hysteresis loop ขนาดต่างๆกัน เมื่อนำวงปิดเหล่านั้นมาวาดบนแกนเดียวกันแล้วต่อเนื่องจุดปลายเข้าด้วยกันเราจะได้เส้นกราฟที่มีชื่อเรียกว่า cyclic stress-strain curve (รูปที่ 2.31)

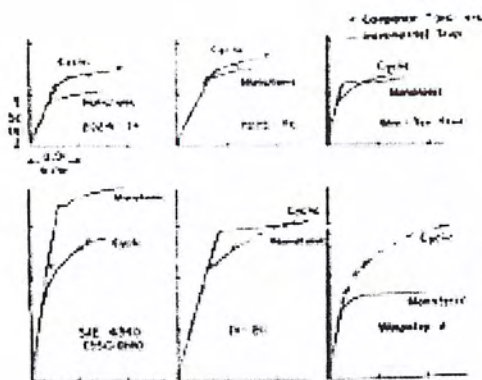


รูปที่ 2.31 แสดงเส้นกราฟ cyclic stress-strain

เมื่อนำเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุภายใต้ภาวะเปลี่ยนแปลง (cyclic stress-strain curve, c) มาวาดบนแกนเดียวกันกับเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Monotonic stress-strain curve, M) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 จะพบว่าเส้นกราฟ ทั้งสองจะมีลักษณะแตกต่างกัน

ถ้าหากเส้นกราฟ M อยู่สูงกว่าเส้นกราฟ C แล้วเราจะเรียกว่าวัสดุมีพฤติกรรมแบบ cyclically soften (รูปที่ 2.33ก) และในทางตรงกันข้ามหากเส้นกราฟ M อยู่ต่ำกว่าเส้นกราฟ C เราจะเรียกว่าวัสดุเกิด cyclically harden (รูปที่ 2.33ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 แสดงเส้นกราฟ cyclic และ Monotonic stress-strain



รูปที่ 2.33 แสดง cyclically harden และ cyclically soften

โดยปกติวัสดุอ่อนจะมีแนวโน้มที่จะเกิด cyclically harden และวัสดุแข็งมีแนวโน้มที่จะเกิด cyclically soften Manson พบว่าอัตราส่วนของ $\frac{\sigma_u}{\sigma_y}$ คือ σ_u นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถใช้ทำนายว่าวัสดุจะเกิดพฤติกรรมตอบสนองแบบใด ดังนี้

ถ้า $\frac{\sigma_u}{\sigma_y} > 1.4$ วัสดุจะเกิด cyclically harden

ถ้า $\frac{\sigma_u}{\sigma_y} < 1.2$ วัสดุจะเกิด cyclically soften

และสำหรับกรณี $1.2 \leq \frac{\sigma_u}{\sigma_y} \leq 1.4$ จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงชัดเจน

นอกจากนี้ strain hardening exponent ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ก็สามารถนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมภายใต้ภาวะเปลี่ยนแปลงได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า $n > 0.2$ วัสดุจะเกิด cyclically harden

ถ้า $n < 0.1$ วัสดุจะเกิด cyclically soften

สมการที่ใช้แทนเส้นกราฟ cyclic stress-strain นั้นมักจะเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ Ramberg-Osgood ดังแสดงในสมการที่ 2.105

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left[\frac{\sigma_a}{K'} \right]^{1/n'} \quad (2.105)$$

ซึ่งค่าคงตัว K' แสดง n' ในสมการสามารถหาได้จากคู่มือสมบัติวัสดุทั่วไป

ย้อนกลับไปพิจารณารูปที่ 2.30 อีกครั้งจากรูปดังกล่าว เราจะได้พิสัยความเครียดรวม (total strain range) คือ

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p \quad (2.106)$$

สมการที่ 2.106 นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแอมพลิจูดความเครียดได้โดยหารสมการที่ 2.106 ตลอดด้วย 2 จะได้

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \quad (2.107)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ea} + \varepsilon_{pa} \quad (2.108)$$

โดย $\varepsilon_{ea}, \varepsilon_{pa}$ แทนพิสัยความเครียดยืดหยุ่น และพิสัยความเครียดพลาสติก ตามลำดับ จากรูปที่ 2.30 แอมพลิจูดความเค้น (stress amplitude) และแอมพลิจูดความเครียด (strain amplitude) จะมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_a = \frac{\Delta \sigma}{2} \quad (2.109)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta \sigma}{2} \quad (2.110)$$

หรือ

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ea} + \varepsilon_{pa} \quad (2.111)$$

โดย $\varepsilon_{ea}, \varepsilon_{pa}$ แทนพิสัยความเครียดยืดหยุ่น และพิสัยความเครียดพลาสติก ตามลำดับ

2.14 เส้นกราฟความเครียด-อายุ

คือเส้นกราฟที่พล็อตระหว่างแอมพลิจูดความเครียด และจำนวนรอบจนกระทั่งเสียหาย การคำนวณหาอายุความล้าจากเส้นกราฟนี้ จะมีหลักการเช่นเดียวกันกับแนวทางของความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบเส้นกราฟความเครียด-อายุ ทำได้โดยกระทำระเปลี่ยนแปลงแบบกลับไปมาต่อชิ้นส่วน โดยกระทำดังกล่าวต้องก่อให้เกิดความเครียดเปลี่ยนแปลงแบบกลับไปมา ($R = -1$) ที่มีแอมพลิจูดคงที่ ตลอดช่วงเวลาทดสอบ จากสมการที่ 2.111

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ea} + \varepsilon_{pa}$$

จากข้อมูลการทดสอบพบว่าแอมพลิจูดความเครียดยืดหยุ่น และแอมพลิจูดความเครียดพลาสติกมีความสัมพันธ์กับอายุความล้า ดังแสดงในสมการที่ 2.112 และ 2.113 ตามลำดับ

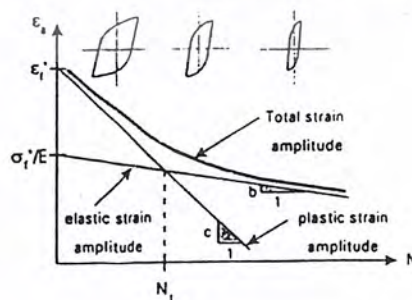
$$\varepsilon_{ea} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b \quad (2.112)$$

$$\varepsilon_{pa} = \varepsilon'_f (2N)^c \quad (2.113)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดความเครียดกับอายุความล้าคือ

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \quad (2.114)$$

โดย σ'_f, b, c และ ε'_f เป็นค่าคงตัวของวัสดุแต่ละชนิด เมื่อนำสมการที่ 2.112, 2.113 และ 2.114 มาพล็อตบนแกนเดียวกัน (รูปที่ 2.34) จะพบว่าเส้นกราฟแอมพลิจูดความเครียดรวม (สมการที่ 2.114) จะลู่ไปกับเส้นกราฟแอมพลิจูดความเครียดพลาสติก (สมการที่ 2.113) ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะ ณ อายุความล้าที่น้อยๆ ขนาดของ hysteresis loop จะมีขนาดใหญ่ (เนื่องจากมีการเสียรูปแบบพลาสติกมาก) ทำให้แอมพลิจูดความเครียดพลาสติกมีบทบาทเด่น แต่ในทางตรงกันข้ามที่อายุความล้ามากขึ้น ขนาดของ hysteresis loop จะเล็กลง การเสียรูปแบบพลาสติกจะน้อยลง เส้นกราฟจึงลู่ไปกับเส้นกราฟแอมพลิจูดความเครียดยืดหยุ่น (สมการที่ 2.112) เราเรียกค่าอายุความล้าที่แบ่งบริเวณที่แอมพลิจูดความเครียดพลาสติกเด่น และบริเวณที่แอมพลิจูดความเครียดยืดหยุ่นเด่นออกจากกันว่า “transition fatigue life” ซึ่งในที่นี้แทนด้วย N_t



รูปที่ 2.34 แสดงเส้นกราฟความเครียดยืดหยุ่น-อายุ

ความเครียดพลาสติก-อายุ และความเครียดรวม-อายุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนิยามของ transition fatigue life เราสามารถคำนวณหาค่า N_t ได้โดยให้สมการที่ 2.112 เท่ากับสมการที่ 2.113 ดังต่อไปนี้

$$\frac{\sigma_f'}{E} (2N_t)^b = \varepsilon_f' (2N_t)^c$$

ดังนั้น

$$N_t = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_f'}{\varepsilon_f' E} \right]^{\frac{1}{c-b}} \quad (2.115)$$

หมายความว่า ณ อายุความล้าใดๆที่มีค่ามากกว่า N_t เส้นกราฟแอมพลิจูดความเครียดรวม จะลดรูปเหลือเส้นกราฟแอมพลิจูดความเครียดยืดหยุ่นหรือ

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a'}{E} (2N)^b \quad (2.116)$$

หากจัดรูปสมการข้างต้นเสียใหม่เราจะได้

$$\varepsilon_a E = \sigma_a' (2N)^b$$

หรือ

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N)^{\frac{b}{c}} \quad (2.117)$$

ซึ่งสมการที่ได้นี้มีรูปแบบเหมือนกับเส้นกราฟความเค้น-อายุพิจารณาสมการที่ 2.113 เราสามารถจัดรูปได้เป็น

$$\left(\varepsilon_{pa} \right)^{\frac{1}{c}} = \left(\varepsilon_f' \right)^{\frac{1}{c}} (2N) \quad (2.118)$$

แทนลงในสมการที่ 2.117 จะได้

$$\sigma_a = \sigma_f' \left(\frac{\varepsilon_{pa}}{\varepsilon_f'} \right)^{\frac{b}{c}} \quad (2.119)$$

แบบจำลองของ Ramberg-Osgood นั้นสมมุติให้แอมพลิจูดความเครียดพลาสติก และแอมพลิจูดความ

เค้น สัมพันธ์กับตามสมการที่ 2.120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_a = k' (\varepsilon_{pa})^{n'} \quad (2.120)$$

โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ในสมการที่ 2.119 และ 2.120 จะได้

$$n' = \frac{b}{c} \quad (2.121)$$

และ

$$K' = \frac{\sigma_F}{(\varepsilon'_f)^{\frac{b}{c}}} \quad (2.122)$$

สมการที่ 2.121 และ 2.122 นั้นมีความหมายว่า หากเราทราบค่าคงตัวในสมการเส้นกราฟความเค้น-อายุ แล้วเราสามารถประมาณสมการของ cyclic stress-strain ได้ (เพราะสมการดังกล่าว จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อวัสดุมีพฤติกรรมเหมือนกับ แบบจำลองของ Ramberg Osgood)

สำหรับตัวอย่างของค่าคงตัวในสมการเส้นกราฟความเค้น-อายุ และสมบัติอื่นๆ ของวัสดุต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2

วัสดุ	Tensile property				cyclic $\sigma - \varepsilon$ curv			Strain-life curve			
	σ_y	σ_u	σ_f	%R	E	K'	n'	σ_f	b	ε'_f	c
SAE 1015	227	415	725	68	206	1058	0.240	976	- 0.14 0	0.76 0	- 0.59 0
Man-Ten	322	557	990	67	203	1096	0.187	1089	- 0.11 5	0.91 2	- 0.60 6
ROC-100	683	758	1186	64	200	903	0.091	938	- 0.06 5	1.38 0	- 0.70 4
SAE 1045	382	621	985	51	202	1258	0.208	948	- 0.09 2	0.26 0	- 0.44 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAE 4142 670HB	1619	2450	2580	6	200	2810	0.040	2550	- 0.07 8	0.00 3	- 0.43 6
SAE 4142 560HB	1688	2240	2650	27	207	4140	0.126	3410	- 0.12 1	0.07 3	- 0.80 5
SAE 4142 450HB	1584	1757	1998	42	207	2080	0.093	1937	- 0.07 6	0.70 6	- 0.86 9
SAE 4142 380HB	1378	1413	1826	48	207	2210	0.133	2140	- 0.09 4	0.63 7	- 0.76 1
AISI 4340 AirCraft	1103	1172	1634	56	207	1655	0.131	1758	- 0.09 8	2.12 0	- 0.77 4
AISI 4340 409HB	1371	1468	1557	38	200	1910	0.123	1879	- 0.08 6	0.64 0	- 0.63 6
2024- T351 Al	379	455	558	25	73	662	0.070	927	- 0.11 3	0.40 9	- 0.71 3
7075-T6 Al	469	578	744	33	71	977	0.106	1466	- 0.14 3	0.26 2	- 0.61 9
Ti-6Al- 4V	1185	1233	1717	41	117	1772	0.106	2030	- 0.10 4	0.84 1	- 0.68 8
Inconel X	703	1213	1309	20	214	1855	0.120	2255	- 0.11 7	1.16 0	- 0.74 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 การประมาณค่าคงตัวในสมการของเส้นกราฟความเครียด-อายุ

สมการความเครียด-อายุนั้น มีค่าคงตัวที่ไม่ทราบค่าอยู่ 4 ตัว ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุโดยตรง เราสามารถประมาณค่าคงตัว ทั้ง 4 ได้คร่าวๆค่าแนะนำ ต่อไปนี้

1. Fatigue strength coefficient, σ'_f

สามารถประมาณได้จาก $\sigma'_f \approx \sigma_f$ (2.123)

และสำหรับเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า 500 BHN จะได้

$$\sigma_f \approx \sigma_u + 50 \text{ksi} \quad (2.124)$$

2. Fatigue strength exponent, b

สำหรับโลหะส่วนใหญ่ค่า b จะอยู่ในระหว่าง -0.05 ถึง -0.12 โดยถ้าเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงต่ำ b จะมีค่าประมาณ -0.12 แต่ถ้าเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสูงค่า b โดยประมาณคือ -0.05

เนื่องจากค่า b นั้นเป็นเลขชี้กำลังของเส้นกราฟแอมพลิจูดความเครียดยืดหยุ่น-อายุซึ่งจะมีบทบาทเด่นเมื่ออายุความล้าเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถผูกโยงแนวทางของความเค้นเข้ามาได้ ดังนี้

ณ จุดที่มีอายุความล้าอนันต์ N_e ค่าขีดจำกัดความทนทานที่ปรับแก้แล้ว จะมีค่าเท่ากับ N_e ค่าขีดจำกัดความทนทานที่ปรับแก้แล้วจะมีค่าเท่ากับ σ_e ดังนั้นจากสมการที่ 4.24 จะได้

$$b = \frac{\log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma_e}\right)}{\log(2N_e)} \quad (2.125)$$

สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าขีดจำกัดความทนทานนั้น มีเพียงตัวประกอบปรับแก้อุณหภูมิ C_{temp} เท่านั้น

3. Fatigue ductility coefficient, ϵ'_f

สามารถประมาณได้จาก $\epsilon'_f \approx \epsilon_f$

โดย
$$\epsilon_f = \ln\left(\frac{1}{1-RA}\right) \quad (2.126)$$

4. Fatigue ductility exponent, c

จากผลงานของ Coffin, Manson และ Morrow พบว่าค่า C จะอยู่ในช่วง -0.5 ถึง -0.7 แต่สำหรับโลหะเหนียวที่มี $\epsilon_f \approx 1$ ค่า C ที่เหมาะสมคือ -0.6 สำหรับโลหะที่มีค่า $\epsilon_f \approx 0.5$ ค่า C ที่เหมาะสมคือ 0.5

2.16 ผลของความเค้นเฉลี่ย

แนวทางของ Morrow

หลักการของแนวทางนี้ก็คือ การหาความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลงสมมูล เพื่อเป็นตัวแทนสภาวะของความเค้น

ใดๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเค้นเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เราจะได้

$$\sigma'_a = \sigma'_f (2N)^b \quad (2.127)$$

ณ ความเค้นเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์ เราจะได้

$$\sigma'_a - eq = \sigma'_f (2N)^b \quad (2.128)$$

โดย $\sigma_a - ep$ แทนความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง (ที่มีค่าความเค้น-เฉลี่ยเท่ากับศูนย์) ซึ่ง Morrow กำหนดให้มีค่าเท่ากับ

$$\sigma_a - eq = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}} \quad (2.129)$$

แทนสมการที่ 2.129 ลงในสมการที่ 2.128 จะได้

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m) (2N)^b$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\sigma_a = \sigma'_f \left[\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} (2N) \right]^b$$

เมื่อเทียบกับสมการ 2.127 เทอมในวงเล็บใหญ่นั้นจะแทนอายุความล้าภายใต้ภาวะเปลี่ยนแปลงที่มีความเค้นเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์ ในที่นี้แทนด้วย N' ดังนั้น

$$2N' = \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} (2N)$$

หรือ

$$N' = \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} (N) \quad (2.130)$$

สำหรับสมการของเส้นกราฟความเครียด-อายุที่ความเค้นเฉลี่ยใดๆ นั้นจะอยู่ในรูปของ

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N')^b + \varepsilon'_f (2N')^c \quad (2.131)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ 2.130 ลงในสมการที่ 2.131 จะได้

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right) (2N)^b + \varepsilon'_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right)^{\frac{c}{b}} (2N)^c \quad (2.132)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

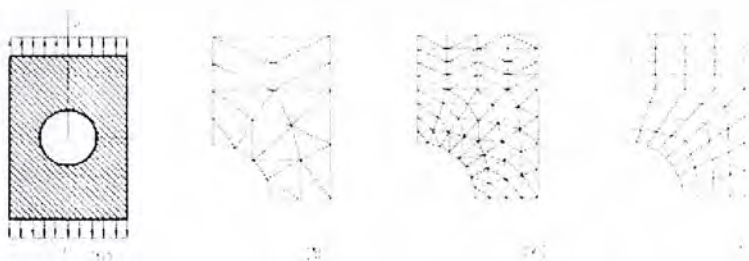
บทที่ 3

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 บทนำ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพานและโครงสร้างอื่นๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (plastic) นอกจากจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิติศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหล, การถ่ายเทมวล เป็นต้น

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน เราสามารถจะหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่างๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอและบางบริเวณอาจมีการเปลี่ยนแปลงของไหลอย่างฉับพลัน หรือใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญหรือสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่นๆ เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต แทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นย่อยๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน เช่น รูป 3.1 เราเรียกชิ้นส่วนย่อยเหล่านี้ว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลเฉลยที่รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (node) ของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะไม่วิเคราะห์ปัญหาที่เดียวทั้งระบบเช่นวิธีต่างๆ ไป แต่เราจะวิเคราะห์หาค่าที่แต่ละเอลิเมนต์แล้วนำมารวม



รูปที่ 3.1 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย

(ก) แผ่นโลหะมีรูตรงกลางและมีโหลด P กระทำ (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมหยาบ

(ค) เอลิเมนต์ 3 เหลี่ยมละเอียด (ง) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ เช่น ในระบบ โครงสร้าง เราจะหาการกระจัดและความเค้นของแต่ละจุดของ
 เอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างของระบบ

3.2 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตามที่กล่าวมาแล้ว เราสามารถจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้าง เช่น การ
 กระจัด, ความเค้น – ความเครียด และใช้วิเคราะห์ปัญหาของการถ่ายเทความร้อน การไหลของของเหลว เป็น
 ต้น ในที่นี้จะเน้นการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างระบบทางกล และชิ้นส่วน
 ของเครื่องจักรกลที่ซับซ้อนที่ไม่สามารถหาผลเฉลยจากวิธีธรรมดาๆ ได้

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง สามารถหาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธีคือ วิธีแรง
 หรือวิธียืดหยุ่น (force or flexibility method) และ วิธีการกระจัดหรือวิธีสทิฟเนส (displacement of
 stiffness method) วิธีแรกสามารถหาแรงภายในและแรงปฏิกิริยาโดยอาศัยสมการสมดุลของแรงและ
 สมการเงื่อนไขการกระจัด (compatibility equation)

ส่วนวิธีที่สองจะสามารถหาการกระจัดที่สมมุติขึ้น โดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์ที่แต่ละ
 จุดต่อหรือที่ขอบบริเวณที่สัมผัสกันไม่ว่าก่อนหรือหลัง โหลดกระทำยังคงมีความต่อเนื่องเหมือนเดิม ดังนั้น
 สมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการกระจัดของแต่ละจุดต่อ และค่าของการกระจัดก็สามารถหาได้โดย
 อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น นิยมใช้วิธีการกระจัดหรือวิธีสทิฟเนสหาสมการ
 ไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถหาสมการสมดุลและหาผลเฉลยได้สะดวกกว่า รวมทั้ง
 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวก็นิยมใช้วิธีการกระจัดด้วย

หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็คือ จะแบ่ง โครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยๆ เช่นรูป 3.1 ซึ่ง
 เรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (displacement function) ที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็น
 ฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะ โยงกันด้วยจุดต่อ (node) หรือเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์สัมผัสกัน
 และโดยอาศัยคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน เราสามารถหาการกระจัด, ความเค้น –
 ความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างหรือชิ้นงาน

ขั้นตอนต่างๆ ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วน เช่น สปริง, ท่อน
 โลหะ, เหล็ก, โครงข้อหมุน, โครงข้อแข็ง, แผ่นโลหะ, ถังความดัน ฯลฯ ภายใต้สภาวะต่างๆ ของโหลด มี
 ขั้นตอนต่างๆ ไปคล้ายกันดังนี้

1. การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างเดิมคือ
 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มาก
 ที่สุด คือบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรู หรือตรงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างฉับพลันก็
 จำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มี
 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักก็อาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนบริเวณที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่เป็นการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างมากนักก็อาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนบริเวณที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักก็อาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยจำนวนเอลิเมนต์มากเกินไปจนความจำเป็นก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูง และอาจทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์มีความละเอียดในการคำนวณไม่เพียงพอ ส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์นั้น จะต้องคำนึงถึงรูปร่างของโครงสร้าง และการกระทำของโหลด รวมทั้งความละเอียดของผลเฉลยที่ผู้วิเคราะห์ต้องการก็อาจจะเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดมิติเดียว, สองมิติ, สามมิติ หรือเอลิเมนต์ชนิดแกนสมมาตร (axisymmetric element) รายละเอียดของเอลิเมนต์ชนิดต่างๆ จะกล่าวในบทต่อไป

2. การเลือกฟังก์ชันการกระจัด

จะต้องเลือกฟังก์ชันการกระจัดภายในเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันคือ พอลิโนเมียลฟังก์ชัน ซึ่งอาจเป็นพอลิโนเมียลกำลังหนึ่ง, กำลังสอง, กำลังสาม ส่วนฟังก์ชันที่เป็นอนุกรมทางเรขาคณิตก็สามารถเลือกใช้ได้แต่ไม่เป็นที่นิยม ทั้งนี้เพราะพอลิโนเมียลฟังก์ชันให้ความสะดวกในการวิเคราะห์มากกว่า ในกรณีของปัญหาสองมิติ ฟังก์ชันการกระจัดที่จุดต่อจะเขียนอยู่ในเทอมของพิกัดของระนาบ เช่น ระนาบ $x - y$ เป็นต้น ฟังก์ชันการกระจัดที่จะเลือกใช้จะต้องทำให้ผลเฉลยที่ความต่อเนื่องทั้งภายในเอลิเมนต์และแบบจำลองของระบบรวม

3. กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด/การกระจัดและความเค้น/ความเครียด

การหาสมการ ไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ จำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในกรณีของปัญหามิติเดียว รูป 3.2 การยืดตัวของเอลิเมนต์ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่น ทิศทาง x จะมีความสัมพันธ์กับความเครียด ϵ_x ในกรณีที่ ϵ_x มีค่าน้อย,

รูปที่ 3.2 ท่อนโลหะรับแรงตามแนวแกน

$\epsilon_x = du / dx$ และถ้าวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น, จากกฎของฮุก ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดคือ $\sigma_x = E\epsilon_x$ ซึ่ง σ_x คือความเค้นในทิศทาง x และ E คือค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น ผลเฉลยของการกระจัด, ความเค้น, ความเครียดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องแม่นยำเพียงใด ย่อขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาใช้ในการคำนวณ และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความเค้นกับความเครียดจะมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นหรือไม่เป็นสมการเชิงเส้น

4. หาสทึฟเนสเมทริกซ์และสมการของเอลิเมนต์

การหาสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์และสมการของแรงของแต่ละเอลิเมนต์สามารถหาได้หลายวิธี เช่น

4.1 วิธีสมดุลโดยตรง (direct equilibrium method)

วิธีสมดุลโดยตรงนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เราสามารถหาสทึฟเนสเมทริกซ์และสมการของแรงในเทอมการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ได้โดยใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงในเอลิเมนต์ ส่วนมากจะใช้หาสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์มิติเดียว เช่น เอลิเมนต์สปริง, ท่อนโลหะ, เพลลา, และคานเป็นต้น

4.2 วิธีงานหรือพลังงาน (work or energy method)

โดยอาศัยหลักของงานสมมุติ (principle of virtual work), หลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (principle of minimum potential energy) และทฤษฎีของแคสติกลีโย (Castigliano's theorem) ก็สามารถจะหาสมาการของเอลิเมนต์และหาสทึฟเนสของเอลิเมนต์สองและสามมิติได้โดยสะดวก สำหรับวิธีของงานสมมุตินั้นสามารถใช้หาสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุทุกชนิดและวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุดและทฤษฎีแคสติกลีโย ใช้หาสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามทั้งสามหลักการสามารถหาสทึฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นได้เหมือนกัน แต่ในหนังสือนี้จะเน้นการหาสทึฟเนสของเอลิเมนต์ โดยอาศัยหลักการพลังงานศักย์ต่ำสุด เพราะเป็นหลักการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างในช่วงยืดหยุ่น

4.3 วิธีเวทเรซิดิว (method of weighted residuals)

วิธีเวทเรซิดิวที่นิยมกันมากที่สุดคือวิธีของการเลอร์กิน (Galerkin's method) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับการหาสมาการของเอลิเมนต์ และให้ผลเช่นเดียวกับวิธีพลังงาน ส่วนมากมักจะนิยมใช้ในกรณีวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุดใช้ได้ไม่สะดวก เช่น ปัญหาการไหลของของเหลว การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนมวล (mass transport) เป็นต้น

โดยอาศัยวิธีใดวิธีหนึ่งจากสามวิธีดังกล่าวมาแล้ว เราจะได้สมการสมดุลของแรงในเทอมของสทึฟเนสเมทริกซ์ และการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์สมการดังกล่าว สามารถจะเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & \cdots & k_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\text{หรือ} \quad \{f\} = [K] \{d\} \quad (3.2)$$

ซึ่ง $\{f\}$ คือเมทริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ, $[K]$ คือสทึฟเนสของเอลิเมนต์ และ $\{d\}$ คือการกระทำที่จุดต่อซึ่งยังไม่ทราบค่า, n คือจำนวนของระดับความเสรีของเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 หาสมการการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบ

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถจะหาได้จาก การรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์ ในขั้นที่ 4 เข้าด้วยกัน ด้วยวิธีซ้อนทับ (superposition method) หรือเรียกว่าวิธีสทิฟเนสโดยตรง (direct stiffness method) โดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงที่จุดต่อเอลิเมนต์ และการต่อเนื่อง (continuity) ของโครงสร้าง สมการรวมของระบบโครงสร้างที่ได้รับ, เขียนในรูปของเมทริกซ์ได้คือ

$$\{F\} = [K] \{d\} \quad (3.3)$$

ซึ่ง $\{F\}$ คือเมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ, $[K]$ คือสทิฟเนสเมทริกซ์รวมของระบบ และ $\{d\}$ คือเมทริกซ์รวมของการกระจัดของระบบซึ่งอาจจะทราบค่าบางค่า และบางตัวอาจจะไม่ทราบค่า เนื่องจากเมทริกซ์ $[K]$ ในสมการ (3.3) เป็นเมทริกซ์เอกฐาน (singular matrix) ทั้งนี้เพราะตัวกำหนด (determinant) เท่ากับศูนย์ จึงไม่สามารถจะหาค่า $\{d\}$ โดยตรงจากสมการ (3.3) ได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบ (boundary conditions) หรือเงื่อนไขบังคับ (constraints) หรือจุดรองรับ (supports) เพื่อช่วยทำให้เมทริกซ์ $[K]$ ในสมการ (3.3) ไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐาน และสามารถหาค่าการกระจัดที่แต่ละจุดต่อที่ต้องการได้

6 หาการกระจัดของระบบ

หลังจากกำหนดเงื่อนไขขอบ หรือเงื่อนไขบังคับ ลงในสมการ (3.3) แล้วเราสามารถหาการกระจัด d_1, d_2, \dots, d_n ได้โดยการแก้สมการพีชคณิตพร้อมๆ กันคือ

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

การหาการกระจัด $\{d\}$ อาจจะใช้วิธีของเกาส์ (gauss's elimination method) หรือวิธีสมมุติ (iteration method) การกระจัด $\{d\}$ หรือการกระจัด $\{d\}$ อาจหาได้โดยการคูณสมการ (3.4) ด้วย $[K]^{-1}$ ตลอด ($[K]$ จะต้องไม่ใช่เมทริกซ์เอกฐาน)

7 การหาค่าความเครียดและความเค้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกล นอกจากต้องการทราบการกระจัดแล้วยังต้องการทราบค่าของความเครียด, ความเค้น หรือค่าของโมเมนต์ และแรงเฉือน ค่าต่างๆ เหล่านี้สามารถจะคำนวณหาได้โดยอาศัยพื้นฐานความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง อาทิเช่น ปัญหามิติเดียว ถ้าทราบค่าการกระจัด u ก็สามารหาค่าความเครียดจาก $\epsilon_n = du / dx$ และหาความเค้นจาก $\sigma_x = E\epsilon_x$ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นตอนที่ 3

8 การตีความผลลัพธ์

จากผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 6 และ 7 ก็สามารถจะทราบได้ว่าที่จุดต่อโคของเอลิเมนต์ หรือ บริเวณโคของ โครงสร้างหรือชิ้นส่วนที่จะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ เช่น บริเวณที่มีการกระจัดสูง หรือ บริเวณโคที่มีความสูง และเราสามารถจะลดขนาดของการกระจัด และ/หรือความเค้นนั้น ได้อย่างไร ทั้งนี้ จะต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะหรือมิติของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนให้เหมาะสมยิ่งขึ้นหรืออาจจะต้อง เลือกรูปวัสดุชนิดอื่นที่เหมาะสมกว่า

3.3 ความรู้พื้นฐานที่จำเป็น

การศึกษาการวิเคราะห์หรือการออกแบบ โครงสร้างและชิ้นส่วนต่างๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตาม ขั้นตอนในหัวข้อ 3.2 นั้น เราจะต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านต่างๆ หลายด้านจึงจะเข้าใจถึงหลักการและวิธีการ ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เป็นอย่างดี อาทิเช่น จะต้องมีความรู้ของด้านเมทริกซ์ รู้เทคนิคต่างๆ ที่จะ ในการแก้สมการพีชคณิตพร้อมๆ กันหลายสมการ รู้เทคนิคการหาค่าของเมทริกซ์ผกผัน เป็นต้น และจะต้องรู้ วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าโดยประมาณ จะต้องมีความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง, ทฤษฎีการ ยืดหยุ่น และหลักการของงาน, พลังงานศักย์ต่ำสุด และวิธีเวทเรซิดิว เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องมีพื้นฐานความรู้และ มีประสบการณ์การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์อีกด้วย ในภาคผนวกของหนังสือจะกล่าวโดยสรุปเกี่ยวกับ ทฤษฎีการ ยืดหยุ่น, วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขสำหรับหลักการของงาน, พลังงานศักย์ต่ำสุดและวิธีเวทเรซิดิว จะกล่าวในบท ต่อไปนี้ ส่วนพื้นฐานความรู้อื่น เราสามารถจะพบทวนได้จากหนังสือที่เกี่ยวข้องทั่วไป

3.4 การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เราสามารถจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ที่เป็นโครงสร้าง และที่ไม่ใช่โครงสร้าง ได้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น ปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้างจะประกอบด้วย การวิเคราะห์ ความเค้น ซึ่งรวมทั้งการวิเคราะห์โครงข้อหมุน, โครงข้อแข็ง, ความเข้มของความเค้นตรงบริเวณที่เป็นรู เป็น รอยบาก หรือตรงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่าง นอกจากนี้ยังใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การ โกงของเสา, การล้าตัว (fatigue) และการสั่นสะเทือนของระบบ โครงสร้างและระบบเครื่องจักรกลด้วย

ส่วนใหญ่อันไม่ใช่โครงสร้างเช่น การถ่ายเทความร้อน, การไหลของของเหลว รวมทั้งการซึมผ่านวัสดุ พรุณ และการต่างศักย์ของแม่เหล็กไฟฟ้า ก็สามารถจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังนิยมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านชีววิศวกรรมภาค เช่น วิเคราะห์การทำงานของ หัวใจ, ตา, ข้อต่อต่างๆ ของร่างกาย เป็นต้น

3.5 ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เราจะเห็นว่าสามารถจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง จึงเป็นที่นิยม ใช้กันทั่วไปในงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อเทียบกับวิธีธรรมดาที่มีดังนี้คือ

1. สามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้าง หรือชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี และสะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สามารถจำลองการกระทำของโพลในสภาพต่างๆ เช่น โพลที่กระจายไม่สม่ำเสมอได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง
 3. ใช้วิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนระบบเครื่องจักรกลที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยไม่มี ความยุ่งยาก
 4. สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหา ไม่ว่าจะเงื่อนไขขอบ, เงื่อนไขบังคับ, และจุดรองรับจะอยู่ในลักษณะใด
 5. สามารถเลือกขนาดของเอลิเมนต์ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ตามความจำเป็น
 6. ในการออกแบบชิ้นส่วนหรือระบบสามารถจะเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ได้สะดวก และยังสามารถประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายด้วย
 7. ในการออกแบบและการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสมัยใหม่ (CAD และ CAM) มักนิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ก่อน ก่อนที่จะผลิตชิ้นส่วนจริงซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและมีความถูกต้องแม่นยำสูง
 8. ในกรณีของวัสดุประเภทยืดหยุ่นตัวไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) หรือการยืดหยุ่นของวัสดุอยู่ในช่วงพลาสติก ก็ยังสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์สิ่งที่ต้องการได้สะดวก เช่น ใช้วิเคราะห์การล้าตัว และ creep ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เป็นต้น
- อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์โครงสร้างหรือระบบเครื่องจักรกลก็มีข้อพึงระวังอยู่บ้าง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.6 ข้อควรระวังของการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลเฉลยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต่อน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับสามประการหลักคือ ประการแรก การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างลักษณะจริงของชิ้นงานได้มากน้อยเพียงใด ประการที่สอง การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ และประการสุดท้ายคือ ความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าต่างๆ ของเครื่องคอมพิวเตอร์

การกำหนดหรือแบ่งเอลิเมนต์ย่อยๆ ให้สอดคล้องกับรูปร่างลักษณะจริงของชิ้นงานได้มากเท่าไร ก็ยิ่งทำให้ผลเฉลยถูกต้องแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น

ส่วนการได้มาของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ อาจจะไม่ต้องสอดคล้องกับการยืดตัวอย่างต่อเนื่องของวัตถุ เช่น ถ้าเลือกใช้อิเล็กเมนต์ที่มีการยึดตัวเชิงเส้น อิเล็กเมนต์ชนิดนี้จะให้ค่าแม่นยำตรง ถ้าปัญหาเป็นแบบท่อนโลหะที่รับแรงดึงแรงอัด แต่ถ้าท่อนโลหะเดียวกันรับแรงกระจายเนื่องจากมวล การกระจัดที่เกิดขึ้นภายในท่อนโลหะจะเป็นแบบสมการกำลังสอง และถ้ายังคงใช้อิเล็กเมนต์เชิงเส้นตรงก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นในผลลัพธ์ ดังนั้นการเลือกเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา และการเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยได้

ส่วนความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขในการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และวิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลข นั้น จะขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ การใช้ความแม่นยำระดับสอง (double precision) และขนาดของ bandwidth ที่เล็กที่สุดจะสามารถช่วยลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวได้ และถ้าเลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีมาตรฐานระดับสูง ความคลาดเคลื่อนเชิง

ตัวเลขในการคำนวณจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนจากการเลือกใช้ชนิด และขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาตรฐานทั่วไป เช่น Abaqus ข้อมูลที่จะต้องให้กับคอมพิวเตอร์ก็คือ ตำแหน่งหรือพิกัดของจุดต่อต่างๆ ของเอลิเมนต์ ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ คุณสมบัติทางกลของวัสดุของแต่ละเอลิเมนต์ ลักษณะของโหนดที่กระทำ ลักษณะของเงื่อนไขขอบหรือเงื่อนไขบังคับ และต้องระบุชนิดของการวิเคราะห์ด้วย เช่น ความเค้นระนาบหรือความเค้นระนาบเป็นต้น เครื่องคอมพิวเตอร์จะใช้ข้อมูลเหล่านั้นคำนวณสิ่งต่างๆ ที่ต้องการ

3.7 หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

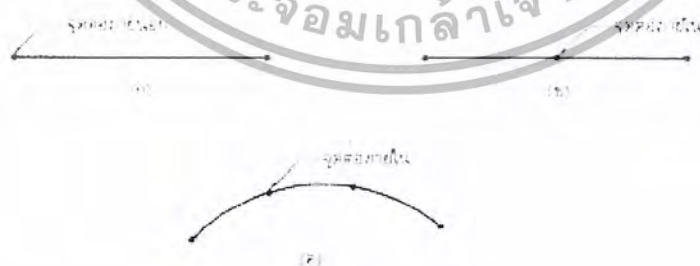
3.7.1 ชนิดของเอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องแบ่งโครงสร้างหรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนตัวๆ และเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงานและการกระทำของโหนด ชนิดของเอลิเมนต์อาจจะแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามมิติคือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ

1 เอลิเมนต์มิติเดียว

เอลิเมนต์มิติเดียวเป็นเอลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน การนำความร้อนในทิศทางเดียวกัน

รูป 3.3 (ก) คือเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านของแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งเรียกว่าจุดต่อภายนอก ส่วนรูปที่ 3.3 (ข) เป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยสามจุดต่อคือจุดต่อภายนอกสองจุดต่อ และจุดต่อภายในหนึ่งจุดต่อ และรูป 3.3 (ค) คือเอลิเมนต์มิติเดียวที่เป็นเส้นโค้งประกอบด้วยสี่จุดต่อ คือสองจุดต่อภายนอก และสองจุดต่อภายในซึ่ง

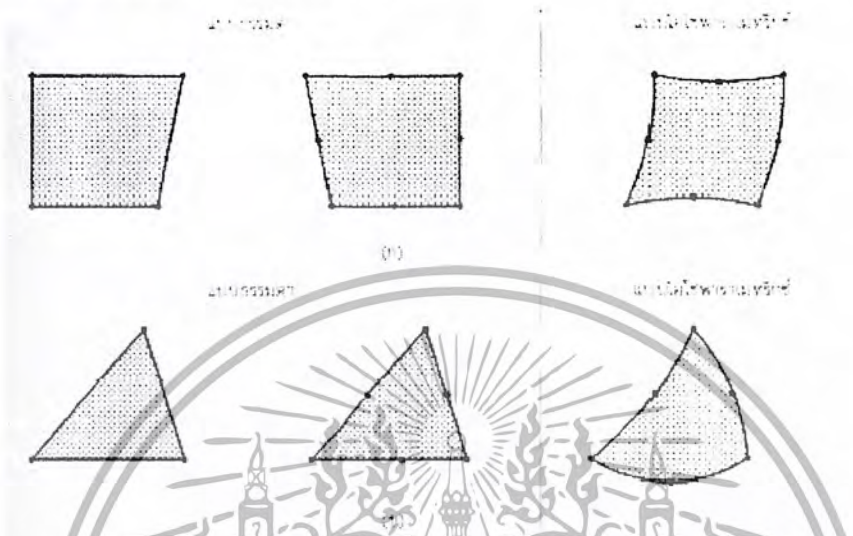


รูปที่ 3.3 เอลิเมนต์มิติเดียว

เหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างหรือชิ้นงานที่มีการยึดตัวไม่เป็นเส้นตรง เช่น กายึดตัวของท่อนโลหะ อันเนื่องจากมวลของท่อนโลหะเอง เป็นต้น

2 เอลิเมนต์สองมิติ

เอลิเมนต์สองมิติมักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้น – ความเครียดระนาบ โดยทั่วไปเอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง เช่น รูปในรูป 3.4 (ก) เป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยสี่จุดต่อและ 8 จุด

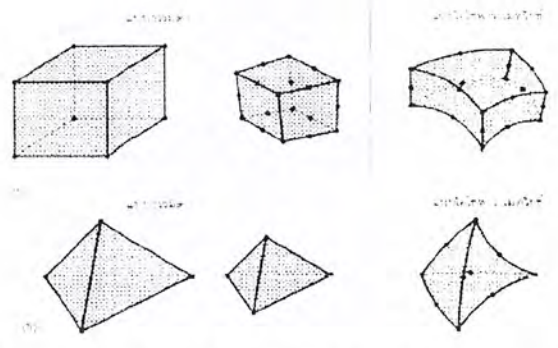


รูปที่ 3.4 เอลิเมนต์สองมิติ (ก) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม

ต่อชนิดด้านตรงและด้านโค้งแบบไอโซพารามเทริกซ์ ส่วนรูป 3.4 (ข) เป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อ และ 6 จุดต่อด้านตรงและด้านโค้งแบบไอโซพารามเทริกซ์ โดยทั่วไปเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะได้รับความนิยมมากกว่าเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ทั้งนี้เพราะในกรณีที่ระดับชั้นความเครียดเท่ากับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ส่วนจะเลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านตรงหรือด้านโค้งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานจริง และโดยทั่วไปจะสมมุติให้ความหนาของเอลิเมนต์มีค่าคงตัว แต่อาจจะกำหนดให้ความหนาเป็นฟังก์ชันกับพิกัดก็ได้

3 เอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์สามมิติจะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติต่างๆ ไป ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึมและรูปกรวยสามเหลี่ยม เช่นในรูป 3.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

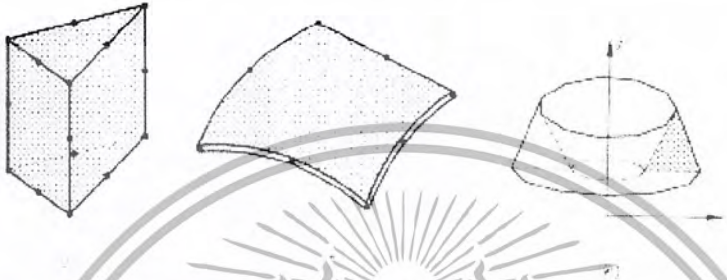


รูปที่ 3.5 เอลิเมนต์สามมิติ (ก) ชนิดปริซึมหรือชนิดทรงหกหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ข) ชนิดกรวยสามเหลี่ยม หรือชนิดทรงสี่หน้า อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

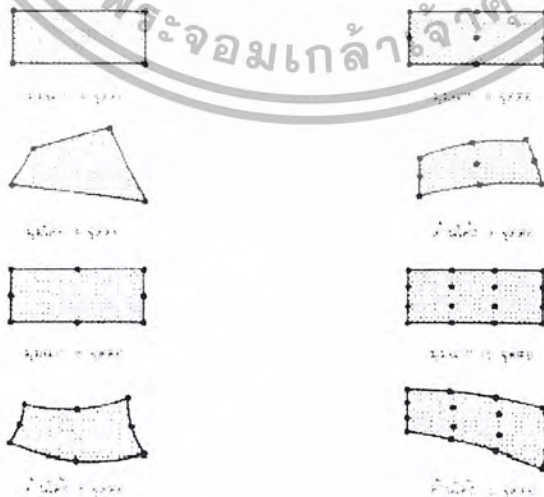
รูป 3.5 (ก) เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรง 6 หน้า (hexahedron) ชนิดด้านตรง (linear) 8 จุดต่อ, ชนิดเส้นตรงกำลังสอง (straight-line quadratic) 20 จุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง (quadratic with curved faces) 20 จุดต่อ ส่วนรูป 3.5 (ข) เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรง 4 หน้า (tetrahedra) ชนิดด้านตรง 4 จุดต่อ ชนิดเส้นตรงกำลังสอง 10 จุดต่อ, และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง 10 จุดต่อตามลำดับ

นอกจากเอลิเมนต์สามมิติตามที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเอลิเมนต์อีกกลุ่มหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะรูปทรงกระบอก เช่นในรูป 3.5 (ก) ปัญหาในลักษณะแผ่นโค้ง



รูปที่ 3.6 (ก) เอลิเมนต์ทรงกระบอก (ข) เอลิเมนต์แผ่นโลหะ โค้งสองมิติ (ค) เอลิเมนต์กรวยสมมาตรสองมิติ

(shell) เช่นในรูป 3.6 (ข) และเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหากรวยสมมาตร ซึ่งอาจจะเป็นเอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมหมุนรอบแกนสมมาตร (360°) เช่นรูป 3.6 (ค) โดยทั่วไปเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจำนวนจุดต่อมาก ๆ จะให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับค่าแม่นยำมากกว่าเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจำนวนจุดต่อน้อย แต่จะเพิ่มความยุ่งยากในการแก้สมการและใช้เวลาในการคำนวณมาก ตัวอย่างเช่น เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติ รูป 3.7 ประกอบด้วยจุดต่อ 4 จะให้ผลเฉลยคลาดเคลื่อนมากกว่าเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วย 8 และ 16 จุดต่อเป็นต้น



รูปที่ 3.7 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติที่ประกอบด้วยจุดต่อต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์

การวิเคราะห์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาปัญหาสองมิติโดยเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านตรงที่ประกอบสามจุดต่อ เช่นในรูป 3.8 (ก) ส่วนปัญหาสามมิติก็ใช้หลักการเดียวกัน

การแบ่งชิ้นส่วนอาจจะเริ่มแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ๆ ก่อนแล้วจึงแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยอีกครั้งหนึ่ง ตำแหน่งของจุดต่อ (node) ภายนอกของเอลิเมนต์ย่อยควรจะอยู่ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วน หรือตำแหน่งที่มีโหลดกระทำหรือตำแหน่งที่มีการใช้วัสดุต่างกัน ตำแหน่งจุดต่อเหล่านั้นดูได้จากรูป 3.8



รูปที่ 3.8 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของจุดต่อที่สำคัญ

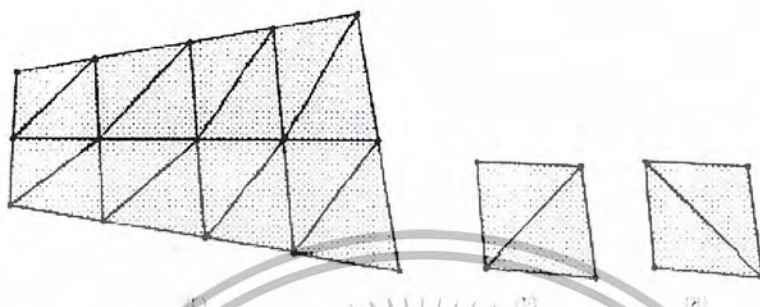
ชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมในรูป 3.8 (ก) ก่อนข้างจะแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยได้ง่าย คือ กำหนดจุดต่อในแต่ละด้านของสามเหลี่ยมให้มีจำนวนเท่ากัน ลากเส้นโยงระหว่างจุดต่อจะได้จุดต่อตรงที่เส้นตัดกันเพิ่มขึ้น ตามรูป 3.8 (ก) ชิ้นส่วนจะถูกแบ่งออกเป็น 9 เอลิเมนต์ แต่ละด้านจะมีสี่จุดต่อ ระยะระหว่างจุดต่อของแต่ละด้านของสามเหลี่ยมไม่จำเป็นต้องเท่ากัน ขนาดของเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์จึงมีขนาดแตกต่างกันตามที่ต้องการ ถ้าเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้วยกัน เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านเท่าจะให้ผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมใดๆ มุมภายในของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมควรจะอยู่ระหว่าง 30° ถึง 120°

ในกรณีของชิ้นส่วนเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านโค้ง เราอาจใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านตรงแทน เช่นในรูป 3.8 (ข) ซึ่งทำให้ขนาดของแบบจำลองที่สอดคล้องกันเล็กน้อยตามเส้นไปจุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์ด้านโค้ง อย่างไรก็ตามถ้าต้องการความแม่นยำสูง อาจใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านโค้งแทนได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดในชิ้นส่วนจะเท่ากับ $(n-1)^2$, n คือจำนวนจุดต่อของแต่ละด้านของชิ้นส่วนสามเหลี่ยมที่ต้องการจะแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อย

สำหรับชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยมในรูป 3.9 (ก) การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยๆ นั้น ทำได้สะดวกคือ กำหนดจุดต่อในแต่ละด้านของสี่เหลี่ยม ลากเส้นระหว่างจุดต่อที่อยู่ตรงข้าม, จุด

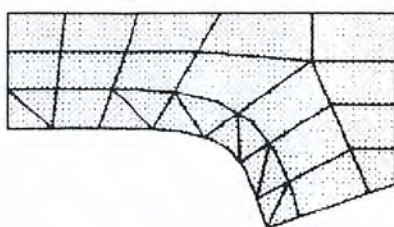


รูปที่ 3.9 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

ตัดของแต่ละเส้นจะเป็นจุดต่อภายในของชิ้นส่วน และถ้าประสงค์จะแบ่งเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยก็ทำได้ โดยลากเส้นทแยงมุมของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม การลากเส้นทแยงมุมนั้นควรจะต้องเลือกเส้นทแยงมุมที่สั้นที่สุด เพราะจะทำให้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมมีสัดส่วนใกล้เคียงสามเหลี่ยมด้านเท่ามากขึ้น ดูตัวอย่างในรูป 3.9 (ข) และ (ค) ในกรณีที่เลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม สัดส่วนด้านยาวสุดต่อด้านสั้นสุดของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมควรจะทำกับ 1 จึงจะทำให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับค่าแม่นยำมากขึ้น

จำนวนจุดต่อบนด้านที่ใกล้เคียงกันของชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมอาจจะแตกต่างกันแต่จำนวนจุดต่อที่ด้านตรงข้ามจะต้องมีจำนวนเท่ากัน เว้นแต่ต้องการลดหรือขยายขนาดของเอลิเมนต์ระยะระหว่างจุดต่ออาจจะแตกต่างซึ่งทำให้เอลิเมนต์มีขนาดเล็กใหญ่ตามต้องการจำนวนจุดต่อบนด้านประกอบมุมของชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมที่ต้องการแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย

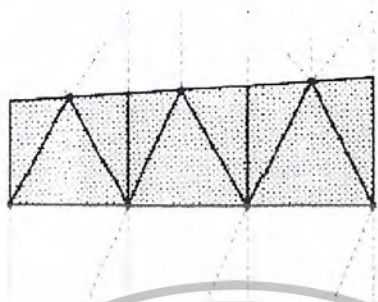
ในรูป 3.9 ระยะระหว่างจุดต่อของชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมจะมีขนาดต่างกัน ทั้งนี้เพื่อให้เอลิเมนต์ในบริเวณที่เป็นส่วนโค้งมีขนาดเล็ก คือ พยายามทำให้แบบจำลองมี



รูปที่ 3.10 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมโค้งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

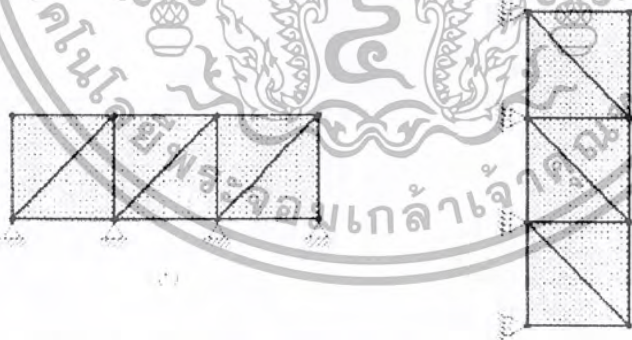
ขนาดใกล้เคียงกับขนาดของชิ้นส่วนจริงมากที่สุด ปกติไม่นิยมแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดเท่ากัน และมีรูปร่างเหมือนกันตลอดชิ้นส่วน เพราะบริเวณที่มีความเค้นสูงหรือบริเวณที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ ควรจะแบ่งให้มีเอลิเมนต์ขนาดเล็กๆ ส่วนบริเวณที่ไกลออกไปจะแบ่ง



รูปที่ 3.11 การขยายขนาดของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

ให้มีขนาดโตขึ้น การเปลี่ยนขนาดของเอลิเมนต์จะมีประโยชน์มากสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน วิธีที่ง่ายที่สุดของการเปลี่ยนแปลงขนาดของเอลิเมนต์คือ กำหนดให้อาณาจุดต่อบนด้านตรงข้ามของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมให้แตกต่างกันเช่นในรูป 3.11 เป็นต้น

การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง จำเป็นต้องกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของจุดต่อต่างๆ ด้วย โดยทั่วไปจุดต่อที่ไม่มีมีการเคลื่อนที่จะแทนด้วยการยึดแบบสลัก (pin connection) เช่นในรูป 3.12 (ก) แต่ถ้าจุดต่อเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวจะแทนด้วย



รูปที่ 3.12 การยึดจุดต่อ (ก) ยึดแบบสลัก (ข) ยึดแบบล้อหมุน

การยึดแบบล้อหมุน รูป 3.12 (ข) ซึ่งชิ้นส่วนสามารถจะเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้ แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวระดับ ส่วนการที่จะกำหนดให้จุดต่อเคลื่อนที่อย่างไรนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา ซึ่งจะเห็นได้จากบทต่อไป

ปัญหาบางปัญหาไม่สามารถจะกำหนดเงื่อนไขขอบได้โดยง่าย เช่นการถ่ายเทความร้อน การหมุนตัวของดิน อย่างไรก็ตามวิศวกรได้พยายามจำลองปัญหาดังกล่าว เพื่อคำนวณหาค่าต่างๆ ที่ต้องการให้สอดคล้องกับธรรมชาติของปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

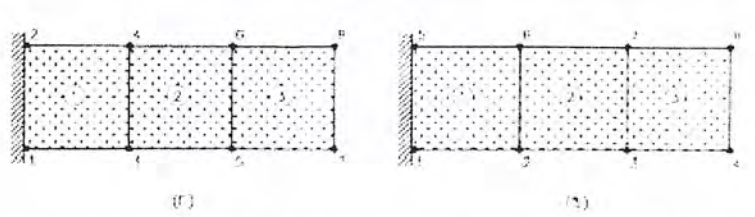
3.9 การกำหนดจุดต่อและความกว้างแถบ

โดยทั่วไปการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนของระบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบด้วยสมการเชิงพีชคณิตเป็นจำนวนมาก จำนวนสมการดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดตำแหน่งจุดต่อของเอลิเมนต์ สัมประสิทธิ์ของสมการจะเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ เช่น สทิตเนสมเมทริกซ์เป็นต้นสัมประสิทธิ์บางตัวจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อความรวดเร็วในการคำนวณและประหยัดพื้นที่เก็บข้อมูลของคอมพิวเตอร์ เราจะจัดให้สัมประสิทธิ์ของสมการอยู่ในรูปของเมทริกซ์ เช่นในรูป 3.13 คือความกว้างแถบจะเท่ากับ $2HB - 1$ ซึ่ง HB คือครึ่งความกว้างแถบ (half bandwidth) ในช่วง HB ค่าสัมประสิทธิ์จะไม่เท่ากับศูนย์ แต่อาจมีบางตัวเท่ากับศูนย์ปนอยู่ด้วย ส่วนช่วงนอกครึ่งความกว้างแถบค่าสัมประสิทธิ์จะเท่ากับศูนย์ทุกตัว สัมประสิทธิ์ช่วงนอก HB นี้ไม่จำเป็นต้องเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ ถ้าให้ขนาดของเมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์คือ $N \times N$ ส่วนที่จำเป็นต้องเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณก็คือเมทริกซ์ขนาด $N \times HB$ เท่านั้น ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปสทิตเนสมเมทริกซ์เป็นเมทริกซ์สมมาตร ซึ่งทำให้ประหยัดเวลาใน



รูปที่ 3.13 ความกว้างแถบของระบบที่มี $HB=8$

การคำนวณและประหยัดพื้นที่เก็บข้อมูลและยังสามารถจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดความจำเล็กลงได้ด้วยความกว้างครึ่งแถบ HB ดังกล่าวสามารถจะคำนวณได้จาก $HB = (R + 1) NDOF$, ซึ่ง R = จำนวนที่แตกต่างกันสูงสุดของจุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ และ NDOF คือระดับชั้นความเสรีของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ เราจะใช้พื้นที่เก็บข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์น้อยสุด ถ้าสามารถหาค่าน้อยสุดของ HB ได้ ซึ่งในระบบที่ซับซ้อนการหาค่าต่ำสุดของ HB ทำได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามสำหรับระบบต่างๆ ไป เราสามารถหาค่า HB น้อยสุดได้ เช่น ระบบของคานาในรูป 3.14 ที่ประกอบด้วย 3 เอลิเมนต์ การกำหนดจุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ดูได้จากรูป 3.14 (ก) และ 3.14 (ข) ถ้าให้แต่ละจุดต่อประกอบด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.14 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานาที่ประกอบด้วย 3 เอลิเมนต์จุดต่อ ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

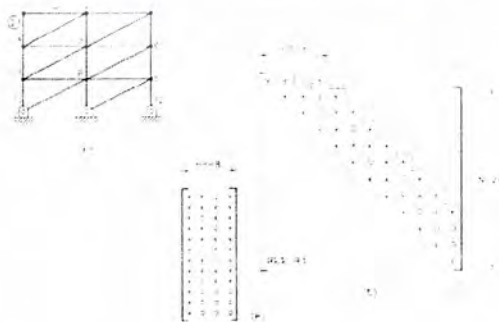
สองพิกัดเช่นพิกัด x, y หรือ NDOF = 2, สำหรับรูป 3.14 (ก) $R = 4 - 1 = 3$ ดังนั้นครึ่งความกว้างแถบ $HB = 8$ และหนึ่งเอลิเมนต์จะประกอบ 4 จุดต่อ หรือ 8 ระดับชั้นความเสรี ฉะนั้นขนาดของสัมประสิทธิ์เมทริกซ์หรือสทิฟเนสเมทริกซ์จะมิตขนาด 8×8 แต่เนื่องจากคานประกอบด้วยสามเอลิเมนต์ย่อย นั่นคือสทิฟเนสเมทริกซ์ของระบบคานจะมีขนาด 16×16

สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูป 3.14 (ข) การกำหนดจุดต่อจะต่างจากรูป 3.14 (ก) ซึ่ง $R = 6 - 1 = 5$ และ NDOF = 2 ดังนั้น $HB = 12$ รูป 3.15 ประกอบคือจะมีสัมประสิทธิ์หรือสทิฟเนสที่เท่ากับศูนย์เพิ่มขึ้นในช่วงของ HB อีก 4 แถว และ 4

รูปที่ 3.15 ความกว้างแถบของคานในรูป 2.12 (ข) ($HB=12$)

คอลัมน์ จากสทิฟเนสเมทริกซ์ในรูป 3.14 (ก) การคำนวณค่าต่างๆ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำมากขึ้น ถ้าเปรียบเทียบขนาดความกว้างครึ่งแถบของแบบจำลองไฟไนต์ทั้งสอง ในรูป 3.14 (ก) และ 3.15 (ข) จะเห็นว่าถ้าจัดอันดับการกำหนดตำแหน่งของจุดต่อให้ดี จะสามารถลดพื้นที่เก็บข้อมูลได้เกือบ 30 เปอร์เซ็นต์

สกายไลน์ (skyline) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้กำหนดความกว้างครึ่งแถบของสทิฟเนสเมทริกซ์ กรอบของสกายไลน์จะเริ่มจากสัมประสิทธิ์ตัวแรกที่ไม่เท่ากับศูนย์ของแต่ละคอลัมน์ของสทิฟเนสเมทริกซ์ ตามวิธีสกายไลน์สัมประสิทธิ์ระหว่างเทอมเส้นทะแยงมุมและแนวสกายไลน์เท่านั้นที่จะเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ รูป 3.16 ประกอบ



รูปที่ 3.16 (ก) โครงข้อหมุนประกอบด้วย 12 จุดต่อ (ข) สกายไลน์เมทริกซ์ของโครงข้อหมุน

(ค) ความกว้างแถบที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.17 (ก) จุดต่อของเอลิเมนต์ 2 คือ 1 และ 4 แต่ละจุดต่อประกอบด้วย 2 ระดับชั้นความเสรี ส่วนในรูป 3.17 (ข) คือสทิฟเนสเทริกซ์รวมของระบบ, x คือสทิฟเนสเทอมที่ไม่เท่ากับศูนย์ สทิฟเนสเมทริกซ์ที่จะใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณก็คือ ความกว้างแถบตามแนวสกายไลน์ ซึ่งมีขนาด 8×24 จากรูป 3.17 (ค) ประกอบ

3.10 ฟังก์ชันการกระจัด

ตามที่กล่าวมาแล้ว การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะต้องแบ่งชิ้นส่วนหรือโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย และจะต้องสมมุติฟังก์ชันการกระจัดโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์ ที่จะประกอบเข้าด้วยกันเป็น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนรวมการกระจัด โดยประมาณที่สมมุติขึ้นเรียกว่า ฟังก์ชันการกระจัด (displacement functions) หรือแบบจำลองการกระจัด (displacement models) หรือสนามการกระจัด (displacement fields) หรือรูปแบบการกระจัด (displacement patterns)

ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันทั่วไป จะเป็นฟังก์ชันพอลิโนเมียล ในกรณีของปัญหามิติเดียว ฟังก์ชันพอลิโนเมียลคือ

$$u(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n+1}x^n \quad (3.5)$$

ซึ่ง $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{n+1}$ คือสัมประสิทธิ์ของพอลิโนเมียล, ส่วน u คือการกระจัดในทิศทาง x

ในกรณีของปัญหาสองมิติ ฟังก์ชันพอลิโนเมียลจะเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x,y) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + \dots + a_n \\ v(x,y) &= a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}x^2 + a_{m+5}xy + a_{m+6}y^2 + \dots + a_{2m} \end{aligned} \quad (3.6)$$

ซึ่ง u และ v คือการกระจัดในทิศทาง x และ y ตามลำดับ, a คือสัมประสิทธิ์ของพอลิโนเมียล และ

$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i$$

ส่วนในกรณีของปัญหาสามมิติ ฟังก์ชันพอลิโนเมียลคือ

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5zx + \dots + a_mz^n \\ v(x, y, z) &= a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}z + a_{m+5}zx + \dots + a_{2m}z^n \\ w(x, y, z) &= a_{2m+1} + a_{2m+2}x + a_{2m+3}y + a_{2m+4}z + a_{2m+5}zx + \dots + a_{3m}z^n \end{aligned} \quad (3.7)$$

ซึ่ง u, v และ w คือส่วนประกอบของการกระจัดในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ และ

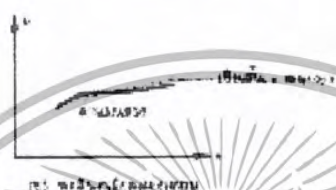
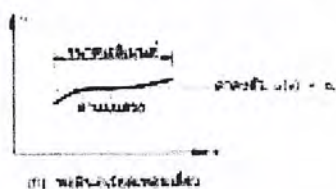
$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i(n+2-i)$$

พอลิโนเมียลที่มีหลายเทอมหรือกำลังสูงๆ จะให้การกระจัดที่สมมุติขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรง แต่การแก้สมการค่อนข้างทำได้ยาก อย่างไรก็ตามการที่จะเลือกใช้ฟังก์ชันพอลิโนเมียลกำลังเท่าใดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา และความละเอียดของผลเฉลยที่ต้องการ เช่น ในกรณีของปัญหามิติเดียว ฟังก์ชันพอลิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอเมียมกำลังสอง (3 เทอม) จะให้ผลเฉลยดีกว่าฟังก์ชันพอลิโนเมียลเทอมเดียวและสองเทอม ดูรูป 3.17 ประกอบ

การจำลองเอลิเมนต์ด้วยการกระจัด อาจแบ่งออกตามกำลังของพอลิโนเมียล ได้สามกลุ่ม คือ กลุ่มเชิงเดียว (simplex) กลุ่มเชิงซ้อน (complex) และกลุ่มเชิงซับซ้อน (multiplex)



รูปที่ 3.17 การสมมติฟังก์ชันการกระจัดสำหรับปัญหามิติเดียว

3.10.1 ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงเดียว

ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงเดียว จะประกอบด้วยพอลิโนเมียลเทอมที่มีค่าคงตัวและเทอมที่เป็นเส้นตรง ส่วนสัมประสิทธิ์ของพอลิโนเมียลจะเท่ากับระดับขั้นความเร็วของระบบ ในกรณีของปัญหามิติเดียว เช่น ท่อนโลหะ, เพลลา, โครงข้อหมุน, โครงข้อแข็ง เป็นต้น เอลิเมนต์เชิงเดียวของปัญหาเหล่านี้จะประกอบด้วยสองจุดต่อภายนอก ซึ่งสามารถจะแทนได้ด้วยพอลิโนเมียลสองเทอมคือ เทอมที่เป็นค่าคงตัวและเทอมที่เป็นเชิงเส้นตรงคือ

$$u(x) = a_1 + a_2x \quad (3.8)$$

ในกรณีของปัญหาสามมิติ เช่น ปัญหาความเค้นระนาบ, ความเครียดระนาบ และปัญหาวงแหวนแกนสมมาตร (axisymmetric) เอลิเมนต์เชิงเดียวของปัญหาเหล่านี้จะเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยสามจุดต่อที่มุมของสามเหลี่ยม รูป 2.2(ข) แต่ละจุดต่อจะประกอบด้วยการกระจัด u และ v ดังนั้นพอลิโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์เชิงเดียวสามเหลี่ยมจะประกอบด้วย 6 ระดับขั้นความเร็ว

$$\begin{aligned} u(x,y) &= a_1 + a_2x + a_3y \\ v(x,y) &= a_4 + a_5x + a_6y \end{aligned} \quad (3.9)$$

สำหรับกรณีของปัญหาสามมิติ เอลิเมนต์เชิงเดียวก็คือ เอลิเมนต์ชนิดกรวยสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยสี่จุดต่อ

ภายนอก รูป 2.3(ข) แต่ละจุดต่อจะประกอบด้วยการกระจัด u , v และ w ในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นหนึ่งเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงเดียวจึงประกอบด้วย 12 ระดับชั้นความเร็ว และฟังก์ชันพอลิโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์ดังกล่าวก็คือ

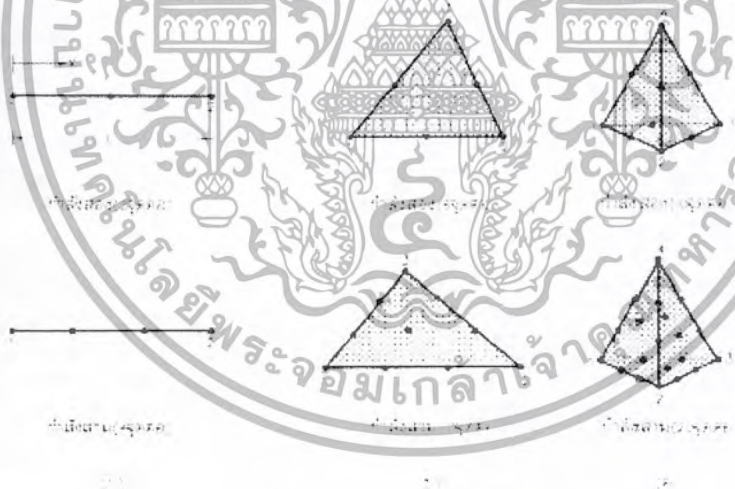
$$\begin{aligned}u(x,y,z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\v(x,y,z) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \\w(x,y,z) &= a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z\end{aligned}\quad (3.10)$$

ซึ่งแต่ละฟังก์ชันจะประกอบด้วยเทอมที่เป็นค่าคงที่ และเทอมที่เป็นเชิงเส้นตรง

3.10.2 ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อน

ฟังก์ชันการกระจัดของเอลิเมนต์เชิงซ้อน จะประกอบด้วยพอลิโนเมียลที่มีค่าคงตัว เทอมเชิงเส้น เทอมกำลัง กำลังสาม และเทอมที่มีกำลังสูงกว่านั้นเท่าที่จำเป็น (ขึ้นอยู่กับระดับชั้นความเร็วของเอลิเมนต์และชนิดของเอลิเมนต์) รูปร่างและชนิดของเอลิเมนต์เชิงซ้อนอาจจะเหมือนกับเอลิเมนต์เชิงเดียว แต่จะมีจุดต่อภายในเพิ่มขึ้น ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างเอลิเมนต์เชิงเดียวและเชิงซ้อนก็คือ จำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์เชิงซ้อนจะมากกว่ามิติของเอลิเมนต์อย่างน้อย 1 จุดต่อ

ในกรณีปัญหามิติเดียว เอลิเมนต์เชิงซ้อนจะเป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อภายในอย่างน้อย 1 จุดต่อ เช่นรูป 3.18 (ก) จะมีจุดต่อภายในเพิ่มขึ้นอีก 1 จุดหรือ 2 จุด



รูปที่ 3.18 เอลิเมนต์เชิงซ้อน (ก) เอลิเมนต์มิติเดียว (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิติ (ค) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมกรวย 3 มิติ

ดังนั้นฟังก์ชันพอลิโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อนกำลังสอง (3 จุดต่อ) ในรูป 2.17 (ก) คือ

$$u(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 \quad (3.11)$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ประกอบด้วย 3 ระดับชั้นความเร็ว สำหรับปัญหาสองมิติเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงซ้อนกำลังสองและกำลังสาม ดูได้จากรูป 3.18 (ข) และฟังก์ชันพอลิโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงซ้อนกำลังสองคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}u(x,y) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \\v(x,y) &= a_7 + a_8x + a_9y + a_{10}x^2 + a_{11}xy + a_{12}y^2\end{aligned}\quad (3.12)$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ประกอบด้วย 12 ระดับชั้นความเร็ว ส่วนรูป 2.17 (ค) เป็นเอลิเมนต์เชิงซ้อนสามเหลี่ยมกรวยกำลังสอง และกำลังสาม ที่ประกอบด้วย 10 จุดต่อ และ 20 จุดต่อตามลำดับ ส่วนฟังก์ชันพอลิโนเมียลของเอลิเมนต์ทั้งสองเขียนได้ในทำนองเดียวกันกับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงซ้อนสองมิติ

3.10.3 ฟังก์ชันการกระจายสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อน

ฟังก์ชันการกระจายของเอลิเมนต์เชิงซ้อน (multiplex) จะประกอบด้วยพอลิโนเมียลที่มีกำลังสูง เช่นเดียวกับฟังก์ชันการกระจายของเอลิเมนต์เชิงซ้อน ในหัวข้อ 3.10.3 แต่ของของเอลิเมนต์จะต้องขนานกับแกนของพิกตรวมของระบบ ทั้งนี้เพื่อให้การกระจายระหว่างขอบของเอลิเมนต์มีความต่อเนื่องกัน ตัวอย่างที่ดีของเอลิเมนต์เชิงซ้อนก็คือเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมมุมฉากในรูป 2.18 (ก) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมในกรณีพิเศษที่ประกอบด้วย 4 จุดต่อภายนอก 8 ระดับชั้นความเร็ว



รูปที่ 3.19 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติ (ก) เอลิเมนต์เชิงเส้น (ข) เอลิเมนต์กำลังสอง (ค) เอลิเมนต์กำลังสาม

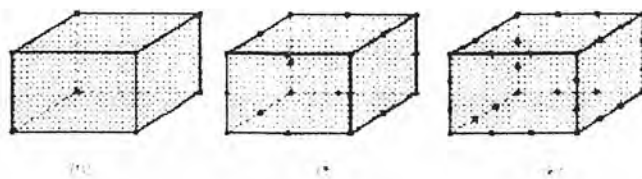
ฟังก์ชันพอลิโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงซ้อนเชิงเส้นคือ

$$\begin{aligned}u(x,y) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \\v(x,y) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy\end{aligned}\quad (3.13)$$

เหตุที่เลือกพอลิโนเมียลเทอม xy แทนที่จะเลือกเทอม x^2 หรือ y^2 ก็เพราะว่าเทอม xy จะทำให้การกระจายในด้านที่ x หรือ y มีค่าคงที่ แปรตามเชิงเส้น

สำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงซ้อนกำลังสองและกำลังสามในรูป 2.18 (ข) และ (ค) สามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันพอลิโนเมียลที่ประกอบด้วย 8 เทอมที่เป็นฟังก์ชันกับ u , 8 เทอมที่เป็นฟังก์ชันกับ v และ 12 เทอมของ u , 12 เทอมของ v ตามลำดับ

ส่วนเอลิเมนต์เชิงซ้อนที่ใช้กับปัญหาสามมิติจะเป็นชนิดปริซึมในลักษณะเชิงเส้น 8 จุดต่อ, กำลังสอง 20 จุดต่อและกำลังสาม 32 จุดต่อ ตามรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.20 เอลิเมนต์ชนิดปริซึม (ก) เอลิเมนต์เชิงเส้น (ข) เอลิเมนต์กำลังสอง (ค) เอลิเมนต์กำลังสาม

ตามที่กล่าวมาแล้ว การเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีกำลังสูง เช่น เอลิเมนต์กำลังสอง, กำลังสาม จะทำให้ผลการวิเคราะห์แม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่คาดว่าจะมีความเข้มของความเค้นสูง การกระจายของความเค้นจะไม่คงที่ จึงจำเป็นต้องเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีกำลังสูงตรงบริเวณดังกล่าว เพื่อลดความยุ่งยากของการอินทิเกรตเชิงตัวเลขและลดเวลาในการอินทิเกรต เราอาจจะใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบผสมระหว่างเอลิเมนต์เชิงเดียวเป็นส่วนใหญ่และเอลิเมนต์เชิงซ้อนหรือเอลิเมนต์เชิงซับซ้อนตรงบริเวณที่จำเป็น

3.11 การนำไปสู่ผลเฉลยแม่นยำตรง

การวิเคราะห์ปัญหาเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเพียงใดนั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการสมมุติฟังก์ชันการกระจัด หรือแบบจำลองการกระจัดของเอลิเมนต์โดยทั่วไปผลเฉลยที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้ค่าการกระจัดน้อยกว่าค่าแม่นยำและเพื่อให้มีความมั่นใจว่า ถ้าเราแบ่งโครงสร้างหรือชิ้นส่วนจริงออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ มากขึ้นแล้ว ผลของการวิเคราะห์จะต้องเข้าใกล้หรือนำไปสู่ (converge) ผลเฉลยแม่นยำตรง, การสมมุติฟังก์ชันการกระจัดในหัวข้อ 3.1 จึงควรมีข้อกำหนดหรือควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ฟังก์ชันการกระจัดจะต้องเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องภายในเอลิเมนต์และการกระจัดระหว่างขอบเอลิเมนต์หรือระหว่างจุดต่อของเอลิเมนต์ที่ติดกันจะต้องมีค่าเท่ากัน ซึ่งฟังก์ชันพอลิโนเมียลจะเป็นฟังก์ชันที่ให้ค่าต่อเนื่องภายในเอลิเมนต์ตามที่ต้องการ สำหรับความหมายของส่วนที่สองก็คือ การกระจัดของเอลิเมนต์ที่อยู่ติดกันจะต้องไม่มีช่องว่างหรือซ้อนกัน หรือการกระจัดระหว่างเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่องกัน

2. ฟังก์ชันการกระจัดจะต้องมีเทอมที่ให้ค่าการกระจัดของวัตถุเกร็ง (rigid body displacement) ของเอลิเมนต์อยู่ด้วย การกระจัดของวัตถุเกร็งจะเป็นการกระจัดในลักษณะการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรง (translation) หรือการหมุน (rotation) ก็ได้ ในกรณีของปัญหามิติเดียวและฟังก์ชันการกระจัดเขียนอยู่ในรูปของพอลิโนเมียล เช่นสมการ (3.8) เทอมที่ให้ค่าการกระจัดของวัตถุเกร็งก็คือ a_1 เป็นต้น

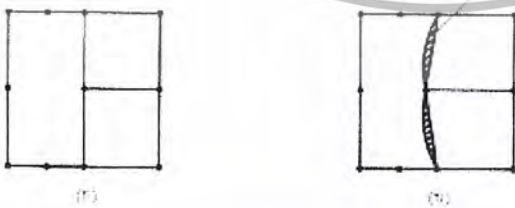
3. ฟังก์ชันการกระจัด จะต้องมีเทอมที่ให้ค่าความเครียดคงที่ (constant strain states) ของเอลิเมนต์อยู่ด้วย ทั้งนี้เพราะว่าถ้าเราแบ่งชิ้นส่วนหรือโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์เล็กมากๆ ค่าของความเครียดจะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ และในกรณีของปัญหาสองมิติ ถ้าสมมุติให้ฟังก์ชันการกระจัดเป็นฟังก์ชันพอลิโนเมียลตามสมการ (3.9) เทอมที่จะให้ค่าความเครียด ϵ_x , ϵ_y คงที่ก็คือ เทอมที่มีสัมประสิทธิ์เป็น a_2 และ a_6 ตามลำดับ

ในกรณีที่ฟังก์ชันการกระจัดของเอลิเมนต์เป็นไปตามข้อกำหนด 1 เราจะเรียกว่าเอลิเมนต์ที่เข้ากันได้ หรือเอลิเมนต์ที่ลงรอยกัน (compatible or conforming elements) ส่วนฟังก์ชันการกระจัดของเอลิเมนต์ที่เป็นไปตามข้อกำหนด 2 และ 3 เราจะเรียกว่า เอลิเมนต์บริบูรณ์ (complete)

3.12 ข้อแนะนำสำหรับการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจำเป็นต้องกำหนดแบบจำลองให้เหมือนกับรูปร่างลักษณะเดิมของปัญหาให้มากที่สุด อย่างไรก็ตามข้อเสนอนี้จะช่วยให้การกำหนดแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงขึ้นหรือให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับค่าแม่นยำ หรือทำให้เชื่อมั่นได้ว่าผลการคำนวณมีความเป็นไปได้ตามสภาพการใช้งานจริงของชิ้นส่วนนั้น (ในกรณีที่ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำมาเปรียบเทียบได้) ข้อเสนอแนะดังกล่าวคือ

1. ในกรณีที่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างกัน ความแตกต่างของขนาด (โดยปริมาตร) ของเอลิเมนต์ที่ติดต่อกันไม่ควรเกินสามเท่า
2. พยายามใช้เอลิเมนต์ที่มีรูปร่างหรือสัดส่วนของรูปร่างธรรมดาๆ ให้มากที่สุดคือพยายามทำให้สัดส่วนของรูปร่างเอลิเมนต์ ด้านยาวสุดต่อด้านสั้นสุด ไม่เกิน 10 : 1 เอลิเมนต์ที่มีสัดส่วนดังกล่าวใกล้เคียงกัน จะให้ผลเฉลยแม่นยำขึ้น ส่วนมุมภายในเอลิเมนต์ เช่นกรณีของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม มุมไม่ควรเกิน 150° และไม่ควรน้อยกว่า 30° และจุดต่อภายในของด้านของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม (ในกรณีที่จำเป็นต้องกำหนดจุดต่อภายใน) ควรอยู่ในตำแหน่งที่ไม่น้อยกว่า $1/3$ ของด้านของสี่เหลี่ยม
3. การเลือกใช้เอลิเมนต์ต้องพยายามให้มีการต่อเนื่องของการกระจัดระหว่างเอลิเมนต์ อาทิเช่น ไม่ควรเชื่อมต่อเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมกำลังสองซึ่งประกอบด้วย 8 จุดต่อ เข้ากับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วย 4 จุดต่อ 2 เอลิเมนต์ ตามรูป 2.21 (ก) เพราะขณะยึด/หัดตัวจะเกิดช่องว่างระหว่างเอลิเมนต์ขึ้น เช่น รูป 3.21 (ข) ทั้งนี้เพราะการกระจัดของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมกำลังสองและเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงเส้น, จำลองมาจากฟังก์ชันการกระจัดที่มีกำลังต่างกัน



รูปที่ 3.21 การประกอบเอลิเมนต์ที่มต่อเนื่อง (ก) ก่อนการยึดตัว
(ข) ขณะยึดตัวหรือหัดตัวจะเกิดช่องว่างขึ้น

4. ใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กๆ ครอบคลุมบริเวณที่มีความแตกต่างของความเค้นสูง เช่น ครอบคลุมที่คาดว่าความเค้นจะมีความเข้มข้น ส่วนบริเวณที่มีความแตกต่างของความเค้นต่ำ ควรใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การกำหนดหมายเลขจุดต่อของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ต้องพยายามให้ความกว้างแถบหรือครึ่งความกว้างแถบมีค่าน้อยสุด
6. พยายามใช้ประโยชน์จากการสมมาตรของรูปร่างโครงสร้างหรือชิ้นส่วนและการสมมาตรของโหลด เพื่อให้ได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กที่สุด
7. การกำหนดเงื่อนไขขอบและหรือเงื่อนไขบังคับของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะต้องคำนึงถึงสภาพความเป็นจริงของปัญหา

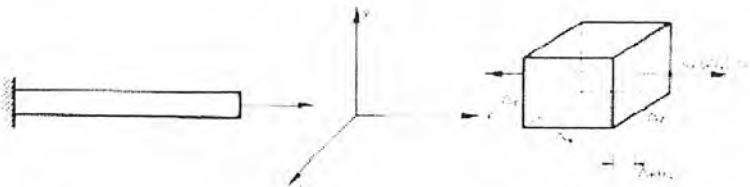
3.13 หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด

การหาสทิพเนสมทริกซ์ของเอลิเมนต์หรือสทิพเนสมทริกซ์ของระบบรวม จะใช้วิธีสมดุโดยตรงกับปัญหาทั่วๆ ไป เช่น ปัญหาของทอนโลหะของเพลและของกาน ส่วนปัญหาที่ซับซ้อนจำเป็นจะต้องอาศัยหลักของงานหรือพลังงาน เช่น ใช้หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด หลักการของงานสมมุติ และวิธีการกาลีเรจิน เป็นต้น สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด เพื่อจะได้นำไปประยุกต์ใช้หาสทิพเนสมทริกซ์ของเอลิเมนต์ที่ซับซ้อน ในปัญหาต่างๆ เช่น ความเค้น – ความเครียดระนาบ, การโก่งของแผ่นโลหะและปัญหาสามมิติในกลศาสตร์ของแข็ง เป็นต้น

เนื่องจากหลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุดนั้น จะใช้หาสทิพเนสมทริกซ์ได้เฉพาะปัญหาของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุดนั้น กล่าวว่า “ถ้าการกระจัดของระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขการต่อเนื่อง (continuity) และเงื่อนไขขอบ (boundary) ของระบบ และระบบอยู่ในสภาพสมดุเสถียร (stable equilibrium) แล้ว พลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นย่อมมีค่าน้อยที่สุด” เนื่องจากพลังงานศักย์รวม Π ของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นก็คือ ผลรวมของพลังงานความเครียด U และพลังงานศักย์จากแรงภายนอกหรืองานจากแรงภายนอก W นั่นคือ

$$\Pi = U + W \quad (3.14)$$

ในกรณีของแท่งโลหะซึ่งมีโหลดกระทำทิศทางเดียว เช่น ทิศทาง x ตามรูป 3.22 พลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นที่ทอนโลหะก็คือ งานที่เกิดจากแรงภายในที่ทำให้ทอนโลหะเปลี่ยนรูปร่าง ถ้าให้ σ_x คือความเค้นในทิศทาง x ที่เกิดขึ้นในทอนโลหะ ดังนั้นแรงภายในจะเท่ากับ



รูปที่ 3.22 ทอนโลหะภายใต้การกระทำของโหลดในทิศทาง x

$\sigma_x (\Delta y)(\Delta x)$ และทำให้เกิดการกระจัดในด้าน x เท่ากับ $\Delta x(\epsilon_x)$ และการกระจัดที่ด้าน $x + dx$ จะเท่ากับ

$\Delta x(\epsilon_x + d\epsilon_x)$ ฉะนั้นการกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือ $\Delta x d\epsilon_x$ ซึ่ง $d\epsilon_x$ คือการเปลี่ยนแปลงของความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นในส่วนของความยาว Δx ดังนั้นงานเนื่องจากแรงภายในหรือพลังงานความเครียด dU ก็คือผลคูณของแรงภายในและการกระจัดที่เกิดขึ้นนั้นคือ

$$dU = \sigma_x(\Delta y)(\Delta z)(\Delta x)d\epsilon_x \quad (3.15)$$

ให้ $(\Delta y)(\Delta z)(\Delta x) = dV =$ ปริมาตรที่มีค่าน้อย และพลังงานความเครียดรวมตลอดความยาวของท่อนโลหะคือ

$$U = \int_V \left[\int_0^{\epsilon_x} \sigma_x d\epsilon_x \right] dV \quad (3.16)$$

สำหรับวัสดุที่เป็นไปตามกฎของฮุก, $\sigma_x = E\epsilon_x$ ดังนั้น

$$U = \int_V \left[\int_0^{\epsilon_x} E\epsilon_x d\epsilon_x \right] dV = \frac{1}{2} \int_V (E\epsilon_x^2) dV = \frac{1}{2} \int_V \sigma_x \epsilon_x dV \quad (3.17)$$

สมการ (3.17) คือสมการของพลังงานความเครียดของปัญหามิติเดียว ส่วนพลังงานศักย์จากแรงภายนอก จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกับงานภายนอกทั้งนี้เพราะพลังงานศักย์จากแรงภายนอกก็คือ งานที่สูญเสียไปจากแรงภายนอกซึ่งเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$W = - \int_V X_b u dV - \int_S T_x u dS - \sum_{i=1}^M f_{ix} d_{ix} \quad (3.18)$$

X_b ในเทอมแรกของสมการ (3.18) คือแรงเนื่องจากมวลของท่อนโลหะ ซึ่งมีหน่วยเป็นแรงต่อปริมาตร, T_x ในเทอมที่สองคือ โหลดที่ผิวหรือแรงตึงผิว มีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่ และ f_{ix} คือแรงกระทำที่จุดต่อที่ปลาย (ดูรูป 3.23) ในทิศทาง x , u คือการกระจัดในทิศทาง x ส่วน V คือ ปริมาตรของท่อนโลหะ และ S คือพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับโหลด T_x , และ d_{ix} คือการกระจัดที่จุดต่อที่แรง f_{ix} กระทำ



รูปที่ 3.23 แรงกระทำบนท่อนโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.16) และ (3.18) พลังงานศักย์รวม Π คือ

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \sigma_x \epsilon_x dV - \int_V X_b u dV - \int_S T_x u dS - \sum_{i=1}^M f_{ix} d_{ix} \quad (3.19)$$

เพื่อที่จะหาค่าพลังงานศักย์รวมต่ำสุด เราจะให้อนุพันธ์ย่อยของพลังงานศักย์รวม Π เทียบกับ d_{ix} มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\frac{\partial \Pi}{\partial d_{ix}} = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.20)$$

ซึ่งสมการ (2.16) จะประกอบด้วย n สมการ ในเทอมของค่า d_i ซึ่งเป็นตัวกำหนดการสมดุลย์สถิตของท่อนโลหะหรือโครงสร้าง การประยุกต์ใช้หลักของพลังงานศักย์รวมต่ำสุดกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจะหาสมการสมดุลของไฟไนต์เอลิเมนต์ และหาค่าสทิพเนสสมพริกซ์ของระบบดูได้จากบทที่ 3, 4 และ 5 เป็นต้น

3.14 วิธีของกาเลอร์กิน

วิธีของกาเลอร์กินเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้หาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะนิยมใช้หาสมการของระบบที่ไม่ใช่โครงสร้าง เช่น ระบบการถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหล เป็นต้น วิธีของกาเลอร์กินนั้นจะใช้เวทเรชชีควที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันโดยประมาณของตัวแปรอิสระ เช่น การกระจัดหรืออุณหภูมิ คุณเข้ากับสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบ โดยทิ้งไปฟังก์ชันโดยประมาณจะไม่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์จึงทำให้มีเรชชีคว R หรือเศษเหลือขึ้น ตัวอย่างเช่น ถ้าให้สมการของระบบ

$$[R]v = \text{ค่าน้อยสุด} \quad (3.21)$$

หลักการของวิธีก็คือ ทำอย่างไรจะให้เศษเหลือมีค่าน้อยสุด เช่น ถ้าสมมติให้เวทฟังก์ชัน W ทำให้เศษเหลือเท่ากับศูนย์ สมการต่างๆ ไปของเวทเรชชีควก็คือ

$$\int_V RW dv = 0 \quad (3.22)$$

ในกรณีของกาเลอร์กินนั้น เราจะให้เวทเรชชีควเป็นฟังก์ชันประมาณภายใน (interpolation functions) หรือฟังก์ชันรูปร่าง (shape functions) ของเอลิเมนต์ เช่น ค่า N_i เป็นฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์ ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระของสมการเชิงอนุพันธ์ (โดยทิ้งไปถ้าแทน N_i ลงในสมการแล้ว เรชชีคว R จะไม่เท่ากับศูนย์) ดังนั้นสมการ (3.22) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\int_V RN_i dv = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.16) และ (3.18) พลังงานศักย์รวม II คือ

$$II = \frac{1}{2} \int_V \sigma_x \epsilon_x dV - \int_V X_b u dV - \int_S T_x u dS - \sum_{i=1}^M f_{ix} d_{ix} \quad (3.19)$$

เพื่อที่จะหาค่าพลังงานศักย์รวมต่ำสุด เราจะให้อนุพันธ์ย่อยของพลังงานศักย์รวม II เทียบกับ d_{ix} มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\frac{\partial II}{\partial d_{ix}} = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.20)$$

ซึ่งสมการ (2.16) จะประกอบด้วย n สมการ ในเทอมของค่า d_i ซึ่งเป็นตัวกำหนดการสมมูลยืดหยุ่นของท่อนโลหะหรือโครงสร้าง การประยุกต์ใช้หลักของพลังงานศักย์รวมต่ำสุดกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจะหาสมการสมมูลของไฟไนต์เอลิเมนต์ และหาค่าสถิติพหุสมการของระบบคู่ได้จากบทที่ 3, 4 และ 5 เป็นต้น

3.14 วิธีของกาเลอร์คิน

วิธีของกาเลอร์คินเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้หาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะนิยมใช้หาสมการของระบบที่ไม่ใช่โครงสร้าง เช่น ระบบการถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหล เป็นต้น วิธีของกาเลอร์คินนั้นจะใช้เวทเรชคิวที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นฟังก์ชันโดยประมาณของตัวแปรอิสระ เช่น การกระจัดหรืออุณหภูมิ คุณสมบัติสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบ โดยทั่วไปฟังก์ชันโดยประมาณจะไม่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์จึงทำให้มีเรชคิว R หรือเศษเหลือขึ้น ตัวอย่างเช่น ถ้าให้สมการของระบบ

$$\int R dv = \text{ค่าน้อยสุด} \quad (3.21)$$

หลักการของวิธีก็คือ ทำอย่างไรจะให้เศษเหลือมีค่าน้อยสุด เช่น ถ้าสมมติให้เวทฟังก์ชัน W ทำให้เศษเหลือเท่ากับศูนย์ สมการต่างๆ ไปของเวทเรชคิวก็คือ

$$\int R W dv = 0 \quad (3.22)$$

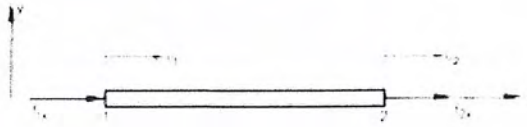
ในกรณีของกาเลอร์คินนั้น เราจะให้เวทเรชคิวเป็นฟังก์ชันประมาณภายใน (interpolation functions) หรือฟังก์ชันรูปร่าง (shape functions) ของเอลิเมนต์ เช่น ค่า N_i เป็นฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์ ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระของสมการเชิงอนุพันธ์ (โดยทั่วไปถ้าแทน N_i ลงในสมการแล้ว เรชคิว R จะไม่เท่ากับศูนย์) ดังนั้นสมการ (3.22) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\int R N_i dv = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.19) จะประกอบด้วย n สมการ โดยที่ไม่ต้องระบุหรือกำหนดเงื่อนไขขอบ แต่หลังจากอินทิเกรตสมการ (3.23) จะต้องระบุเงื่อนไขขอบตามลักษณะของปัญหา

ในกรณีของท่อนโลหะรับแรงตามแนวแกน x , เช่น f_{1x} , f_{2x} และ u_1 , u_2 คือการกระจัดในทิศทาง x ที่จุดต่อ 1 และ 2 ค่าวัสดุเป็นไปตามกฎของฮุก, $\sigma_x = E\varepsilon_x$ และ



รูปที่ 3.24 ท่อนโลหะรับแรงตามแนวแกน

เพราะว่า $\varepsilon_x = du/dx$ ดังนั้น $\sigma_x = E du/dx$ ถ้าคำนึงถึงในสภาพสมดุลผลรวมของแรงภายในจะเท่ากับค่าคงที่หรือ $A\sigma_x = \text{ค่าคงที่}$ ดังนั้น

$$\frac{d}{dx}(A\sigma_x) = 0 \quad (3.24)$$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อนโลหะ สมการเชิงอนุพันธ์ของท่อนโลหะในรูป 2.23 คือ

$$\frac{d}{dx}\left(AE \frac{du}{dx}\right) = 0 \quad (3.25)$$

ถ้าพิจารณาสมการ (3.21), (3.22) และสมการ (3.25) จะเห็นว่า

$$R = \frac{d}{dx}\left(AE \frac{du}{dx}\right)$$

ดังนั้นสมการกาเลอร์คิน (2.19) ของท่อนโลหะเขียนได้ดังนี้

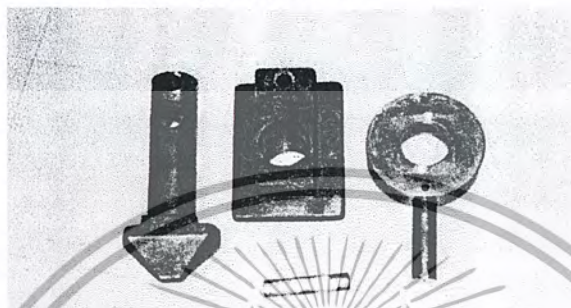
$$\int_0^L \frac{d}{dx}\left(AE \frac{du}{dx}\right) N_1 dx = 0 \quad (3.26)$$

บทที่ 4

ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดสอบชิ้นงานจำลอง

4.1 ลักษณะการทำงานของสเปคเตอร์

สเปคเตอร์ คือ สลักชนิดหนึ่ง มีหน้าที่ยกตู้คอนเทนเนอร์โดยจะอยู่ในร่องสลักทั้ง 4 มุมของตู้คอนเทนเนอร์ ตัวสลักทั้ง 4 จะทำหน้าที่รับน้ำหนักของตู้คอนเทนเนอร์



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะและชิ้นส่วนของสเปคเตอร์

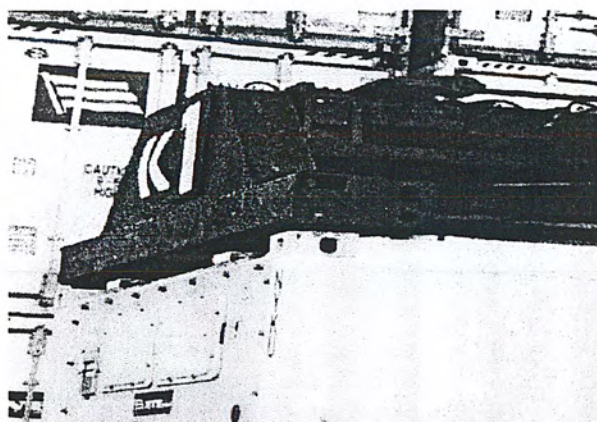


รูปที่ 4.2 แสดงรูสลักที่ตู้คอนเทนเนอร์



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งสเปคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

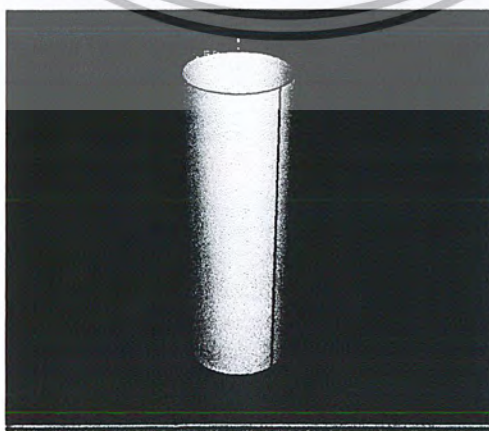


รูปที่ 4.4 แสดงการทำงานของสเปคโตรัมยัคคูคอนเทนเนอร์

4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.2.1 การสร้างชิ้นงาน (Part)

หลังจากที่ทำการวัดขนาดของชิ้นงานจริงแล้วก็ทำการสร้างชิ้นงานขึ้นในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวสเปคโตรัมและสลักของสเปคโตรัม สำหรับสลักของสเปคโตรัมนั้นจะกำหนดเป็น Rigid body



รูป 4.5 แสดงสลักตัวสเปคโตรัมและตัวสเปคโตรัมในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material)

ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดคุณสมบัติให้กับสเปเดอร์ โดยการกำหนดค่า Young's modulus และค่า Poisson's ratio ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะกำหนดให้สเปเดอร์ทำจากเหล็กที่ต่างชนิดกัน

Data		
Click mouse button 3 for table options.		
	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	200000	0.3

รูป 4.6 แสดงคุณสมบัติของวัสดุใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.2.3 การประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกัน (Assembly)

จากขั้นตอนนี้จะทำการสร้างชิ้นงานออกเป็น 2 ส่วน ในขั้นตอนนี้จะทำการนำชิ้นส่วนทั้งสองนี้มาวางอยู่ใน Global coordinates



รูป 4.7 แสดงสเปเดอร์ก่อนการประกอบและหลังการประกอบใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การกำหนดขั้นตอนของการวิเคราะห์ (Analysis Steps)

ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการสร้างการวิเคราะห์เริ่มต้น (Initial step) มาให้โดยอัตโนมัติ หลังจากนั้นจะทำการสร้าง Contact step และ Load step และในขั้นตอนนี้จะเป็นการเลือกผลลัพธ์ที่จะแสดงออกมา

Name	Procedure	Nonlinear	Time
Initial	(Initial)	N/A	N/A
contact	Static, General	OFF	1
Load	Static, General	OFF	1

รูป 4.8 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

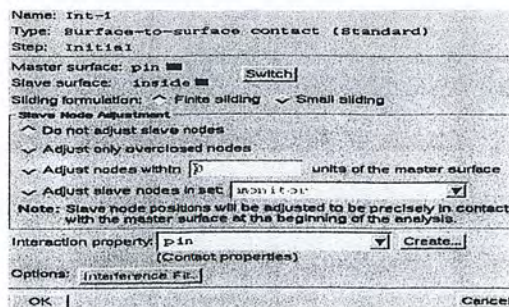
4.2.5 การกำหนดพื้นผิวและจุดสัมผัส (Contact interactions)

ขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดจุดสัมผัสและพื้นผิวที่เกิดขึ้นในสเปเดอร์ ซึ่งกำหนดดังนี้

1. กำหนดพื้นผิวให้กับสลักของสเปเดอร์ โดยพื้นผิวที่กำหนดให้นั้นเป็นพื้นผิวภายนอก
2. กำหนดพื้นผิวให้กับสเปเดอร์ โดยพื้นผิวที่กำหนดให้นั้นเป็นพื้นผิวภายใน
3. กำหนดจุดสัมผัสระหว่างสเปเดอร์และสลักของสเปเดอร์



รูป 4.9 แสดงการกำหนดพื้นผิวให้กับสลักของสเปเดอร์

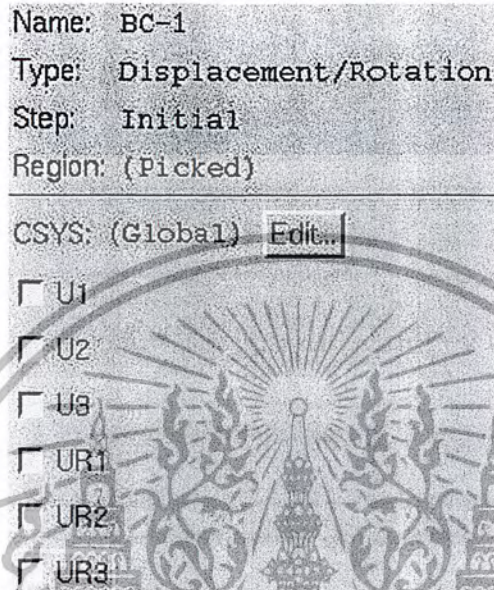


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูป 4.10 แสดงการกำหนดจุดสัมผัสระหว่างสเปเดอร์และสลักของสเปเดอร์ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

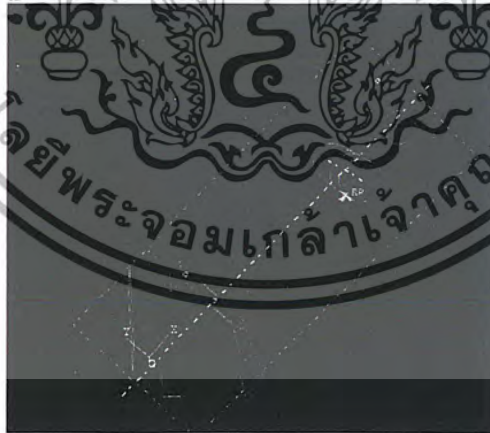
4.2.6 การกำหนดสภาวะขอบและภาระให้กับชิ้นงาน (Load)

1. กำหนดสภาวะขอบ

ในสภาวะการทำงานจริงสเปคเตอร์จะถูกยึดและเกิดการหมุนได้น้อยมาก ดังนั้นการวิเคราะห์จึงสมมติให้สเปคเตอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงและไม่สามารถหมุนได้



รูป 4.11 แสดงการกำหนดสภาวะขอบ

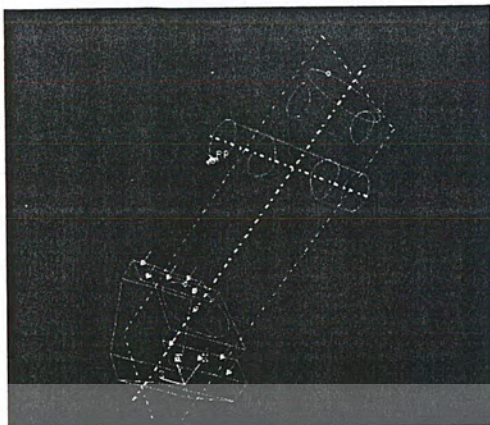


รูป 4.12 แสดงสภาวะขอบของสเปคเตอร์ใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

2. การกำหนดภาระ

เป็นการกำหนดแรง (ต่อหน่วยพื้นที่) ให้กับพื้นที่หน้าตัดที่ไปสัมผัสและเป็นแบบ
Uniform

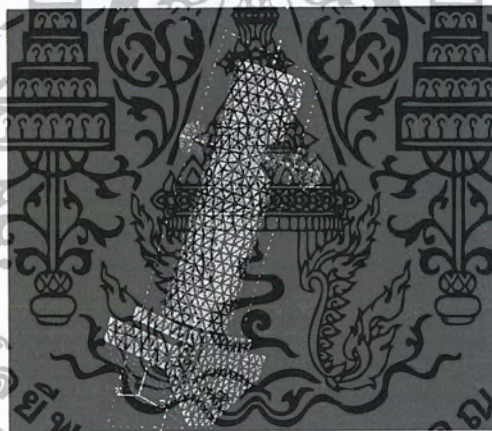
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.13 แสดงภาวะของสเปเคอร์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.2.7 การสร้าง Mesh ให้กับสเปเคอร์

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้าง Mesh ให้กับสเปเคอร์และเลือกอิเลเมนต์เป็นแบบสามเหลี่ยม



รูป 4.14 แสดงสเปเคอร์เมื่อสร้าง Mesh

4.2.8 การนำข้อมูลไปประมวลผล

หลังจากที่ได้ทำตามขั้นตอนข้างต้นแล้วโปรแกรมจะทำการประมวลผลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์

4.2.9 การบันทึกค่าความเค้นและความเครียด

เมื่อโปรแกรมประมวลผลเสร็จเรียบร้อยแล้วสามารถเลือกดูผลลัพธ์ได้และบันทึกค่าเพื่อนำไปคำนวณหาอายุการใช้งาน

4.2.10 การคำนวณอายุการใช้งานโดยใช้โปรแกรม Matlab

สมการที่ใช้คำนวณอายุความล้า(สมการ 2.132)เป็นสมการแบบ Non-linear การคำนวณจึงเลือก

วิธีการของนิวตันรพกลับ และเพื่อความสะดวกจึงใช้โปรแกรม Matlab ช่วยในการคำนวณ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเพื่อความสะดวกจึงใช้โปรแกรม Matlab ช่วยในการคำนวณ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองดึงชิ้นงานจำลอง

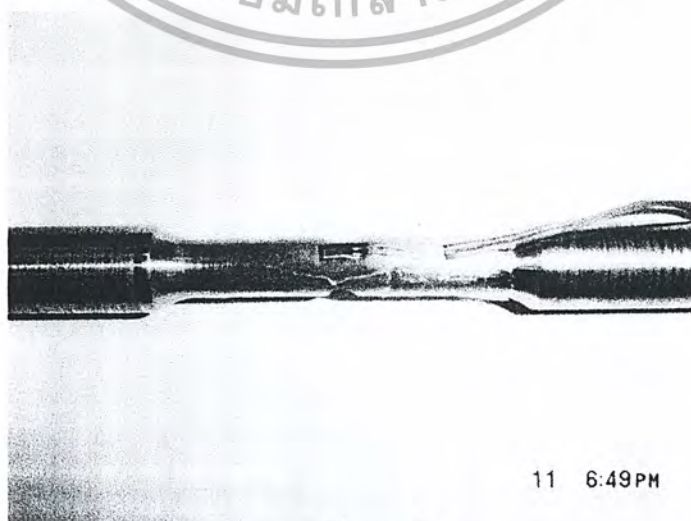
เราได้ทำการทดลองดึงชิ้นงานจำลองเพื่อดูแนวโน้มของการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจำลองและที่เกิดขึ้นจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันหรือไม่ โดยที่การทดลองทั้งสองแบบได้มีการเจาะรูที่ชิ้นงานเพื่อปรับปรุงกระจายความเค้นด้วย

4.4 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการกลึงออกมาเป็นตัว SPECIMEN โดยทำการกลึงชิ้นงานด้วยกันกรณีละ 2 ชิ้น ซึ่งแบ่งเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. ทำการเจาะรูบนตัวชิ้นงานเพียง 1 รู
2. ทำการเจาะรูบนตัวชิ้นงาน 2 รูในแนวขนานกัน
3. ทำการเจาะรูบนตัวชิ้นงาน 2 รูในแนวไขว้กันทำมุม 90 องศา

ทำการติด STRAIN GAUGE เพื่อวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานขณะรับแรงดึง โดยติด STRAIN GAUGE ที่บริเวณขอบของรูทูลู เพื่อนำค่าความเครียดที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความเค้นต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **รูปที่ 4.15 แสดงชิ้นงานที่นำมาทดสอบ** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 วิธีการทดสอบ

1. นำชิ้นงานที่ทำกรติดตั้ง STRAIN GAUGE เรียบร้อยแล้วไปติดตั้งที่เครื่องทดสอบโดยใช้ปากจับจับยึดชิ้นงานไว้กับเครื่อง
2. กำหนดให้เครื่องทำการดึงชิ้นงานทดสอบ โดยกำหนดให้การดึงวัสดุอยู่ในช่วงที่ไม่เกินจุด YIELD ของวัสดุ
3. ขณะทดสอบให้ใช้เครื่อง STRAIN INDICATOR วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นแล้วบันทึกค่าไว้แยกเป็นแต่ละกรณีไป
4. ทำการทดสอบและบันทึกผลจนแล้วเสร็จทุกกรณี



รูปที่ 4.16 แสดงเครื่องมือที่ใช้ทำการทดสอบ

4.6 ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่าค่าความเค้นที่มากที่สุดอยู่ที่กรณีเจาะเพียงรูเดียว รองลงมาคือเจาะสองรูขนานกัน และน้อยที่สุดอยู่ที่เจาะสองรูทำมุมไขว้กัน 90 องศา ซึ่งแสดงว่าการเจาะรูมีผลต่อการกระจายความเค้นจริง

4.7 สรุปผลการทดสอบ

การเจาะรูบนตัวชิ้นงานช่วยในการกระจายความเค้นได้จริง และการเจาะรูไขว้กันช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการกระจายความเค้นได้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 5

ผลจากการวิเคราะห์

5.1 ผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.1.1 กรณีเจาะรูแนวเดียวกับสลักวัสดุ ASM 1040

ความเค้นรวมที่เกิดขึ้นกับสเปเดอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	212.3
13	210.0
16	201.5
19	212.7
22	202.7
25	221.6

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	201.0
13	213.6
16	216.5
19	213.5
22	215.8
25	208.1

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	214.9
13	213.7
16	217.1
19	213.7
22	214.9
25	215.0

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	215.7
13	204.2
16	206.7
19	209.7
22	218.1
25	211.5

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	215.8
13	203.4
16	202.9
19	212.4
22	204.5
25	210.4

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	211.5
13	214.7
16	202.4
19	210.8
22	203.6
25	200.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นในแต่ละแนวแกน

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	81.14	50.75	247.2
13	77.75	56.24	244.0
16	82.57	62.89	232.5
19	75.44	51.81	247.4
22	79.60	51.43	236.0
25	99.71	56.45	246.6

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	77.17	46.65	233.4
13	75.74	50.78	248.4
16	75.20	50.87	251.8
19	82.19	49.70	247.6
22	76.65	59.13	251.0
25	134.9	81.16	244.6

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	82.46	49.68	250.7
13	93.77	62.80	239.4
16	74.43	50.92	252.3
19	81.43	49.67	247.7
22	98.69	61.88	250.7
25	72.32	51.25	248.3

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	81.79	49.26	250.5
13	79.22	46.77	235.7
16	73.71	53.63	239.2
19	79.55	49.95	243.2
22	79.20	62.07	254.4
25	91.15	48.78	235.1

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	81.34	50.65	250.6
13	73.98	57.58	236.7
16	76.23	52.92	235.6
19	78.72	50.48	248.0
22	76.69	63.04	236.3
25	78.11	57.47	240.8

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Y (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Z (Mpa)
10	79.57	50.10	245.8
13	73.04	50.03	250.2
16	73.00	45.81	233.3
19	76.17	52.35	244.1
22	79.93	62.25	238.1
25	81.84	46.85	232.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดสูงสุดที่เกิดในสเปเดอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.14
13	1.126
16	1.077
19	1.141
22	1.085
25	1.152

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.077
13	1.147
16	1.162
19	1.146
22	1.158
25	1.117

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.156
13	1.100
16	1.166
19	1.147
22	1.156
25	1.147

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.158
13	1.091
16	1.099
19	1.126
22	1.173
25	1.103

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.159
13	1.090
16	1.088
19	1.143
22	1.099
25	1.110

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.136
13	1.154
16	1.081
19	1.131
22	1.094
25	1.073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดที่เกิดขึ้นแต่ละแนวแกนของสเปคเตอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.954	5.955	1.107
13	3.787	5.950	1.093
16	3.896	5.953	1.047
19	3.843	6.232	1.112
22	4.017	6.008	1.066
25	4.830	6.006	1.151

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.798	6.052	1.051
13	3.798	5.977	1.112
16	3.899	6.035	1.128
19	4.008	6.009	1.110
22	3.806	5.979	1.125
25	3.741	6.054	1.102

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	4.020	6.041	1.120
13	4.817	5.948	1.066
16	3.875	5.965	1.139
19	3.996	5.998	1.110
22	3.773	6.032	1.120
25	3.622	6.050	1.138

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดในแกน X (10^{-4})	ความเคียดในแกน Y (10^{-5})	ความเคียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.999	6.044	1.122
13	3.875	5.960	1.063
16	3.923	6.045	1.071
19	3.908	5.963	1.089
22	3.755	6.308	1.136
25	3.943	5.973	1.085

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดในแกน X (10^{-4})	ความเคียดในแกน Y (10^{-5})	ความเคียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.888	6.033	1.122
13	3.819	5.959	1.064
16	3.967	6.026	1.059
19	3.798	5.927	1.108
22	3.915	5.885	1.065
25	3.847	5.929	1.107

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดในแกน X (10^{-4})	ความเคียดในแกน Y (10^{-5})	ความเคียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.910	6.033	1.101
13	3.709	5.957	1.118
16	4.257	6.009	1.053
19	3.850	5.882	1.094
22	3.975	5.889	1.069
25	3.878	5.891	1.044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 กรณีเจาะรูแนวเดียวกับสลักวัสดุ ASM 1020

ความเค้นรวมที่เกิดขึ้นกับสเปเดอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	212.3
13	210.0
16	201.5
19	212.7
22	206.9
25	221.6

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	201.0
13	213.6
16	216.5
19	213.5
22	203.6
25	206.1

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	214.9
13	213.7
16	217.1
19	213.7
22	214.9
25	215.0

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	215.7
13	204.2
16	206.7
19	209.7
22	218.1
25	211.5

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	215.8
13	203.4
16	202.9
19	212.4
22	204.5
25	210.4

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	211.5
13	214.7
16	202.4
19	210.8
22	203.6
25	200.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นในแต่ละแนวแกน

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	81.15	50.75	247.2
13	77.58	56.24	244.0
16	82.57	62.89	232.5
19	75.44	51.81	247.4
22	103.3	72.29	241.0
25	99.71	56.45	246.6

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	77.18	46.65	233.4
13	75.74	50.78	248.4
16	75.20	50.88	251.8
19	82.20	49.71	247.6
22	79.93	62.25	238.1
25	78.32	58.37	242.6

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	82.46	49.68	250.7
13	68.81	70.06	252.7
16	74.43	50.93	252.3
19	81.43	49.67	247.7
22	98.69	61.88	250.7
25	72.32	51.25	248.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคโตรัมและจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	81.80	49.26	250.5
13	79.22	46.67	235.7
16	73.71	53.63	239.2
19	79.55	49.55	243.2
22	79.21	62.07	254.4
25	91.15	48.78	235.1

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคโตรัมและจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	81.35	50.65	250.6
13	73.99	57.58	236.7
16	76.23	52.92	235.6
19	78.73	50.48	248.0
22	76.69	63.64	236.3
25	78.11	57.44	240.8

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคโตรัมและจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	79.58	50.11	245.8
13	73.04	50.03	250.2
16	73.00	45.81	233.3
19	76.18	52.35	244.1
22	79.93	62.25	238.1
25	81.84	46.85	232.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดสูงสุดที่เกิดในสเปเดอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.102
13	1.088
16	1.041
19	1.102
22	1.072
25	1.113

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.040
13	1.108
16	1.123
19	1.107
22	1.057
25	1.060

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.117
13	1.107
16	1.126
19	1.108
22	1.117
25	1.108

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.119
13	1.054
16	1.061
19	1.088
22	1.133
25	1.066

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.120
13	1.053
16	1.051
19	1.105
22	1.027
25	1.072

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.097
13	1.115
16	1.044
19	1.093
22	1.057
25	1.037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดที่เกิดขึ้นแต่ละแนวแกนของสเปเดอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.821	5.753	1.070
13	3.659	5.749	1.057
16	3.784	5.752	1.012
19	3.713	6.022	1.074
22	3.465	6.008	1.096
25	4.666	5.802	1.112

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.670	5.848	1.015
13	3.669	5.775	1.074
16	3.767	5.831	1.090
19	3.873	5.805	1.073
22	3.840	5.689	1.033
25	3.808	5.857	1.058

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.884	5.837	1.082
13	3.812	5.826	1.103
16	3.745	5.764	1.092
19	3.861	5.795	1.072
22	3.645	5.282	1.082
25	3.500	5.845	1.099

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดในแกน X (10^{-4})	ความเคียดในแกน Y (10^{-5})	ความเคียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.864	5.839	1.084
13	3.744	5.758	1.027
16	3.791	5.840	1.035
19	3.777	5.761	1.052
22	3.628	5.834	1.098
25	3.810	5.771	1.048

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดในแกน X (10^{-4})	ความเคียดในแกน Y (10^{-5})	ความเคียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.757	5.829	1.084
13	3.690	5.757	1.028
16	3.833	5.823	1.023
19	6.670	5.726	1.071
22	3.782	5.686	1.029
25	3.717	5.729	1.070

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดในแกน X (10^{-4})	ความเคียดในแกน Y (10^{-5})	ความเคียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.778	5.829	1.064
13	3.584	5.756	1.080
16	4.114	5.086	1.017
19	3.720	5.683	1.027
22	3.840	5.689	1.033
25	3.747	5.692	1.009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 กรณีเจาะรูทำมุม 90 องศากับสลัก (วัสดุ ASM 1040)

ความเค้นรวมที่เกิดขึ้นกับสเปเดอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	201.9
13	200.1
16	202.7
19	209.9
22	200.8
25	208.7

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	205.2
13	208.3
16	204.2
19	200.9
22	209.0
25	208.4

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	197.9
13	194.9
16	196.2
19	197.2
22	199.2
25	213.5

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	207.5
13	200.8
16	200.0
19	199.6
22	198.8
25	202.5

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	200.5
13	200.2
16	199.6
19	204.0
22	204.7
25	214.6

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (MPa)
10	204.1
13	203.5
16	198.2
19	204.7
22	201.0
25	208.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นในแต่ละแนวแกน

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	103.6	55.44	232.9
13	86.31	49.49	227.7
16	96.79	57.05	225.1
19	77.83	61.17	243.8
22	100.6	56.80	229.4
25	91.02	71.86	246.3

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	88.48	51.44	232.5
13	96.31	53.19	231.2
16	102.7	48.12	228.8
19	83.70	54.66	224.6
22	94.90	50.95	245.3
25	84.78	61.23	236.4

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	105.3	48.87	223.8
13	88.69	53.73	219.3
16	89.79	56.23	222.3
19	94.97	58.76	226.8
22	91.77	49.04	226.2
25	99.75	61.54	240.4

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	82.49	51.75	240.2
13	100.8	48.85	224.6
16	96.07	52.44	224.6
19	89.02	50.13	226.7
22	90.55	56.47	225.5
25	79.36	51.45	240.8

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	96.61	52.24	226.4
13	99.13	46.99	222.3
16	97.06	52.60	223.8
19	91.21	53.36	234.0
22	76.06	56.49	240.4
25	96.27	48.04	243.3

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Y (MPa)	ความเค้นในแนวแกน Z (MPa)
10	95.07	49.90	232.5
13	86.26	54.43	235.4
16	92.55	52.26	224.6
19	75.99	52.35	239.6
22	97.78	50.36	230.3
25	85.85	49.66	243.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดสูงสุดที่เกิดในสเปเดอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.077
13	1.061
16	1.049
19	1.127
22	1.069
25	1.126

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.088
13	1.096
16	1.078
19	1.062
22	1.129
25	1.096

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.049
13	1.031
16	1.038
19	1.046
22	1.056
25	1.120

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.114
13	1.059
16	1.057
19	1.058
22	1.053
25	1.086

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.060
13	1.054
16	1.055
19	1.086
22	1.101
25	1.128

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.084
13	1.088
16	1.050
19	1.100
22	1.069
25	1.121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดที่เกิดในแต่ละแนวแกนของสเปคเตอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	5.150	5.896	1.049
13	4.231	5.887	1.025
16	4.695	5.890	1.011
19	4.084	5.792	1.090
22	4.862	6.138	1.031
25	3.106	4.526	1.113

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	4.585	5.862	1.056
13	4.643	5.891	1.060
16	4.944	5.916	1.043
19	4.361	5.916	1.020
22	4.705	5.797	1.088
25	4.169	5.983	1.093

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	5.136	5.900	1.014
13	4.264	5.867	0.9937
16	4.404	5.901	1.006
19	4.633	5.870	1.009
22	4.503	5.877	1.021
25	4.669	5.940	1.118

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคโตรัมและจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.966	5.883	1.076
13	4.859	5.849	1.026
16	4.748	5.812	1.021
19	4.558	5.866	1.025
22	4.466	5.929	1.019
25	4.166	5.917	1.077

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคโตรัมและจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	4.609	5.019	1.031
13	4.773	5.937	1.015
16	4.709	5.888	1.019
19	4.648	6.096	1.053
22	3.902	6.141	1.075
25	4.604	6.482	1.127

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคโตรัมและจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	4.575	6.131	1.048
13	4.246	6.176	1.059
16	4.516	6.212	1.017
19	3.740	6.312	1.071
22	4.934	6.625	1.036
25	4.151	6.901	1.090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 กรณีเจาะรูทำมุม 90 องศากับสลัก (วัสดุ ASM 1020)

ความเค้นรวมที่เกิดขึ้นกับสเปเดอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	201.9
13	200.1
16	202.7
19	209.9
22	200.8
25	208.7

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	205.2
13	208.3
16	204.2
19	200.9
22	209.0
25	208.4

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	197.9
13	194.9
16	196.2
19	197.2
22	199.2
25	213.5

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	207.5
13	200.8
16	200.0
19	199.6
22	198.8
25	202.5

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	200.5
13	200.2
16	199.6
19	204.0
22	204.6
25	214.6

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	ความเค้นรวม (Mpa)
10	204.1
13	203.5
16	198.2
19	204.7
22	201.0
25	208.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นในแต่ละแนวแกน

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Y (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Z (Mpa)
10	103.6	55.44	232.9
13	86.31	49.49	227.7
16	96.79	57.05	225.1
19	77.84	61.17	243.8
22	100.6	56.80	229.4
25	91.03	71.86	246.3

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Y (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Z (Mpa)
10	88.50	51.44	232.5
13	96.32	53.19	231.2
16	102.7	48.12	228.6
19	83.70	54.66	224.6
22	94.91	50.95	245.3
25	84.89	61.23	236.4

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Y (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Z (Mpa)
10	105.3	48.87	223.8
13	88.72	53.74	219.3
16	89.81	56.24	222.3
19	94.99	58.77	226.8
22	91.79	49.04	226.2
25	99.77	61.54	240.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Y (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Z (Mpa)
10	82.50	51.75	240.2
13	100.8	48.86	224.6
16	96.09	52.44	224.6
19	89.04	50.13	226.7
22	90.57	56.47	225.5
25	79.39	51.45	240.8

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Y (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Z (Mpa)
10	96.62	52.24	226.4
13	99.14	46.99	222.3
16	97.07	52.60	223.8
19	91.22	53.36	234.0
22	76.02	56.49	240.4
25	96.29	48.04	243.3

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเค้นในแนวแกน X (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Y (Mpa)	ความเค้นในแนวแกน Z (Mpa)
10	95.08	49.90	232.5
13	86.28	54.44	235.4
16	92.56	52.26	224.6
19	76.01	52.35	239.6
22	97.86	50.36	230.3
25	85.86	49.66	243.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดสูงสุดที่เกิดในสเปคเตอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.051
13	1.036
16	1.013
19	1.089
22	1.033
25	1.087

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.052
13	1.069
16	1.051
19	1.026
22	1.091
25	1.059

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.023
13	0.9959
16	1.003
19	1.011
22	1.020
25	1.082

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.076
13	1.023
16	1.021
19	1.023
22	1.018
25	1.049

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.024
13	1.028
16	1.030
19	1.050
22	1.063
25	1.090

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดสูงสุด (10^{-3})
10	1.047
13	1.051
16	1.014
19	1.063
22	1.033
25	1.083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวแกนของสเปเดอร์

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	5.025	5.753	1.023
13	4.128	5.744	1.000
16	4.536	5.691	0.9768
19	3.946	5.596	1.053
22	4.697	5.930	0.9961
25	3.001	4.373	1.075

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	4.430	5.664	1.020
13	4.530	5.747	1.034
16	4.824	5.771	1.017
19	4.214	5.716	0.9857
22	4.545	5.601	1.051
25	4.028	5.780	1.056

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปเดอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเครียดในแกน X (10^{-4})	ความเครียดในแกน Y (10^{-5})	ความเครียดในแกน Z (10^{-3})
10	5.011	5.756	0.9896
13	4.125	5.668	0.9600
16	4.255	5.701	0.9716
19	4.477	5.672	0.9753
22	4.351	5.678	0.9868
25	4.512	5.739	1.080

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดในแกน X (10^{-4})	ความเคียดในแกน Y (10^{-5})	ความเคียดในแกน Z (10^{-3})
10	3.832	5.684	1.039
13	4.698	5.631	0.9916
16	4.588	5.618	0.9865
19	4.404	5.668	0.9902
22	4.316	5.728	0.9848
25	4.025	5.717	1.041

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดในแกน X (10^{-4})	ความเคียดในแกน Y (10^{-5})	ความเคียดในแกน Z (10^{-3})
10	4.453	5.815	0.9957
13	4.657	5.792	0.9901
16	4.594	5.744	0.9937
19	4.491	5.890	1.017
22	3.771	5.934	1.039
25	4.449	6.263	1.089

ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสเปคเตอร์และจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเคียดในแกน X (10^{-4})	ความเคียดในแกน Y (10^{-5})	ความเคียดในแกน Z (10^{-3})
10	4.421	5.923	1.013
13	4.103	5.968	1.023
16	4.363	6.002	0.9826
19	3.614	6.098	1.035
22	4.767	6.401	1.001
25	4.011	6.668	1.053

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 อัตราส่วนของอายุการใช้งานของการเจาะรูทำมุม 90 องศา กับสลัก (ASM 1040)

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	2.793
13	3.066
16	3.633
19	1.838
22	3.204
25	1.462

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	2.523
13	2.500
16	2.264
19	3.274
22	1.985
25	1.885

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	3.605
13	4.000
16	3.689
19	3.658
22	3.263
25	2.034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	1.995
13	3.250
16	3.350
19	3.177
22	3.350
25	2.030

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	3.115
13	3.524
16	3.416
19	2.632
22	2.025
25	1.612

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	2.717
13	2.422
16	3.471
19	2.052
22	3.157
25	1.954

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 อัตราส่วนของอายุการใช้งานของการเจาะรูแนวเดียวกับสลัก(ASM1020)

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	1.489
13	1.630
16	2.500
19	1.434
22	1.942
25	1.322

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	2.267
13	1.395
16	1.254
19	1.470
22	2.080
25	1.691

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	1.367
13	1.201
16	1.224
19	1.473
22	1.375
25	1.150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	1.343
13	2.073
16	1.967
19	1.697
22	1.192
25	1.860

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	1.326
13	2.080
16	2.200
19	1.430
22	2.139
25	1.536

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	1.552
13	1.300
16	2.243
19	1.615
22	2.080
25	2.414

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 อัตราส่วนของอายุการใช้งานของการเจาะรูทำมุม 90 องศากับสลัก(ASM 1020)

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	2.614
13	2.223
16	2.880
19	1.761
22	3.216
25	1.450

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 60 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	2.470
13	2.326
16	2.686
19	3.264
22	1.892
25	1.854

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 70 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	3.390
13	4.000
16	3.750
19	3.684
22	3.226
25	1.676

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 80 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	1.920
13	3.246
16	3.366
19	3.148
22	3.366
25	1.928

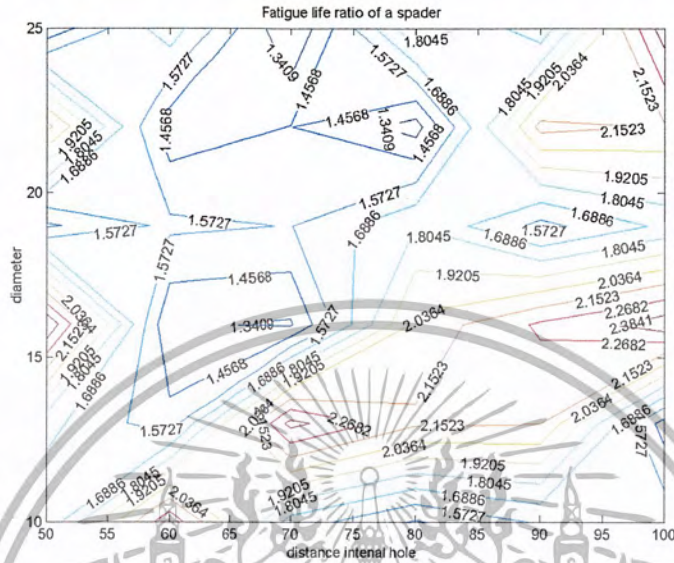
ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 90 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	3.126
13	3.316
16	3.284
19	2.584
22	1.932
25	1.512

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ 100 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนอายุการใช้งาน ที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับปรุง
10	2.654
13	2.360
16	3.482
19	1.940
22	3.118
25	1.852

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทที่ 6

สรุปผลการวิเคราะห์และวิจารณ์ผล

สรุปผลการวิเคราะห์

จากผลการทดลองพบว่าค่าที่ปรับปรุงแล้วของวัสดุ กรณีเจาะรูแนวเดียวกับรูสลักมีค่าอายุการล้าดีกว่า ก่อนปรับปรุง 2.5 เท่า กรณีเจาะรูแนวไขว้กับรูสลักทำมุม 90 องศา มีค่าดีกว่า 4 เท่า ตำแหน่งที่ดีที่สุดของการเจาะรูแนวเดียวกับรูสลักอยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูสลักถึงรูเจาะ 50 มิลลิเมตร และกรณีการเจาะรูแบบไขว้กับรูสลักทำมุม 90 องศาอยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างรูเจาะ 70 มิลลิเมตร สรุปได้ว่าการปรับปรุงอายุการล้าโดยการเจาะรูนั้นช่วยเพิ่มอายุการล้าได้จริง และการเจาะรูแบบสลับจะช่วยเพิ่มอายุการล้าโดยการเจาะรูให้ได้ผลดียิ่งขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบกับชิ้นงานจำลอง ทุกค่าของอายุการล้าที่ทำการปรับปรุงโดยการเจาะรูจะมากกว่าค่าที่ยังไม่ได้ปรับปรุงเสมอทุกค่าซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการปฏิบัติงานพบว่า ปัญหาการวิเคราะห์ด้วยการเจาะรูเพื่อช่วยในการกระจายความเค้นเป็นเพียงแนวทางหนึ่งเท่านั้น แต่ยังมีอีกหลายแนวทาง เช่น การใส่รัศมีที่ตัวสเปคเตอร์แทนการเจาะรู หรือการทำเกลียวบนตัวสเปคเตอร์ เป็นต้น การสร้างเอลิเมนต์ในการทดลองนี้ใช้เอลิเมนต์ชนิด 3 เหลี่ยม สำหรับผู้ที่สนใจอาจจะทดลองใช้เอลิเมนต์ชนิดอื่นๆ เช่น เอลิเมนต์ 4 เหลี่ยมจตุรัส หรือเอลิเมนต์ 4 เหลี่ยมผืนผ้า เป็นต้น ในการทดลองนี้ไม่ได้เน้นอิทธิพลของอุณหภูมิและการคัดกรองของสิ่งแวดล้อม แต่เน้นในเรื่องของความเสียหายเนื่องจากการรับแรงเป็นหลัก ซึ่งผู้ที่สนใจจะพัฒนาโครงการนี้ต่อไปก็สามารถทำได้โดยการนำปัจจัยรองที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ไปวิเคราะห์ต่อไป

References

- [1] Daryl L.Logan, Finite Element Method, 3rd ,Brooks/Cole,2002
- [2] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, Mechanical Engineering Design ,International six Edition, Mcgraw-Hill
- [3] Society of Automotive Engineers, Inc.“Fatigue Design Handbook” Ae-10 SAE
- [4] Stephen J.Chapman, MATLAB Programming for Engineers, Brooks/Cole,2002.
- [5] รศ.ดร.เดช พุททเจริญทอง, การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ,1998.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็กชนิดต่างๆ

Grade (a)	Orientation (e)	Description (f)	Hardness HB	Tensile Strength S_{ut}		Reduction in Area %	True Strain at Fracture ϵ_f	Modulus of Elasticity E		Fatigue Strength Coefficient σ'_f		Fatigue Strength Exponent b	Fatigue Ductility Coefficient ϵ'_f	Fatigue Ductility Exponent c
				MPa	ksi			GPa	10 ⁴ psi	MPa	ksi			
A538A (b)	L	STA	405	1515	220	67	1.10	185	27	1655	240	-0.065	0.30	-0.62
A538B (b)	L	STA	460	1860	270	56	0.82	185	27	2135	310	-0.071	0.80	-0.71
A538C (b)	L	STA	480	2000	290	55	0.81	180	26	2240	325	0.07	0.60	0.75
AM-350 (c)	L	HR, A		1315	191	52	0.74	195	28	2800	406	0.14	0.33	-0.84
AM-350 (c)	L	CD	496	1905	276	20	0.23	180	26	2690	390	-0.102	0.10	-0.42
Gainex (c)	LT	HR sheet		530	77	58	0.86	200	29.2	805	117	-0.07	0.86	-0.65
Gainex (c)	L	HR sheet		510	74	64	1.02	200	29.2	805	117	-0.071	0.86	-0.68
H-11	L	Ausformed	660	2585	375	33	0.40	205	30	3170	460	-0.077	0.08	-0.74
RQC-100 (c)	LT	HR plate	290	940	136	43	0.56	205	30	1240	180	-0.07	0.66	-0.69
RQC-100 (c)	L	HR plate	290	930	135	67	1.02	205	30	1240	180	-0.07	0.66	-0.69
10B62	L	Q&T	430	1640	238	38	0.89	195	28	1780	258	-0.067	0.32	-0.56
1005-1009	LT	HR sheet	90	360	52	73	1.3	205	30	580	84	0.09	0.15	-0.43
1005-1009	LT	CD sheet	125	470	68	66	1.09	205	30	515	75	-0.059	0.30	-0.51
1005-1009	L	CD sheet	125	415	60	64	1.02	200	29	540	78	-0.073	0.11	-0.41
1005-1009	L	HR sheet	90	345	50	80	1.6	200	29	640	93	-0.109	0.10	0.39
1015	L	Normalized	80	415	60	68	1.14	205	30	825	120	-0.11	0.95	-0.64
1020	L	HR plate	108	440	64	67	0.96	205	29.5	895	130	-0.12	0.41	-0.51
1040	L	As forged	225	620	90	60	0.93	200	29	1540	223	-0.14	0.67	-0.57
1045	L	Q&T	225	725	105	65	1.04	200	29	1225	178	-0.095	1.00	-0.66
1045	L	Q&T	410	1450	210	51	0.72	200	29	1860	270	0.073	0.60	-0.70
1045	L	Q&T	390	1345	195	59	0.89	205	30	1585	230	-0.074	0.45	-0.68
1045	L	Q&T	450	1585	230	55	0.81	205	30	1795	260	-0.07	0.35	-0.69
1045	L	Q&T	500	1825	265	57	0.71	205	30	2275	330	-0.08	0.25	0.68
1045	L	Q&T	595	2240	325	41	0.52	205	30	2725	395	-0.081	0.07	-0.60
1144	L	CDSR	265	930	135	33	0.51	195	28.5	1000	145	-0.08	0.32	-0.58
1144	L	DAT	305	1035	150	25	0.29	200	28.8	1585	230	-0.09	0.27	-0.53
1541F	L	Q&T forging	290	950	138	49	0.68	205	29.9	1275	185	-0.076	0.68	-0.65
1541F	L	Q&T forging	260	890	129	60	0.93	205	29.9	1275	185	-0.071	0.93	-0.65
4130	L	Q&T	258	895	130	67	1.12	220	32	1275	185	-0.083	0.92	-0.63
4130	L	Q&T	365	1425	207	55	0.79	200	29	1695	246	-0.081	0.89	-0.69