

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสะพานคอมโพสิตหลายประเภททั้งการศึกษาจากตัวสะพานตามหน่วยงานจริง การศึกษาจากแบบจำลองที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรม หรือว่าจะเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้น้ำหนักแบบคงที่ หรือใช้น้ำหนักแบบเคลื่อนไหวในการพิจารณา ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

อลัมพาลลี (Alampalli, 2006) ได้ทำการศึกษาสะพานคอมโพสิตแบบโครงข้อหมุน ที่ทำการเปลี่ยนแผ่นพื้นจากคอนกรีตเสริมเหล็ก ไปเป็น CFRP Composite deck โดยจะใช้น้ำหนักจากรถบรรทุกจริงในการวิ่งผ่านสะพาน ซึ่งผลที่ได้ แสดงให้เห็นว่าสะพานนั้นจะมีค่าการแอ่นตัวลดลงร้อยละ 30 เมื่อทำการเปลี่ยนแผ่นพื้นของสะพานคอมโพสิตเป็น CFRP composite deck ต่อมา (Chiewanichakorn, 2007 : 1475-1489) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของสะพานคอมโพสิตแบบโครงข้อหมุนที่ได้มีการเปลี่ยนพื้นของสะพานไปเป็น CFRP composite deck โดยจะพิจารณาความล้าที่เกิดขึ้นในโครงข้อหมุนของสะพาน โดยจะนำค่าของความล้าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองของสะพาน มาใช้ในการหาอายุการใช้งานของสะพานโดยใช้มาตรฐานของ AASHTO ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิเคราะห์จากแบบจำลองของสะพานที่มีพื้นเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว จะเห็นว่า สะพานคอมโพสิตที่เปลี่ยนพื้นสะพานเป็น CFRP composite deck นั้นจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสะพานที่มีพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการพิจารณาผลของความล้าของสะพานคอมโพสิตนั้น (Tsiatas, 2002) ได้ทำการศึกษาความล้า และหาอายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิต โดยใช้มาตรฐานในการเปรียบเทียบ 4 วิธี คือ AASHTO Guide Specifications , BAR7 , The Lehigh method และ Fracture mechanics (LEFM) ซึ่งจะพิจารณาสะพานแบบเดียว และพิจารณาจากความล้าของสะพาน โดยผลที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO Guide Specifications และ Fracture mechanics (LEFM) นั้นจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากกว่าอีก 2 วิธีที่เหลือ (ชาคริตพันธ์ ไม้พันธุ์, 2551) ได้ทำการศึกษาสะพานคอมโพสิต โดยพิจารณาความล้า และหาอายุการใช้งานของสะพานจากแบบจำลอง เปรียบเทียบกับมาตรฐาน AASHTO ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองจะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำมากกว่า

ทาวาคโคลิซาเดด (Tavakkolizadeh, 2003 : 186-196) ได้ทำการศึกษาถึงผลการเสริมความแข็งแรงของสะพานคอมโพสิตโดยใช้วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย เพื่อลดค่าหน่วยแรงความล้า (Fatigue stress) ของคานเหล็ก และยังสามารถลดการเกิดรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นของคานเหล็กได้ ซึ่งในการพิจารณาสะพานคอมโพสิตที่มีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น โดยที่มีความกว้างของรอยร้าวที่ 0.90 เซนติเมตร ซึ่งที่ผ่านมานั้นยังไม่มีใครทดสอบความแข็งแรงของสะพานที่มีรอยร้าวเกิดขึ้น และได้ทำการศึกษาคานเหล็กของสะพานคอมโพสิต โดยทำการเลือกพิจารณาคานเหล็กที่เกิดรอยร้าวที่กึ่งกลางคาน โดยที่จะพิจารณาคานที่มีความยาว 1.2 เมตร และมีแรงกระทำแบบ 4 จุด ซึ่งแรงกระทำจะมีขนาดแตกต่างกันออกไป โดยจะพิจารณาทั้งกรณีที่ไม่มีการเสริมกำลัง และกรณีที่มีการเสริมกำลัง โดยใช้วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย และจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคานเหล็กที่เกิดรอยร้าวเกิดขึ้นนั้น จะทำให้ตัวคานเหล็กมีค่าหน่วยแรงที่สูงกว่า คานเหล็กที่ไม่มีรอยร้าว ส่วนคานเหล็กทำการเสริมความแข็งแรงด้วย CFRP นั้นจะทำให้คานเหล็กสามารถรับจำนวนรอบของน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่า คานเหล็กที่ไม่ได้เสริมความแข็งแรง แต่อย่างไรก็ดีการศึกษานี้ก็เป็นเพียงการศึกษาเพียงแค่ว่าส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิตเท่านั้นซึ่งเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ และน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดนั้นก็ไม่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

2.2 สะพานคอมโพสิต ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กวางบนคานเหล็ก

2.2.1 บทนำ

ในศตวรรษที่ 20 การก่อสร้างสะพานคอมโพสิต ได้เริ่มมีการพัฒนาขึ้นอย่างมาก โดยในช่วงแรกของการพัฒนาการก่อสร้างสะพานคอมโพสิต ได้เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1950 โดยได้ใช้เป็นส่วนหนึ่งในการขยายโครงข่ายทางไปรษณีย์ของยุโรปในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งได้รับความเสียหายจากสงครามระหว่างเยอรมันและฝรั่งเศส จึงทำให้ต้องมีการสร้างถนนขนาดใหญ่ รางรถไฟ และสะพานขึ้นมาใหม่ ซึ่งสะพานนั้นจำเป็นต้องสร้างให้รวดเร็ว ดังนั้นสะพานคอมโพสิตจึงเป็นสะพานที่ได้มีการสร้างเพิ่มมากขึ้น เพราะใช้เวลาในการสร้างที่รวดเร็วกว่าสะพานประเภทอื่น ๆ สะพานคอมโพสิต คือ สิ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เหล่านี้ โดยในการก่อสร้างนั้นจะมีน้ำหนักที่ไม่มากและมีน้ำหนักที่น้อยกว่าสะพานที่โครงสร้างทั้งหมดเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในปัจจุบันสะพานคอมโพสิตได้มีการก่อสร้างอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนมากจะใช้เพื่อข้ามแม่น้ำ คลอง ถนน โดยรูปแบบของสะพานคอมโพสิตนั้นแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 รูปแบบของสะพานคอมโพสิต (Brent, 2003)

สะพานคอมโพสิตที่สร้างขึ้นในปัจจุบันนั้น จะเกิดความเสียหายส่วนใหญ่เนื่องจากความล้า ซึ่งความล้าจะเกิดได้เนื่องจากสะพานคอมโพสิตรับน้ำหนักบรรทุก เป็นเวลานาน โดยที่รูปแบบของความเสียหายของสะพานคอมโพสิตนั้นจะแสดงดังภาพที่ 2.2

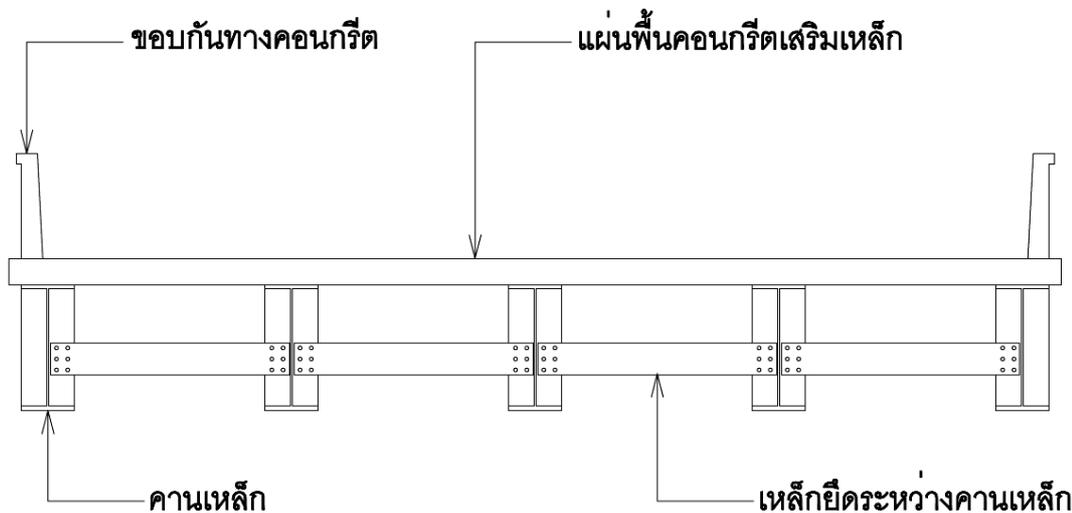


ภาพที่ 2.2 ความเสียหายของสะพานคอมโพสิตเนื่องจากความล้า (Dawson, 2005)

2.2.2 ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต

จากความก้าวหน้าทางการออกแบบโครงสร้างของสะพานในปัจจุบัน ส่งผลให้ประเภทของสะพานค่อนข้างมีรูปแบบที่หลากหลาย และทำให้ต้นทุนการก่อสร้างสะพานคอมโพสิตต่ำลง ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของต้นทุนในด้านแรงงานหรือต้นทุนในด้านวัสดุ โครงสร้างสะพานคอมโพสิต เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการก่อสร้าง ซึ่งตัวสะพานจะประกอบไปด้วยส่วนหลักต่าง ๆ คือ แผ่นพื้นคอนกรีต

เสริมเหล็ก (Concrete Deck) คานเหล็ก (Steel girder) ซึ่งจะเป็นเหล็กรูปตัวไอ (I-shape) และจะมีเหล็กยึดระหว่างคานเหล็ก เรียกว่า Diaphragm ซึ่งแสดงดังในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ส่วนประกอบของสะพานคอมโพสิต

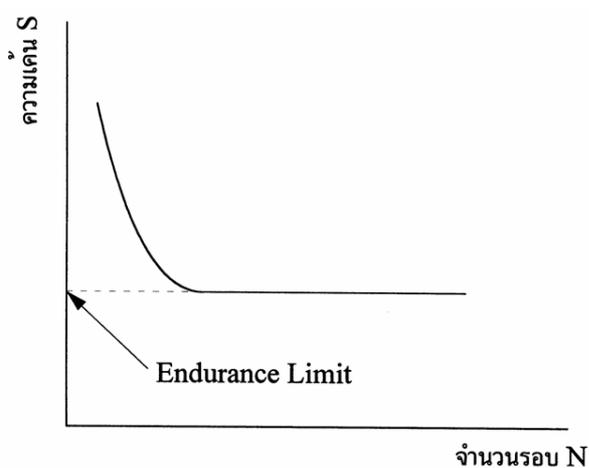
2.3 ความล้า (Fatigue)

เมื่อวัสดุถูกแรงซึ่งต่ำกว่าค่ากำลังสูงสุด (Ultimate Strength) มากกระทำกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ กันก็อาจจะเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้า (Fatigue) ขึ้น ความล้าที่เกิดในวัสดุนี้เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่าง ๆ เพราะตลอดอายุงานของเครื่องจักร เช่น เครื่องยนต์ สวิตซ์รีเลย์ ฯลฯ จะต้องเกิดหน่วยแรงสลับไปสลับมาเป็นล้าน ๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของมันได้ ขบวนการเกิดความล้าที่แท้จริงยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก แต่จากการศึกษาพบว่าความล้าจะเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีหน่วยแรงรวมศูนย์ (Stress Concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สอง เมื่อมีหน่วยแรงเข้าไปซ้ำมารอยแตกนี้ก็จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่ากำลังสูงสุด วัสดุก็จะแตกหักจากกัน (กองวิชาวิศวกรรมสรรพาวุธ, 2551)

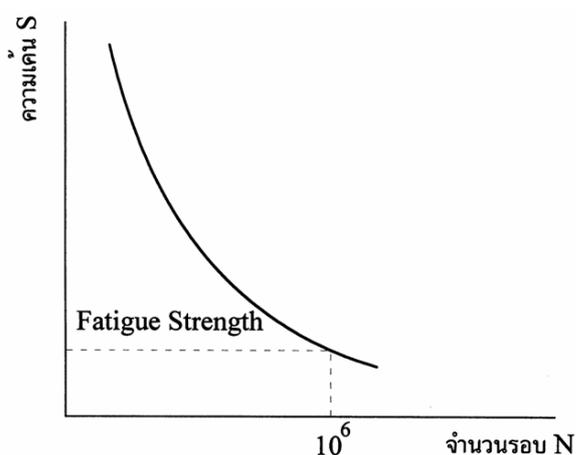
ถ้าเรากำหนดจำนวนรอบของหน่วยแรงที่ทำเข้าไปซ้ำมาแล้ว (โดยปกติจะใช้ที่ค่า $10^6 - 10^8$ รอบ) ค่าหน่วยแรงที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของหน่วยแรงรอบนั้น ๆ เราเรียกว่า Fatigue Strength สำหรับโลหะโดยเฉพาะพวกเหล็ก จะมีค่าหน่วยแรงอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้หน่วยแรงต่ำกว่านี้แล้ว ไม่ว่าจะจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใด วัสดุจะไม่แตกออก ค่าหน่วยแรงนี้เรียกว่า Endurance Limit

การทดสอบความล้ามีอยู่หลายวิธี แต่โดยหลักการจะเหมือนกันคือ จะให้แรงกระทำเป็นรอบกับชิ้นทดสอบ โดยให้เกิดหน่วยแรงค่าต่าง ๆ แล้วบันทึกจำนวนรอบ (Cycles) ที่วัสดุจะทนได้ไว้

จากนั้นนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 2.4 เรียกว่ากราฟหน่วยแรงกับจำนวนรอบ (S-N Curve) สำหรับโลหะในกลุ่มเหล็กเกือบทั้งหมดและโลหะที่ไม่ใช่เหล็กบางชนิด จะมี Endurance Limit ดังรูป 2.4 (ก) ส่วนพวกโพลีเมอร์และโลหะที่ไม่ใช่เหล็กหลายชนิดจะไม่มี Endurance Limit ดังรูป 2.4 (ข) สำหรับโลหะที่มี Endurance limit นั้น ค่า Endurance limit จะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังสูงสุด กล่าวคือ พวกเหล็กกล้าที่ขึ้นรูปแล้ว จะมีค่า Endurance limit ครึ่งหนึ่งของค่ากำลังสูงสุด ส่วนโลหะผสมทองแดงจะอยู่ประมาณร้อยละ 25-50 ของกำลังสูงสุด สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต้องรับแรงสลับ ก็คงต้องคำนึงถึงเรื่องของความล้าด้วย และพยายามออกแบบให้รับหน่วยแรงต่ำกว่า Endurance Limit หรือ Fatigue Strength ตามแต่กรณี



(ก) ในวัสดุที่มี Endurance Limit



(ข) ในวัสดุที่ไม่มี Endurance Limit

ภาพที่ 2.4 กราฟหน่วยแรงกับจำนวนรอบ (S-N Curve) (กองวิชาวิศวกรรมสรรพาวุธ, 2551)

2.4 วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)

คอมโพสิตเป็นวัสดุที่เกิดจากการนำวัสดุชนิดอื่นมาอยู่ด้วยกันโดยมีโครงสร้างในแบบต่าง ๆ เป็นการนำมารวมกันโดยที่เนื้อของคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ไม่กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน มีสมบัติร่วมของวัสดุที่นำมาอยู่ร่วมกันและไม่สามารถหาได้จากวัสดุชนิดเดียวที่มีปัญหาจากการที่สมบัติชนิดหนึ่งจะมีความสัมพันธ์ผกผันกับสมบัติอีกชนิดหนึ่ง

คอมโพสิตประกอบด้วยตัวเสริมความสามารถหรือเรียกว่า Reinforce phase ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของเส้นใย แผ่น หรือเป็นอนุภาคฝังตัวอยู่ในตัวพื้นที่เรียกว่า Matrix ที่เป็นโลหะ เซรามิกส์ หรือโพลิเมอร์ เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีทั้งข้อดีข้อเสีย เช่น โลหะจะมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง แต่เป็นสนิมง่ายและหนัก โพลิเมอร์จะมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงต่ำ ทนความร้อนไม่ได้ นำไฟฟ้าไม่ได้ เซรามิกส์มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการสึกหรอและการผุกร่อนได้ดี ทนความร้อนได้ดี แต่เปราะ มีความเหนียวต่ำ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเอาวัสดุต่างชนิดมาผสมกันเพื่อจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติพิเศษที่ได้จากข้อดีของวัสดุแต่ละชนิด เราเรียกรวมวัสดุกลุ่มนี้ว่า คอมโพสิต หรือ วัสดุผสม (Composite materials)

เราอาจจะแบ่งกลุ่มวัสดุผสมออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีโพลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (Fiber-Reinforced Polymers, FRP) กลุ่มที่มีเซรามิกส์เป็นส่วนผสมหลัก (Ceramic-matrix composite, CMC) และกลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (Metal-matrix composite, MMC) นอกจากนี้ เรายังอาจแบ่งตามลักษณะของวัสดุที่เรานำมาผสมกันคือ กลุ่มที่ส่วนผสมเสริมมีลักษณะเป็นผง (Particulate composites) กลุ่มที่มีส่วนผสมเสริมมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous composites) ซึ่งอาจจะแบ่งย่อยออกไปเป็นกลุ่มเส้นใยสั้นและกลุ่มเส้นใยยาว กลุ่มสุดท้ายคือกลุ่มวัสดุผสมชนิดซ้อนแผ่น (Laminated composites)

โพลิเมอร์เสริมเส้นใย หรือที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งคือ Carbon Fiber Reinforced Polymer วัสดุประเภท CFRP นั้นเป็นวัสดุทางวิศวกรรมขั้นสูงที่สังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมีในอุณหภูมิสูงโดยทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลคาร์บอนเป็นเส้นยาวและมีความแข็งแรงสูง เส้นใย Carbon Fiber มีความสามารถรับแรงดึงได้สูงถึง 10-15 เท่าของเหล็กกล้าที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากัน

วัสดุ CFRP ได้ถูกใช้งานเป็นส่วนประกอบโครงสร้างอากาศยานและยุทโธปกรณ์ทางทหารมายาวนานกว่า 50 ปี เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบาและมีความคงทนถาวรอย่างยิ่ง ในปัจจุบันได้มีการนำ CFRP มาใช้ในงานวิศวกรรมด้านต่าง ๆ มากมายเช่นเดียวกับในงานด้านวิศวกรรมโครงสร้างและโยธา ซึ่งได้มีการนำมาใช้เสริมเพิ่มความแข็งแรง ของโครงสร้างและซ่อมแซมความเสียหายจากการรับน้ำหนักเกิน แผ่นดินไหว และแรงกระแทก ฯลฯ

วัสดุ CFRP นั้นมีอยู่หลายประเภท ทั้งแบบเป็นเส้น (Rod) แบบแผ่นหนา (Plate) และแบบแผ่นกระดาษ (Sheet) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งแต่ละประเภทยังจะมีการนำไปใช้งานที่

แตกต่างกัน แล้วแต่จุดประสงค์ของการใช้งานแต่ละประเภท เช่น เสایشีเกิดรอยร้าว จะต้องใช้วัสดุ CFRP ประเภทแผ่นกระดาษ (Sheet) ในการซ่อมแซม เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 ประเภทของวัสดุ CFRP (MTEC, 2008)

ในประเทศไทยได้เริ่มมีการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุ CFRP ตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2541 โดยมีการเสริมกำลังโครงสร้างอาคารสถานศึกษา โรงงานอุตสาหกรรม และเสริมกำลังสะพานด้วยวัสดุ CFRP ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวถือว่าเป็นยุคต้น ๆ ของการใช้วัสดุ CFRP สำหรับงานวิศวกรรมโยธาในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พร้อมกันนั้นก็เริ่มมีการศึกษาวิจัยการประยุกต์ใช้วัสดุดังกล่าวในมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ในประเทศไทย ซึ่งเป็นการเพิ่มทางเลือกในการซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตนอกเหนือไปจากวิธีการดั้งเดิม (MTEC, 2008)

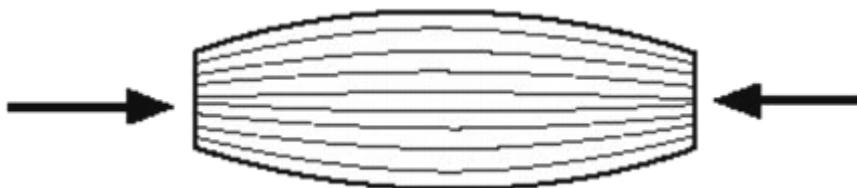
การรับแรงของวัสดุ โดยทั่วไปแรงที่กระทำต่อวัสดุมีด้วยกัน 4 ประเภทคือ

- **แรงดึง (Tension)** ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะแรงดึงที่กระทำต่อคอมโพสิต การตอบสนองต่อแรงกระทำของวัสดุขึ้นอยู่กับแรงดึงและความแข็งแรงเชิงกลของเส้นใยเสริมแรงที่ใช้



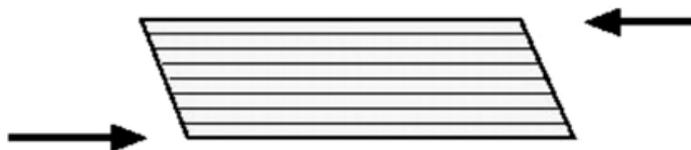
ภาพที่ 2.6 การรับแรงดึง (Tension) ของ CFRP (MTEC, 2008)

- **แรงกดอัด (Compression)** ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะคอมโพสิตที่ได้รับแรงกดอัด ในสภานี้ความแข็งแรงของวัสดุจะขึ้นกับสมบัติความแข็งแรงดึง และการยึดติด (Adhesion) ของเนื้อโพลีเมอร์เป็นหลัก เนื่องจากโพลีเมอร์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงให้อยู่ในลักษณะเส้นตรงและป้องกันไม่ให้เส้นใยโค้งงอ



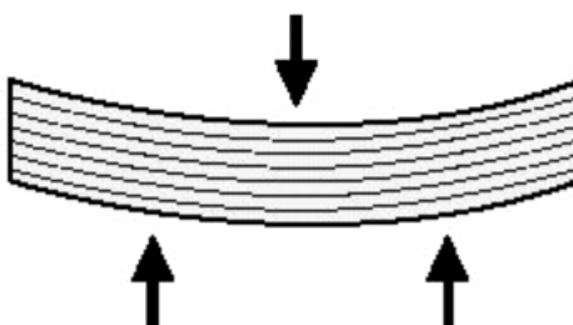
ภาพที่ 2.7 การรับแรงกดอัด (Compression) ของ CFRP (MTEC, 2008)

- **แรงเฉือน (Shear)** ลักษณะแรงที่กระทำต่อคอมโพสิตมีทิศทางตรงข้ามกัน และแนวแรงอยู่ต่างระดับกัน ดังภาพที่ 2.8 ภายใต้สภาวะแบบนี้โพลิเมอร์จะมีบทบาทอย่างมากในเรื่องการยึดติดกับเส้นใยเสริมแรงไม่ใช่ในเรื่องสมบัติความแข็งแรงเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอมโพสิตที่มีการเรียงเส้นใยเสริมแรงเป็นชั้น ๆ



ภาพที่ 2.8 การรับแรงเฉือน (Shear) ของ CFRP (MTEC, 2008)

- **แรงดัด (Flexure)** ลักษณะของแรงที่กระทำกับวัสดุมีลักษณะผสมของแรงดึงแรงเฉือน และแรงกดอัด 3 แรงเข้าด้วยกัน จากภาพที่ 2.9 เห็นได้ว่ากึ่งกลางของด้านบนของวัสดุถูกแรงกดอัดกระทำ ขณะที่ใต้วัสดุจะถูกแรงยึดและแรงเฉือนจากการยึดตัวของวัสดุ



ภาพที่ 2.9 การรับแรงดัด (Flexure) ของ CFRP (MTEC, 2008)

2.4.1 คุณสมบัติของวัสดุ CFRP

- ความแข็งแรงในการรับแรงดึงสูง (มากกว่าเหล็ก 10 เท่า)
- ไม่เป็นสนิม ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนและสารเคมีได้ดีกว่าเหล็ก
- น้ำหนักเบา

- ติดตั้งได้ง่ายและสะดวก
- ขนาดบาง
- ยึดหยุ่นเข้ากับรูปร่างของโครงสร้างได้ดี
- ใช้อย่างแพร่หลาย

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต

- สมบัติของเส้นใยเสริมแรง
- สมบัติของโพลิเมอร์ (เรซิน)
- สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Fiber Volume Fraction ; FVF) เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรงมักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าโพลิเมอร์ ดังนั้นหากคอมโพสิตมีเส้นใยเสริมแรงมากขึ้นจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมเส้นใยเสริมแรงกับโพลิเมอร์ก็มีขีดจำกัดเนื่องจากเส้นใยเสริมแรงควรมีเนื้อโพลิเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมโพสิต เช่น เรือไฟเบอร์กลาสจะนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีที่เรียกว่า แฮนด์เลย์อัป (Hand lay-up) ซึ่งจะมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณร้อยละ 30-40 แตกต่างจากชิ้นงานคอมโพสิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงจะมีสัดส่วนของเส้นใยประมาณร้อยละ 70
- การจัดเรียงตัว (Orientation) ของเส้นใยในคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากเส้นใยในคอมโพสิตมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันแล้ว สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่แสดงออกมาจะมีค่าแตกต่างกันตามแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาตั้งแต่การออกแบบคือ ขนาดและลักษณะแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน

2.4.3 ประโยชน์ของวัสดุ CFRP

- เพิ่มกำลังให้กับโครงสร้าง
- เพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง
- เพิ่มความคงทนให้กับโครงสร้าง

2.4.4 ความจำเป็นในการเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยใช้วัสดุ CFRP

- เปลี่ยนรูปแบบการใช้งานโครงสร้าง
- การก่อสร้างหรือออกแบบผิดพลาด
- โครงสร้างเสื่อมสภาพ
- เปลี่ยนมาตรฐานการออกแบบ

- ซ่อมแซมโครงสร้างที่เสียหายจากแผ่นดินไหว
- ซ่อมแซมโครงสร้างสะพานคอมโพสิต ที่เสียหายจากความล้า

2.4.5 ชนิดของ CFRP ที่ใช้กันโดยทั่วไป

ในการซ่อมแซม หรือเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างโดยใช้วัสดุ CFRP นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

- **แบบเป็นเส้น (Rod)** ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นกลม โดยใช้เสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แทนเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต ซึ่งวัสดุประเภท CFRP นั้นจะมีกำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าเหล็ก
- **แบบแผ่นกระดาษ (Sheet)** ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นแต่จะมีความหนาไม่มาก สามารถตัด หรือพับได้ง่าย ซึ่งจะใช้เสริมความแข็งแรงในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งวัสดุ CFRP ประเภทนี้จะช่วยในด้านของกำลังรับแรงดึงของโครงสร้าง



ภาพที่ 2.10 การเสริมความแข็งแรงโดยใช้ วัสดุ CFRP แบบกระดาษ (CFRP laminate)

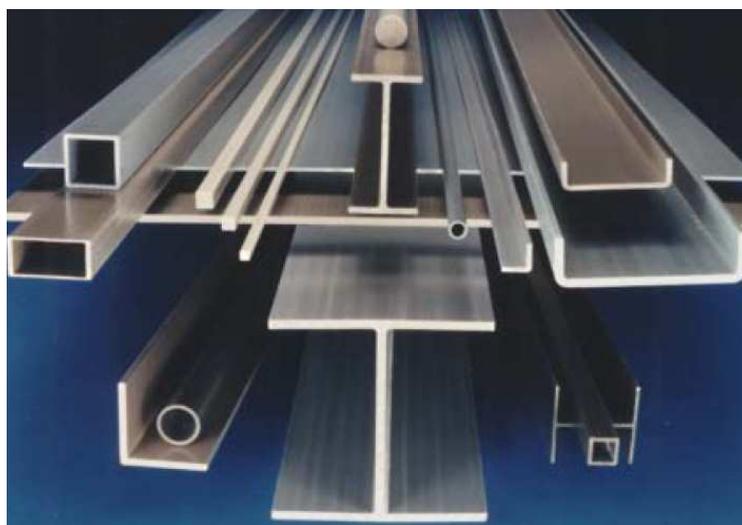
(Hughes Brothers, 2003)

- **แบบแผ่นหนา (Plate)** ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งจะมีความหนามากกว่า วัสดุ CFRP แบบกระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งวัสดุ CFRP ประเภทนี้จะมีการตัด หรือการรียากกว่าแบบกระดาษ



ภาพที่ 2.11 วัสดุ CFRP แบบแผ่นหนา (Strongwell, 1998)

- แบบอื่น ๆ วัสดุ CFRP นั้นยังมีอีกหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นแบบกล่อง แบบท่อ แบบเหล็กรูปพรรณต่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งวัสดุ CFRP



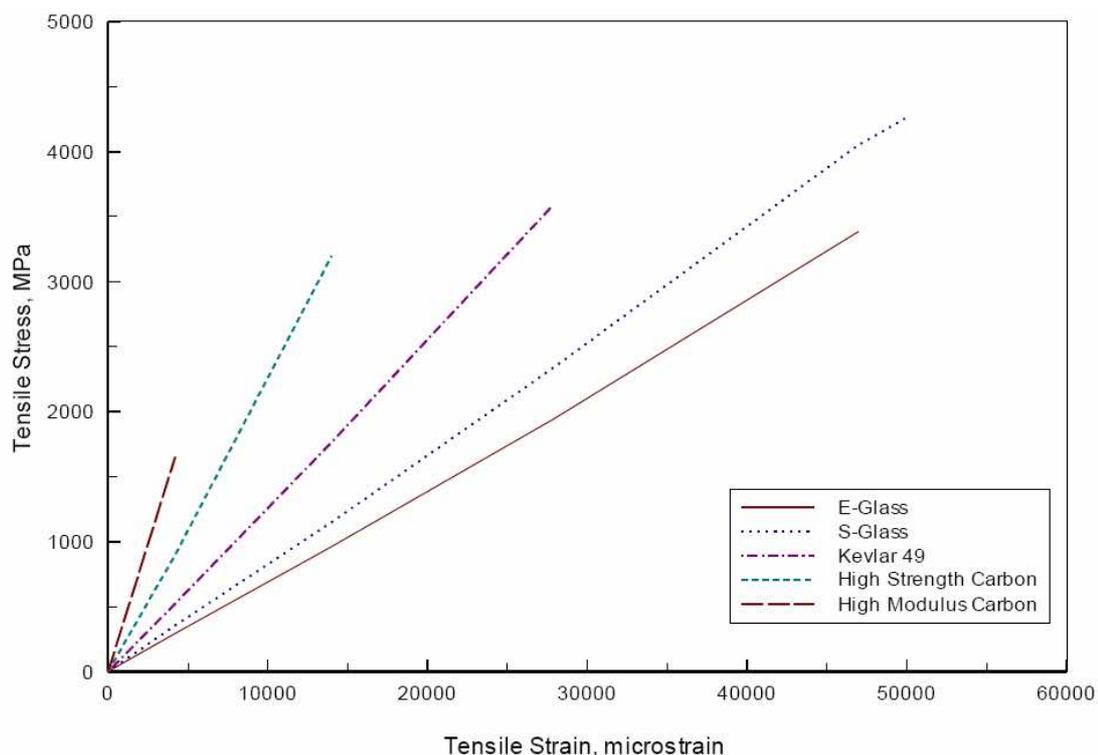
ภาพที่ 2.12 วัสดุ CFRP รูปแบบต่าง ๆ (Strongwell, 1998)

รูปร่างของวัสดุ CFRP นั้นยังสามารถนำรูปแบบต่าง ๆ มารวมกันเพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ ยกตัวอย่างเช่น แผ่นพื้นของสะพานเราสามารถนำเอาวัสดุ CFRP แบบแผ่นหนา และแบบกล่องกลวง มารวมกันก็จะสามารถทำให้ได้รูปร่างของแผ่นพื้นดังภาพที่ 2.13 ซึ่งรูปร่างของแผ่นพื้นนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ



ภาพที่ 2.13 วัสดุ CFRP รูปแบบต่าง ๆ นำมารวมเป็นแผ่นพื้น (Aixi Zhou, 2002)

วัสดุประเภทโพลีเมอร์เสริมเส้นใยนั้นมียุหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีกำลังรับแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 กราฟหน่วยแรงและความเครียด (Stress-Strain diagram) ของโพลีเมอร์เสริมเส้นใย ประเภทต่าง ๆ ภายใต้แรงดึง (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2545)

คุณสมบัติของวัสดุ CFRP หลัก ๆ จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบกระดาด (Sheet , Laminate) (Sika, 2003) และ แบบแผ่นหนา (Plate) (Strongwell, 1998) ที่นำมารวมกับแบบกล่องกลวง ซึ่ง คุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุเสริมพิเศษ CFRP

วัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	โมดูลัสยืดหยุ่น (N/m ²)	หน่วยแรงดึง (N/m ²)	หน่วยแรงอัด (N/m ²)	Poisson's Ratio
CFRP Composite Deck	1800	1.93×10^{10}	2.07×10^8	2.07×10^8	0.33
CFRP Laminate	1500	16.50×10^{10}	2.80×10^9	-	0.30

2.5 ความรู้พื้นฐานของพลศาสตร์โครงสร้าง (Fundamental of Structural Dynamics)

เนื่องจากขนาด ทิศทางและตำแหน่งของน้ำหนักพลวัตที่กระทำต่อโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับเวลา ของการตอบสนอง (Response) ของโครงสร้าง เช่น การโก่งที่เกิดขึ้นที่แผ่นพื้นในเวลาใดเวลาหนึ่งเป็นต้น การวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์โดยทั่วไป เราจะสมมติให้น้ำหนักพลวัตมีรูปร่างลักษณะขนาดและทิศทางที่แน่นอน และการวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์และทางสถิตศาสตร์มีข้อแตกต่างกันสองประการคือ ลักษณะของน้ำหนักที่กระทำ และการตอบสนองของน้ำหนักนั้น ๆ

ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์ที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่งคือ การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ส่วนแบบจำลองเชิงวิเคราะห์นั้นจะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะจริงของโครงสร้างให้มากที่สุด ซึ่งแบบจำลองเชิงวิเคราะห์นี้อาจจะเป็นของจริงที่ใช้งานอยู่แล้ว โดยทั่วไปแบบจำลองเชิงวิเคราะห์จะประกอบด้วยสามส่วนหลักได้แก่

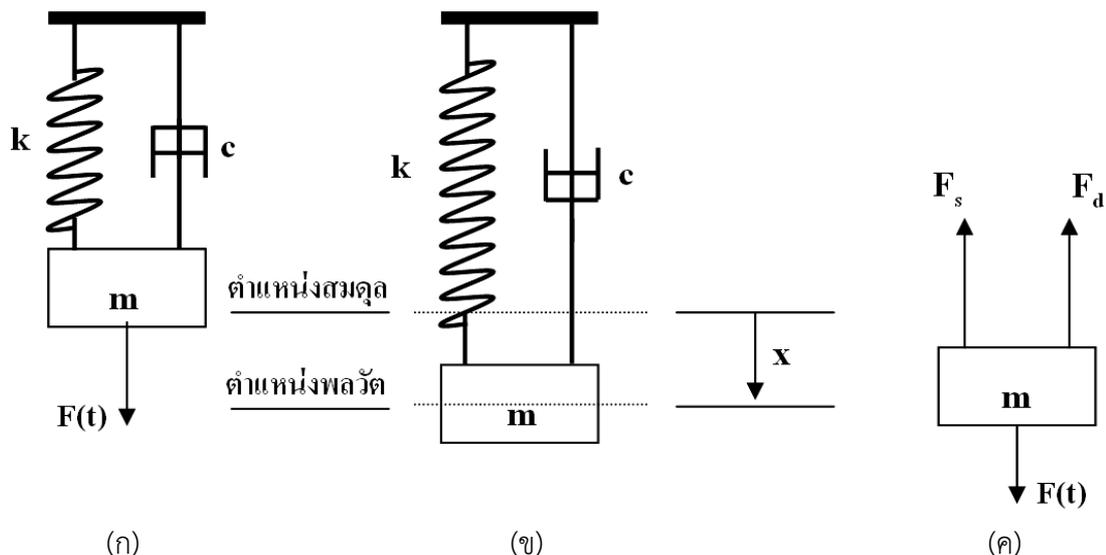
- (1) สมมุติฐานที่จะใช้ในการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับระบบจริง
- (2) แผนภาพที่แสดงให้เห็นการทำงานหรือการเกี่ยวโยงของระบบและ
- (3) รายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ พร้อมทั้งขนาดและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างของระบบ

ขั้นตอนต่อไปของการวิเคราะห์เชิงพลวัตก็คือ แก๊สมการอนุพันธ์เพื่อหาการตอบสนองทางพลวัตของระบบ ซึ่งแบ่งออกได้สองประเภทหลักคือ การตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแบบเสรี (Free vibration) และการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Forced vibration) การแก๊สมการดังกล่าวจำเป็นต้องแก๊สสมการเบื้องต้น (Initial condition) และเงื่อนไขบังคับ (Forced condition) จากภายนอก ถ้าระบบสั่นสะเทือนเป็นประเภทแบบเสรีและประเภทสั่นสะเทือนแบบบังคับตามลำดับ และผลเฉลยที่ได้รับก็จะเป็นการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของระบบโครงสร้างซึ่งเรียกรวม ๆ ว่า การตอบสนองเชิงพลวัต (เดซ พุทธเจริญทอง, 2542)

2.5.1 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต

โดยทั่วไปแบบจำลองของระบบโครงสร้างทางพลวัตที่มีระดับความเสรีขึ้นเดียว ที่มีแรงพลวัต และไม่มีแรงภายนอกกระทำ การหาสมการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยกฎ และหลักการต่าง ๆ เช่น กฎข้อที่สองของนิวตัน หลักของเดอเลมเบิร์ต วิธีพลังงาน หลักของงานเสมือน และวิธีของลากรองจ์ เป็นต้น

ระบบโครงสร้างทางพลวัตที่มีระดับความเสรีขึ้นเดียวจะประกอบด้วยมวล-สปริงและตัวหน่วง (Damper) ภาพที่ 2.15 มวลของระบบจะแทนด้วย m ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) ส่วนที่ยึดหยุ่นของระบบจะแทนด้วยค่าคงตัวสปริง k ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อเมตร (N/m) และตัวหน่วงการเคลื่อนที่จะแทนด้วยค่าคงตัว c หรือเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ตัวหน่วงชนิดเหลว ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อเมตรต่อวินาที (N/m/s) ส่วน $F(t)$ เป็นแรงที่กระทำที่มวล m (แนวตั้ง)



ภาพที่ 2.15 แบบจำลองระบบโครงสร้างที่มีระดับความเสรีขึ้นเดียว (ก) ระบบอยู่ในตำแหน่งสมดุล (ข) ระบบอยู่ในตำแหน่งพลวัต และ (ค) แผนภาพเสรีพลวัตของมวล (เดช พุทธเจริญทอง, 2542)

กฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่า ผลรวมของแรงที่กระทำต่อมวลย่อมเท่ากับผลคูณของมวลและความเร่งในทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ จากภาพที่ 2.15 ถ้าให้ x เป็นการกระจัดในแนวดิ่งของมวล m โดยอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$\sum F_x = m\ddot{x} \quad (2.1)$$

จากแผนภาพเสรีพลวัต (Dynamic Free-Body Diagram) ของมวล m ภาพที่ 2.15 ผลรวมของแรงทางซ้ายมือของสมการ (2.1) คือ

$$F(t) - F_s - F_d = m\ddot{x} \quad (2.2)$$

ซึ่ง $F_s = kx =$ แรงต้านของสปริง , $F_d = c\dot{x} =$ แรงต้านของตัวหน่วง ดังนั้นสามารถจะเขียนสมการ (2.1) ใหม่ได้ดังนี้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.3)$$

ซึ่ง สมการที่ (2.3) เป็นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดา อันดับสองที่มีค่าสัมประสิทธิ์คงตัว

2.6 การหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต

ได้มีการพัฒนาสมการเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิต ซึ่งได้ใช้ข้อมูลจาก ทดสอบ และวิเคราะห์โครงสร้างจริง โดยที่สมการนั้นมีความถูกต้องมาก (Barth, 2007) ซึ่งสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$f = \lambda^2 f_{sb} \quad (2.4)$$

- เมื่อ $\lambda = 1$ (สำหรับจตุรรองรับแบบง่าย)
 $\lambda = 1.25$ (สำหรับจตุรรองรับแบบยึดแน่น – จตุรรองรับแบบหมุน)
 $\lambda = 1.5$ (สำหรับจตุรรองรับแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง)

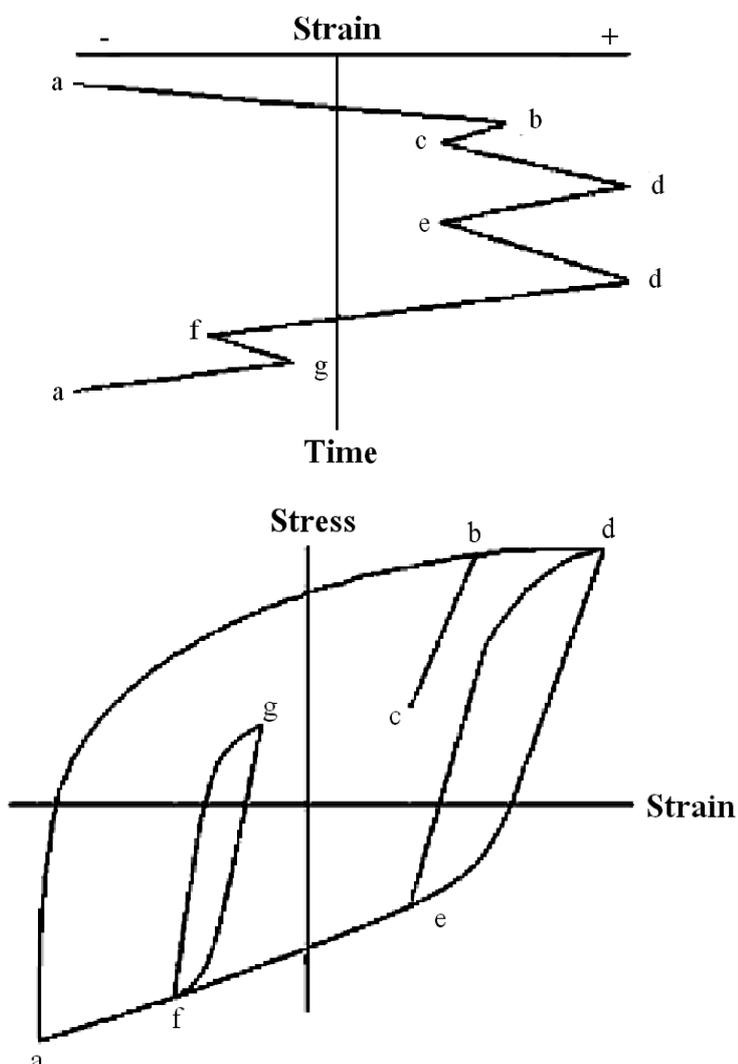
$$f_{sb} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{E_b I_b g}{w}} \quad (2.5)$$

- เมื่อ L = ความยาวของช่วงสะพาน (m.)
 g = ความเร่ง (m/s^2) ในที่นี้ใช้ $9.81 m/s^2$
 $E_b I_b$ = Flexural rigidity of the composite steel girder ($N \cdot m^2$)
 w = น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความยาวสะพาน (N/m)

โดยจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสมการที่ 2.4 เป็นสมการที่ใช้หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานคอมโพสิตชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตวางบนคานเหล็ก ชนิดที่มีจตุรรองรับแบบง่ายที่มีความแม่นยำมาก

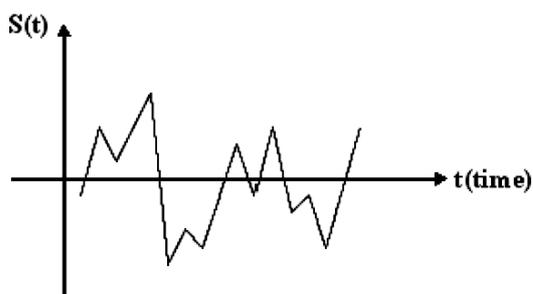
2.7 วิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method)

วิธีการนับช่วงหน่วยแรงนั้นได้มีจุดเริ่มต้นมาจากการศึกษาความเสียหายเนื่องจากความล้าของโครงสร้างของยานอวกาศ และเครื่องบิน โดยวิธีการนับที่ใช้ในการนับช่วงของหน่วยแรงที่นิยมใช้วิธีหนึ่งก็คือ วิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Rainflow counting method) ซึ่งในขณะนั้นจะทำการนับจำนวนเต็มรอบ หรือครึ่งรอบ ของกราฟค่าความเครียดกับเวลา (Strain-time signals) โดยต่อมาจะนำไปเป็นพื้นฐานในการนับกราฟค่าหน่วยแรงกับความเครียด (Stress-strain) ของวัสดุ (Aridulu, 2004) ในภาพที่ 2.16 แสดงการเสียรูปของวัสดุจากจุด a ไปยังจุด b โดยที่จุด b นั้นจะเกิดการคลายแรงกระทำ ไปจนถึงจุด c เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นที่จุด c ไปจนถึงจุด d วัสดุเมื่อเสียรูปจนถึงจุด b โดยที่วัสดุจะจำรูปแบบการเสียรูปเดิม ตัวอย่าง เช่น การเสียรูปจากจุด a ไปยังจุด b จะต่อเนื่อง ส่วนการเสียรูปจากจุด a ไปยังจุด d นั้นช่วงระหว่าง b ถึง c จะไม่ต่อเนื่อง



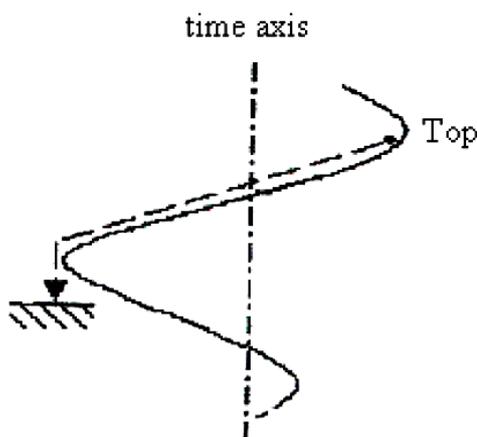
ภาพที่ 2.16 กราฟรอบค่าความเครียดกับเวลา และค่าหน่วยแรงกับความเครียด (Aridulu, 2004)

สัญญาณคลื่นของค่าหน่วยแรง ในบางครั้งค่าหน่วยแรงที่ผ่านแกน x จะไม่เกิดแค่ครั้งเดียว แต่อาจจะเกิดจุดสูงสุดได้หลายครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.17 ซึ่งจะยากต่อการนับจำนวนรอบของค่าหน่วยแรง



ภาพที่ 2.17 กราฟค่าหน่วยแรงแบบสุ่ม (Aridulu, 2004)

จุดเริ่มต้นของชื่อวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก นั่นคือชื่อ่วาวิธีหลังคาพาโกดา (Pagoda Roof) โดยที่แกนตั้งจะเป็นเวลา และค่าหน่วยแรงแบบสุ่มนั้นจะแสดงเหมือนฝนที่ตกลงมาจากหลังคา ซึ่งรูปแบบของการตกนั้นจะแสดงดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 กราฟค่าหน่วยแรงที่ตกลงจากจุดสูงสุด (Aridulu, 2004)

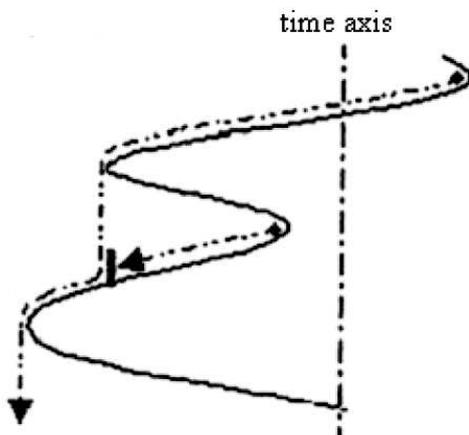
จุดเริ่มต้นของค่าหน่วยแรงสูงสุดที่อยู่ในแกน โดยที่จุดสูงสุดของค่าหน่วยแรงนั้นเปรียบเหมือนจุดสูงสุดของหลังคา ซึ่งจะอยู่ทางขวาของแกนตั้ง และจุดต่ำสุดของหลังคานั้นจะอยู่ฝั่งซ้ายของกราฟ โดยจากจุดสูงสุดไปยังจุดต่ำสุดจะเหมือนการไหลตกของน้ำ

ถ้าจุดเริ่มต้นของการตก คือ จุดสูงสุด

ก) การตกนั้นจะหยุด ถ้าไปเจอจุดสูงสุดอีกจุดหนึ่ง

ข) มันจะหยุด ถ้าเจอกับส่วนจุดสิ้นสุด และจะตกผ่านไป ดังแสดงในภาพที่ 2.19

ค) การตกนั้นสามารถที่จะตกลงไปยังหลังคาอื่น ๆ และดำเนินการต่อตามข้อ ข)



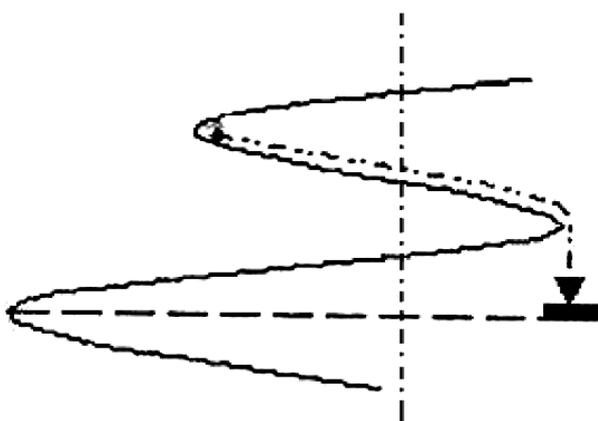
ภาพที่ 2.19 กราฟการตกจากจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง (Aridulu, 2004)

ถ้าจุดเริ่มของการตก เริ่มจาก จุดตรงข้ามจุดสูงสุด

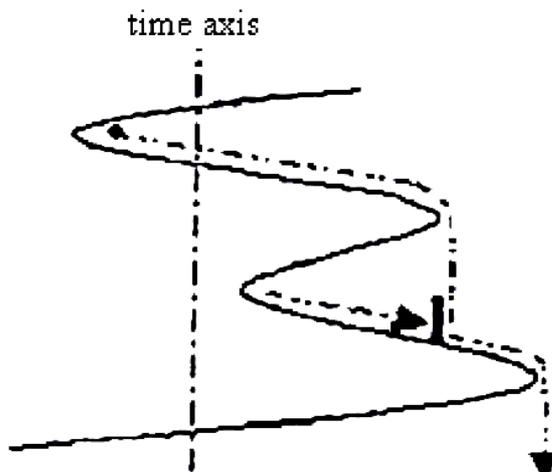
ง) การตกจะหยุดเมื่อการไหลไปเจอกับจุดสิ้นสุด ดังแสดงในภาพที่ 2.20

จ) การตกจะตกลงจากหลังคาหนึ่งไปยังอีกหลังคาหนึ่ง จนกว่าจะไม่เจอหลังคาอีก ดังแสดงในภาพที่ 2.21

ฉ) การหยุดสามารถที่จะตกไปยังหลังคาที่อยู่ต่อเนื่องกัน จากข้อ ง) และ ข้อ จ) นั้น ความยาวของแกนนอนจากการตก 1 ครั้ง สามารถเปรียบได้กับครึ่งรอบของช่วงแอมพลิจูด (Amplitude)



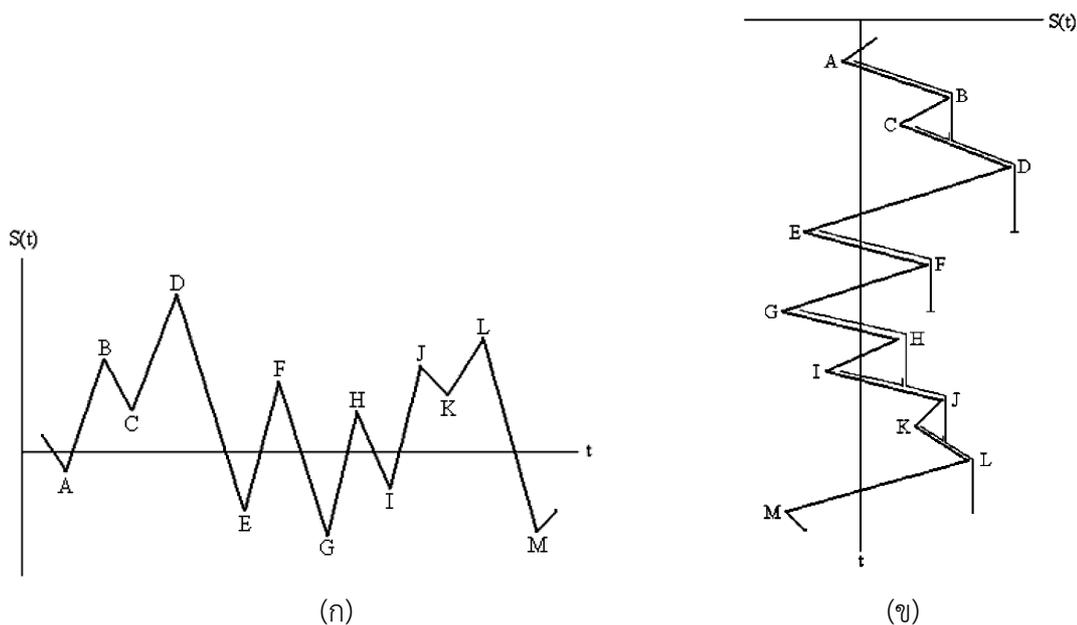
ภาพที่ 2.20 กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุด (Aridulu, 2004)



ภาพที่ 2.21 กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง (Aridulu, 2004)

พื้นฐานเริ่มต้นของวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก นั้นจะมีจำนวนรอบแบบสุ่มให้ ดังแสดงในภาพที่ 2.22 (ก) โดยค่าหน่วยแรงนั้นจะมีทั้งจุดสูงสุด และจุดต่ำสุด เมื่อหมุนแกนของเวลาให้ตั้งขึ้น จะเห็นได้ว่าจุดสูงสุด และจุดต่ำสุดของกราฟค่าหน่วยแรง จะทำให้กราฟมีลักษณะเหมือนน้ำที่ตกลงมา โดยจะมีขั้นตอน และวิธีดังนี้

1. จุดเริ่มต้นที่จุดต่ำสุดจะไหลต่อเนื่องลงไป โดยที่จุดต่ำสุดนั้นจะมีค่าน้อยกว่าแกน x จากภาพที่ 2.22 (ข) จะเริ่มจากจุด A และสิ้นสุดที่จุด E
2. ส่วนที่ไหลจะสิ้นสุด เมื่อถึงจุดไม่สามารถที่จะไหลไปได้ ยกตัวอย่างเช่น จุด C เป็นจุดสิ้นสุดของส่วนแรก
3. ส่วนใหม่นั้นจะเริ่มจากจุดสิ้นสุดของส่วนก่อนหน้า
4. จุดต่ำสุดนั้นคือ จำนวนรอบที่นับได้ครึ่งรอบ โดยที่ค่าของช่วงหน่วยแรง S_i ส่วนค่าเฉลี่ย μ_i นั้นจะอยู่ที่จุดศูนย์กลาง
5. ขั้นตอนนั้นจะเริ่มต้นใหม่ เมื่อขั้นตอนการนับนับได้ 1 รอบหรือครึ่งรอบ



ภาพที่ 2.22 กราฟการตกจากจุดตรงข้ามจุดสูงสุดไปยังอีกหลังคาหนึ่ง (Aridulu, 2004)

ข้อกำหนดในการปฏิบัติ

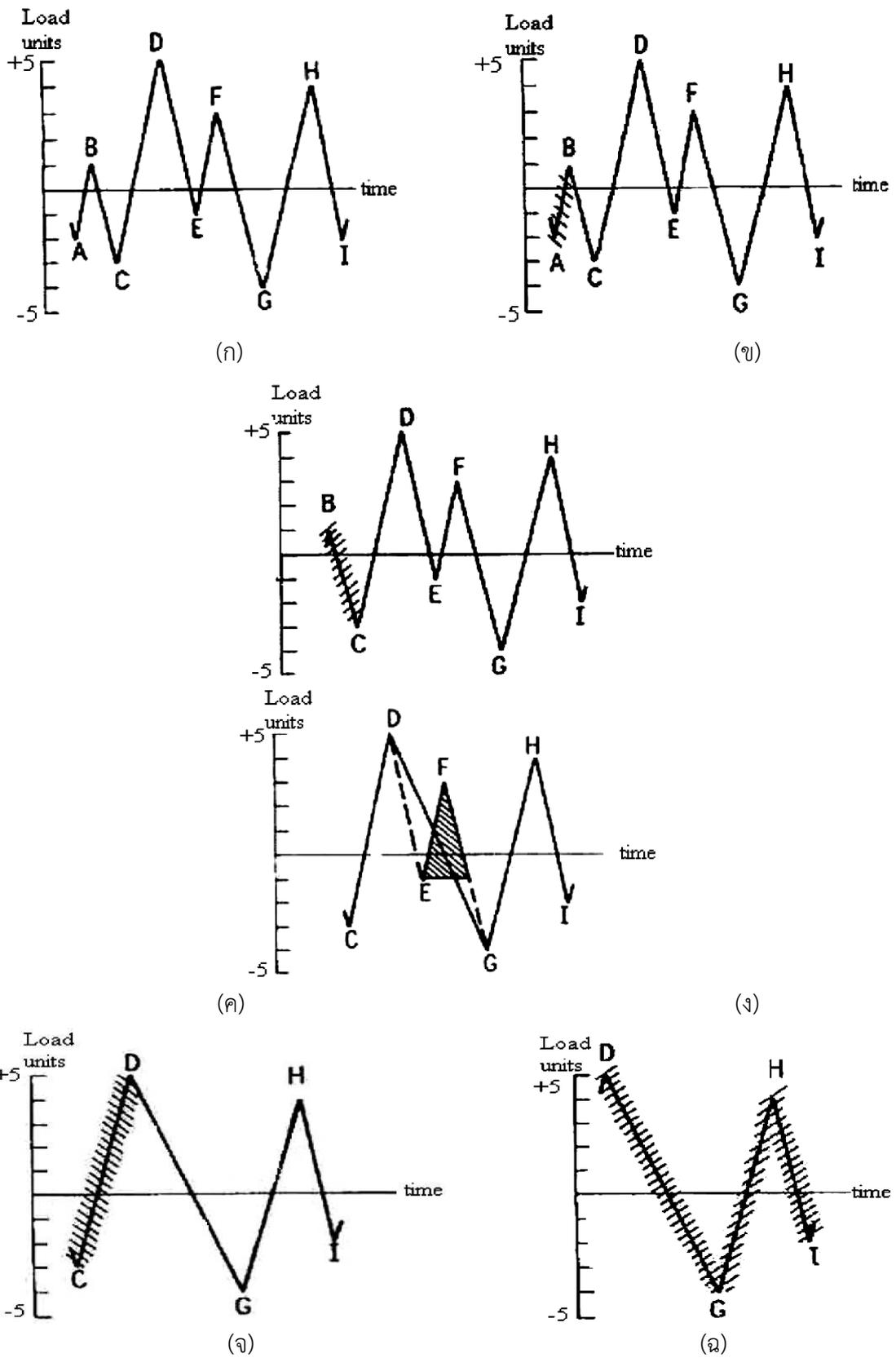
ขั้นตอนของวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก สามารถอธิบายได้จาก มาตรฐาน ASTM-1049 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการนับจำนวนรอบของค่าความล้า โดยจะมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

กำหนดให้ X คือช่วงที่พิจารณา
Y คือช่วงที่อยู่ก่อนหน้า ซึ่งติดกับช่วง x

1. อ่านค่าจุดสูงสุด หรือจุดต่ำสุด ถ้าข้อมูลหมดให้ไปขั้นตอนที่ 6
2. ถ้ามีจำนวนจุดน้อยกว่า 3 จุด ให้ไปที่ขั้นตอนที่ 1 ในรูปแบบของช่วง X และ Y จะใช้ 3 ค่าสูงสุด และต่ำสุด ที่ต้องทิ้งไป
3. เปรียบเทียบค่าของช่วง X และ Y
 - ก) ถ้า $X < Y$ ให้ไปขั้นตอนที่ 1
 - ข) ถ้า $X \geq Y$ ให้ไปขั้นตอนที่ 4
4. ถ้าช่วงของ Y เริ่มต้นที่จุด S ไปที่ขั้นตอนที่ 5 อีกอย่างให้นับช่วง Y เป็น 1 รอบ ทั้งค่าสูงสุด ต่ำสุดของ Y และไปยังขั้นตอนที่ 2
5. นับค่าช่วง Y เป็นครึ่งรอบ โดยทิ้งจุดที่ 1 (จุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุด) ในช่วงของ Y ย้ายจุดเริ่มต้นไปยังจุดที่ 2 ในช่วง Y แล้วย้ายไปยังขั้นตอนที่ 2
6. นับบางช่วงที่ไม่ได้อยู่ก่อนหน้า ให้เป็นครึ่งรอบ

ภาพที่ 2.23 จะใช้เป็นตัวอย่างในการนับโดยวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก ซึ่งจะมีขั้นตอนดังนี้

1. $S = A$; $Y = |A-B|$; $X = |B-C|$; $X > Y$, Y คือ S ที่จุด A นับช่วง $|A-B|$ เป็นครึ่งรอบ และตัดจุด A ทิ้ง โดยที่ $S = B$ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (ข)
2. $Y = |B-C|$; $X = |C-D|$; $X > Y$, Y คือ S ที่จุด B นับช่วง $|B-C|$ เป็นครึ่งรอบ และตัดจุด B ทิ้ง โดยที่ $S = C$ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (ค)
3. $Y = |C-D|$; $X = |D-E|$; $X < Y$.
4. $Y = |D-E|$; $X = |E-F|$; $X < Y$.
5. $Y = |E-F|$; $X = |F-G|$; $X > Y$. นับช่วง $|E-F|$ เป็น 1 รอบ โดยที่ตัดจุด E และจุด F ออก ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (ง)
6. $Y = |C-D|$; $X = |D-G|$; $X > Y$, Y คือ S ที่จุด C นับช่วง $|C-D|$ เป็นครึ่งรอบ และตัดจุด C ทิ้ง โดยที่ $S = D$ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (จ)
7. $Y = |D-G|$; $X = |G-H|$; $X < Y$.
8. $Y = |G-H|$; $X = |H-I|$; $X < Y$. ข้อมูลหมด
9. นับช่วง $|D-G|$ เป็นครึ่งรอบ นับช่วง $|G-H|$ เป็นครึ่งรอบ และนับช่วง $|H-I|$ เป็นครึ่งรอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.23 (ฉ)
10. สิ้นสุดการนับ



ภาพที่ 2.23 ขั้นตอนการนับด้วยวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก (Aridulu, 2004)

ค่าหน่วยแรงนั้นสามารถที่จะหาได้จากจุดสูงสุดของวงรอบ และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่แสดงต่างในกราฟนั้น สามารถหาได้จาก สมการที่ 2.6

$$(\Delta\sigma_{eff})_i = (\sigma_{max})_i - \sigma_{op} \quad (2.6)$$

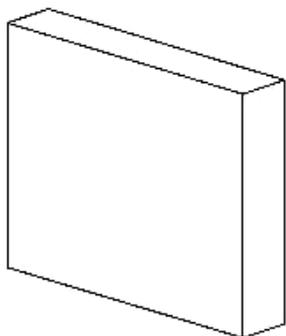
เมื่อ $(\sigma_{max})_i$ คือ ค่าหน่วยแรงของรอบรอบไปยังจุดสูงสุด ผลสรุปการนับที่ได้จากภาพที่ 2.23 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งแสดงค่าของจำนวนรอบที่นับ ในช่วงต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 จำนวนรอบที่นับจากวิธีการนับช่วงหน่วยแรงแบบฝนตก

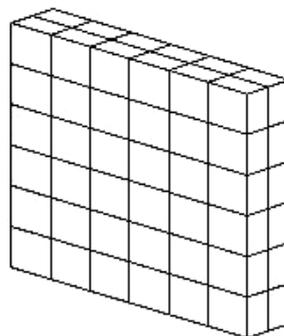
Rang (units)	Cycle counts	Events
10	0	
9	0.5	D - G
8	1	C - D , G - H
7	0	
6	0.5	H - I
5	0	
4	1.5	B - C , E - F
3	0.5	A - B
2	0	
1	0	

2.8 วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ ที่นิยมเรียกด้วยคำย่อกันว่า FEM ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่าง ๆ กันตามตำแหน่งต่าง ๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยอิลิเมนต์ (Elements) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 2.24



(ก) รูปร่างปกติที่มีค่าต่าง ๆ จำนวนอนันต์



(ข) รูปร่างที่แทนด้วยอิลิเมนต์

ภาพที่ 2.24 รูปร่างการแทนด้วยอิลิเมนต์ (Elements) (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

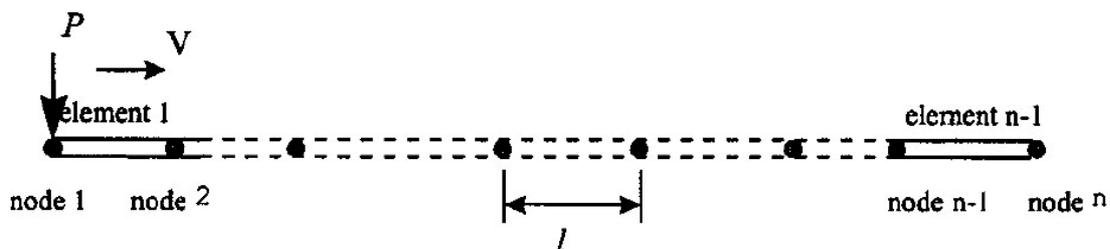
วิธีการดังกล่าวข้างต้นเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละอิลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้น ๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาอิลิเมนต์ทีละอิลิเมนต์โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละอิลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกอิลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของอิลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นนอกจากนั้นความแม่นยำของผลเฉลย ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation function) ที่ใช้กับแต่ละอิลิเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมุติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของอิลิเมนต์อาจสมมุติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้นตรง (Linear distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (Magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Nodes) ของอิลิเมนต์

2.9 การจำลองการเคลื่อนที่ของแรงกระทำแบบเคลื่อนไหว

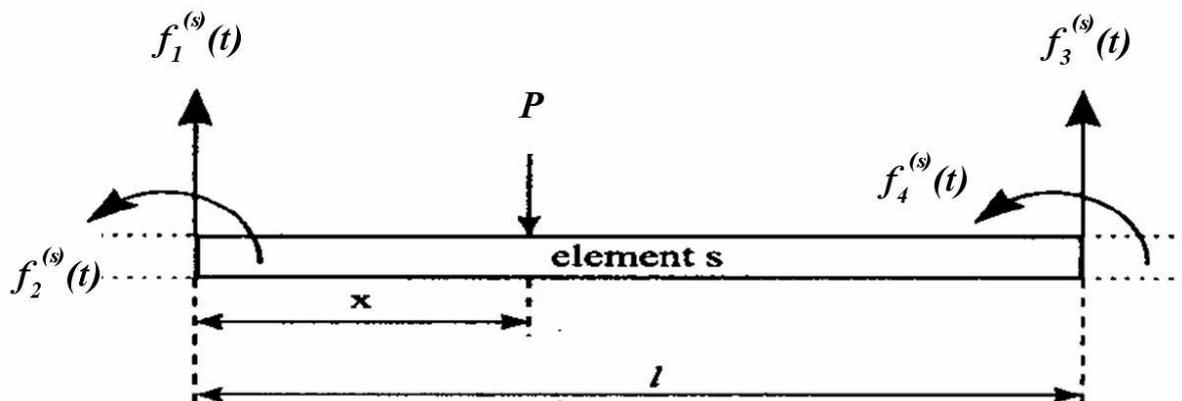
2.9.1 การจำลองการเคลื่อนที่แบบ One-Force Model

ในเบื้องต้นจะกล่าวถึงหลักการของการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำหนักขบวนรถ โดยยกกรณีรถไฟ โดยจะสมมติให้เพลาารถไฟ 1 เพลา มีค่าเท่ากับแรงหนึ่งแรงเคลื่อนที่จาก Node 1 ไปยัง Node 2 ด้วยความเร็วคงที่ V ดังภาพที่ 2.25 (Wu, 2000)



ภาพที่ 2.25 คานที่มีแรงแบบเคลื่อนที่ P เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ V (Wu, 2000)

ถ้าหากพิจารณาเพียง 1 Element พบว่าแรงที่เกิดขึ้นในอีลิเมนต์ (Element) ภายใต้แรงที่เคลื่อนที่ P สามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 แรงที่เกิดขึ้นใน Element (Wu, 2000)

เมื่อ $f_1^{(s)}(t)$ และ $f_3^{(s)}(t)$ คือแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละปลายของอีลิเมนต์ ส่วน $f_2^{(s)}(t)$ และ $f_4^{(s)}(t)$ คือโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละปลายของอีลิเมนต์ โดยที่ค่าโมเมนต์ที่ปลายสามารถที่จะไม่ต้องนำมาพิจารณาได้ ดังนั้นค่าของแรงสามารถหาค่าได้จากสมการข้างล่าง

$$f_1^{(s)}(t) = P \left(1 - \frac{x}{l} \right) \quad (2.7)$$

$$f_3^{(s)}(t) = P \left(\frac{x}{l} \right) \quad (2.8)$$

สมการที่ 2.7 และ 2.8 เป็นค่าอย่างง่ายที่แนะนำ สำหรับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนแรงจาก Node 1 ไปยัง Node i ในภาพที่ 2.26 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$t_i = \frac{(i-1)\Delta x}{V} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.9)$$

เมื่อ Δx คือความยาวของแต่ละ element, $(x_i - x_{i-1})$ ขณะที่ t_i คือ เวลาที่แรงใช้ในการเคลื่อนที่จาก Node 1 ไปหา Node i และ V คือความเร็ว

2.9.2 หลักการจำลองการเคลื่อนที่แบบ Multi-Force Model

สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของแรงในกรณีที่มีแรงมากกว่า 1 แรง ซึ่งเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของโบกักรถไฟที่มีจำนวนล้อมากน้อยไปตามลักษณะของขบวนรถจึงส่งผลให้มีแรงแบบเคลื่อนที่จำนวนเท่ากับจำนวนล้อ ในกรณีนี้แรงทั้งหมดจะไม่ได้กระทำที่โครงสร้างพร้อมกันแต่จะกระทำไปตามลำดับของแรงที่มาก่อนหลัง ตัวอย่างเช่นสมมติให้แรงที่ 1 กระทำที่ Node 1 เมื่อเวลา $t=0$ ดังนั้นแรงที่ 2 จะเคลื่อนที่มากระทำที่ Node 1 ก็ต่อเมื่อเวลาผ่านไป t_2 หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Time Delay ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$t_2 = \frac{s_2}{V} \quad (2.10)$$

เมื่อ V คือความเร็วของแรง และ s_2 คือระยะห่างระหว่างแรงที่ 1 และแรงที่ 2 สำหรับกรณีของแรงที่ 3 ไปจนถึงแรงที่ n ก็สามารถคำนวณหา Time Delay ได้โดยเพียงพิจารณาระยะห่างระหว่างแรงที่พิจารณากับแรงที่ 1 ส่วนความเร็วก็มีค่าคงที่เนื่องจากเป็นขบวนรถไฟเดียวกัน

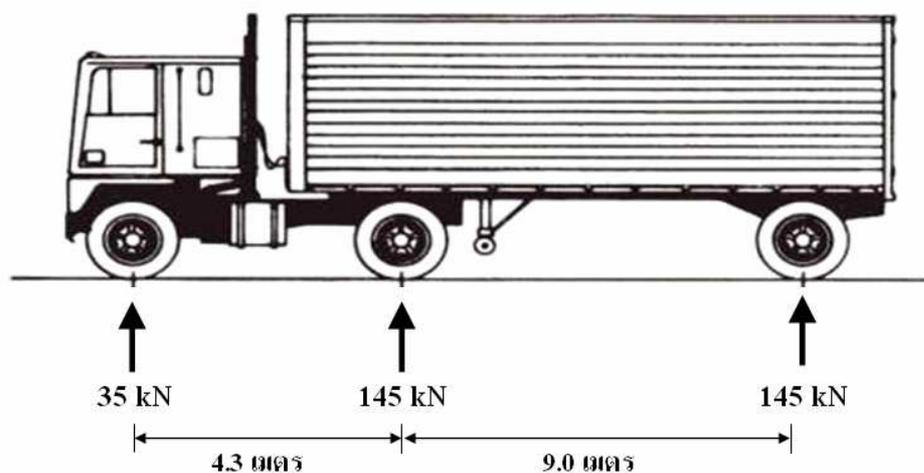
2.10 มาตรฐานในงานโครงสร้างสะพานคอมโพสิต

ในการออกแบบงานสะพานส่วนใหญ่จะใช้มาตรฐาน AASHTO (American Association for State Highway and Transportation Officials Standard Specifications for Highway Bridges) ในการออกแบบ ซึ่งสะพานคอมโพสิต ในวิทยานิพนธ์นี้ก็ใช้มาตรฐานนี้เช่นเดียวกัน

มาตรฐาน AASHTO (AASHTO, 2003) นั้นมีข้อกำหนดต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับสะพานคอมโพสิตตั้งแต่น้ำหนักกระทำ ไปจนถึงการคำนวณอายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิต โดยพิจารณาความล้า (Fatigue) ที่เกิดขึ้นในสะพาน โดยข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบมีดังต่อไปนี้

2.10.1 น้ำหนักบรรทุกจร และปริมาณรถบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกจรที่ใช้ในการออกแบบสะพานคอมโพสิตจะเป็นน้ำหนักจากรถบรรทุก ซึ่งจะมีน้ำหนักกระทำอยู่ 3 เพลา โดยที่น้ำหนักของรถบรรทุกที่ใช้ในบทความนี้ จะมาจากมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO (HS-20) ดังแสดงในภาพที่ 2.27 ซึ่งจะมีแรงกระทำอยู่ 3 เพลา โดยแต่ละเพลาจะมีน้ำหนักแตกต่างกัน เริ่มจากเพลาแรกที่ด้านหน้ารถจะมีน้ำหนักเท่ากับ 8,000 ปอนด์ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 35 กิโลกรัมนิวตัน (kN) เพลาที่ 2 จะอยู่ห่างจากเพลาแรก 4.3 เมตร โดยมีน้ำหนักของเพลา 32,000 ปอนด์ ซึ่งประมาณ 145 กิโลกรัมนิวตัน และเพลาที่ 3 จะมีระยะห่างจากเพลาที่ 2 เท่ากับ 9.0 เมตร โดยมีน้ำหนักเท่ากับเพลาที่ 2 คือ 145 กิโลกรัมนิวตัน และระยะระหว่างล้อเท่ากับ 1.80 เมตร โดยมีจำนวนรถบรรทุกวิ่งต่อวันต่อช่องทางเท่ากับ 3,000 คัน



ภาพที่ 2.27 รถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO ประเภท HS20 (AASHTO, 2003)

ในการออกแบบสะพานคอมโพสิตโดยพิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรของรถบรรทุก นั้นจะต้องพิจารณาถึงค่าสัดส่วนการกระแทกเพิ่มเติม (Impact Factor IM) เนื่องจากเป็นการพิจารณาโครงสร้างแบบพลศาสตร์ ซึ่งจะต้องพิจารณาเพิ่มในน้ำหนักของรถบรรทุก โดยมีค่าดังแสดงตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าสัดส่วนการกระทบเพิ่มเติม (Impact Factor, IM) (AASHTO, 2003)

Component	IM (%)
Deck joints – all limit states	75
All other components	
Fatigue and fracture limit states	15
All other limit states	33

ปริมาณรถบรรทุกที่วิ่งในหนึ่งวัน ต่อหนึ่งช่องจราจร ($ADTT_{SL}$) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$(ADTT)_{SL} = p \times ADTT \quad (2.11)$$

เมื่อ $ADTT$ = Number of truck per day in a single-lane
 p = Fraction of truck traffic in a single-lane

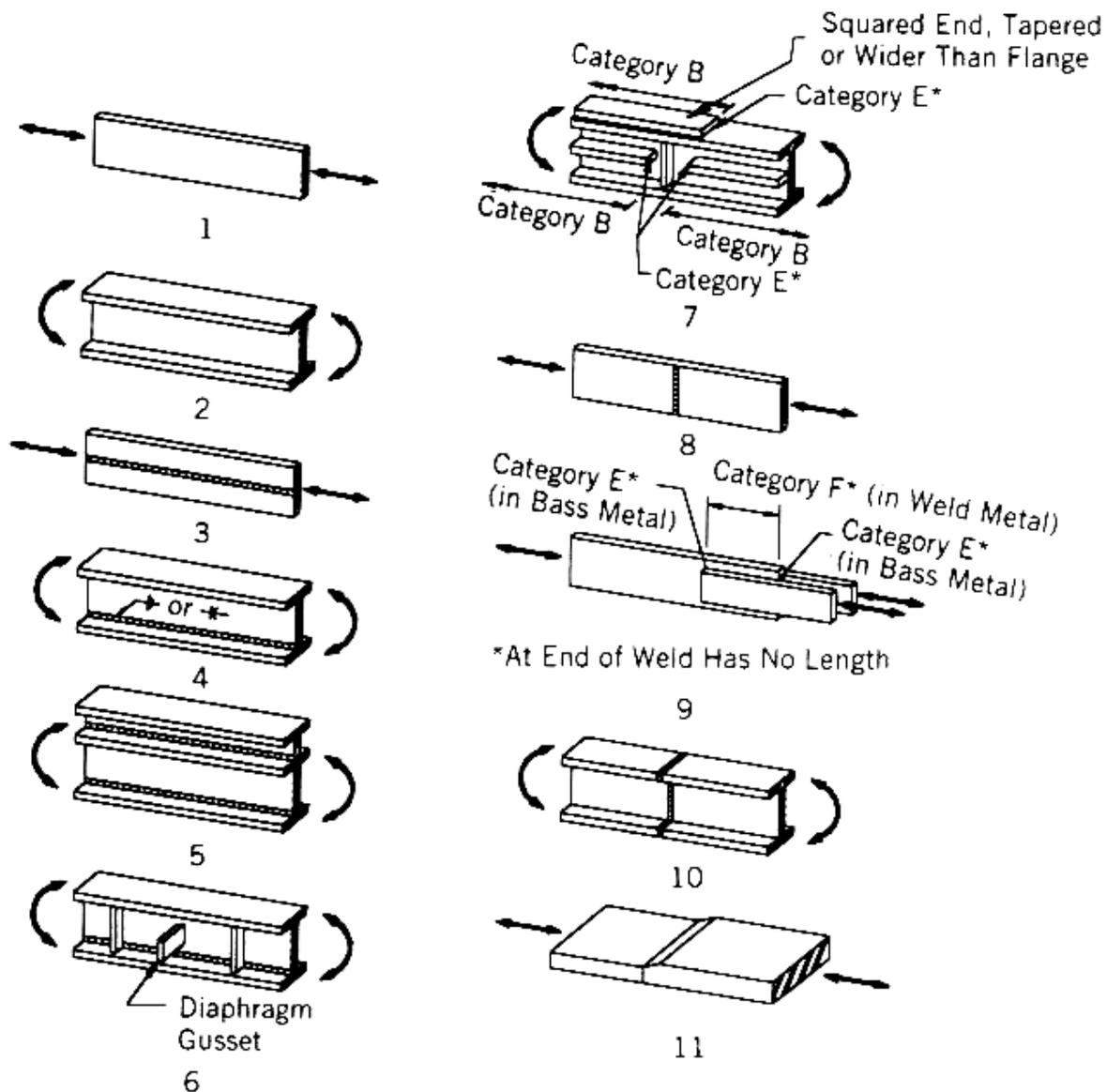
ซึ่งค่า Fraction of truck traffic in a single-lane สามารถหาได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า Fraction of truck traffic in a single-lane, p (AASHTO, 2003)

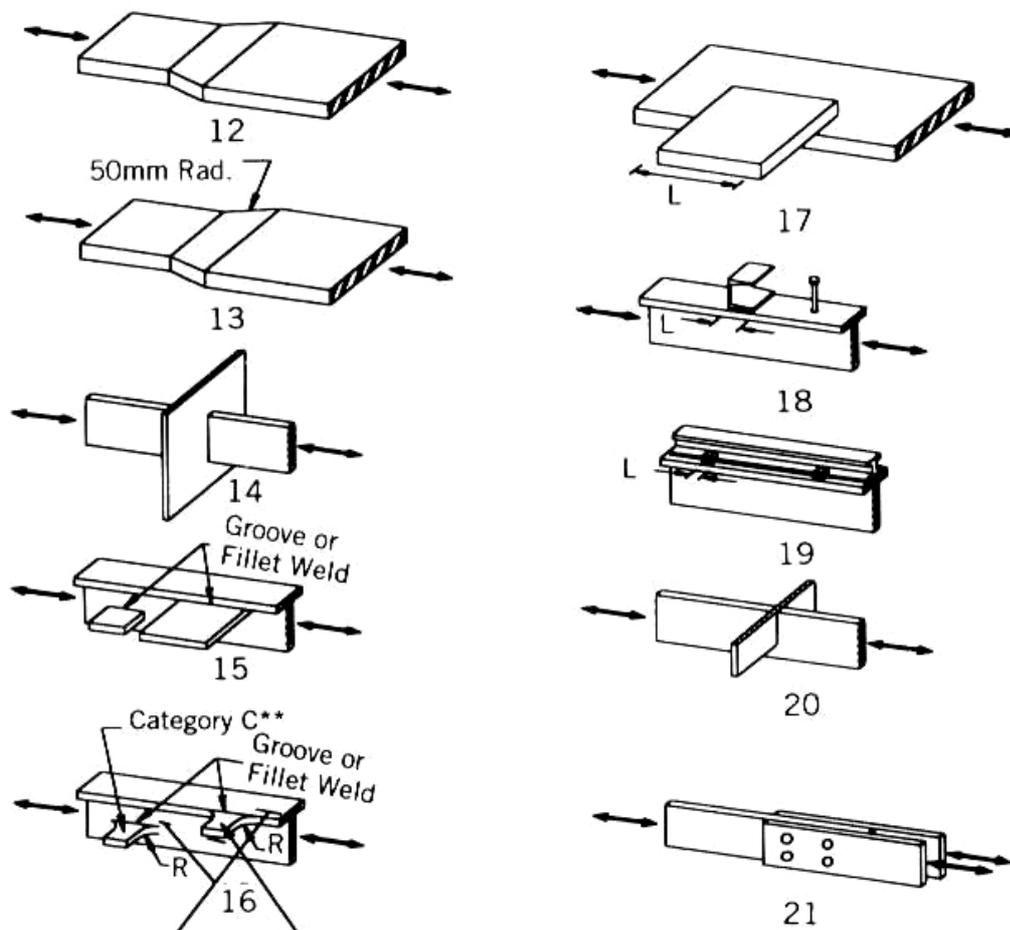
Number of Lanes Available to Trucks	p
1	1.00
2	0.85
มากกว่า 3	0.80

2.10.2 การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิต เพื่อใช้ในการหาอายุของสะพาน

การแบ่งประเภทของสะพานคอมโพสิต เพื่อใช้ในการหาอายุของสะพานนั้น จากมาตรฐานของ AASHTO นั้นได้แบ่งสะพานออกเป็น 9 ประเภท ซึ่งจะมีตั้งแต่ประเภท A ไปจนถึงประเภท E' โดยก่อนที่จะแบ่งประเภทนั้นจะต้องพิจารณาว่าสะพานคอมโพสิตนั้นตรงตามข้อกำหนดใด ซึ่งจะมีอยู่ 21 รูป มีหมายเลขของข้อกำหนดนั้นจะเริ่มตั้งแต่ 1 จนถึง 21 ดังที่แสดงในภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 รูปแบบข้อกำหนดของสะพานคอมโพสิตแบบต่าง ๆ (AASHTO, 2003)



Weld Condition*	Cat.
Unequal Thickness-Reinf. in Place	E
Unequal Thickness-Reinf. in Removed	D
Equal Thickness-Reinf. in Place	C
Equal Thickness-Reinf. Removed	B

*For Transverse Loading-Check Transition Radius for Possible Lower category

R**	Cat.	
	Fil.	Gr.
R>610	D	B
610>R>150	D	C
150>R>50	D	D
50>R	E	E

**Also Applies to Transverse Loading

ภาพที่ 2.28 รูปแบบข้อกำหนดของสะพานคอมโพสิตแบบต่าง ๆ (ต่อ) (AASHTO, 2003)

เมื่อเลือกรูปแบบของข้อกำหนดได้แล้ว จะต้องนำลำดับของเงื่อนไขของสะพานคอมโพสิต เพื่อไปแยกประเภทตามตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก ข

2.10.3 การหาอายุการใช้งานของสะพานคอมโพสิตตามมาตรฐาน AASHTO

จากมาตรฐานของ AASHTO สามารถหาอายุการใช้งานได้จาก สมการที่ 2.12

$$y = \frac{A}{n(365)(ADTT)_{SL}(\Delta F)_n^3} \quad (2.12)$$

โดย $(\Delta F)_n \geq \frac{1}{2}(\Delta F)_{TH}$

เมื่อ A = ค่าคงที่ จากตารางที่ 2.6

n = จำนวนรอบที่เกิดหน่วยแรง (Number of stress range cycles

per truck passage) จากตารางที่ 2.6

$(\Delta F)_n$ = Nominal Fatigue Resistance

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.13)$$

$$N = n(365)(75)(ADTT)_{SL} \quad (2.14)$$

เมื่อ N = No. of cycles (รอบ)

365 = จำนวนวัน ในหนึ่งปี

75 = จำนวนอายุการใช้งาน ที่ออกแบบโดย AASHTO

$(\Delta F)_{TH}$ = Constant fatigue threshold จากตารางที่ 2.5

$(ADTT)_{SL}$ = Single-lane ADTT จากสมการที่ 2.11

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ A และ Constant fatigue threshold (AASHTO, 2003)

ประเภท	Constant A ($\times 10^{11}$ MPa ³)	Fatigue Threshold (MPa)
A	82.0	165
B	39.3	110
B'	20.0	82.7
C	14.4	69.0
C'	14.4	82.7
D	7.21	48.3
E	3.61	31.0
E'	1.28	17.9

ตารางที่ 2.6 ค่า Number of stress range cycles per truck passage (AASHTO, 2003)

Longitudinal Members	ความยาวสะพาน	
	≥ 12 เมตร	≤ 12 เมตร
Simple-span girders	1.0	2.0
Continuous girders		
1. Near interior support	1.5	2.0
2. Elsewhere	1.0	2.0
Cantilever girders	5.0	
Trusses	1.0	