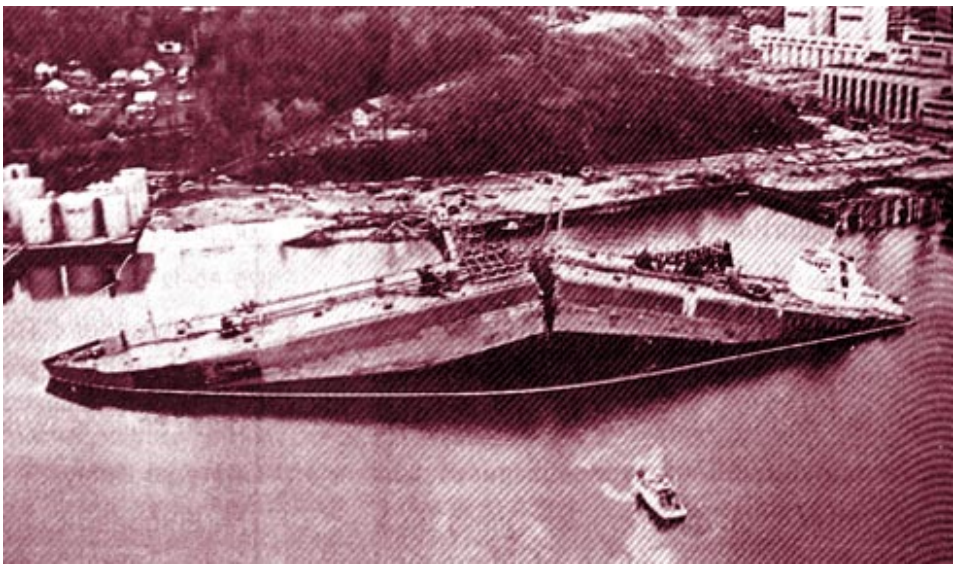


วัสดุวิบัติได้อย่างไร

: สาเหตุและกลศาสตร์

■ **รศ.ดร. สุธีระ ประเสริฐสรรพ์**
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันความรู้เพื่อวิเคราะห์สาเหตุการวิบัติของวัสดุกำลังเป็นที่ต้องการอย่างมาก เพราะอุปกรณ์และเครื่องจักรกลที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักมีราคาแพง การวิบัติของวัสดุซึ่งมีส่วนประกอบของเครื่องจักรดังกล่าว อาจทำให้เครื่องจักรทำงานไม่ได้ ซึ่งนำไปสู่การสูญเสียทั้งในแง่ของเวลา ทรัพย์สิน รวมทั้งเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยในสุขภาพและชีวิตของผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลนั้นๆ จึงจำเป็นต้องบำรุงรักษาเชิงป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติ ทฤษฎีการวิบัติที่ศึกษากันเน้นที่การคราก (yielding) แต่การวิบัติส่วนใหญ่เป็นการแตกหัก เนื่องจากความล้า (fatigue fracture) การจะวิเคราะห์สาเหตุได้ถูกต้องจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกลศาสตร์การวิบัติ (mechanics of failure) ซึ่งไม่จำกัดวิสัยทัศน์อยู่เพียงการคราก บทความนี้ให้ความรู้เชิงเปรียบเทียบระหว่างการวิบัติแบบคราก และแตกหัก โดยแสดงให้เห็นถึงปัจจัยต่างๆ ที่ควบคุมพฤติกรรมการวิบัติของวัสดุ รวมทั้งแสดงหลักการของกลศาสตร์แตกหัก (fracture machnics) ที่ใช้ในงานออกแบบด้วย

ประวัติการศึกษาและประสบการณ์ผู้เขียน

รองศาสตราจารย์ ดร. สุธีระ ประเสริฐสรรพ์ เกิดที่จังหวัดยะลา พ.ศ.2496 จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยม) จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และได้รับราชการในตำแหน่งอาจารย์ ณ ที่ภาควิชาดังกล่าว ตั้งแต่ พ.ศ.2519 เป็นต้นมา จากนั้นได้รับทุนโคลัมโบและทุนมหาวิทยาลัยแห่งรัฐควีนส์แลนด์ ประเทศออสเตรเลีย เพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาโทและปริญญาเอก ในปี พ.ศ.2522-2524 และ พ.ศ.2526-2530 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ระดับ 8 และรองคณบดีฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

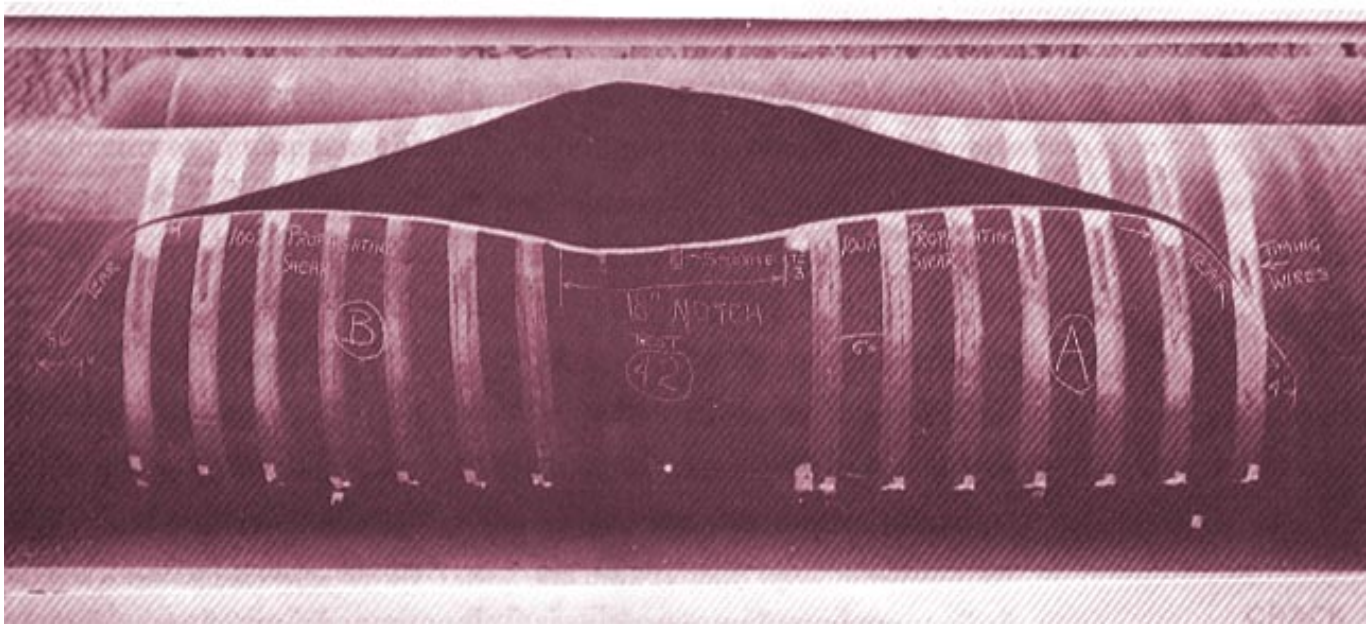
บทนำ

ในระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมานี้ ผู้ที่สนใจเรื่องการวิเคราะห์การแตกหักเสียหายของวัสดุชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทราบดีว่า มีกิจกรรมฝึกอบรมบรรยายในเรื่องดังกล่าวหลายครั้งมาก จัดโดยหลายหน่วยงาน อาทิเช่น ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เป็นต้น การจัดแต่ละครั้งมีผู้สนใจเข้าฟังจำนวนมาก และบางหน่วยงานจัดมาแล้วมากกว่า 1 ครั้ง ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้ว่าหัวข้อนี้เป็นที่สนใจในแวดวงอุตสาหกรรม และบุคลากรในประเทศ ผู้มีความรู้ในเรื่องนี้ยังมีน้อยมากประกอบกับกิจการขนาดใหญ่ เช่น เหมืองแร่ถ่านหินของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมเหล็ก และอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล เริ่มตระหนักว่าไม่มีความรู้พอที่จะวิเคราะห์หาสาเหตุการวิบัติ เพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้ (preventive maintenance) จากประสบการณ์ของผู้เขียน การวิบัติของเครื่องจักรกลใหญ่ๆ เช่น ของเหมืองถ่านหินแม่เมาะเกิดขึ้นซ้ำๆ และการแก้ไขก็ทำแบบลองผิดลองถูกบ้าง ทำโดยอาศัยผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศบ้าง ทำให้แก้ไขปัญหาไม่ถูกจุด จึงต้องมีการแสวงหาความรู้เพิ่มเติม โดยการเข้าอบรมสัมมนา อย่างไรก็ตามจากประสบการณ์ของผู้เขียนพบว่าเนื้อหาวิชาการจากการอบรมสัมมนา ต่างๆ ยังขาดพื้นฐานเชิงกลอยู่มาก เอกสารประกอบการสัมมนา (เท่าที่เห็น) จะเน้นด้านวัสดุศาสตร์ ซึ่งเป็นเพียงด้านเดียวของการวิบัติ จึงไม่ช่วยให้เข้าใจปัญหาอย่างถ่องแท้

การศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ในประเทศไทยยังขาดหลักสูตรนี้ ถ้าจะมีก็เพียงระดับปริญญาโทในบางแห่งเท่านั้น ถึงแม้ข้อกำหนดใหม่ของกองประกอบวิชาชีพวิศวกรรม (กว.) ได้รวมวิชากลศาสตร์แตกหักไว้ในกลุ่มเดียวกับวิชาออกแบบเครื่องกล แต่มิได้หมายความว่า นักศึกษาจำเป็นต้องเรียนเพราะว่าถ้านักศึกษาเรียนวิชาออกแบบเครื่องกลผ่าน ก็สามารถขอรับใบอนุญาตประกอบชีพได้แล้ว (ปกติกลศาสตร์แตกหักมิได้รวมอยู่ในเนื้อหาวิชาการออกแบบเครื่องกล)

การวิเคราะห์การวิบัติให้ถูกต้องนั้น จำเป็นต้องทราบสาเหตุ โดยเฉพาะสาเหตุเชิงกล บทความนี้ตั้งใจเขียนให้วิศวกรทั่วไปอ่านได้เข้าใจในศาสตร์นี้ยิ่งขึ้น

โดยเน้นที่สาเหตุการวิบัติ ความแตกต่างระหว่างกาวิบัติโดยการคราก (yielding) และการแตกหัก (fracture) พฤติกรรมของวัสดุ, ปัจจัยที่เกิดจากการออกแบบและการใช้งานที่ส่งเสริมให้เกิดการวิบัติ เพื่อเสริมให้ผู้มีหน้าที่วิเคราะห์ความเสียหายแตกหักได้เข้าใจสาเหตุของการวิบัติอย่างถ่องแท้



การแตกหักที่เกิดในท่อลำเลียง

การออกแบบวิศวกรรม : องค์ความรู้ที่จำเป็นแต่ขาดหาย

การนำวัสดุมาใช้งานทางวิศวกรรมศาสตร์ มักจะหลีกเลี่ยงการรับภาระ (load) ไม่ได้ โดยเฉพาะวัสดุที่ประกอบเป็นโครงสร้างของชิ้นงาน ที่ไม่ว่าจะเล็กขนาดปากกาหรือใหญ่โตซับซ้อนขนาดยานอวกาศ ในโครงสร้างที่ใหญ่โตซับซ้อน เช่น เรือ เครื่องบิน สะพานหรือเตาปฏิกรณ์ปรมาณู ตัวโครงสร้างจะต้องได้รับการออกแบบให้ปลอดจากการวิบัติในระหว่างอายุใช้งาน เพราะการวิบัติในโครงสร้างเช่นนี้เป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินมาก ในเครื่องจักรกลธรรมดาทั่วไปผู้ออกแบบต้องให้ชิ้นงานปลอดการวิบัติเพื่อให้เครื่องจักรกลนั้นมีความทนทานต่อการใช้งาน เป็นที่เข้าใจกันทั่วไปว่าความทนทานของเครื่องจักรกลนั้นขึ้นกับวัสดุที่ใช้ และการออกแบบที่เหมาะสม (รวมทั้งการใช้งานและบำรุงรักษาซึ่งเป็นเรื่องของผู้ใช้) ดังนั้นผู้ออกแบบเครื่องจักรกล หรือโครงสร้างทางโยธา จึงต้องมีความรู้ทั้งการออกแบบและวัสดุศาสตร์ ความรู้ทางการออกแบบคือการกำหนดรูปทรงชิ้นงานแต่ละชิ้นที่ทำงานสัมพันธ์กัน เช่น เพลา เฟือง เกียร์ และแบริ่ง เป็นต้น การออกแบบจึงแบ่งเป็น 3 เรื่องหลัก คือ ออกแบบเพื่อความแข็งแรง (ไม่วิบัติ) ออกแบบเพื่อให้ได้รูปร่างขนาดที่เหมาะสมและออกแบบเพื่อการผลิต จะเห็นได้ว่าผู้ออกแบบที่ดีจะต้องมีความรู้กว้างมากในหลายสาขา

การวิบัติของวัสดุแบ่งได้หลายระดับ ปรากฏการณ์บางอย่างเช่น การสึกหรอ (wear) ถือเป็นการวิบัติ (จึงต้องออกแบบให้ทนทานต่อการสึกหรอ เช่น การปรับสภาพผิว การหล่อลื่น เป็นต้น) แต่ก็ไม่รุนแรงถึงระดับพังทลาย การพังทลายของวัสดุที่นิยมใช้เป็นเกณฑ์ออกแบบทั่วไป คือ การคราก (yielding) ความแข็งแรงคราก (yield strength) จึงเป็นสมบัติประการแรกที่นักออกแบบใช้เลือกวัสดุการออกแบบโดยวิธีนี้ จึงเป็นการออกแบบเพื่อทนทานการคราก (design against yielding) *ทฤษฎีวิบัติต่างๆ ที่ใช้กันจึงเป็นทฤษฎีที่ใช้ขอบเขตการครากมาเป็นเกณฑ์การออกแบบ โดยขาดความตระหนักว่าชิ้นงานอาจจะวิบัติโดยการแตกหัก (fracture) ได้โดยไม่ต้องคราก* การขาดความรู้อย่างลึกซึ้งในกลไกวิบัติของวัสดุเป็นเหตุให้งานออกแบบจำนวนมากล้มเหลว กลไกวิบัติที่ขาดหายไป คือ กลไกการแตกหัก ทฤษฎีวิบัติในเนื้อหาวิชาการออกแบบเครื่องกลที่ใช้ในมหาวิทยาลัยภายในประเทศไม่ถือว่าการแตกหักคือ เกณฑ์การออกแบบ *กลไกการแตกหักจึงเป็นองค์ความรู้ที่จำเป็นแต่ขาดหาย*

การแตกหัก : ความสำคัญที่ถูกมองข้าม

เกณฑ์การวิบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเพื่อความแข็งแรง (design for strength) มี 2 ประการ คือ การครากและการแตกหัก การครากถือเป็นจุดวิบัติเพราะวัสดุไม่สามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นอีกต่อไป รวมทั้งมีการยืดตัวออกอย่างถาวร การแตกหัก คือ การที่ชิ้นส่วนรับแรงดึงมากจนขาดออกจากกัน ในงานออกแบบเพื่อทนทานการครากนั้น ถือว่าการแตกหักเกิดภายหลังวัสดุครากแล้ว (post yield rupture) ดังนั้นจึงคำนึงแต่เพียงออกแบบให้ใช้งานแล้ววัสดุไม่ครากและก็เชื่อว่าปลอดภัย *แต่ในความเป็นจริงแล้วการแตกหักสามารถเกิดได้ในช่วงยืดหยุ่น (elastic) การที่การแตกหักสามารถเกิดก่อนการครากได้นั้นทำให้การออกแบบเพื่อทนทานการครากไม่ปลอดภัยพอเพราะชิ้นงานสามารถวิบัติได้ก่อนจะถึงคราก* การครากเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้ในเวลาที่วัสดุเกิดคอคอดยืดตัวออก (necking) แต่การแตกหักในช่วงยืดหยุ่นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในทันทีทันใดเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นเร็วมาก เช่นการระเบิดของถังความดัน เป็นต้น การวิบัติโดยการแตกหักในช่วงยืดหยุ่นนี้จึงสำคัญ และมีอันตรายมากกว่าการวิบัติ

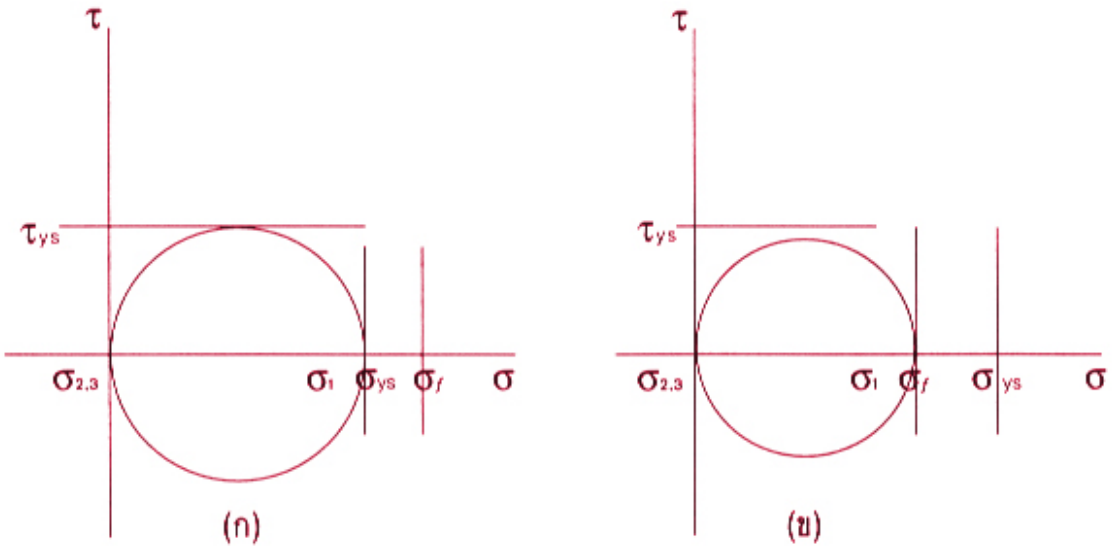
โดยการคราก (โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่) ดังนั้นการที่นักออกแบบเครื่องจักรกลและโครงสร้างใหญ่ๆ ทั้งหลายยังขาดความรู้เรื่องกลศาสตร์แตกหัก จึงทำให้งานออกแบบนั้นไม่สามารถปลอดการวิบัติได้อย่างแท้จริงและนับวันจะยิ่งมีอันตรายมากขึ้น เมื่อโครงสร้างทางวิศวกรรมมีขนาดใหญ่ขึ้นและรับผิดชอบต่อชีวิตและทรัพย์สินมากขึ้น ดังเช่นที่เราประสบกับความสูญเสียอันเนื่องจากภัยพิบัติขนาดใหญ่ทั้งในและต่างประเทศ เช่น สะพาน หรืออาคารพาณิชย์พังทลาย

กลไกการวิบัติ : ทางเลือกของพฤติกรรมเปราะ-เหนียว

การครากและการแตกหักเป็นการวิบัติที่เกิดจากกลไกต่างกัน การครากคือการที่วัสดุเริ่มเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวร ซึ่งเกิดจากการที่เนื้อวัสดุไถล (slip) ไปบนระนาบการไถล (slip plane) การไถลเกิดจากแรงเฉือน (shear force) และระนาบการไถล คือ ระนาบที่อ่อนแอต่อแรงเฉือน ซึ่งมักจะวางตัวอยู่ในทิศที่มีความเค้นเฉือนสูงสุด (maximum shear stress) การแตกหักคือการที่วัสดุถูกดึงให้ขาดออกจากกันด้วยแรงดึง การขาดออกจากกันด้วยแรงดึง ดังนั้นระนาบที่ขาดคือระนาบที่อ่อนแอต่อแรงดึง ซึ่งมักจะเป็นระนาบที่ตั้งฉากกับแรงดึง ดังนั้นระนาบที่ขาดคือ ระนาบที่อ่อนแอต่อแรงดึง ซึ่งมักจะเป็นระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางความเค้นฉากสูงสุด (principal normalstress) กล่าวโดยสรุป *การวิบัติทั้งสองประเภทเกิดจากการกลไกต่างกันคือการไถลและการดึงเอาชนะแรงเกาะกันของเนื้อวัสดุ กลไกทั้งสองเป็นผลจากความเค้นเฉือน (τ) และความเค้นจากฉาก (σ)* ตามลำดับ

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าสถานะความเค้น (state of stress) ทุกสถานะประกอบด้วยความเค้นเฉือนและความแค้นฉาก ซึ่งปรากฏในรูปของวงกลมโมร์ (Mohr's circle) ดังรูปที่ 1 ดังนั้นวัสดุที่ทุกสถานะความเค้น (แม้แต่ uniaxial tensile loading) จะมีความเค้นเฉือนและความเค้นฉาก อีกนัยหนึ่ง คือ *วัสดุนั้นมีความเค้นที่พยายามให้วัสดุคราก และพยายามให้แตกหักอยู่พร้อมกัน ดังนั้นวัสดุจะครากหรือแตกหัก จึงขึ้นอยู่ว่าวัสดุนั้นทนต่อกลไกใดได้น้อยกว่ากัน* เพื่อให้เข้าใจยิ่งขึ้นจึงกำหนดขอบเขตการครากด้วย τ_{ys} บนแกนความเฉือน และขอบเขตการแตกหักด้วย σ_f บนแกนความเค้นฉากในรูปที่ 1 ในรูป (ก) วัสดุแรงดึงแกนเดียว (uniaxial tensile load) เมื่อความเค้นดึง (σ) ค่อยๆ เพิ่มขึ้นนั้นวงกลมโมร์ก็ขยายขนาดขึ้นด้วย รัศมีของวงกลมคือ ความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่า $\sigma/2$ การครากเกิดเมื่อวงกลมขยายใหญ่จนชนขอบเขตการครากชิ้นงานรับแรงดึง ในรูป (ก) นี้จะปรากฏจุดคราก (yield point) ในการทดสอบแรงดึง (tensile test) และเรียกว่าเป็นวัสดุเหนียว (น่าสังเกตว่าถ้าคำนึงถึงนิยามของกลไกการไถลที่ทำให้เกิดการครากแล้ว σ_{ys} จะไม่มีจริง แต่ σ_{ys} ในที่นี้คือ ความเค้นดึงในสถานะความเค้นแกนเดี่ยวที่ทำให้ความเค้นเฉือนในเนื้อวัสดุสูงถึง τ_{ys} เราพบว่าในสถานะความเค้นหลายแกนค่า σ_{ys} จะเปลี่ยนไปในขณะที่ τ_{ys} คงที่วิศวกรจบใหม่หลายท่านใช้ค่า σ_{ys} ในตารางเหล็กโดยไม่ตระหนักว่า σ_{ys} นั้นได้จาก tensile test ซึ่งเป็นเงื่อนไขของความเค้นแกนเดี่ยว)

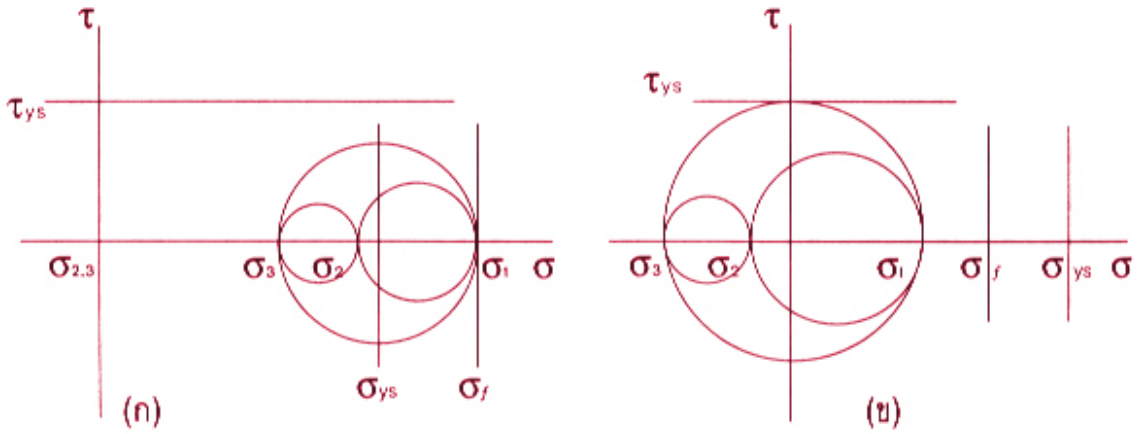
ในทางกลับกัน สำหรับวัสดุเปราะเมื่อแรงดึงเพิ่มขึ้นวงกลมโมร์จะขยายไปชนขอบเขต การแตกหัก (σ_f) ก่อนดังรูป (ข) วัสดุนี้จึงขาดออกจากกันโดยไม่ปรากฏจุดคราก *เราจะเห็นได้ว่าการครากขึ้นอยู่กับขนาดของวงกลมโมร์ ส่วนการแตกหักขึ้นอยู่กับตำแหน่งของวงกลม ด้วยเงื่อนไขของการคราก และการแตกหักเช่นนี้วัสดุเหนียวอาจแตกหักโดยไม่ปรากฏจุดครากก็ได้ ถ้าสถานะความเค้นทำให้วงกลมมีขนาดเล็ก และเคลื่อนไปทางขวา* ดังรูปที่ 2 (ก) *และวัสดุเปราะก็สามารถมีจุดครากได้โดยไม่แตกหัก ถ้าวงกลมนั้นโตขึ้นแต่ไม่ชนขอบเขตแตกหัก (σ_f)* ดังรูป 2(ข) นั่นคือ วัสดุที่เคยเชื่อว่าเหนียวในรูป 1(ก) จะกลับเป็นเปราะถ้ามีสถานะความเค้นดังรูป 2(ก) และในลักษณะเดียวกัน วัสดุที่เคยเปราะจะกลายเป็นวัสดุเหนียวก็ได้ ถ้ามีสถานะความเค้นดังรูป 2 (ข) กล่าวโดยสรุปคือ *ความเหนียวความเปราะไม่ได้ขึ้นกับวัสดุอย่างเดียว แต่ขึ้นกับสถานะความเค้นด้วย* ประเด็นที่สำคัญคือวัสดุที่คิดว่าเหนียว และใช้เกณฑ์การครากมาออกแบบนั้น จะกลับเป็นเปราะและวิบัติโดยการแตกหักได้ ถ้าชิ้นงานนั้นรับแรงหลายแกน *ความเหนียว ความเปราะของวัสดุในตารางคุณสมบัติของวัสดุ (σ_{ys}) และ elongation กำหนดโดยการทดสอบแรงดึงแกนเดี่ยว แต่การใช้งานจริงมักมีความเค้นหลายแกนผสมอยู่ และความเค้นหลายแกนนี้ ทำให้วัสดุเปลี่ยนพฤติกรรมเหนียว-เปราะได้ การเลือกวัสดุจากสมบัติในตารางจึงอาจไม่สอดคล้องกับสภาพที่ใช้งานจริง*



รูปที่ 1 วงกลมโมร์ของ uniaxial tensile test

(ก) วัสดุเหนียวปรากฏจุดคราก $\sigma_{ys} < \sigma_f$

(ข) วัสดุเปราะวิบัติคราก $\sigma_{ys} < \sigma_f$



รูปที่ 2 วงกลมโมร์ของความเค้น 3 ทิศทาง

(ก) วัสดุเหนียว ($\sigma_{ys} < \sigma_f$) เปลี่ยนสภาพเป็นเปราะ (วิบัติโดยการแตกหัก)

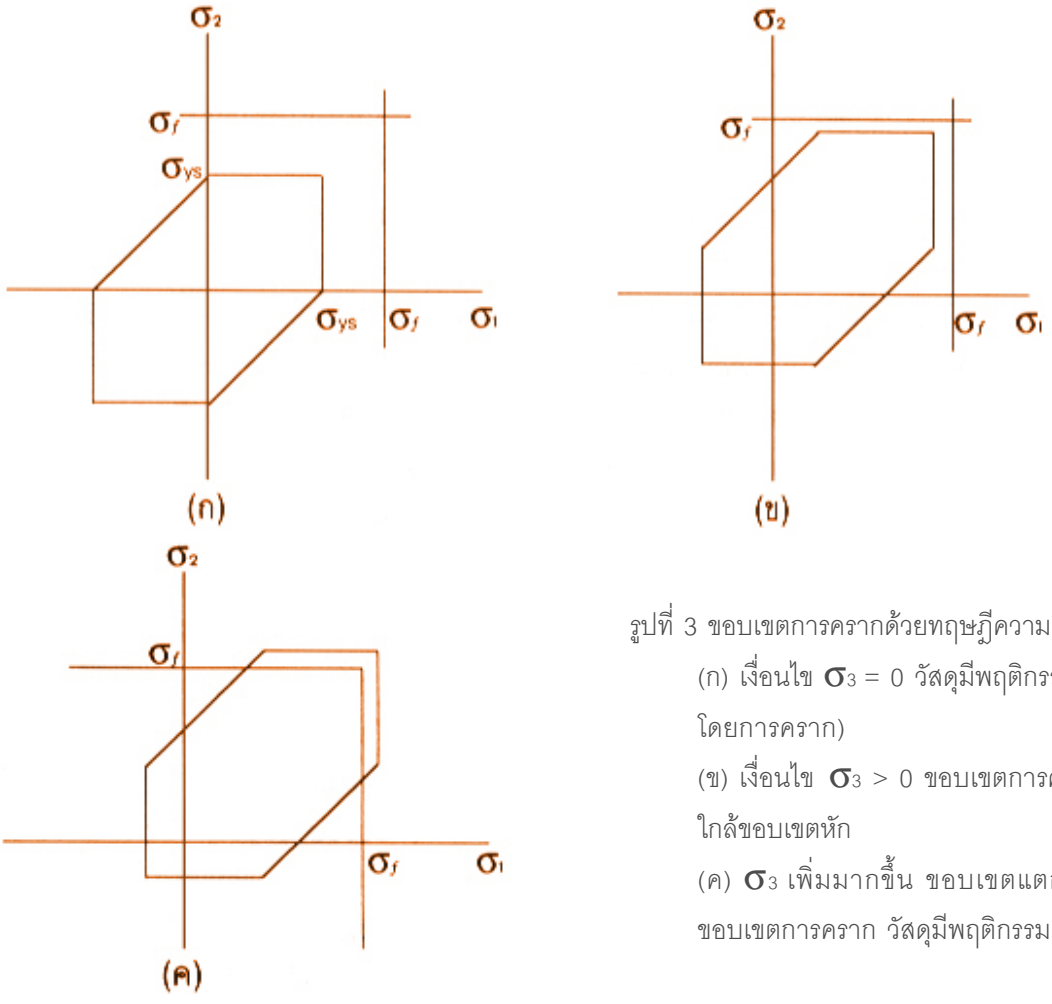
(ข) วัสดุเปราะ ($\sigma_{ys} < \sigma_f$) เปลี่ยนสภาพเป็นเหนียว (วิบัติโดยคราก)

ทฤษฎีวิบัติ : จุดอ่อนและการขาดความสมบูรณ์

การเลือกใช้วัสดุในทางวิศวกรรมมักจะเลือกวัสดุ "เหนียว" ซึ่งก็คือวัสดุที่ปรากฏจุดครากในการทดสอบดึงแกนเดี่ยว (uniaxial tensile test) ดังนั้นเมื่อคำนวณความแข็งแรงใช้งาน จึงคำนวณบนพื้นฐานของการคราก ทฤษฎีวิบัติที่เป็นที่นิยมใช้คือ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (maximum shear stress theory) และทฤษฎีพลังงานบิดเบี้ยวสูงสุด (maximum distortional energy theory) ทฤษฎีทั้งสองให้ผลใกล้เคียงกัน แต่ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดใช้ง่ายกว่ามาก จึงเป็นที่นิยม ทฤษฎีนี้มีหลักว่า "วัสดุที่รับแรงหลายแกนจะวิบัติเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่ามากกว่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดวิบัติของการทดลองความเค้นดึงแกนเดี่ยว" ซึ่งสรุปเป็นสมการการวิบัติได้ว่า การวิบัติเริ่มเกิดเมื่อ

$$|\sigma_1 - \sigma_2| = \sigma_{ys} \quad \text{หรือ} \quad |\sigma_2 - \sigma_3| = \sigma_{ys} \quad \text{หรือ} \quad |\sigma_3 - \sigma_1| = \sigma_{ys} \qquad (1)$$

โดยมีขอบเขตของการวิบัติ ดังรูปที่ 3(ก) ซึ่งเป็นรูปที่คุ้นเคยกันทั่วไป (รูปนี้เป็นขอบเขตตามเงื่อนไขแรกของสมการที่ (1) สำหรับเงื่อนไขอื่นก็ได้ขอบเขตรูปร่างเหมือนกัน) เมื่อพิจารณาจากวงกลมโมร์ ค่าทางซ้ายมือของสมการคือเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมโมร์ และค่าทางขวามือคือขอบเขตความเค้นดึงแกนเดี่ยวที่จุดครากขนาดวงกลมสัมพันธ์โดยตรงกับความเค้นเฉือนสูงสุด (ค่ารัศมี) ซึ่งอาจเกิดในระนาบใดระนาบหนึ่ง *จุดอ่อนของทฤษฎีนี้ (ซึ่งมักจะไม่ทราบกัน) คือ ไม่คำนึงความสัมพันธ์ของ* σ_1, σ_2, σ_3,*ที่ทำให้ตำแหน่งวงกลมโมร์เคลื่อนที่ไปมาแกน* σ *ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 ทฤษฎีนี้มองที่ขนาดวงกลมโมร์แต่เพียงอย่างเดียว เพราะไปเน้นที่ค่าความเฉือนสูงสุด ดังนั้นชิ้นงานที่คำนวณความแข็งแรง โดยทฤษฎีนี้จึงไม่ครากแต่จะวิบัติโดยการแตกหักได้* ดังรูป ที่ 2(ก) การแตกหักลักษณะนี้อันตรายมากกว่าการคราก ทฤษฎีวิบัติด้วยความเค้นเฉือนสูงสุดที่ใช้กันทั่วไปนั้นจึงขาดความสมบูรณ์ ความสมบูรณ์ขาดหายไปเพราะขอบเขตการวิบัติที่แสดงในรูปที่ 3(ก) เป็นขอบเขตที่ $\sigma_3 = 0$ อย่างไรก็ตามถ้า $\sigma_3 \neq 0$ รูปร่างของขอบเขตก็ยังคงเหมือนเดิม และมีขนาดเท่าเดิม แต่ตำแหน่งของขอบเขตจะเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 3(ข) ขอบเขตการครากรูปหกเหลี่ยมเคลื่อนที่ไปบนแกนของความเค้นอุทกสถิต (hydrostatic stress) ซึ่งเป็นแกนที่ทำมุม 45° กับ σ_1 และ σ_2 (เมื่อมองในระนาบของ σ_1, σ_2) ขอบเขตของการแตกหัก (σ_f) มีขนาดคงที่ และอยู่กับที่ดังนั้นการที่ $\sigma_3 \neq 0$ จะทำให้ขอบเขตการครากเคลื่อนตัวเข้าใกล้ขอบเขตการแตกหักดังรูปที่ 3 (ข) อย่างไรก็ตามวัสดุภายใต้เงื่อนไขนี้ก็ยังวิบัติโดยการคราก และทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดก็ยังคงใช้ได้อยู่ แต่ถ้า σ_3 มีค่าเพิ่มขึ้นขอบเขตการครากจะอยู่นอกเหนือขอบเขตการแตกหัก ดังรูปที่ 3 (ค) สภาวะเช่นนี้วัสดุจะวิบัติโดยการแตกหัก รูปที่ 3 (ก) - (ค) จริงๆ แล้วคือ การเคลื่อนที่ของวงกลมโมร์ ในรูปที่ 2(ก) นั่นเอง (ในรูปที่ 2(ก) ขอบเขตการครากกำหนดโดย τ_{ys}) ดังนั้น โดยสรุปแล้ว*การใช้เกณฑ์วิบัติในรูปที่ 3 (ก) ซึ่งละเลยอิทธิพลของ* σ_3 *และขอบเขตการแตกหัก* (σ_f) *เป็นความผิดพลาดอย่างมากของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด*



รูปที่ 3 ขอบเขตการครากด้วยทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด
(ก) เงื่อนไข $\sigma_3 = 0$ วัสดุมีพฤติกรรมเหนียว (วิบัติโดยการคราก)
(ข) เงื่อนไข $\sigma_3 > 0$ ขอบเขตการครากเคลื่อนเข้าใกล้ขอบเขตหัก
(ค) σ_3 เพิ่มมากขึ้น ขอบเขตแตกหักอยู่ภายในขอบเขตการคราก วัสดุมีพฤติกรรมเปราะ

สถานะความเค้นในเนื้อวัสดุนอกจากจะจำแนกเป็นตามประเภทเป็นความเค้นฉาก และความเค้นเฉือนแล้ว ยังสามารถจำแนกตามผลที่เกิดขึ้นกับวัสดุได้ด้วย เมื่อแรงมากระทำวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลง 2 ประการ คือ เปลี่ยนขนาดและเปลี่ยนรูปร่าง การเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 อย่างเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน แต่เกิดจากกลไกต่างกัน การเปลี่ยนขนาด (โดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง) เกิดจากระบบความเค้นอุทกสถิต (hydrostatic stress, σh) ส่วนการเปลี่ยนรูปร่าง (โดยไม่เปลี่ยนขนาด) เกิดจากระบบความเค้นเบี่ยงเบน (deviatoric stress, σd) ความเค้นอุทกสถิตคือความเค้นฉากที่มีขนาดเท่ากันในทุกทิศทาง ซึ่งหาได้จาก

$$\sigma h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \qquad (2)$$

และความเค้นเบี่ยงเบนคำนวณจาก

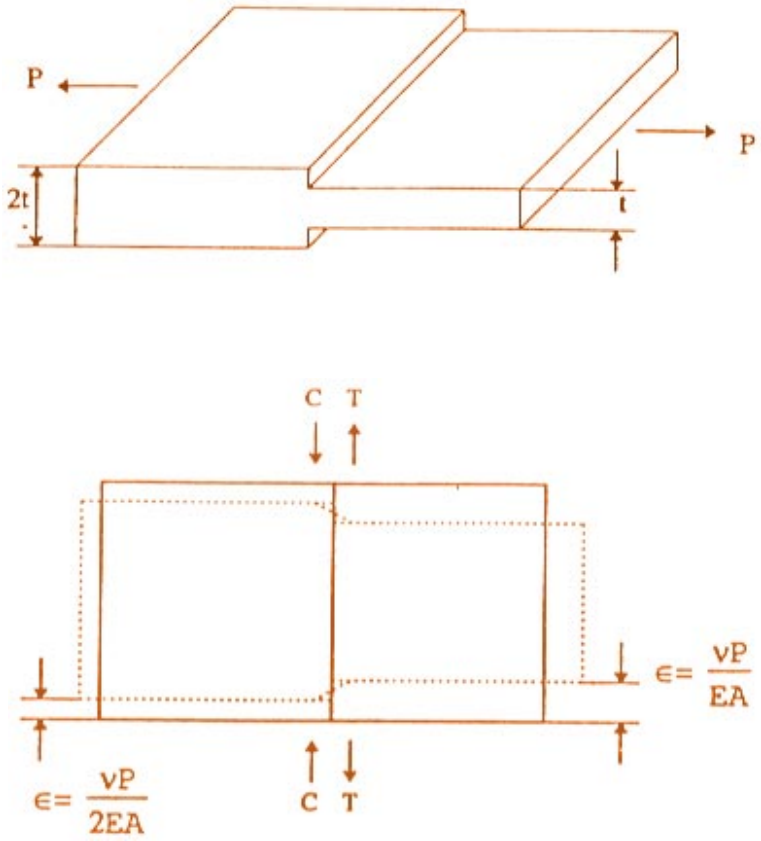
$$\sigma d = \sqrt{\frac{1}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \qquad (3)$$

ระบบความเค้นทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งหมายความว่า ความเค้นใดความเค้นหนึ่งเปลี่ยนแปลงได้ (เพิ่มขึ้นหรือลดลง) โดยไม่ต้องไปเปลี่ยนแปลงอีกความเค้นหนึ่ง กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ วัตถุอาจจะเปลี่ยนขนาดแต่เพียงอย่างเดียว โดยไม่เปลี่ยนรูปร่างหรือเปลี่ยนรูปร่าง แต่ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนขนาดก็ได้ ระบบความเค้นทั้งสองมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับขนาดและตำแหน่งของวงกลมโมร์ที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้ว ซึ่งหมายถึงว่า วงกลมโมร์อาจจะโตขึ้น (τ มากขึ้น) โดยไม่เปลี่ยนตำแหน่ง (จุดศูนย์กลางอยู่ที่เดิม) หรือวงกลมมีขนาดเท่าเดิมแต่เปลี่ยนตำแหน่งก็ได้ การโตของวงกลมคือ การเพิ่มโอกาสการคราก ส่วนการเปลี่ยนตำแหน่งคือ การเพิ่มโอกาสการแตกหัก อย่างไรก็ตามโอกาสการแตกหักเกิด เมื่อตำแหน่งของวงกลมเลื่อนไปทางขวามือเท่านั้น (ดูรูปที่ 2) นั่นคือ*วัสดุมีโอกาสวิบัติโดยการแตกหักมากขึ้น ถ้าความเค้นอุทกสถิตมีค่ามาก และความเค้นเบี่ยงเบนมีค่าน้อย* ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นหลักของทั้ง 3 แกนเป็นความเค้นดึง (พิจารณาสมการ (2) และ (3) ประกอบด้วย) กรณีที่เห็นได้ชัดคือ เมื่อวัสดุรับภาระแบบอุทกสถิตแต่เพียงอย่างเดียวนั้นวงกลมโมร์จะเป็นจุดซึ่งเป็นสภาพที่ไม่มีความเค้นเฉือน ถ้าเป็นความเค้นอุทกสถิตชนิดดึงวัสดุนั้นจะมีโอกาสวิบัติโดยการแตกหักเพียงประการเดียวและเกิดเมื่อจุด (วงกลมโมร์) เคลื่อนที่ไปชนขอบเขตการแตกหัก นั่นคือ วัสดุนั้นถึงแม้จะมีความแข็งแรงครากต่ำเพียงใดก็ไม่มีโอกาสวิบัติโดยการคราก แต่กลับแตกหักแบบวัสดุเปราะแทน ทฤษฎีวิบัติที่ใช้กันทั่วไปขาดความสมบูรณ์ในส่วนนี้

การแตกหักที่เกิดขึ้นในภาชนะทำจากเหล็กกล้า

ความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ : ความสำคัญของรูปทรง ภาระ และโครงสร้าง

ความเค้นระนาบ (plane stress) คือสภาวะที่ $\sigma_3 = 0$ แต่ $\varepsilon_3 = 0$ แต่ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \neq 0$ (และสำคัญมากเมื่อทั้ง 3 มีค่า > 0) โดยนัยนี้ความเค้นระนาบจึงมีความเค้นเฉือนสูง และมีโอกาสวิบัติโดยการคราก (ดูรูปที่ 3(ก) ประกอบ) และในทางกลับกันสภาพความเครียดระนาบนั้น วัสดุมีโอกาสวิบัติโดยการแตกหัก (รูปที่ 3(ค)) ความเครียดระนาบจึงเป็นอันตรายอย่างยิ่ง สภาพความเครียดระนาบอาจเกิดจากสาเหตุภายนอก เช่น ลักษณะของภาระหลายแกน (multiaxial load) ที่กระทำต่อชิ้นงาน และโครงสร้างที่ซับซ้อนที่ไม่มีอิสระในการยืด-หด จึงเกิดการดึง-ดันกันเอง หรือเกิดจากสาเหตุภายใน เช่น รูปทรงที่ชักนำให้เกิดความเค้น (induced stress) ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานแม้จะมีภาระกระทำเพียงแกนเดียว แต่ก็อาจเกิดสภาวะความเครียดระนาบได้ ดังปรากฏในรูปที่ 4 เมื่อชิ้นงานมีขนาดเปลี่ยนไปและรับแรงดึง



รูปที่ 4 การเกิดความเครียดระนาบจากความเค้นชักนำ

เมื่อพิจารณาจากด้านบน การยืดตัวของซีกขวาจะมากเป็น 2 เท่าของซีกซ้ายมือ (เพราะขนาดความเค้นต่างกัน 2 เท่า) เป็นผลให้การหดตัวในแนวขวางต่างกัน 2 เท่าเช่นกัน อย่างไรก็ตามวัสดุบริเวณที่มีการเปลี่ยนขนาดจะต้องหดเท่าๆ กัน เพื่อคงความต่อเนื่องของเนื้อวัสดุไว้ เงื่อนไขนี้จึงชักนำให้เกิดความเค้นดึงในซีกขวา (ซีกบาง) และความเค้นกดในซีกซ้าย ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาจากด้านข้างก็จะมีการชักนำให้เกิดความเค้นดึง และกดให้ลักษณะเดียวกัน สถานะของความเค้นที่ซีกขวา (ที่ใกล้รอยต่อ) จึงเป็นความเค้นใน 3 ทิศทาง (σ_1, σ_2, $\sigma_3 > 0$) พื้นผิวไม่สามารถหดตัวได้อย่างอิสระ และจัดเป็นสภาพความเครียดระนาบ ซึ่งวัสดุบริเวณนี้จะมีโอกาสวิบัติแบบแตกหักดังได้กล่าวมาแล้ว วัสดุบริเวณนี้จึงมีพฤติกรรมเปราะ (รูปที่ 2(ก)) ในทางกลับกันวัสดุซีกซ้ายมีแรงดึงหนึ่งทิศทางผสมแรงกดในอีกสองทิศทาง ทำให้มีโอกาสวิบัติคราก (รูปที่ 2(ข)) วัสดุบริเวณนี้จึงมีพฤติกรรมเหนียว จะเห็นได้ว่า ***วัสดุเดียวกันบนชิ้นงานเดียวกันนี้ ซีกหนึ่งมีพฤติกรรมเหนียว แต่อีกซีกหนึ่งซึ่งอยู่ติดถัดไปนั้นกลับมีพฤติกรรมเปราะ พฤติกรรมการวิบัติจึงขึ้นอยู่กับรูปทรงของชิ้นงานด้วย*** อิทธิพลของรูปทรง ภาระ และโครงสร้างของชิ้นงานที่ชักนำให้เกิดพฤติกรรมเหนียว-เปราะนี้ ไม่ได้รวมไว้ในทฤษฎีวิบัติความเค้นเฉือนสูงสุดที่ใช้กันทั่วไป ทฤษฎีดังกล่าวจึงเป็นทฤษฎีที่มีจุดอ่อน และขาดความสมบูรณ์ในการนำมาใช้เพื่อออกแบบป้องกันการวิบัติ

ถ้าศึกษากันให้ถ่องแท้แล้ว จะพบว่าชิ้นงานถึงแม้ไม่มีการเปลี่ยนรูปทรงก็มีสภาพเป็นความเครียดระนาบได้ ตัวอย่างที่เห็นเด่นชัดคือ การแตกหักแบบ cup and cone เมื่อชิ้นงานกลมเรียบรับแรงดึง (uniaxial tensile test specimen) ดังรูปที่ 5

รูปที่ 5 การขาดแบบ cup & cone อิทธิพลของความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ

เพื่อให้เข้าใจต้องพิจารณาเนื้อวัสดุข้างในเป็นชิ้นงานเล็กๆ จำนวนมากรับแรงดึงอยู่ ซึ่งเมื่อถูกยืดออกในแนวแกนก็จะพยายามหดตัวอยู่ในแนวขวาง แต่ไม่สามารถหดได้ เพราะเนื้อวัสดุที่อยู่ติดกันดึงเอาไว้ (เพื่อรักษาความต่อเนื่องของวัสดุ) จึงชักนำให้เกิดความเค้นดึงขึ้นโดยรอบ และเป็นเงื่อนไขของความเครียดระนาบ การวิบัติบริเวณนี้จึงเป็นการแตกหักออกในแนวตั้งฉากกับแรงดึงและแสดงพฤติกรรมเปราะ สำหรับเนื้อวัสดุที่ผิวโดยรอบ และบริเวณใกล้เคียงถัดเข้าไปนั้น มีขนาดความเค้นดึงชักนำน้อยกว่า เพราะผิวสามารถหดตัวได้อย่างอิสระ ความรุนแรงของความเครียดระนาบจึงมีน้อยกว่า วัสดุจึงวิบัติด้วยการครากโดยไถล (slip) ในแนว 45° กับแรงดึง (ทิศทางความเค้นเฉือนสูงสุด) และแสดงพฤติกรรมเหนียว รูปร่างการวิบัติโดยรวมจึงเป็น cup and cone การดึงชิ้นงานเรียบให้ขาดออกจากกัน จึงเป็นการวิบัติทั้งแบบเหนียวและแบบเปราะ

บริเวณที่วิบัติในแนว 45° นี้ เรียกว่า shear lip ซึ่งจะมีขนาดคงที่เสมอ (สำหรับวัสดุหนึ่ง) ดังนั้นงานขนาดใหญ่ (หนา) เมื่อวิบัติจะมีพื้นที่วิบัติด้วย การแตกหักมากกว่าพื้นที่วิบัติด้วยการคราก เมื่อเป็นดังนี้ภาพโดยรวมของชิ้นงานนั้นคือ "เปราะ" ในทางกลับกัน ถ้าชิ้นงานมีขนาดบางภาพโดยรวมของชิ้นงานคือ *"เหนียว" ดังนั้น ความเหนียวความเปราะนอกจากจะขึ้นกับรูปทรงแล้ว ยังขึ้นกับขนาดของชิ้นงานอีกด้วย* ตามปกติแล้วเรามักจะคิดว่าชิ้นงานขนาดใหญ่จะมี ความปลอดภัยสูงกว่า ซึ่งจะจริงถ้าใช้การครากเป็นเกณฑ์ เพราะชิ้นงานใหญ่จะช่วยลดระดับความเค้นลง แต่เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนพฤติกรรมจากเหนียวไปเป็นเปราะ เมื่อชิ้นงานใหญ่ขึ้นนั้นก็ไม่แน่ว่างานชิ้นนั้นจะปลอดวิบัติอีกต่อไป จริงอยู่ชิ้นงานอาจไม่คราก แต่ก็มีโอกาสแตกหักได้ ถ้าสถานการณ์อำนวยซึ่งมีอันตรายมากกว่าการคราก

Fracture Toughness : ในมุมมองของเกณฑ์วิบัติ

ในการวิบัติโดยการครากนั้น ความเค้นเฉือนที่จุดคราก (τ_{ys} หรือ $\sigma_{ys}/2$) คือ สมบัติเชิงกลที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนดการวิบัติ ในลักษณะเดียวกันนี้ การวิบัติโดยการแตกหักก็จะมีสมบัติเชิงกล คือ fracture toughness (K_{Ic}) เป็นเกณฑ์ K_{Ic} เป็นสมบัติของวัสดุที่หาได้จากการทดลอง (อย่างไรก็ตามค่า K_{Ic} มักไม่ปรากฏในตารางวิบัติวัสดุวิศวกรรมเหมือน σ_{ys})

วัสดุเมื่อมีรอยแตก สนามความเค้นที่บริเวณปลายรอยแตก ทำให้เกิดค่า stress intensity factor (K_I) ซึ่งมีสมการทั่วไป ดังนี้

$$K_I = C\sigma\sqrt{\pi a} \qquad (4)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่แปรตามรูปร่างชิ้นงาน, ลักษณะภาระและรอยแตก

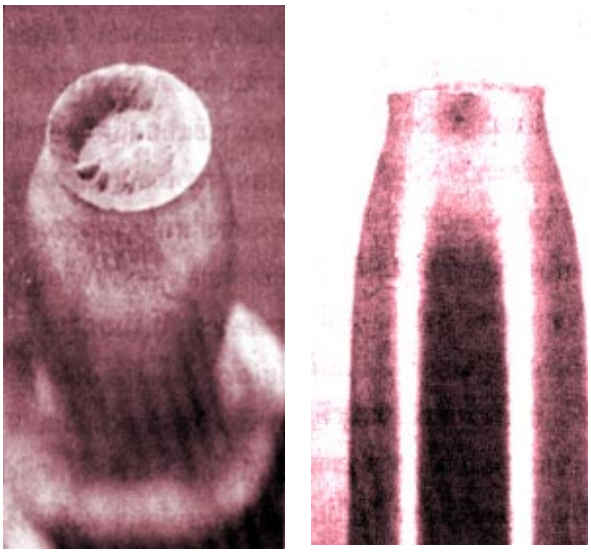
σ คือ ความเค้นภายนอกที่มากระทำต่อชิ้นงาน

a คือ ครึ่งความยาวรอยแตก

จะเห็นว่า ค่า K_I เพิ่มขึ้น ถ้าภาระ (σ) มากขึ้น (หรือรอยแตกยาวขึ้น เช่น กรณีของ fatigue) การแตกหักจะเกิดขึ้นเมื่อ K_I เพิ่มถึงค่า K_{Ic} ซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้น การออกแบบโดยใช้สมการ (4) เป็นเกณฑ์มีข้อดีหลายประการคือ ได้เชื่อมโยงรูปร่างชิ้นงาน ลักษณะภาระและรอยแตก (C) ขนาดของภาระ (σ) ขนาดรอยแตก (a) เข้ากับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (K_{Ic}) พารามิเตอร์ต่างๆที่นำมาพิจารณานี้สอดคล้องกับการใช้งานจริง กล่าวคือ ชิ้นงานจริงเมื่อใช้งานนั้นจะประกอบด้วย ค่า C, σ และ a (ทฤษฎีวิบัติโดยการครากมีจุดอ่อนประเด็นนี้) รอยแตกที่ปรากฏในสมการ (4) อาจเป็นรอยแตกที่เกิดจากการผลิต เช่น รอยบากบนชิ้นงาน หรือ รอยบกพร่อง (defect) ในเนื้อวัสดุก็ได้ เช่น โพรงที่เกิดจากการเชื่อมและ inclusion ในเนื้อโลหะเอง เป็นต้น ค่า K_{Ic} ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นเป็นค่าไม่คงที่แต่ขึ้นกับลักษณะภาระและสิ่งแวดล้อม

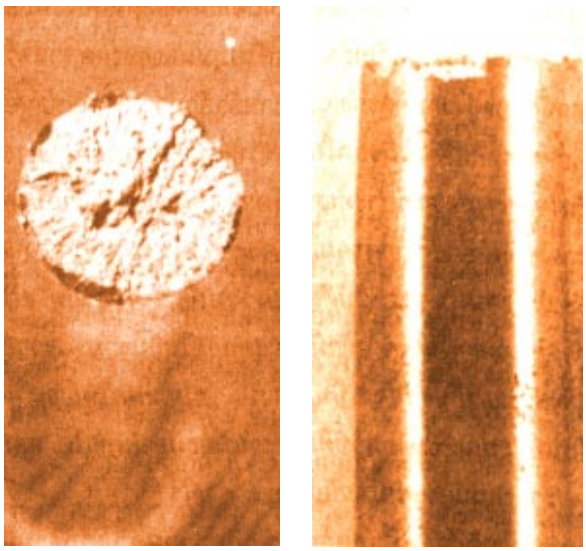
K_{Ic} ชื่อเต็มคือ plane strain fracture toughness หรือ plane strain critical stress intensity factor

ภาระแบบพลศาสตร์ (dynamic) จะทำให้ K_{IC} ลดลง อุณหภูมิต่ำมาก ๆ ก็จะทำให้ K_{IC} ลดลง ค่า K_{IC} ที่ลดลง หมายถึง วัสดุเปราะขึ้น วัสดุที่เคยเหนียวที่อุณหภูมิหนึ่งจะกลายเป็นเปราะที่อีกอุณหภูมิหนึ่ง ดังนั้น *การวิบัติโดยสมการ (4) นี้ จึงครอบคลุมปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมวิบัติของวัสดุ อันได้แก่ รูปร่างชิ้นงาน ขนาดและชนิดภาระ ขนาดรอยแตก (เนื่องมาจากกระบวนการผลิต) ลักษณะภาระ และสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน*



(a) (b)

ลักษณะมหัพภาพของการแตกหักดึงแบบเหนียว



(c) (d)

ลักษณะมหัพภาพของการแตกหักดึงแบบเปราะ

Fracture Toughness : ในมุมของการออกแบบ

การออกแบบเพื่อความแข็งแรงโดยใช้ fracture toughness นั้น ประกอบด้วย 3 มุมมอง คือ K_I, σ และ a ที่ประกอบกันเป็นสมการ (4) มุมมองทั้ง 3 คือ ส่วนประกอบสำคัญสำหรับการออกแบบ K_I คือ องค์ประกอบที่ใช้ตัดสินใจเลือกวัสดุ σ คือ ส่วนของภาระและ a คือ ส่วนของการผลิตและควบคุมคุณภาพ

เกณฑ์การออกแบบโดยให้วัสดุเป็นตัวเลือก กำหนดโดย

$$K_I = C\sigma\sqrt{\pi a} \qquad (5)$$

กล่าวคือถ้าเรารู้ขนาด σ จากขนาดชิ้นงานและภาระและขนาด a จากการตรวจสอบ (เช่นใช้เทคนิค x-ray radiography) เราสามารถคำนวณ K_{IC} จากสมการ (5) งานออกแบบนี้จะปลอดภัยเมื่อเลือกวัสดุให้มี K_{IC} มากกว่า K_I

เกณฑ์การออกแบบโดยให้ความเค้นเป็นตัวเลือกกำหนดโดย

$$\sigma_C = \frac{K_{IC}}{C\sqrt{\pi a}} \qquad (6)$$

นั่นคือผู้ออกแบบต้องเลือกวัสดุ (K_{IC}) และขนาด a ก่อน แล้วคำนวณความเค้นวิบัติจากสมการ (6) งานออกแบบจะปลอดภัยเมื่อชิ้นงานมีภาระต่ำกว่า σ_C

เกณฑ์การออกแบบโดยให้ขนาดรอยแตกเป็นตัวเลือกกำหนดโดย

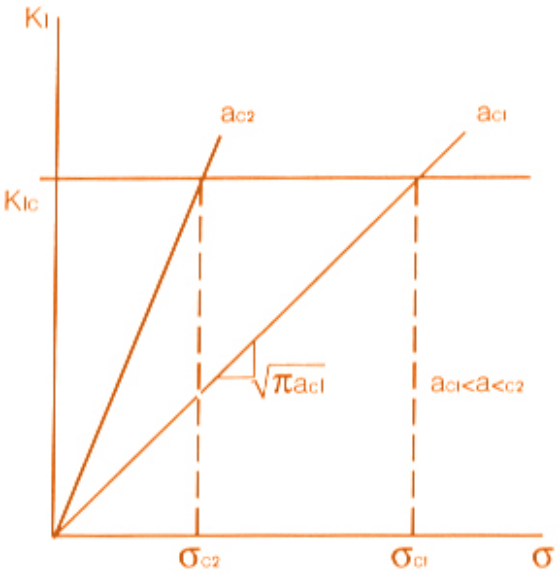
$$a_C = \frac{1}{\pi}\left[\frac{K_{IC}}{C\sigma}\right]^2 \qquad (7)$$

การออกแบบโดยสมการ (7) ต้องเลือกวัสดุ (K_{IC}) รวมทั้งกำหนดขนาดชิ้นงาน และภาระ (σ) ก่อนจึงจะคำนวณ a_C ได้ และ *ชิ้นงานออกแบบจะใช้งานได้ปลอดภัย ถ้าการตรวจคุณภาพสามารถตรวจพบรอยแตกที่ขนาดเล็กกว่า $2a_C$ ได้* (a ในสมการคือ ครึ่งความยาวรอยแตก ดังนั้นความยาวจริงของ รอยแตกคือ 2a)

การวิบัติ คือ การที่ความเค้นสูงถึงจุดวิกฤติ และรอยแตกยาวถึงจุดวิกฤติ ดังนั้นขณะที่เกิดวิบัติจะได้ความสัมพันธ์

$$K_{IC} = C\sigma_c \sqrt{\pi a_c} \qquad (8)$$

ในสมการ (8) นี้มีเพียง K_{IC} เท่านั้นที่เป็นค่าคงที่ เพราะเป็นสมบัติของวัสดุ ขนาด σ_c จะแปรกับ a_c ดังรูปที่ 6 กล่าว คือ ถ้ารอยแตกขณะแตกหักมีขนาดเล็กความเค้นที่ทำให้แตกหักก็จะมาก และถ้ารอยแตกมีขนาดใหญ่ก็จะทน ความเค้นได้น้อย ในการออกแบบจริงจะมีตัวแปร 3 ตัว คือ วัสดุ (K_{IC}) ซึ่งเป็นตัวกำหนดราคาและความยากง่ายในการผลิต ภาระ (σ) ซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาด น้ำหนักหรือความสามารถทำงานได้และรอยแตก (a) ซึ่งเป็นตัวกำหนดขีดความสามารถของอุปกรณ์ตรวจรอยแตก หรือการลงทุนด้านเครื่องมือตรวจสอบ ผู้ออกแบบจะต้องเลือกตัวแปร 2 ใน 3 ตัวนี้ก่อนแล้ว จึงจะคำนวณหาตัวแปรที่ 3 จากสมการ (5), (6) หรือ (7) เช่น การออกแบบเครื่องบินนั้น วัสดุจะถูกเลือกก่อน เพราะข้อจำกัดเรื่องน้ำหนัก และภาระ จะถูกเลือกเป็นลำดับถัดไปคือภาระต้องสูง เพื่อลดน้ำหนัก (ลดขนาด) ในขณะที่มีสมรรถนะสูง (บรรทุกผู้โดยสารได้มาก) ดังนั้นผู้ออกแบบจะคำนวณขนาดรอยแตกวิกฤติที่จุดวิบัติจากสมการ (7) แล้วนำผลคำนวณไปกำหนดขีดความสามารถตรวจสอบรอยแตกของเครื่องมือตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (nondestructive testing) เช่น พบว่ารอย แตกวิกฤติมีขนาด 10 มม. ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย เครื่องมือจะต้องตรวจพบรอยแตกขนาดน้อยกว่า 10 มม. ได้ เช่น 3 มม. เป็นต้น (ในกรณีนี้ค่า safety factor $= \sqrt{10/3}$



รูปที่ 6 เกณฑ์วิบัติกำหนดโดยกลศาสตร์แตกหัก K_{IC}

การวิบัติทางวิศวกรรมเกือบทั้งหมดเป็นปรากฏการณ์ที่มาจากการล้าของวัสดุ (fatigue) ชิ้นงานเมื่อออกแบบผลิตและนำออกใช้ครั้งแรกจะไม่วิบัติ (เพราะถ้าวิบัติก็ไม่นำออกมาใช้) ***แต่การไม่วิบัติในการใช้ครั้งแรกไม่ได้หมายความว่าจะไม่วิบัติในวันหน้า*** การที่ชิ้นงานทางวิศวกรรมทั้งหลายมีอายุใช้งานก็แสดงว่าเป็นการวิบัติที่ใช้เวลา (time delay failure) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 พวกคือ วิบัติเมื่อภาระแบบสถิต และวิบัติเมื่อภาระแบบวัฏจักร การวิบัติโดยภาระแบบสถิตมีสาเหตุหลายประการ เช่น วัสดุเปลี่ยนสภาพจากเหนียวเป็นเปราะเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งเป็นผลจากสภาพแวดล้อมใช้งานได้ทำลายความเหนียว (embrittlement) หรือเป็นผลจากการเกิดรอยแตกเนื่องจากความเค้นในสภาวะกัดกร่อน (stress corrosion cracking)

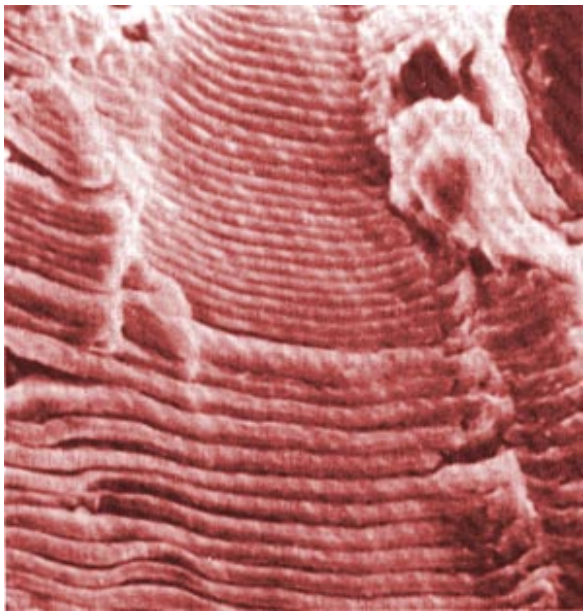
การวิบัติเมื่อภาระวัฏจักรหรือที่รู้จักกันดีว่าเกิดเป็นการล้าของวัสดุ การออกแบบเพื่อป้องกันความล้า จึงเป็นเรื่องสำคัญเรื่องหนึ่งในการออกแบบ เพื่อความแข็งแรง (design for strength) (หลักสูตรบางมหาวิทยาลัยให้ความสำคัญกับความล้าน้อยมากทั้งๆที่การวิบัติส่วนใหญ่เกิดจากความล้า) การออกแบบเพื่อให้ทนความล้า คือให้ความเค้นน้อยกว่า endurance limit ที่ได้จาก S-N curve และคำนวณโดยมีปัจจัยต่างๆ มาประกอบ เช่น คุณภาพผิว เป็นต้น แต่ในมุมมองของกลศาสตร์แตกหักมองปรากฏการณ์ของความล้าลึกกว่า S-N curve โดยพยายามเข้าใจถึงกลไกการวิบัติของความล้า *การเข้าใจอย่างถ่องแท้ทำให้เราได้คำตอบต่างๆมากมาย ไม่เพียงแต่เชื่อว่า ถ้าความเค้นต่ำกว่า endurance limit แล้วชิ้นงานนั้นจะไม่วิบัติด้วยความล้า (ซึ่งไม่จริง!) คำตอบเหล่านี้ได้แก่ ถ้ามีรอยแตกอยู่ในชิ้นงาน ความแข็งแรงของชิ้นงานจะเป็นอย่างไร รอยแตกใหญ่ขนาดไหนที่จะทำให้ชิ้นงานวิบัติ ชิ้นงานนี้จะมีอายุเท่าใด และควรวางแผนตรวจสอบซ่อมบำรุง อย่างไร*

ในวิชากลศาสตร์แตกหักถือว่าวัสดุวิศวกรรมมีรอยบกพร่อง (defect) อยู่ในตัว ดังนั้นชิ้นงานเรียบ (คุณภาพผิวดี) และไม่มี Stress Concentration (เช่น รูหรือรอยบาก) ก็ไม่ได้หมายความว่าชิ้นงานนั้นไม่มีรอยแตก

(Crack) รอยแตกในเนื้อวัสดุอาจเกิดจาก inclusion ยิ่งถ้าวัสดุผ่านการขึ้นรูปเช่น การรีดทำให้ inclusion มีลักษณะแบนยาวฝังในเนื้อวัสดุและเปรียบเสมือนรอยแตก หรือแม้แต่ในระดับโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เช่น ดิสโลเคชั่น (dislocation) ก็ถือเป็นร่องรอยบกพร่องที่จะชักนำให้เกิดรอยแตกได้ *กลศาสตร์แตกหักมองพฤติกรรมความล้าว่าเป็นกระบวนการเกิดรอยแตก (crack initiation) รอยแตกเติบโตระดับมหัพภาพ (crack growth) จนรอยแตกมีขนาดวิกฤติซึ่ง เป็นจุดวิบัติของชิ้นงาน* จะเห็นได้ว่าในมุมมองนี้ต่างกับ S-N curve ตรงที่มองว่า ไม่มีชิ้นงานใดมีอายุอนันต์ (infinity) และอธิบายว่าที่ความเค้นต่ำกว่า หรือเท่ากับ endurance limit นั้น แท้จริงแล้วรอยแตกเติบโตช้ามากจนไม่มีนัยสำคัญใน S-N curve (slope = 0) อายุชิ้นงานไม่สามารถเป็นอนันต์ได้ ในความเป็นจริงแล้วรอยแตกกำลังโตอย่างช้าๆ และสักวันหนึ่งก็จะวิบัติ *วิชากลศาสตร์แตกหักจึงใช้คำนวณอายุชิ้นงานจากอัตราการเติบโตของรอยแตก* (crack growth rate, da/dN) อัตราการเติบโตนี้ไม่คงที่ รอยแตกขนาดเล็ก (เมื่อเริ่มต้น) จะมีอัตราการเติบโตช้ามาก และรอยแตกขนาดใหญ่จะโตเร็วมาก นั่นหมายความว่าอายุชิ้นงานขึ้นอยู่กับความละเอียดของเครื่องมือตรวจรอยแตกในการตรวจคุณภาพที่ผลิตออกจากโรงงาน และอัตราการเติบโตนี้เองจะช่วยกำหนดแผนการตรวจสอบ (เช่น การตรวจสอบเครื่องบินด้วยรังสีเอ็กซ์ตามระยะชั่วโมงใช้งาน) เพื่อให้มั่นใจว่ายังปลอดภัยอยู่ หรือแผนการเปลี่ยนชิ้นส่วนก่อนที่จะวิบัติ ซึ่งเป็นการบำรุงรักษาเชิงป้องกันนั่นเอง

τ_{ys} VS. K_{Ic} : ได้อย่างเสียอย่าง

ในตอนต้นของบทความได้จำแนกการวิบัติออกเป็นการคราก และการแตกหัก การครากมีขอบเขตกำหนดโดย τ_{ys} โดยมีทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดมาสนับสนุน การแตกหักกำหนดขอบเขตโดย σ_f และได้ใช้ทฤษฎีกลศาสตร์แตกหัก $K_I = C\sigma\sqrt{\pi a}$ มาสนับสนุนโดยกำหนดสมบัติเชิงกล K_{Ic} มาเป็นเกณฑ์วิบัติ วัสดุที่มี τ_{ys} สูงจะทนการครากได้ดี ส่วนวัสดุที่มี K_{Ic} สูงก็จะทนการ แตกหักได้ดี ดังนั้น *วัสดุที่ดีควรจะมี τ_{ys} และ K_{Ic} สูงทั้ง 2 ค่าจึงจะทนการวิบัติทั้งสองประการได้ดี อย่างไรก็ตามวัสดุวิศวกรรมทั่วไปถ้ามี τ_{ys} สูงก็จะเปราะ (K_{Ic} ต่ำ)* และวัสดุที่มี K_{Ic} สูงก็จะมี τ_{ys} ต่ำ แม้กระทั่งเหล็กเบอร์เดียวกัน ถ้านำไปผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงคราก (เช่น ผ่านกระบวนการเชิงความร้อนและเชิงกล) ก็จะมี K_{Ic} ลดลง ในการออกแบบโดยใช้การครากเป็นเกณฑ์นั้น ถ้าขนาดชิ้นงานถูกจำกัดผู้ออกแบบก็มักจะเลือกใช้เหล็กความแข็งแรงสูง (high yield strength) มาใช้งานเพื่อให้มีค่าความปลอดภัย (safety factor) แม้จะรับภาระสูง โดยอาจจะละเลยความจริงที่ว่าเหล็กนี้จะเปราะ (K_{Ic} ต่ำ) เมื่อนำไปใช้งานที่มีภาระสูง ถึงแม้จะไม่คราก แต่จะวิบัติโดยการแตกหัก เมื่อย้อนกลับไปดูสมการ (4) วัสดุที่มี K_{Ic} ต่ำ นอกจากจะรับภาระได้ต่ำแล้ว ยังทนรอยแตกขนาดใหญ่ไม่ได้ด้วย ซึ่งหมายความว่า การนำวัสดุความแข็งแรงสูงมาใช้ เราต้องระมัดระวังในการออกแบบ และการผลิตไม่ให้มีรอยแตกขนาดใหญ่เกิดขึ้น รวมทั้งจะต้องควบคุมคุณภาพวัตถุดิบและผลผลิตสุดท้ายอย่างเข้มงวด นอกจากนั้นวัสดุความแข็งแรงสูงยังไม่เหมาะกับงานที่รับภาระวัฏจักรอีกด้วย เพราะรอยแตกในเนื้อวัสดุจะมีอัตราการเติบโตเร็วทำให้อายุการใช้งานสั้น *ด้วยเหตุทั้งปวงนี้ทำให้วัสดุความแข็งแรงสูงไม่เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการออกแบบให้ทนทานการแตกหัก* ข้อเท็จจริงนี้ยังไม่ตระหนักโดยทั่วไปในหมู่ผู้ออกแบบ และหลายครั้งจะพบว่า การออกแบบเพื่อมุ่งให้ทนทานการครากแต่เพียงอย่างเดียว แต่ไม่ทราบว่าวัสดุที่นำมาใช้นั้นไม่ครากก็จริง แต่จะแตกหักกลับทำให้ชิ้นงานอันตรายมากขึ้น



ลักษณะของสไตรเอชั่น (striation) อันเนื่องมาจากความล้าในอะลูมิเนียมผสมชนิด 745-T7651

สรุป

ในบทความนี้ได้แยกแยะให้เห็นว่า การวิบัติของวัสดุเป็นปรากฏการณ์ของการคราก และการแตกหัก ปรากฏการณ์ทั้ง 2 นี้ เกิดจากกลไกต่างกันและเป็นอิสระต่อกัน การครากเกิดจากความเค้นเฉือน และการแตกหักเกิดจากความเค้นฉากดึง สถานะของความเค้นในวัสดุอาจมีโอกาสที่ความเค้นเฉือนสูง แต่ความเค้นฉากดึงต่ำ หรือในทางกลับกัน มีความเค้นเฉือนต่ำ แต่กลับมีความเค้นฉากดึงสูงก็ได้ ดังนั้นวัสดุจึงมีโอกาสที่จะวิบัติทั้งโดยการคราก และการแตกหัก *ทฤษฎีวิบัติที่อยู่ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ทั่วไปให้ความสำคัญแต่เพียงการวิบัติโดยการครากเท่านั้น จึงไม่เพียงพอสำหรับการออกแบบเพื่อความแข็งแรง การละเลยโอกาสการวิบัติแบบแตกหักนับว่ามีอันตรายมาก เพราะการแตกหักมีโอกาสเกิดก่อนการครากได้* ดังนั้นวัสดุที่ใช้เกณฑ์การครากมาออกแบบไม่ใช่ว่าจะไม่วิบัติ แต่อาจจะวิบัติโดยการแตกหัก (ถ้าสภาวะความเค้นเหมาะสม) การแตกหักโดยไม่ครากเป็นปรากฏการณ์ของวัสดุเปราะ ซึ่งเป็นการวิบัติที่อันตรายมาก เพราะพลังงานที่สะสมในโครงสร้างถูกปลดปล่อยออกมาทันทีทันใด ยิ่งถ้าเป็นโครงสร้างที่สะสมพลังงาน เช่น ถังความดัน ก็จะยิ่งอันตราย

ความเหนียวหรือความเปราะของวัสดุ มิใช่คุณสมบัติคงที่ของวัสดุ แต่ความเหนียว ความเปราะเป็นพฤติกรรมของวัสดุที่ควบคุมด้วยสถานะความเค้นสภาวะแวดล้อม และลักษณะของภาระ ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบทางวิศวกรรมจึงละเลยความรู้กลศาสตร์ แตกหัก (fracture mechanics) ไม่ได้ ในตอนท้ายของบทความนี้ได้นำเสนอหลักการที่เป็นหัวใจของการใช้กลศาสตร์แตกหักมาออกแบบชิ้นงาน หลักการแม้จะดูง่ายแต่ศาสตร์นี้เป็นศาสตร์ที่ลึกซึ้งมาก หลักการแม้จะดูง่ายแต่ศาสตร์นี้เป็นศาสตร์ที่ลึกซึ้งมาก ทั้งนี้เพราะกลศาสตร์แตกหักเป็นศาสตร์ที่อธิบายถึงพฤติกรรมของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อม (อุณหภูมิความชื้นและสารเคมี) การใช้งาน (แรงสถิต พลศาสตร์ วัฏจักร และแรงผสม) รูปร่างชิ้นงาน (ความหนา การเปลี่ยนรูปร่าง การเกิดความเค้นชักนำและการชักนำให้เกิดรอยแตกระหว่างการใช้งาน) วัสดุ (ค่า K_{Ic} ความเร็วของการเติบโตของรอยแยก) การผลิต (ความเค้นตกค้างจากการผลิต การเปลี่ยนโครงสร้างวัสดุจากการผลิต สมบัติ anisotropic จากการขึ้นรูปและความอ่อนแอของรอยเชื่อม) และการตรวจสอบ (เทคนิคตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เพื่อหาขนาดรอยแตก การทำนายอายุการใช้งาน และกำหนดแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกัน) ถึงแม้ว่ากลศาสตร์แตกหักจะเป็นเรื่องสำคัญ แต่ก็ดูเหมือนว่าไม่เฉพาะภายใน ประเทศเรามีองค์ความรู้ด้านนี้น้อยเท่านั้น *วิศวกรส่วนใหญ่ ของเราก็ไม่ได้ตระหนักว่า วัสดุจะวิบัติและมีโอกาสวิบัติโดยการแตกหักได้*

เอกสารอ้างอิง

1. สุธีระ ประเสริฐสรรพ์. กลศาสตร์แตกหัก, คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2535. 273 หน้า.

2. Collin, J.A., Failure of Materials in Mechanical Design., John Wiley & Sons. N.Y. 1981.

M