บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ความล้า [19] คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในลักษณะทางโครงสร้างของวัสดุที่เกิดขึ้นเป็นจุดๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงดึงแบบขึ้นลงซ้ำๆ โดยที่หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่ากำลังดึงประลัยสูงสุดของวัสดุ เมื่อมีหน่วยแรงแบบขึ้นลงซ้ำๆเกิดขึ้นในวัสดุ จะทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (micro crack) ขึ้นในวัสดุ รวมทั้งจะทำให้รอยแตกขนาดเล็กทั้งที่มีอยู่ในวัสดุอยู่ก่อนแล้วและที่เกิดขึ้นใหม่ขยายยาวขึ้นเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ (macro crack) เมื่อรอยแตกขนาดใหญ่นี้ขยายยาวขึ้นมากจนกระทั่งทำให้พื้นที่รับแรงของวัสดุลดลงจนกระทั่งไม่เพียงพอที่จะต้านแรงกระทำจากภายนอกได้ ก็จะเกิดการวิบัติของโครงสร้าง (failure) ขึ้น โดยการวิบัติเกิดขึ้นทั้งๆที่โครงสร้างไม่ได้ต้านทานแรงกระทำประลัยเลย

การวิบัติเนื่องจากความล้าสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การเปลี่ยนรูป (deformation) แบบพลาสติกก่อนเกิดรอยแตกจากความล้า (fatigue crack)
2. การเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (micro crack)
3. การขยายยาวและการรวมกันของรอยแตกเล็กๆ จนกลายเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ (macro crack)
4. การขยายยาวของรอยแตกขนาดใหญ่
5. การวิบัติ (failure)

สำหรับสะพานเหล็กตัวสะพานจะได้รับแรงกระทำแบบขึ้นลงซ้ำๆ เนื่องจากการแล่นผ่านของยวดยานที่แล่นผ่านสะพาน การที่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวนั้นส่งผลทำให้มีโอกาสที่จะมีความเสียหายเนื่องจากความล้าได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีหน่วยแรงคอนเซนเทรชั่น (stress concentration) ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงสูง เช่นในบริเวณรอยเชื่อม ทั้งนี้เนื่องจากในบริเวณรอยเชื่อมนั้นมีรอยตำหนิที่มีขนาดเล็กอยู่มาก รอยตำหนิเหล่านี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดหน่วยแรงคอนเซนเทรชั่น (stress concentration) นอกจากนี้รอยตำหนิดังกล่าวก็เปรียบเสมือนว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นอยู่ก่อนแล้ว ปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดความล้ามากหรือน้อยนั้นแบ่งเป็น 2

ปัจจัยคือ ค่าช่วงความเค้น (stress range) และจำนวนรอบสำหรับค่าช่วงความเค้นนั้นๆ (No. of cycles) สามารถอธิบายได้ดังนี้

การหาค่าช่วงความเค้นและจำนวนรอบสามารถกระทำได้โดยหาจากสัญญาณการตรวจวัด จึงเป็นการง่ายถ้าสัญญาณดังกล่าวมีลักษณะเป็นแบบคงที่ (constant amplitude) (รูปที่ (2-1)) จะหาค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นได้โดยการนำเอาค่าความเค้นสูงสุดลบด้วยค่าความเค้นต่ำสุดตามหลักการทางคณิตศาสตร์ ส่วนจำนวนรอบนั้นสามารถหาได้จากการนับจำนวนลูกคลื่นของสัญญาณดังกล่าว แม้ว่าสัญญาณจะมีลักษณะเป็นสัญญาณที่มีความยาวก็ยังสามารถที่จะใช้วิธีการนี้ได้เช่นเดียวกัน ส่วนในกรณีที่สัญญาณมีลักษณะแบบไม่คงที่ (variable amplitude) [14] แต่มีลักษณะเป็นแบบแถบแคบๆ (narrow-band) ดังรูปที่ (2-2b) เป็นการง่ายเนื่องจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนั้น แต่ละรอบที่เกิดขึ้นมานั้นสามารถหาได้ง่าย ซึ่งสามารถที่จะหาจำนวนรอบโดยการนับรอบของค่าช่วงความเค้นที่มีค่าเท่ากัน และสามารถนำค่าต่างที่ได้มานั้นมาทำการเขียนแผนภูมิแท่งสำหรับจำนวนรอบในแต่ละค่าช่วงความเค้นได้ดังรูปที่ (2-3) แต่ความเป็นจริงในทางปฏิบัติแล้วค่าช่วงความเค้นที่ได้มาจากการตรวจวัดภาคสนามนั้นมีความเป็นไปได้น้อยที่ค่าช่วงความเค้นดังกล่าวจะมีลักษณะคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากค่าช่วงความเค้นที่ได้จากกการตรวจวัดเกิดขึ้นจากปัจจัยที่มีความแตกต่างกันเช่น น้ำหนักของยวดยานที่แล่นผ่านสะพาน, ระยะระหว่างเพลา, ปริมาณการจราจร เป็นต้น หรือถ้าค่าหน่วยแรงเป็นดังรูปที่ (2-2a) ในกรณีสำหรับค่าของน้ำหนักที่เปลี่ยนไปมีแล้วจะเป็นการยากสำหรับการหาจำนวนรอบในแต่ละค่าช่วงความเค้นเนื่องจากในแต่ละรอบนั้นไม่สามารถที่จะสังเกตุเห็นได้เด่นชัดเหมือนกับรูปที่ (2-2b) ซึ่งอาจจะมีรอบเล็กๆขึ้นอยู่ในรอบใหญ่ๆ ที่เกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการแยกแยะสัญญาณที่ได้มาจากการตรวจวัดออกเป็นค่าช่วงความเค้นต่างๆ โดยอาศัยวิธีการที่เรียกว่าเรนโฟล์วเคาน์ติ่ง (Rainflow Counting Method) [9]

วิธีการเรนโฟล์วนี้ได้ถูกทำคิดค้นโดย Matsuishi และ Endot [9] และต่อมาถูกพัฒนาโดย H. Anzai และ T. Endo [3] และสุดท้าย S. D. Downing และ D. F. Socie [4] ได้นำมาปรับปรุงอีกครั้ง โดยหลักการของเรนโฟล์วสามารถที่จะอธิบายได้อย่างง่ายดังนี้ ทำการพิจารณาสัญญาณในรูปที่ (2-4a) จากชื่อเรนโฟล์วนั้น สื่อความหมายมาจากแนวความคิดของการหยดลงน้ำฝน ณ ตำแหน่งที่ขอบหลังคาของพระเจดีย์ในประเทศญี่ปุ่น จากสัญญาณในรูปที่ (2-4a) ทำการจินตนาการให้มีหยดน้ำเริ่มไหลจากตำแหน่งเริ่มต้นของสัญญาณ และด้านในของจุดยอดทุกยอด (B) เมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางเกิดขึ้นจะทำการจินตนาการให้มีการหยดลงมา (B-B') เสมือนหนึ่งว่า ณ.ตำแหน่งนั้นคือขอบหลังคา การไหลนั้นจะหยุดก็ต่อเมื่อหยดน้ำนั้นไหลเจอกับหยดน้ำที่ไหลมา

จากขั้นที่สูงกว่า (F) หรือเมื่อหยดน้ำดังกล่าวคือจุดตรงข้ามที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับ (นับตามหลักการทางคณิตศาสตร์) จุดที่มาจากจุดเริ่มต้น (B') การไหลแต่ละครั้งนั้นจะทำการนับเป็นครึ่งรอบ ดังนั้นความไม่สม่ำเสมอของสัญญาณหน่วยแรงสามารถที่จะลดรูปมาสู่จำนวนครึ่งรอบสามารถที่จะแสดงสัญญาณดังกล่าว (รูปที่ (2-4a)) ในรูปของวงรอบฮิสเตอริสิส (Hysteresis loop) ได้ดังรูปที่ (2-4b) เมื่อผ่านขบวนการเรนโฟล์วแล้วก็จะได้สิ่งที่ต้องการออกมา 2 ประการคือ ค่าช่วงความเค้นและจำนวนรอบในแต่ละค่าช่วงความเค้นซึ่งสามารถที่จะนำเอาค่าดังกล่าวทั้งสองนั้นมาทำการเขียนแผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่าช่วงความเค้นกับจำนวนรอบในแต่ละค่าช่วงความเค้นได้ ค่าช่วงความเค้นที่ได้ออกมานั้นจะสามารถทำเป็นค่าช่วงความเค้นที่มีลักษณะคงที่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2-1) และจำนวนรอบที่เกิดขึ้นนั้นสามารถหาได้จากการรวมจำนวนรอบทุกๆค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้นจริง [14]

$$S_e = (\Sigma f_i S_{ri}^{3})^{1/3} \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่ f_i คือ ความถี่ของค่าช่วงความเค้นช่วงที่ i

S_{ri} คือ ค่าช่วงความเค้นช่วงที่ i

S_e คือ ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล

โดยทั่วไปวิธีพื้นฐานที่ใช้แสดงข้อมูลความล้าคือ การใช้กราฟ S-N (S-N diagram) [10] ซึ่งคือกราฟบันทึกจำนวนรอบของรอบความเค้น (stress cycles) ที่ทำให้เกิดการวิบัติ ที่ระดับของขนาดของหน่วยแรง (stress amplitude) ต่างๆ โดยที่ N จะเป็นค่าค่าจำนวนรอบของรอบความเค้นที่ทำให้เกิดการวิบัติ และ S จะเป็นค่าขนาดของค่าความเค้นของรอบความเค้นต่างๆ กราฟ S-N ดังกล่าวนี้ได้มาจากการทดสอบในห้องทดลอง โดย Wohler [21] ซึ่งเป็นบุคคลที่ทำการศึกษาเรื่องกำลังการรับน้ำหนักของรางรถไฟ ซึ่งแบบจำลองจะประกอบด้วยการหมุนของคานยื่นที่มีแรงกระทำตรงปลายด้านที่เป็นอิสระ (ดังรูปที่ (2-5a)) โดยที่ปลายด้านที่มีการยึดนั้นจะใช้ไฟเบอร์ติดบนผิวของคานยื่น ณ.ตำแหน่ง X ซึ่งจะรับหน่วยแรงดังรูปที่ (2-5b) ซึ่งขนาดของหน่วยแรง (stress amplitude, S) นั้นจะเปลี่ยนโดยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ต่างกันในแต่ละตัวอย่างของการทดสอบ จำนวนรอบของการหมุน (number of rotation, N) จะเป็นจำนวนรอบจนกระทั่งเกิดการพังของคานที่ทำการทดสอบ และสามารถที่จะทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า S และ ค่า N ได้ดังรูปที่ (2-5c) ซึ่งจากกราฟที่ได้มานั้นจะพบว่าเมื่อจำนวนรอบมากขึ้น ค่าของหน่วยแรงนั้นจะมีค่าลดลง หรือกล่าวได้ว่าจำนวนรอบในการวิบัตินั้นมีค่ามากขึ้น และจากกราฟนั้นก็จะพบว่าค่าน้อยสุดของหน่วยแรง (minimum stress, S_0) ซึ่งถ้าวัสดุมีการกระทำจากหน่วยแรงที่มีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าวแล้วจะไม่มีการวิบัติเนื่องจากความล้าแม้ว่าจะมีจำนวนรอบอนันต์ก็ตามค่าดัง

กล่าวนี้เรียกว่า ค่าพิกัดความล้า (fatigue limit) การทดสอบดังกล่าวนั้นจะกระทำการให้หน่วยแรงที่มีลักษณะคงที่เรียกการทดสอบแบบนี้ว่าการทดสอบความล้าเมื่อมีหน่วยแรงกระทำคงที่ (Constant – amplitude fatigue test) การทดสอบดังกล่าวนี้เป็นการหาค่าพื้นฐานต่างของความล้าสำหรับวัสดุที่เป็นชิ้นส่วนของโครงสร้าง การทดสอบแบบนี้สามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่าหน่วยแรงกับเวลาได้ดังรูปที่ (2-1) ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าค่าช่วงความเค้น (stress range, S_r) คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุด ครึ่งหนึ่งของค่าช่วงความเค้นก็คือขนาดของหน่วยแรง (stress amplitude) และค่าเฉลี่ยของค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่สุดคือค่ากลางของหน่วยแรง (mean stress, S_m) ซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ก็ได้ โดยทั่วไปนิยมที่จะใช้ค่าช่วงความเค้นกับจำนวนรอบนำมาเขียนกราฟ S-N ในทางปฏิบัติค่าของหน่วยแรงที่กลับไปกลับมานี้จะมีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าลักษณะของขนาดของหน่วยแรงคงที่ (constant amplitude stressing) โดยจะมีลักษณะเป็นขนาดของหน่วยแรงที่ไม่คงที่ (variable amplitude stressing) ซึ่งค่าช่วงความเค้น (stress range) และค่ากลางของหน่วยแรง (mean stress) อาจไม่คงที่ จากผลดังกล่าวนั้นทำให้ไม่สามารถที่จะใช้กราฟ S-N ในการประเมินหาอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล่านี้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วค่าช่วงความเค้นจะมีผลกระทบต่อความล้ามากกว่าค่ากลางของหน่วยแรงมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการพิจารณาถึงค่าแตกต่างของค่ากลางหน่วยแรง ส่วนค่าช่วงความเค้นที่ไม่คงที่นั้นจะทำการแปลงมาเป็นค่าช่วงความเค้นที่คงที่ได้โดยอาศัยจากสมการที่ (2-1)

กราฟ S-N ที่ใช้สำหรับการวิจัยนี้จะเป็นกราฟที่อ้างอิงจากมาตรฐานของกรมทางหลวงประเทศสหรัฐอเมริกา (AASHTO) [20] ปี ค.ศ. 1996 และจากมาตรฐานการก่อสร้างของประเทศญี่ปุ่น (JSSC) [6] ในปี ค.ศ. 1995 โดยกราฟ S-N ที่นำมาใช้นี้จะไม่มีการกำหนดค่าพิกัดความล้า (fatigue limit) ซึ่งการกำหนดดังกล่าวนั้นจะทำให้คำนวณระยะเวลาการใช้งานอย่างปลอดภัยอยู่ในด้านปลอดภัย โดยความเป็นจริงแล้วค่าพิกัดความเค้นสำหรับค่าหน่วยแรงที่มีค่าไม่คงที่นั้น จะมีค่าต่ำกว่าค่าพิกัดความเค้นของค่าหน่วยแรงที่มีค่าคงที่ แต่อาศัยจากการกำหนดที่ผ่านมาข้างต้นนั้นจะทำการหาอายุการใช้งานอย่างปลอดภัยอยู่ในย่านที่มีความปลอดภัย ซึ่งการพิจารณาใช้ในกราฟ S-N นั้นจะต้องพิจารณาถึงรูปแบบของรอยเชื่อม (welding category) [6], [20] เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องสำหรับการคำนวณหาอายุการใช้งาน ซึ่งรูปแบบของรอยเชื่อมในต่ละมาตรฐานนั้นจะมีความแตกต่างกันตามแต่ผู้ที่ทำการทดสอบนั้นได้ทำการกำหนดไว้ ซึ่งในแต่ละรูปแบบของรอยเชื่อมนั้นจะมีกำลังความสามารถในการรับความล้าแตกต่างกันไป (ตารางที่ (4-5)) [6], [20]

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการประเมินหาอายุการใช้งานที่เหลือจากปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการดังกล่าวข้างต้น โดยที่จะแบ่งได้เป็น 2 แนวทางใหญ่ๆ คือ

1 การประเมินตามหลักการของ AASHTO [13]

2 การประเมินตามหลักการของ Palmgren-Miner [6]

ซึ่งวิธีการประเมินทั้ง 2 นั้น จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์กันระหว่างค่าช่วงความเค้นกับจำนวนรอบในแต่ละค่าช่วงความเค้นนั้น ซึ่งสามารถอธิบายวิธีประเมินทั้ง 2 แนวทางอย่างละเอียดได้ดังนี้

2.2 <u>การประเมินตามหลักการของ AASHTO</u> [13]

การประเมินนี้จะกระทำกับชิ้นส่วนที่ไม่มีรอยแตกหรือไม่มีการซ่อมแซมมาก่อน ชิ้นส่วนดังกล่าวนี้จะถูกกระทำด้วยหน่วยแรงดั้งเดิมที่ได้ออกแบบให้รับไว้ในขั้นตอนของการออกแบบ ซึ่งจะไม่ครอบคลุม 1) ผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงดัดอันดับที่สองที่มิได้คำนวณเอาไว้ในขั้นตอนการออกแบบ 2) การประเมินและการซ่อมแซมชิ้นส่วนที่มีรอยแตก หรือ 3) ผลกระทบอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนและการพังทางเชิงกล (mechanical damage) [13]

อายุการใช้งานที่เหลือ (remaining fatigue life) นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ 1) อายุกลางการใช้งานที่เหลือ (remaining mean life) จะเป็นการประมาณที่มีความเป็นไปได้ดีที่สุดสำหรับการหาอายุการใช้งานที่เหลือ โดยการประเมินแบบนี้นั้นจะใช้ความเป็นไปได้เท่ากับร้อยละ 50 โดยจะใช้สำหรับชิ้นส่วนทั้งแบบรีดันแดนท์ (redundant) และนันรีดันแดนท์ (nonredundant) 2) อายุการใช้งานที่เหลืออย่างปลอดภัย (remaining safe life) จะมีความปลอดภัยมากขึ้นและอายุการใช้งานที่เหลืออย่างปลอดภัยนี้จะมีความแตกต่างกันสำหรับชิ้นส่วนและแบบนันรีดันแดนท์ (nonredundant) กับชิ้นส่วนแบบรีดันแดนท์ (redundant) เนื่องจากความแตกต่างกันในเรื่องของระดับความปลอดภัย โดยที่ความเป็นไปได้เท่ากับร้อยละ 97.7 สำหรับชิ้นส่วนแบบ redundant และความเป็นไปได้เท่ากับร้อยละ 99.9 สำหรับชิ้นส่วนแบบ nonredundant

2.2.1 *<u>ค่าช่วงความเค้น (stress range)</u>* *(S_r)*

ในขั้นตอนพื้นฐาน ค่าช่วงความเค้นสามารถคำนวณได้จากแผนภูมิแห่งแสดงค่าช่วงความเค้นซึ่งได้มาจากการตรวจวัดสะพานภายใต้สภาพการจราจรปกติ หรืออาจใช้ค่าที่ได้มาจากการ

คำนวณจากการนำรถบรรทุกมาตรฐานแล่นผ่านสะพานในแบบจำลอง (โดยที่ค่าช่วงความเค้นดังกล่าวที่ได้จากวิธีการทั้งสองนั้นจะต้องถูกทำการปรับปรุงให้มีค่าความน่าเชื่อถือมากขึ้นซึ่งจะกล่าวต่อจากนี้ไป) สมการที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล (effective stress range, S_e) ที่ได้พัฒนามาจากการทดสอบทางด้านความล้าของชิ้นส่วนภายใต้น้ำหนักการจราจรที่ได้สมมุติขึ้น สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-1) [14]

$$S_e = (\Sigma f_i S_{ri}^3)^{1/3} \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่ f_i คือ ความถี่ของค่าช่วงความเค้นช่วงที่ i

S_{ri} คือ ค่าช่วงความเค้นช่วงที่ i

S_e คือ ค่าช่วงความเค้นประสิทธิผล

ความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้านั้น ที่เนื่องมาจากจำนวนรอบของค่าช่วงความเค้นประสิทธิผลจะมีค่าความเสียหายเท่ากับความเสียหายที่เกิดจากค่าช่วงความเค้นที่แสดงในแผนภูมิแท่งแสดงค่าช่วงความเค้น สมการที่ (2-1) นั้นจะตั้งอยู่บนพื้นฐานของหลักการไมเนอร์ (Miner's Law) [10] และค่าความชันมีค่าเท่ากับ –1/3 ของเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่าลอกกาลิทึมของค่าช่วงความเค้นกับค่าลอกกาลิทึมของจำนวนรอบสำหรับกราฟ S-N

2.2.2 <u>รถบรรทุกมาตรฐานสำหรับความล้า (fatigue truck)</u>

รถบรรทุกมาตรฐานนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ (2-6) รถบรรทุกคันดังกล่าวนั้นจะใช้เป็นรถบรรทุกสำหรับการประเมินความล้าซึ่งเสนอโดย Schilling [14], [15] โดยที่รถบรรทุกมาตรฐานนี้จะเป็นตัวแทนของรถบรรทุกที่มีความหลากหลายกันในเรื่องของ ขนิดรถและน้ำหนักที่แล่นอยู่ในการจราจรจริง ทั้งนี้เนื่องมาจากในประเทศสหรัฐอเมริการนั้นรถบรรทุกที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อสะพานได้แก่รถบรรทุกกึ่งพ่วง (semi-trailor) ที่มี 4 เพลาและ 5 เพลา [16] ซึ่งระยะระหว่างเพลาและน้ำหนักที่กระจายลงในแต่ละเพลาของรถบรรทุกมาตรฐานนั้นจะแทนสำหรับรถบรรทุกทั่วไป โดยที่รถบรรทุกกึ่งพ่วงนั้นถ้าเพลาเป็นเพลาคู่นั้นจะแทนให้เป็นเพลาเดี่ยวสำหรับรถบรรทุกมาตรฐาน

ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะแทนรถบรรทุกมาตรฐานนั้นด้วยรถบรรทุกของมาตรฐาน AASHTO แบบ HS-20 ซึ่งรถบรรทุกแบบนี้ถูกเสนอโดย Moses และ Pavia [11] ในการประเมินความล้านั้นจำ

เป็นที่จะต้องใช้ระยะระหว่างเพลากลางกับเพลาท้ายมีค่าเท่ากับ 30ฟุต (หรือ 9.14 เมตร) [20] ทั้งนี้เนื่องมาจากเพื่อความถูกต้องในการประเมินความล้า เช่นถ้าสะพานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาที่มีความยาวช่วงเท่ากับ 60 ฟุต แต่ใช้ระยะระหว่างเพลากลางกับเพลาท้ายเท่ากับ 14 ฟุต จะส่งผลทำให้มีการเพิ่มค่ามากที่สุดของโมเมนต์อีก 55% ซึ่งส่งผลทำให้อายุการใช้งานลดลงประมาณ 3.7 เท่า

2.2.3 *การกระแทก (Impact)*

สำหรับการประเมินความล้านั้นค่าปัจจัยการกระแทก (impact factor) จะกำหนดจากการเพิ่มขึ้นของค่าช่วงความเค้น ซึ่งมีค่ามากกว่าจุดยอดของหน่วยแรงเนื่องมาจากผลทางพลศาสตร์ (dynamic effect) ค่าปัจจัยการกระแทกนี้จะแตกต่างกันตามรถบรรทุกที่แล่นผ่านสะพาน ค่าปัจจัยการกระแทกนั้นจะแตกต่างกันตามสะพาน [12] ที่ได้ทำการพิจารณาแต่จะไม่ปรากฏเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงสะพานที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบแบบทางสถิตย์ตามมาตรฐานการออกแบบของกรมทางหลวงประเทศสหรัฐอเมริกา (AASHTO) [20] แต่จะขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวถนนหรือร่องบริเวณปลายสะพาน ในขั้นตอนพื้นฐานนั้นค่าปัจจัยการกระแทกสามารถที่จะแสดงด้วยค่าเฉลี่ยของค่าประสิทธิผลปัจจัยการกระแทกสำหรับสะพานที่มีผิวทางเรียบและจุดต่อที่ดีของสะพาน

ค่าปัจจัยการกระแทกมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 จะใช้กับขั้นตอนการประเมินที่อยู่บนพื้นฐานที่ว่าค่าของข้อมูลนั้นจะได้มาจากการตรวจวัดภาคสนาม ซึ่ง Moses และ Nyman [12] ได้เสนอให้มีการใช้ค่าปัจจัยการกระแทกให้มีค่าเท่ากับ 1.12 ส่วน Schilling [17] ได้เสนอให้ค่าปัจจัยการกระแทกมีค่าเท่ากับ 1.15 และ 1.17 สำหรับสะพานที่มีคานแบบธรรมดา (simple span) และคานต่อเนื่อง (continuous span) ตามลำดับ ค่าดังกล่าวนั้นเป็นค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันตามแต่ละสะพาน และไม่ได้มีการคิดจากค่าความเรียบของผิวทาง เนื่องจากเป็นขั้นตอนการประเมินซึ่งจะใช้ค่าปัจจัยการกระแทกมีค่าเท่ากับ 1.10 สำหรับผิวทางที่เรียบ และค่าปัจจัยดังกล่าวนั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 1.10 ถึง 1.30 สำหรับผิวถนนที่มีความขรุขระ

2.2.4 *การกระจายทางด้านข้าง (Lateral Distribution) DF*

สำหรับชิ้นส่วนที่มีการดัดตัวตามแนวยาวนั้นค่าปัจจัยการกระจายตัวทางด้านข้างนั้นจะใช้ทำการประยุกต์สู่ค่าโมเมนต์ที่เกิดจากรถบรรทุกมาตรฐาน (fatigue truck) กระทำต่อชิ้นส่วนที่

กำลังพิจารณา ค่าปัจจัยการกระจายตัวทางด้านข้างสำหรับการประเมินความล้าจะอยู่บนพื้นฐานของเงื่อนไขที่เกิดขึ้นบ่อยๆ ซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานที่ว่ารถบรรทุกหนึ่งคันตรงตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางการจราจร ซึ่งช่องทางการจราจรดังกล่าวคือช่องทางการจราจรด้านนอกทั้งนี้เนื่องมาจากช่องทางการจราจรดังกล่าวนั้นจะมีจำนวนรถบรรทุกจำนวนมากที่แล่นในช่องทางดังกล่าว สำหรับชิ้นส่วนรูปตัวไอ (I) ขั้นตอนพื้นฐานในการประเมินความล้าจะทำการกำหนดโดยให้ค่าโมเมนต์เนื่องจากรถบรรทุกนั้นจะกระจายโดยพฤติกรรมของคานที่มีจุดรองรับ ในการหาค่าปัจจัยการกระจายตัวทางด้านข้างนั้นสามารถที่หาได้ดังนี้

สำหรับคานตัวใน (Interior girder) ขั้นตอนพื้นฐานในการหาค่าการกระจายทางด้านข้างจะมีค่าเท่ากับ *(S-3)/S* โดยที่ S คือระยะห่างระหว่างคานทั้งสองตัวมีหน่วยเป็นฟุต ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ได้พัฒนามาจากการทดลอง

สำหรับคานด้านในนั้น $DF = DF_i = S/D$ แต่ค่าดังกล่าวนี้จะต้องมีค่าไม่มากกว่าค่า *(S-3)/S* เมื่อ *S* คือระยะห่างระหว่างคาน (ฟุต) สำหรับคานด้านนอกนั้น ทาง AASHTO ได้กำหนดให้มีค่า $DF_o = 0.9 - 0.8P$ เมื่อค่า *P* นั้นมีค่าน้อยกว่า 0.5 และ ค่า DF_o จะต้องมีค่าที่ไม่น้อยกว่าค่า DF_i โดยที่ค่า *P* คือค่าระยะจากคานตัวนอกถึงตำแหน่งกึ่งกลางของเลนด้านนอกที่ใกล้กับคานตัวนอกที่สุดและถูกหารด้วย ค่าระยะห่างระหว่างคานทั้งสอง (*S*) (ดูรูปที่ (2-7) ประกอบ)[13]

2.2.5 *ค่าคงที่ของลักษณะการเชื่อมในแบบต่างๆของชิ้นส่วน (Detail consant , K)*

ในการคำนวณหาอายุการใช้งานที่เหลือนั้นจะตั้งอยู่บนพื้นฐานของค่าความเค้นที่ยอมให้สำหรับความล้า (allowable fatigue stresses) ที่ได้ทำการศึกษา ณ มหาวิทยาลัยลีไฮน์ (Lehigh University) [7] และ AASHTO [20] จำนวนรอบทั้งหมด (N) ที่ชิ้นส่วนที่ได้ทำการพิจารณานั้นสามารถที่จะต้านทานได้ก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญคือ ค่าช่วงความเค้น ณ.ตำแหน่งของรายละเอียดและค่าหน่วยแรงเฉพาะที่ที่เกิดขึ้น ในการคำนวณค่าความแตกต่างของค่าหน่วยแรงเฉพาะที่ที่เกิดขึ้นนั้นพบว่า จะมีความแตกต่างกันในเรื่องของชนิดของรอยเชื่อมที่สามารถที่จะทำการแบ่งออกได้เป็น 8 ประเภทมีชื่อดังนี้ A, B, B', C, D, E และ E' ค่ากลางของค่าช่วงความเค้น (mean stress range, S_m) นั้นชิ้นส่วนสามารถที่จะรับจำนวนรอบ (*N*) สามารถแสดงได้ดังสมการ[13]

$$N S^b = A \qquad (2\text{-}2)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟในรูปมาตราส่วนลอกการิทึม (log-log scale) เส้นตรงในกราฟนั้นจะตัดกันที่ A และค่าความชันของเส้นตรงนั้นเป็นลบที่มีค่าเท่ากับ " b " ซึ่งสมการที่ (2-2) นั้นจะหามาได้จากการกระจายตัวของข้อมูลความล้า โดยได้ทำการสมมุติให้การกระจายตัวของค่าช่วงความเค้นนั้น ให้เป็นไปตามการกระจายตัวทางสถิติแบบธรรมดาของลอกการิทึม (log normal statistical distribution) [12] สำหรับค่าช่วงความเค้นนั้นกำหนดโดยสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ที่ต่ำกว่าค่ากลางของค่าช่วงความเค้น กราฟที่ใช้ในการออกแบบจะถูกกำหนดโดยสมการ [13]

$$N S_{95}{}^{b} = A \qquad (2\text{-}3)$$

โดยที่ ค่า S_{95} เป็นค่าช่วงความเค้นที่ต่ำกว่าค่ากลางของค่าช่วงความเค้นเท่ากับสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า A คือค่า ณ.ตำแหน่งที่ตัดกันสำหรับกราฟที่ใช้ในการออกแบบ ค่าความชัน b นั้นมีค่าเท่ากับ 3 และสำหรับค่า A สำหรับแต่ละรูปแบบของรอยเชื่อมนั้นสามารถหาได้จากการตัดกันระหว่างกราฟที่ใช้ในการออกแบบแต่ละรูปแบบของรอยเชื่อมกับแกนนอน (แกนที่แสดงจำนวนรอบ) ซึ่งค่าดังกล่าวนั้นสามารถที่จะนำไปสู่การหาค่าคงที่ของลักษณะการเชื่อมในแบบต่างๆของชิ้นส่วนที่ได้ทำการพิจารณา ซึ่งจะเป็นค่าที่จำเป็นในการประเมินหาค่าอายุการใช้งานที่เหลือ ค่าคงที่ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการ [7]

$$K = \frac{A}{(365 \times 10^{6})} \qquad (2\text{-}4)$$

โดยที่ค่าคงที่ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ (2-1)

2.2.6 <u>จำนวนรอบต่อการแล่นผ่านของรถบรรทุก (Cycles Per Truck Passage , C)</u>

สำหรับสะพานช่วงสั้น (ความยาวช่วงน้อยกว่า 40 ฟุต หรือ 12.2 เมตร) ที่มีจุดรองรับแบบธรรมดา การแล่นผ่านของรถบรรทุกมาตรฐานที่แล่นผ่านสะพานนั้นจะทำให้เกิดจำนวนรอบขึ้น 2 รอบ [16), (18] และสำหรับช่วงยาวที่มีจุดรองรับแบบธรรมดานั้นการแล่นผ่านของรถบรรทุกดังกล่าวนั้น จะทำให้เกิดจำนวนรอบขึ้น 1 รอบที่มีความซับซ้อนที่มีจุดสูงสุด (peak) ขึ้น 2 ยอด และมีจุดต่ำสุดเกิดขึ้น (valley) อยู่ระหว่างจุดยอดทั้งสอง รูปร่างที่ถูกต้องของรอบที่มีความซับซ้อนดังกล่าวสามารถที่จะทำการคำนวณสำหรับช่วงของสะพานโดยใช้เส้นอิทธิพล (influence line) และผลกระทบทั้งหมดของรอบที่มีความซับซ้อนดังกล่าวนั้นสามารถที่จะแสดงได้ด้วยจำนวนรอบเทียบ

เท่ากับรอบที่เกิดขึ้น (equivalent number of individual cycles) [16], [18] เมื่อใช้หลักการดังกล่าวแล้วจำนวนรอบที่เทียบเท่าสามารถที่จะทำการเขียนกราฟเสมือนฟังก์ชันของความยาวช่วงสำหรับความแตกต่างกันในกรณีต่างๆ และสำหรับหลายกรณีแล้วจำนวนรอบต่อการแล่นผ่านของรถบรรทุกจะมีค่าเท่ากับ 1 (ช่วงสะพานยาว) ส่วนแบบที่เหลือมีค่ามากกว่า 1

2.2.7 *ค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือ (Reliability Factor , R_S)*

ในการคำนวณหาอายุการใช้งานที่เหลือแบบค่ากลาง (remaining mean life) นั้นไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำค่าความน่าเชื่อถือหรือค่าความปลอดภัย (safety factor) มาทำการคำนวณหาค่าช่วงความเค้นเนื่องจากนั่นคือค่าประมาณที่ดีที่สุดสำหรับค่าช่วงความเค้นที่เกิดขึ้น สำหรับในการคำนวณหาอายุการใช้งานที่เหลืออย่างปลอดภัย (remaining safe life) นั้นจำเป็นที่จะต้องมีการนำเอาค่าความน่าเชื่อถือ หรือค่าความปลอดภัยนำมาคิดค่าช่วงความเค้นเพื่อที่จะให้มีระดับความปลอดภัยตามความต้องการ ความต้องการดังกล่าวนั้นจะต้องมีความน่าจะเป็นที่อายุการใช้งานที่ต้องการมีค่ามากกว่าค่าอายุการใช้งานที่เหลืออย่างปลอดภัย ในการหาค่าความน่าเชื่อถือนั้นจะหาโดยอาศัยจากเลขที่บ่งชี้ถึงความปลอดภัย (safety index) ซึ่งก็คือค่าตัวแปรทางสถิติที่กำหนดเป็นค่า β สามารถเขียนในรูปของความสัมพันธ์เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นดังสมการ [5]

$$\text{safety index , } \beta = \frac{[\text{ Mean Value of safety margin of } \bar{Z}\ ]}{[\text{ Standard deviation of } Z(\sigma_Z)\ ]}$$

ค่าความปลอดภัยนั้นสำหรับการประเมินหาอายุการใช้งานที่เหลือนั้น จะมีค่าเท่ากับ 2 และ 3 สำหรับชิ้นส่วนแบบรีดันแดนท์ (redundant) และนันรีดันแดนท์ (nonredundant) ตามลำดับ จากกราฟรูปที่ (2-8) เมื่อค่าความปลอดภัยเป็นค่าดังกล่าวข้างต้นแล้วจะทำให้ได้ค่าความน่าเชื่อถือพื้นฐาน (basic reliability factor, R_{SO}) เท่ากับ 1.35 และ 1.75 สำหรับชิ้นส่วนแบบรีดันแดนท์ (redundant) และนันรีดันแดนท์ (nonredundant) ตามลำดับ [13] ดังนั้นค่าความน่าเชื่อถือ หรือค่าความปลอดภัยที่จะนำไปคูณกับค่าช่วงความเค้นนั้นจะเป็นตามสมการ [13]

$$R_S = R_{SO}\, F_{S1}\, F_{S2} \qquad (2\text{-}5)$$

โดยที่

F_{S1} (Measured Stresses) [13] คือ ทางเลือกที่ยอมให้ทางวิศวกรใช้แผนภูมิค่าช่วงความเค้นที่ได้มาจากการตรวจวัดค่าช่วงความเค้นในสถานีตรวจวัด ณ ตำแหน่งวิกฤติ เนื่องจากความไม่แน่ใจในการตรวจวัดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (coefficient of variation, *cov*) มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 3 แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนนั้นจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยความไม่แน่ใจดังกล่าวนั้นเป็นผลเนื่องจาก 1) การกระจายของการตรวจวัด 2) ความแตกต่างกันในน้ำหนักของรถบรรทุกที่มีมากกว่าช่วงเวลาและฤดูกาลที่ได้ทำการตรวจวัด (สมมุติให้การตรวจวัดเสร็จสิ้นสมบูรณ์ในระยะเวลา 2-3 วัน และ 3) การเปลี่ยนไปในเรื่องของการกระแทกที่มีความเป็นไปได้อันเนื่องจากการเปลี่ยนไปของลักษณะของผิวทาง ซึ่งเมื่อนำเอาค่าดังกล่าวที่ผ่านมานี้ไปทำการหาค่าความน่าเชื่อถือ หรือค่าความปลอดภัยนั้นสามารถที่จะหาออกมาได้เท่ากับ 1.14 (ย้อนดูพบว่าครั้งก่อนนี้หาได้เท่ากับ 1.35) เมื่อค่าบ่งชี้ความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาสมการที่ (2-5) แล้วจะพบว่า F_{S1} = 1.14 / 1.35 = 0.85 (ค่าดังกล่าวนี้ใช้ได้ทั้งชิ้นส่วนทั้งแบบรีดันแดนท์ (redundant) และนันรีดันแดนท์ (nonredundant))

F_{S1} (Site Truck Weight Data) [13] คือ ทางเลือกในหัวข้อนี้จะทำการแจกแจงตามน้ำหนักรวมของรถบรรทุกมาตรฐาน (gross weight of the fatigue truck) ทางเลือกแรกจะอนุญาติให้วิศวกรทำการปรับปรุงค่าน้ำหนักรวมบนพื้นฐานของการตัดสินใจและตำแหน่งที่ตั้งของสะพานที่ทำการตรวจวัดการตัดสินใจนั้นจะต้องเป็นการตัดสินใจที่ดีที่สุดในการประมาณน้ำหนักรวมของยวดยาน แบบจำลองของการทำนายความล้านั้นจะสมมุติให้น้ำหนักรวมนั้นมีประสิทธิภาพในการใช้งานดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย อย่างไรก็ตามทางวิศวกรก็ยังมีความปลอดภัยเมื่อเลือกใช้แนวทางดังกล่าวถ้าน้ำหนักรวมนั้นมีค่าน้อยกว่า 54,000 ปอนด์ (น้ำหนักของรถบรรทุกมาตรฐาน) ในทางกลับกันถ้าน้ำหนักรวมดังกล่าวมีค่ามากกว่าก็จำเป็นที่จะต้องใช้น้ำหนักที่สูงกว่า ดังนั้นค่า F_{S2} = 1.00 สำหรับทางเลือกที่สองนั้นอนุญาติให้วิศวกรใช้การชั่งน้ำหนัก ณ สถานีการตรวจวัด (weigh station measurement) เพราะชนิดของการตรวจวัดดังกล่าวนั้นได้ตรวจวัดถึง คนขับขี่ยวดยาน และรถบรรทุกที่มีน้ำหนักมากมักที่จะหลีกเลี่ยงสถานีตรวจวัดดังกล่าว ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้การประมาณนั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้นค่าน้ำหนักรวมจะเท่ากับค่ากลาง (mean) ของค่าที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความน่าเชื่อถือ หรือค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.34 ดังนั้นจากสมการที่ (2-4) นั้นจะทำให้ได้ค่า F_{S2} = 1.34 / 1.35 $\approx$ 1.00 และสำหรับทางเลือกสุดท้ายคือทางเลือกที่สามนั้นอนุญาติให้วิศวกรใช้แผนภูมิแห่งของน้ำหนักรวมที่ได้มาจากการทำการวัดที่เรียกว่า เวย์อินโมชั่น (weigh-in-motion

measurement) ในการทำการตรวจวัดดังกล่าวนั้นไม่สามารถที่จะทำการตรวจวัดคนขับขี่ยวดยานได้ทำให้ค่าผลลัพธ์นั้นไม่ใช่ค่ากลางที่ได้จากการตรวจวัด และทำการหาค่าความน่าเชื่อถือ หรือค่าความปลอดภัยได้เท่ากับ 1.28 ดังนั้นจากสมการที่ (2-4) นั้นจะทำให้ได้ค่า F_{S2} = 1.28 / 1.35 = 0.95

ค่าช่วงความเค้น (Stress Range, S_r) [13] ค่าช่วงความเค้นนี้จะเกิด ณ ตำแหน่งวิกฤติของสะพานภายใต้การจราจรปกติซึ่งในบทนี้เนื่องจากค่าช่วงความเค้นดังกล่าวนั้นจะได้มาจาก 2 แนวทางคือ การคำนวณโดยอาศัยการหาค่าโมเมนต์มากที่สุดที่เกิดขึ้นเมื่อมีรถแล่นผ่านบนสะพานที่ได้ทำการพิจารณาจากนั้นก็ทำการนำเอาค่าโมเมนต์มากที่สุดที่เกิดขึ้นนั้นนำมาหารด้วยค่าอัตราส่วนระหว่างค่าโมเมนต์ความเฉื่อยกับค่าระยะระหว่างแนวแกนสะเทินถึงผิวด้านล่างของหน้าตัดคานที่กำลังพิจารณาจะทำให้ได้ค่าช่วงความเค้นตามที่ต้องการ และอีกแนวทางก็คือค่าช่วงความเค้นดังกล่าวนั้นจะได้มาจากการตรวจวัดภาคสนามสำหรับสะพานที่กำลังพิจารณาภายใต้สภาพการจราจรปกติ ค่าช่วงความเค้นที่คำนวณมาได้นี้จะใช้หน่วยเป็น กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ksi.)

2.2.8 *ค่าจำนวนรถบรรทุกที่แล่นผ่านสะพานในช่องทางที่กำลังพิจารณาต่อวัน (Average daily truck volume per lane , T_o)* [16]

ในที่นี้ได้ทำการตรวจนับปริมาณยวดยานของรถบรรทุกไว้แล้วจึงสามารถที่จะนำเอาค่าดังกล่าวมาใช้ในการทำการแทนค่าลงในสมการที่ (2-6) ได้ทันที มีหน่วยเป็น คันต่อวันต่อช่องทางการจราจรที่ได้ทำการพิจารณา

อายุการใช้งานของสะพานตั้งแต่เริ่มทำการเปิดใช้ให้ยวดยานแล่นผ่านบนสะพานนับมาจนกระทั่งถึงวันเวลาที่ได้ทำการตรวจวัด มีหน่วยเป็น ปี (present year life , a)

2.2.9 *ค่าปัจจัยในการคำนวณอายุการใช้งานที่เหลือจากกราฟ S-N (f)*

มีความมั่นใจมากกว่าร้อยละ 95 สำหรับผลของการทดสอบในแต่ละรูปแบบของรอยต่อซึ่งกราฟที่ใช้ดังกล่าวนั้นเป็นการหาอายุการใช้งานที่เหลืออย่างปลอดภัย (remaining safe life) ใช้ค่า f = 1.0 และ เมื่อทำการหาค่ากลางของอายุการใช้งานที่เหลือนั้น (remaining mean life) จะมีค่าเป็นสองเท่าของกราฟที่ใช้ จึงมีการกำหนดให้ใช้ค่า f = 2.0

ทาง AASHTO ได้เสนอสมการเพื่อใช้ในการประเมินหาอายุการใช้งานที่เหลือของสะพานได้ดังสมการที่ (2-6) ได้ดังนี้ [13]

$$Y_f = \frac{f \times K \times 10^6}{T_a \times C \times (R_S S_r)^3} - a \qquad (2\text{-}6)$$

สำหรับสมการที่ (2-6) นั้นมีที่มาจากสมการที่ (2-2) ดังนี้

จากสมการที่ (2-2) เมื่อทำการจัดรูปทางขวาของสมการที่ (2-2) มาใหม่จะได้ว่า

$$A = f \times K \times 10^6 \times 365 \qquad (2\text{-}7)$$

จากสมการที่ (2-2) ค่า N ทางด้านซ้ายของสมการดังกล่าวนั้นสามารถที่จะทำการเปลี่ยนรูปออกมาได้ดังสมการที่ (2-8) ดังนี้

$$N = T_a \times C \times 365 \times (Y_f + a) \qquad (2\text{-}8)$$

ทำการให้ค่าช่วงความเค้นนั้นมีการคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือ (Reliability factor) ได้ดังสมการที่ (2-9) ทั้งนี้เพื่อที่จะปรับปรุงให้ค่าช่วงความเค้นดังกล่าวนั้นมีความน่าเชื่อถือให้มากยิ่งขึ้น

$$R_S S_r \qquad (2\text{-}9)$$

จากนั้นจะนำสมการที่ (2-7) ,(2-8) และ (2-9) มาแทนลงในสมการที่ (2-2) และสามารถแสดงออกมาได้เป็นสมการเดียวกันกับสมการที่ (2-6)

$$T_a \times C \times 365 \times (Y_f + a) \times (R_S S_r)^3 = f \times K \times 10^6 \times 365$$

$$Y_f = \frac{f \times K \times 10^6}{T_a \times C \times (R_S S_r)^3} - a$$

2.3 การประเมินตามหลักการของ Palmgren – Miner [6]

การประเมินหาอายุการใช้งานที่เหลือของ Palmgren-Miner นั้นจะทำได้โดยทำการพิจารณาค่าช่วงความเค้นที่ i นั้นจะพบว่ามีค่าช่วงความเค้นเท่ากับ S_n และมีจำนวนรอบของค่าช่วงความเค้นดังกล่าวเท่ากับ n_i ถ้าใช้ความสัมพันธ์ของ *S-N* ก็สามารถที่จะหาจำนวนรอบที่จะทำให้เกิดการวิบัติ N_i ได้ ซึ่งจะหมายความว่าในขณะที่ได้ทำการหาค่าช่วงความเค้นนั้นได้เกิดความเสียหาย [10] ไปแล้วเป็นสัดส่วนเท่ากับ n_i / N_i ดังนั้นถ้าทำการรวมสัดส่วนความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากทุกค่าช่วงความเค้น และถ้าผลรวมนี้มีค่าเท่ากับ 1 แล้วความวิบัติก็จะเกิดขึ้น สามารถเขียนได้ดังนี้ [6]

$$D = \sum [\frac{n_i}{N_i}] \qquad (2\text{-}10)$$

โดยที่ *D* นั้นจะแสดงถึงค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อค่า *D* นั้นมีค่าเท่ากับ 1 แล้ว ความวิบัติก็จะเกิดขึ้น ในการศึกษาในครั้งนี้จะใช้กราฟ *S-N* ของ สมาคมการก่อสร้างโครงสร้างเหล็กของประเทศญี่ปุ่น (Japanese Society of Steel Construction (JSSC)) [8] อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะช่วยในการคำนวณให้ง่ายขึ้นนั้นจะทำการพิจารณาว่าวัสดุไม่มีพิกัดความล้า fatigue limit ซึ่งสมมุติฐานนี้จะทำให้การคำนวณหาอายุการใช้งานที่เหลืออย่างปลอดภัยนั้นมีค่าความปลอดภัยยิ่งขึ้น โดยในความเป็นจริงแล้ว ในกรณีของขนาดหน่วยแรงไม่คงที่ (variable amplitude stressing) ของวัสดุเหล็กก็ยังมีค่าพิกัดความล้า (fatigue limit) แต่ค่าของพิกัดความล้าจะต่ำกว่าพิกัดความ ในกรณีของของหน่วยแรงคงที่ (constant amplitude stressing) มาก

ทำการพิจารณากราฟ *S-N* ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรงในสเกลแบบลอกการิทึม (log scale) ซึ่งสามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้ [8]

$$\log S = C + B \log N$$

โดยที่ *S* คือ ค่าช่วงความเค้น และ *N* คือจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติ ส่วนค่า *B* และค่า *C* จะเป็นค่าคงที่ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ค่า $B = -1 / 3$ สำหรับเหล็ก [10] ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\log [\frac{S}{N^{1/3}}] = C$$

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$S^3N = C_o \qquad (2\text{-}10)$$

โดยที่ค่า C_o เป็นค่าคงที่ และจะมีค่าเปลี่ยนไปตามกำลังในการรับแรงในแต่ละรูปแบบรอยเชื่อม (strength category) ค่า C_o แสดงได้ดังนี้

$$C_o = 2\text{x}10^6 \text{ x } \Delta\sigma_f^m \qquad (2\text{-}11)$$

โดยที่ m = 3

$\Delta\sigma_f$ = ค่าช่วงความเค้นที่ยอมให้ ที่ $2\text{x}10^6$ รอบ

ทำการคำนวณหาสัดส่วนความเสียหายที่เกิดจากค่าช่วงความเค้นใดๆ S_i กระทำเป็นจำนวน 1 รอบตาม Palmgren-Miner Rule ได้ดังสมการที่แสดงด้านล่างดังนี้

$$\frac{1}{N_i} = \frac{S_i^3}{C_o} \qquad (2\text{-}12)$$

ถ้าทำการสมมุติให้รถยนต์ 1 คัน แล่นผ่านสะพานที่ทำการพิจารณาบนเลนใดเลนหนึ่ง สามารถทำให้เกิดค่าช่วงความเค้นทั้งหมด n รอบคือ $S_1, S_2, S_3, \ldots, S_n$ ดังนั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นจากรถยนต์ 1 คัน สามารถที่จะใช้ค่าช่วงความเค้นที่เป็นตัวแทนของค่าช่วงความเค้นทั้ง n รอบ เรียกว่าค่าช่วงความเค้นเสมือน (equivalent stress range (S_e)) ซึ่งค่าตัวแทนของค่าช่วงความเค้นนั้นสามารถที่จะแสดงในรูปความสัมพันธ์กับค่าช่วงความเค้นต่างๆได้ดังสมการที่ (2-1) จากสมการที่ (2-10) นั้นสามารถที่จะหาจำนวนรอบทั้งหมดสำหรับค่าช่วงความเค้นที่ทำการพิจารณาได้ดังสมการที่ (2-13)

$$N = \frac{C_o}{S_i^3} \qquad (2\text{-}13)$$

จากนั้นทำการคำนวณหาจำนวนรอบที่เหลืออยู่ ณ.เวลาปัจจุบันได้ดังสมการที่ (2-14)

$$N_r = N - (a \text{ x } 365 \text{ x } N_D) \qquad (2\text{-}14)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ N_f คือ จำนวนรอบที่เหลืออยู่ ,ค่า N_D คือ จำนวนรอบของค่าช่วงความเค้นต่อวัน และค่า a คือ จำนวนอายุของสะพานนับถึงปัจจุบันมีหน่วยเป็น ปี

จากสมการที่ (2-14) นั้นจะสามารถจะหาอายุการใช้งานที่เหลือออกมาได้ดังสมการที่ (2-15)

$$Y_f = \frac{N_f}{(365 \times N_D)} \qquad (2\text{-}15)$$

ดังนั้นทำการหาอายุการใช้งานที่เหลือของสะพาน (Y_f) คำนวณได้จาก

$$Y_f = \frac{C_o}{S^3 \times 365 \times N_D} - a \qquad (2\text{-}16)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย