บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในวัสดุที่เป็นโลหะ การจัดเรียงตัวของอะตอมจะมีการจัดตามรูปแบบทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันตามชนิดของโลหะ และเมื่อวัสดุได้รับหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำ ๆ ความไม่สมบูรณ์ (dislocation) ของโลหะที่มีอยู่แล้วและที่เกิดขึ้นใหม่จากหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำ ๆ จะเกิดเป็นรอยแตกขนาดเล็ก (microscopic crack) และเมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำ ๆ ต่อไปรอยแตกจะขยายยาวมากขึ้นเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ (macroscopic crack) จนกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติ ซึ่งลักษณะการวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำ ๆ นี้เรียกว่า การวิบัติเนื่องจากความล้า (fatigue damage)

สำหรับในสะพานเหล็กข้ามทางแยกที่ทำการศึกษา เมื่อมียานพาหนะแล่นผ่านบนสะพาน สะพานจะได้รับหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำ ๆ โดยเฉพาะยานพาหนะที่มีขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำ ๆ ที่มีค่าสูง ซึ่งมีผลต่ออายุการใช้งานของสะพานโดยตรง และยิ่งในบริเวณที่มีความหนาแน่นของความเค้น (stress concentration) ที่สูงด้วยแล้ว จะทำให้สะพานอาจได้รับความเสียหายหรือเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า

2.2 ความล้า

ความล้า (fatigue) เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในโครงสร้างของวัสดุที่เกิดเป็นจุด ๆ โดยเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ที่มีอยู่แล้วในโครงสร้างของวัสดุและจากผลของการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำ ๆ ซึ่งเรียกว่า รอยแตกขนาดเล็ก และเมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำแบบซ้ำ ๆ นี้ต่อไปอีก รอยแตกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นจะขยายยาวมากขึ้นเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ ทำให้พื้นที่ที่รับแรงดึงในวัสดุลดลง จนกระทั่งไม่เพียงพอต่อการต้านทานหน่วยแรงดึงที่มากระทำ ส่งผลให้เกิดการวิบัติ (failure) เนื่องจากความล้า โดยที่หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยกว่ากำลังดึงประลัย (ultimate tensile strength) ของวัสดุ และปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการวิบัติเนื่องจากความล้าคือ ค่าช่วงความเค้น (stress range) และจำนวนรอบ (number of cycle) ที่เกิดขึ้นสำหรับแต่ละค่าช่วงความเค้นนั้น ๆ รวมทั้งลักษณะของรอยเชื่อม

กราฟ S-N เป็นกราฟแสดงข้อมูลความล้าของวัสดุ ซึ่งประกอบด้วยค่าช่วงความเค้นต่าง ๆ และจำนวนรอบที่เกิดการวิบัติของค่าช่วงความเค้นนั้น ๆ ดังรูปที่ 2-1 โดยกราฟ S-N ได้จากการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการและใช้หน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำ ๆ ที่มีลักษณะคงที่ (constant amplitude stressing) กระทำจนกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า ก็จะทราบจำนวนรอบที่วิบัติ โดยที่ค่าช่วงความเค้นคือค่าความแตกต่างระหว่างหน่วยแรงสูงสุดและหน่วยแรงต่ำสุด ครึ่งหนึ่งของค่าช่วงความเค้นคือแอมปลิจูดของความเค้น (stress amplitude) และค่าเฉลี่ยระหว่างหน่วยแรงสูงสุดและหน่วยแรงต่ำสุดคือค่าความเค้นเฉลี่ย (mean stress) ดังรูปที่ 2-2

ตัวอย่างของกราฟ S-N นำมาจาก Fatigue Design Recommendation for Steel Structures [15] โดย Japanese Society of Steel Construction (JSSC) 1995 ดังรูปที่ 2-3 ซึ่งกราฟ S-N จะแสดงขีดจำกัดความล้า ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำสุดของหน่วยแรงที่กระทำต่อวัสดุแล้วเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า และถ้าหน่วยแรงที่กระทำต่อวัสดุต่ำกว่าค่าดังกล่าวแล้ววัสดุจะไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากความล้าแม้ว่าจำนวนรอบของการเกิดหน่วยแรงจะมีจำนวนมากก็ตาม โดยที่ค่าขีดจำกัดความล้ามี 2 ขีดจำกัด คือ ขีดจำกัดที่มีค่าสูงกว่าเรียกว่า ขีดจำกัดความล้าสำหรับหน่วยแรงคงที่ (constant amplitude fatigue limit, CAFL) จะใช้กับเงื่อนไขที่หน่วยแรงที่กระทำมีค่าคงที่ ส่วนขีดจำกัดที่มีค่าต่ำกว่าเรียกว่า ขีดจำกัดความล้าสำหรับหน่วยแรงไม่คงที่ (variable amplitude fatigue limit, VAFL) ซึ่งใช้กับเงื่อนไขที่หน่วยแรงมีลักษณะซับซ้อนไม่คงที่และใน JSSC ได้เสนอว่า เมื่อหน่วยแรงที่มีลักษณะไม่คงที่มีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดความล้าต่ำสุดสำหรับหน่วยแรงคงที่แล้ว การประเมินอายุเนื่องจากความล้าไม่จำเป็นต้องพิจารณาเพราะค่าอายุที่ประเมินได้จะมีค่าเป็นอนันต์ อย่างไรก็ตามถ้ามีเพียงหน่วยแรง 1 ค่าที่เกินค่าขีดจำกัดความล้าต่ำสุดสำหรับหน่วยแรงคงที่แล้ว หน่วยแรงที่เกินขีดจำกัดนี้จะทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า

สะพานเหล็กที่พิจารณาในการศึกษาเป็นสะพานเหล็กที่มีลักษณะคานเป็นแบบแผ่นเหล็กที่มีทั้งรอยต่อแบบเชื่อม (weld joint) และรอยต่อแบบหมุด (bolt joint) โดยรอยต่อแบบเชื่อมจะเป็นรอยต่อที่ประกอบขึ้นจากโรงงาน และรอยต่อแบบหมุดนั้นเป็นรอยต่อในการนำมาประกอบขณะทำการก่อสร้าง โดยทั่วไปแล้วรอยต่อแบบหมุดจะมีคุณสมบัติดีกว่ารอยต่อแบบเชื่อม ทั้งนี้เนื่องจากว่าภายในรอยเชื่อมนั้นจะมีรอยตำหนิขนาดเล็กซึ่งเกิดขึ้นจากขบวนการเชื่อม และรอยตำหนิขนาดเล็กนี้จะทำให้เกิดผลของความหนาแน่นของความเค้นเพิ่มมากขึ้นจากลักษณะของรอยเชื่อม

ในรอยต่อประเภทที่เป็นรอยเชื่อม ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงที่รอยเชื่อมนั้นจะมีความสลับซับซ้อน เนื่องจากความไม่สมบูรณ์และตำหนิของรอยต่อ ดังนั้นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันคือ การพิจารณาพฤติกรรมความล้าของรอยต่อในลักษณะเฉลี่ย โดยมาตรฐานการออกแบบต่าง ๆ ได้ทำการทดสอบพฤติกรรมความล้าของรอยต่อในลักษณะต่าง ๆ เมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำแบบซ้ำ ๆ ซึ่งรอยต่อที่พิจารณาเกือบทั้งหมดเป็นรอยต่อแบบเชื่อม และจากผลการทดสอบที่ได้จึงจำแนกรอยต่อตามกำลังความล้า (fatigue strength) ของรอยต่อแต่ละประเภท โดยรอยต่อที่มีหมวดหมู่ของรอยเชื่อม (strength category) เดียวกัน จะมีกำลังความล้าเหมือนกันและใช้กราฟ S-N เดียวกัน

จากกราฟ S-N เส้นกราฟแต่ละเส้นจะแสดงถึงลักษณะประเภทของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นกับความเข้มของความเค้น คุณภาพของรอยเชื่อม ทิศทางของหน่วยแรง หน่วยแรงคงค้าง และผลกระทบอื่น ๆ ซึ่งสมการของกราฟ S-N สามารถแทนได้ด้วย

$$N \cdot S^{B} = A \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่ N = จำนวนรอบสูงสุดที่เกิดการวิบัติเนื่องจากความล้า

S = ช่วงความเค้น

B = 3 (สำหรับเหล็ก)

A = ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยเชื่อม (จุดตัดบนแกน x ในกราฟ S-N)

ดังนั้นจะได้สมการที่ (2-1) เป็น

$$N \cdot S^3 = A \qquad (2\text{-}2)$$

2.3 วิธีการเรนโฟล์วเคาน์ติ้ง (Rainflow Counting Method)

ในการตรวจวัดสัญญาณของหน่วยแรงที่เกิดจากยานพาหนะแล่นผ่านสะพานนั้น สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีลักษณะที่ซับซ้อนและไม่คงที่ คือ ค่าช่วงความเค้น และ ค่าความเค้นเฉลี่ย จะไม่คงที่ และโดยทั่วไปแล้วค่าช่วงความเค้นจะมีผลต่อความล้ามากกว่าค่าความเค้นเฉลี่ยมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงความแตกต่างของค่าความเค้นเฉลี่ย และในการประเมินอายุการใช้งานของสะพานเหล็กนั้น จำเป็นที่จะต้องทราบจำนวนรอบของแต่ละช่วงความเค้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องแยกจำนวนรอบของแต่ละช่วงความเค้นออกจากความเค้นที่ซับซ้อนและไม่คงที่โดยวิธีการเรนโฟล์วเคาน์ติ้ง [3,9,22]

หลักการของวิธีเรนโฟล์วเคาน์ติ้ง เป็นการเปลี่ยนสัญญาณของหน่วยแรงที่มีลักษณะที่ซับซ้อนให้เป็นสัญญาณที่มีลักษณะคงที่หลาย ๆ ค่า ซึ่งวิธีการที่จะอธิบายได้ดีโดยการหมุนแกนของกราฟหน่วยแรงและเวลา 90 องศาดังรูปที่ 2-4 เปรียบจุดยอดของสัญญาณเป็นขอบของหลังคา และจินตนาการว่าหยดฝนจะเริ่มไหลจากจุดยอดของสัญญาณ (A) และจากด้านในของทุก ๆ จุดยอด การไหลจะเปลี่ยนทิศทางเมื่อไหลถึงจุดยอดและจะหยดลงที่สัญญาณที่ต่ำกว่า (C-C') การไหลจะหยุดเมื่อพบกับการไหลจากชั้นที่สูงกว่า (F) และมีขนาดทางคณิตศาสตร์ที่ใหญ่กว่า หรือจุดที่หยดน้ำมีขนาดทางคณิตศาสตร์ที่เล็กกว่าสัญญาณด้านล่าง (C') การแยกการไหลแต่ละค่าจะถูกนับเป็นครึ่งรอบ ดังนั้นสัญญาณที่มีลักษณะที่ซับซ้อนจะถูกลดเป็นจำนวนครึ่งรอบของหน่วยแรงที่คงที่แต่ละค่า และจะเห็นได้ว่าจำนวนครึ่งรอบของสัญญาณที่ได้จะสามารถจับคู่กันได้เป็นหนึ่งรอบยกเว้นสัญญาณที่จำกัดซึ่งอาจจะไม่สามารถจับคู่ได้บริเวณปลายของสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่ได้สามารถแสดงลักษณะของหน่วยแรงและจำนวนรอบได้ด้วยวงรอบของฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) ดังรูปที่ 2-4

2.4 กฎของพาลเกรน-ไมเนอร์ (Palgren-Miner Rule)

Miner [4,22] ได้เสนอหลักการประเมินอัตราความเสียหาย (damage ratio) ของวัสดุเนื่องจากความล้าในหน่วยแรงที่แตกต่างกันหรือหน่วยแรงที่มีค่าเท่ากัน โดยอธิบายผ่านเส้นความเสียหาย (damage line) ที่ค่าหน่วยแรงต่าง ๆ ซึ่งแทนด้วยกราฟ S-N โดยที่อัตราความเสียหายเนื่องจากความล้าของหน่วยแรงนั้น ๆ ก็คือ อัตราส่วนจำนวนรอบที่หน่วยแรงนั้นเกิดขึ้นต่อจำนวนรอบการวิบัติที่ได้จากเส้นความเสียหายในกราฟ S-N ของหน่วยแรงนั้น ๆ

ดังนั้นจะได้อัตราความเสียหาย เนื่องจากความเค้น S_i ใด ๆ กระทำ n_i รอบ และจำนวนรอบของการวิบัติที่ได้จากกราฟ S-N เป็น N_i

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \qquad (2\text{-}3)$$

และจากอัตราความเสียหายนี้โครงสร้างจะเกิดการวิบัติเนื่องจากความล้าก็ต่อเมื่อผลรวมของอัตราความเสียหายเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นถ้าให้ ความเค้น S_1 , S_2 ,...., S_i มีจำนวนรอบของการวิบัติที่ได้จากกราฟ S-N เป็น N_1 , N_2 ,...., N_i กระทำเป็นจำนวน n_1 , n_2 ,...., n_i รอบ ดังรูปที่ 2-5 ซึ่งโครงสร้างจะเกิดการวิบัติเมื่อ

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + ... + \frac{n_i}{N_i} = 1 \qquad (2\text{-}4)$$

$$\sum_{i=1}^{i} \frac{n_i}{N_i} = 1 \qquad (2\text{-}5)$$

2.5 ช่วงความเค้นเทียบเท่า (Equivalent Stress Range)

จากสัญญาณในการตรวจวัด เมื่อยานพาหนะคันที่ i วิ่งผ่านจุดตรวจวัดความเครียด สัญญาณความเครียดที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2-6 และจากกฎของฮุค (Hook's law) สามารถแปลงเป็นความเค้นได้จาก

$$S_i = E \cdot \varepsilon_i \qquad (2\text{-}6)$$

โดยที่ S_i = ช่วงความเค้นที่ i
ε_i = ช่วงความเครียดที่ i
E = ค่ายังโมดูลัสของเหล็ก

และจากลักษณะสัญญาณของช่วงความเค้น สัญญาณที่ได้มีลักษณะที่ซับซ้อน และเมื่อผ่านวิธีการของเรนโฟล์วเคาน์ติ้งจะได้ช่วงความเค้นทั้งหมด n รอบ โดยมีความเค้นเป็น S_{i1} , S_{i2} ,...., S_{in} ตามลำดับดังรูป 2-7 และจากอัตราความเสียหายเนื่องจากความล้าที่เกิดจากช่วงความเค้น S_{i1} จะได้เท่ากับ

$$D_{i1} = \frac{1}{N_{i1}} = \frac{S_{i1}^3}{A} \qquad (2\text{-}7)$$

ดังนั้นอัตราความเสียหายรวมทั้งหมดที่เกิดจากรถคันที่ i วิ่งผ่าน ทำให้เกิดช่วงความเค้น S_{i1} S_{i2} . . .S_{in} เป็น

$$D_i = D_{i1} + D_{i2} + ... + D_{in} \qquad (2\text{-}8)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{S_{ij}^3}{A} \qquad (2\text{-}9)$$

เมื่อต้องการแทนด้วยความเค้นเทียบเท่า (S_i) เพียง 1 รอบ ที่มีขนาด S_i อัตราความเสียหายเนื่องจากความเค้น S_i เท่ากับ

$$D_i = \frac{1}{N_i} = \frac{S_i^3}{A} \qquad (2\text{-}10)$$

ถ้าต้องการให้ค่าความเค้นเทียบเท่าเพียง 1 ลูก ที่สามารถทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าเท่ากับความเสียหายที่เกิดเนื่องจากความล้าของความเค้นที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากรถคันที่ i วิ่งบนสะพานที่ทำให้เกิดความเค้น S_{i1} , S_{i2} ,...., S_{in} จำนวน n ลูก โดยให้อัตราความเสียหายที่เกิดขึ้นเท่ากัน นั่นคือสมการที่ (2-9) เท่ากับสมการที่ (2-10) จะได้

$$\frac{S_i^3}{A} = \sum_{j=1}^{n} \frac{S_{ij}^3}{A} \qquad (2\text{-}11)$$

$$S_i = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^{n} S_{ij}^3} \qquad (2\text{-}12)$$

นั่นคือช่วงความเค้น S_i เพียง 1 ลูกจะทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าเท่ากับช่วงความเค้นที่เกิดจาก S_{i1} , S_{i2} ,...., S_{in} จำนวน n ลูกของรถคันที่ i

2.6 ช่วงความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress Range)

เมื่อมีจำนวนยานพาหนะผ่าน T คัน อัตราความเสียหายทั้งหมดที่เกิดจากรถ T คันวิ่งผ่าน โดยที่รถแต่ละคันมีหน่วยแรงเทียบเท่าเป็น S_1 , S_2 ,. . ., S_T ดังนั้นอัตราความเสียหายรวมเนื่องจากรถ T คันเท่ากับ

$$\sum_{i=1}^{T} D_i = \sum_{i=1}^{T} \frac{1}{N_i} = \sum_{i=1}^{T} \frac{S_i^3}{A} \qquad (2\text{-}13)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความเค้นประสิทธิผล (S_e) เป็นค่าเฉลี่ยของอัตราความเสียหายของหน่วยแรงเทียบเท่า S_1 , S_2 .. . ., S_T จำนวน T ลูก นั่นคือความเสียหายเนื่องจากความล้าที่เกิดจากความเค้นประสิทธิผล จำนวน T ลูก ทำให้เกิดความเสียหายเท่ากับความเค้นเทียบเท่า S_1 , S_2 .. . ., S_T จำนวน T ลูก ดังนั้นอัตราความเสียหายที่เกิดจากความเค้นประสิทธิผล T ลูกเป็น

$$T \cdot D_e = \frac{T}{N_e} = \frac{T \cdot S_e^3}{A} \qquad (2\text{-}14)$$

จากสมการข้างต้นเมื่ออัตราความเสียหายเท่ากัน จะได้

$$\frac{T \cdot S_e^3}{A} = \sum_{i=1}^{T} \frac{S_i^3}{A} \qquad (2\text{-}15)$$

$$S_e = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{T} f_i \cdot S_i^3} \qquad (2\text{-}16)$$

โดยที่ S_i ช่วงความเค้นที่ i

S_e ความเค้นประสิทธิผล

f_i ความถี่ของช่วงความเค้น i (จำนวนความเค้นที่ i หารด้วยจำนวนความเค้นทั้งหมด)

ในสะพานแต่ละแห่ง น้ำหนักรถแต่ละประเภทที่ก่อให้เกิดช่วงความเค้นนั้นมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้น อัตราความเสียหายเนื่องจากความล้าจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่จะแสดงให้เห็นถึงความเสียหายเนื่องจากรถแต่ละประเภทในแต่ละสะพานว่ามีผลต่อความเสียหายอย่างไร และจากการประเมินผลของอัตราความเสียหายเนื่องจากความล้านั้น จะพิจารณาว่าวัสดุไม่มีขีดจำกัดความล้าเนื่องจาก 1) เพื่อค่าในการประเมินอายุที่ได้จะอยู่ในด้านความปลอดภัย รวมทั้งมีความสะดวกในการประเมิน 2) ถ้าช่วงความเค้นที่ตรวจวัดได้นั้นเกินค่าขีดจำกัดสำหรับความเค้นคงที่แล้ว การประเมินอายุเนื่องจากความล้านั้นจะมีค่าจำกัดอยู่ค่าหนึ่ง 3) สัญญาณที่ทำการตรวจวัดมีลักษณะเป็นสัญญาณที่ซับซ้อนไม่คงที่ ซึ่งขีดจำกัดความล้าสำหรับความเค้นไม่คงที่จะต่ำกว่าขีดจำกัดสำหรับความเค้นคงที่

จากการประเมินเบื้องต้น ค่าช่วงความเค้นที่ตรวจวัดได้เมื่อนำไปประเมินอัตราความเสียหายแล้วพบว่า ตั้งแต่รถหกล้อขึ้นไปจนถึงรถพ่วงนั้นมีอัตราความเสียหายเนื่องจากความล้ามากกว่ารถยนต์ขนาดเล็กมาก เนื่องจากอัตราความเสียหายจากความล้านั้นจะแปรตามกำลังสามของช่วงความเค้นที่เกิดขึ้น ดังนั้นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเนื่องจากยานพาหนะที่ก่อให้เกิดความเสียเนื่องจากความล้าจะขึ้นอยู่กับรถขนาดใหญ่เท่านั้น

จากลักษณะของรอยเชื่อมบริเวณคานหลักของสะพาน มีรอยเชื่อมจัดอยู่ในประเภท B' (AASHTO) และประเภท D (JSSC) ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่ A ได้เท่ากับ 2×10^{12} (Mpa^3) โดยที่ ความเค้นมีหน่วยเป็นเมกกะปาสคาล (Mpa) และจะได้อัตราความเสียหายของรถแต่ละคันที่ก่อให้เกิดความเค้นได้เป็น

$$D_i = \frac{S_i^3}{2\times10^{12}} \qquad (2\text{-}17)$$

2.7 **ตัวประกอบการขยายพลวัต** (Dynamic Amplication factor)

ขณะที่รถแล่นผ่านบนสะพาน น้ำหนักพลศาสตร์ (dynamic load) ของยานพาหนะจะก่อให้เกิดรอบของการสั่นขนาดเล็กเพิ่มขึ้นจากรอบที่เกิดจากน้ำหนักทางสถิตศาสตร์ (static load) ของยานพาหนะ จากการสั่นของรอบที่เกิดจากผลทางพลศาสตร์นี้จะทำให้ค่าสูงสุดของความเค้น (maximum stress) และช่วงความเค้นสูงขึ้น และยังทำให้โครงสร้างเกิดหน่วยแรงกระทำขึ้น-ลงแบบซ้ำ ๆ ซึ่งจะส่งผลทำให้อายุการใช้งานของสะพานลดลง และผลทางพลศาลตร์ (dynamic effect) ที่เกิดขึ้นนี้มีผลมาจาก น้ำหนัก ความเร็ว ความถี่การสั่นของรถ ความถี่ธรรมชาติของสะพาน และความขรุขระของผิวการจราจร รวมทั้งรอยต่อของช่วงสะพาน

ในการประเมินอายุการใช้งานของสะพานเนื่องจากความล้าตามมาตรฐาน AASHTO ได้กำหนดเป็นค่าตัวประกอบในการกระแทก (impact factor) เท่ากับ 1.10 สำหรับผิวทางที่ราบเรียบ และ 1.10-1.30 สำหรับผิวทางที่มีความขรุขระ ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของรถและสะพานที่ทำการวิจัยในสหรัฐอเมริกา และจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความแตกต่างจากในอเมริกา คือ ลักษณะของรถที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นน้ำหนักลงเพลา ระยะระหว่างเพลา รวมทั้งความแตกต่างของผิวทาง ฯลฯ ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างจากข้อกำหนดตามมาตรฐานของ AASHTO และอีกปัจจัยหนึ่งก็คือ ตัวประกอบการขยายพลวัตที่ใช้ประเมินความล้าจะเป็นตัวแทนของค่าเฉลี่ยเนื่องจากความเสียหายของยานพาหนะทั้งหมด

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีผู้เสนอค่าตัวประกอบการขยายพลวัต เช่น Moses และ Nyman ได้ค่าเฉลี่ย 1.12, Schilling ได้ค่าเฉลี่ย 1.15 และในรายงานของ NCHRP 299 ที่ใช้ในการประเมินอายุของสะพานใช้ 1.10 สำหรับผิวทางที่มีความเรียบและใช้ค่า 1.10-1.30 สำหรับผิวทางที่มีความขรุขระ ซึ่งเห็นได้ว่ามีค่าแตกต่างกันพอสมควร รวมทั้งลักษณะของรถแต่ละประเภทยังส่งผลต่อตัวประกอบการขยายพลวัตอีกด้วย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาผลของตัวประกอบการขยายพลวัตของรถแต่ละประเภท เพื่อที่จะใช้ในการประเมินอายุการใช้งานของสะพานและยังจะได้ทราบถึงเงื่อนไขของรถแต่ละประเภทที่มีผลต่อตัวประกอบการขยายทางพลวัตอีกด้วย

ซึ่งค่าตัวประกอบการขยายพลวัตก็คือ อัตราส่วนของความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักพลวัตต่อความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักสถิตศาสตร์ ดังนั้นจะได้

$$DAF_i = \frac{S_i}{S_{qi}} \qquad (2\text{-}18)$$

โดยที่ DAF_i ตัวประกอบการขยายพลวัต

S_i ช่วงความเค้นเทียบเท่าพลวัต

S_{qi} ความเค้นเทียบเท่าสถิตศาสตร์

2.8 การประเมินอายุการใช้งานของสะพานเนื่องจากความล้า

พิจารณาสมการที่ (2-2) เมื่อให้ความเค้นที่เกิดขึ้นแทนด้วยความเค้นประสิทธิผล จะได้จำนวนรอบทั้งหมดที่ทำให้โครงสร้างสะพานเกิดการวิบัติเนื่องจากความเค้นประสิทธิผลเป็น

$$N = \frac{A}{Se^3} \qquad (2\text{-}19)$$

โดยที่จำนวนรอบที่ทำให้เกิดการวิบัติสามารถแทนได้ด้วย

$$N = Ta \cdot C \cdot 365 \cdot Y \qquad (2\text{-}20)$$

โดยที่ Ta ปริมาณการจราจรเป็นคันต่อวันต่อช่องการจราจรนอกสุด

C จำนวนรอบของความเค้นต่อการแล่นผ่านของรถบรรทุก

Y อายุการใช้งานของสะพานเป็นปี

ดังนั้นจะได้สมการที่ (2-19) เป็น

$$Ta \cdot C \cdot 365 \cdot Y = \frac{A}{Se^3} \qquad (2\text{-}21)$$

$$Y = \frac{A}{Ta \cdot C \cdot 365 \cdot Se^3} \qquad (2\text{-}22)$$

กำหนดให้

$$K = \frac{A}{365 \times 10^6} \qquad (2\text{-}23)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะได้สมการที่ (2-22)เป็น

$$Y = \frac{K \times 10^{6}}{Ta \cdot C \cdot Se^{3}} \qquad (2\text{-}24)$$

โดยที่ K เป็นค่าคงที่ของลักษณะของรอยเชื่อมดังตารางที่ 2-1

Se ความเค้นประสิทธิผลมีหน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2.9 การประเมินอายุการใช้งานของสะพานโดยใช้แบบจำลองรถบรรทุกตามมาตรฐานของ AASHTO

โดยทั่วไปในการประเมินอายุการใช้งานของสะพานเนื่องจากความล้า จำเป็นที่จะต้องทำการตรวจวัดความเครียดในสภาพการใช้งานจริง เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่าความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการประเมินอายุการใช้งาน แต่เพื่อความสะดวกในการประเมินอายุการใช้งาน AASHTO ได้เสนอวิธีการประเมินความเค้นจากแบบจำลองของรถบรรทุก ดังนี้

2.9.1 แบบจำลองของรถบรรทุกในการประเมินอายุการใช้งานเนื่องจากความล้า

แบบจำลองของรถบรรทุกในการประเมินเป็นรถบรรทุกชนิด fatigue truck ซึ่งเป็นรถบรรทุก 3 เพลา ที่มีน้ำหนัก 54 กิโลปอนด์ (kip) และมีอัตราส่วนของน้ำหนักลงเพลาหน้า เพลากลาง และเพลาท้ายเป็น 0.112 0.444 และ 0.444 ของน้ำหนักแบบจำลองรถบรรทุก มีระยะระหว่างเพลาหน้าและเพลากลางเป็น 14 ฟุต ระหว่างเพลากลางและเพลาท้ายเป็น 30 ฟุต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-8 ซึ่งแบบจำลองของรถบรรทุกนี้เสนอโดย Schilling โดยที่น้ำหนักของแบบจำลองรถบรรทุกที่เสนอได้จากการหาน้ำหนักประสิทธิผลของรถบรรทุกที่ทำการเก็บข้อมูลจาก 30 สถานีตรวจวัดในสหรัฐอเมริกาและได้ข้อมูลรถบรรทุกมากกว่า 27,000 คัน ซึ่งแบบจำลองของรถดังกล่าวเป็นตัวแทนของรถบรรทุกที่มีความแตกต่างทั้งด้านการกระจายของน้ำหนักลงเพลา และน้ำหนักรวมของรถบรรทุก รวมทั้งจำนวนเพลา และในสหรัฐอเมริกาพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของสะพานเกิดจากรถกึ่งพ่วงประเภท 4 และ 5 เพลา โดยน้ำหนักที่กระจายลงเพลาและระยะระหว่างเพลาของแบบจำลองรถบรรทุกที่เสนอนั้นจะแทนสำหรับรถบรรทุกทั่วไปและในรถบรรทุกที่มีลักษณะเป็นเพลาคู่จะแทนด้วยเพลาเดี่ยวของแบบจำลองรถบรรทุกที่เสนอด้วย

2.9.2 การกระแทก (ตัวประกอบการขยายพลวัต)

ในการประเมินความล้านั้นตัวประกอบการกระแทกจะกำหนดจากการเพิ่มค่าช่วงความเค้นมากกว่าการเพิ่มจุดสูงสุดของความเค้น เนื่องจากผลทางพลศาสตร์ ซึ่งจะแปรผันตามรถบรรทุก และค่าตัวประกอบการกระแทกนั้นเป็นตัวแทนของค่าเฉลี่ยเนื่องจากความเสียหายของยานพาหนะทั้งหมด ซึ่งแตกต่างจากการออกแบบทางสถิตศาสตร์ที่เป็นค่าเฉลี่ยของความปลอดภัยสูงสุด และตัวประกอบการกระแทกนี้จะเพิ่มค่าช่วงความเค้นมากกว่าเพิ่มค่ายอดของความเค้น รวมทั้งจะมีความแตกต่างกันตามสะพานเนื่องจากในแต่ละสะพานมีลักษณะของโครงสร้าง ความถี่

ธรรมชาติ ความขรุขระ และรอยต่อที่แตกต่างกัน แต่ไม่ปรากฏว่าเป็นฟังก์ชันของความถี่ธรรมชาติของสะพานตามข้อกำหนดสำหรับการออกแบบทางสถิตศาสตร์ใน Ontario Bridge Code หรือเป็นฟังก์ชันของความยาวช่วงคานตามที่กำหนดในการออกแบบสถิตศาสตร์ของ AASHTO

ค่าตัวประกอบการกระแทกที่เสนอนี้เป็นค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการกระแทกประสิทธิผลของสะพานทั่วไปที่มีผิวทางเรียบและมีรอยต่อที่ดี ซึ่งจากการตรวจวัดภาคสนามของข้อมูลจำนวนมากจึงใช้ค่าตัวประกอบการกระแทกสำหรับผิวทางที่มีความเรียบเป็น 1.10 และสำหรับผิวทางที่มีความขรุขระเป็น 1.10 ถึง 1.30 เนื่องจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าตัวประกอบการกระแทกที่ได้จากการตรวจวัดแตกต่างกันมาก รวมทั้งไม่สามารถที่จะรวมผลเนื่องจากความขรุขระของผิวทางในแต่ละสถานีตรวจวัดได้

2.9.3 การกระจายด้านข้าง (Lateral Distribution)

สำหรับชิ้นส่วนที่มีการดัดตามยาว ตัวประกอบการกระจายด้านข้าง (lateral distribution factor) จะถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะทำการกระจายค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแบบจำลองของรถบรรทุกไปสู่ชิ้นส่วนที่พิจารณา และตัวประกอบการกระจายด้านข้างสำหรับการประเมินความล้าจะอยู่บนเงื่อนไขที่เกิดขึ้นเสมอ นั่นคือ ตำแหน่งของแบบจำลองรถบรรทุกจะอยู่ที่กึ่งกลางของช่องทางการจราจรด้านนอกสุด เนื่องจากช่องทางการจราจรดังกล่าวเป็นช่องทางที่ถือว่าวิกฤตที่สุดในการประเมินความล้าเพราะรถบรรทุกส่วนใหญ่จะใช้ช่องทางการจราจรนี้

สำหรับชิ้นส่วนคานรูปตัวไอ (I-shape) ขั้นตอนพื้นฐานในการประเมินค่าตัวประกอบการกระจายด้านข้าง คือ ถ้าโครงสร้างมีคานหลักเพียง 2 ชิ้น จะกำหนดให้โมเมนต์ดัดที่เกิดเนื่องจากแบบจำลองของรถบรรทุกมีการกระจายในลักษณะคานอย่างง่าย (simple beam) แต่ถ้าโครงสร้างมีคานหลักมากกว่า 2 ชิ้นแล้วให้ทำการประเมินค่าตัวประกอบการกระจายด้านข้างดังนี้

สำหรับคานด้านใน (interior girder)

$$Li = \frac{s}{D} \quad \text{แต่ไม่มากกว่า} \quad \frac{s-3}{s} \qquad (2\text{-}25)$$

โดยที่ Li ตัวประกอบการกระจายด้านข้างของคานตัวใน

s ระยะระหว่างคานมีหน่วยเป็นฟุต

D เป็นตัวประกอบที่กำหนดดังตารางที่ 2-2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับคานด้านนอก (exterior girder)

$$\text{ถ้า } P > 0.5 \text{ แล้ว } Le = 0.7 - 0.4 \cdot P \text{ แต่ไม่น้อยกว่า Li}$$

$$\text{ถ้า } P \leq 0.5 \text{ แล้ว } Le = 0.9 - 0.8 \cdot P \text{ แต่ไม่น้อยกว่า Li} \qquad (2\text{-}26)$$

โดยที่ Le ตัวประกอบการกระจายด้านข้างของคานตัวนอก

P ระยะระหว่างคานตัวนอกถึงกึ่งกลางช่องการจราจรด้านนอกที่ใกล้กับคานตัวนอกที่สุดส่วนด้วยระยะห่างระหว่างคาน และ P จะมีค่าเป็นลบเมื่อเส้นกึ่งกลางอยู่ด้านนอกของคานตัวริม

แต่ถ้าระยะจากด้านในของขอบกั้นถึงขอบด้านนอกเส้นแบ่งกลางช่องการจราจรของช่องการจราจรด้านนอกน้อยกว่า 1 ฟุต หรือความกว้างของไหลทางมากกว่า 4 ฟุตแล้ว

$$Le = Li \qquad (2\text{-}27)$$

2.9.4 ค่าคงที่ของลักษณะรอยเชื่อม

จากหัวข้อที่ 2.6 ค่าคงที่ของลักษณะรอยเชื่อมเป็นการเปลี่ยนรูปของค่าจุดตัดของแกน x ในกราฟ S-N (ค่า A) เพื่อที่จะให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการแทนค่าในสมการการประเมินอายุการใช้งานเนื่องจากความล้า ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามลักษณะของรอยเชื่อมดังตารางที่ 2-1

2.9.5 จำนวนรอบของความเค้นต่อการแล่นผ่านของรถบรรทุก (Cycles per Truck Passage, C)

สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาที่มีความยาวน้อยกว่า 30 ฟุตแล้ว การที่แบบจำลองของรถบรรทุกแล่นผ่านสะพานจะทำให้เกิดความเค้นที่มีลักษณะคล้ายกันขึ้น 2 รอบ และสำหรับคานที่มีความยาวมากกว่านี้แล้ว การแล่นผ่านของแบบจำลองรถบรรทุกจะทำให้เกิดความเค้นที่มีความซับซ้อนขึ้น 1 ลูก รูปร่างที่ถูกต้องของความเค้นที่ซับซ้อนสามารถที่จะคำนวณโดยการใช้เส้นอิทธิพล (influence line) ซึ่งเป็นผลจากความเค้นสถิตศาสตร์ รวมกับผลของความเค้นพลวัต ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยจำนวนรอบเทียบเท่า (equivalent number of individual cycles) และด้วยหลักการดังกล่าว จำนวนรอบเทียบเท่าสามารถที่จะเขียนได้เป็นความสัมพันธ์กับช่วงความยาวของคานในกรณีที่แตกต่างกัน ดังนั้นแล้วในการประเมินความล้าจำนวนรอบของความเค้นต่อการแล่นผ่านของแบบจำลองรถบรรทุกที่เกิดขึ้นจากคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาจะได้เป็น

สำหรับคานที่มีความยาวมากกว่า 40 ฟุต $C = 1.0$

สำหรับคานที่มีความยาวน้อยกว่า 40 ฟุต $C = 1.8$ (2-28)

2.9.6 ปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันต่อช่องทางการจราจรนอกสุด (Average Daily Truck Volume in The Outer Lane, Ta)

ในการคำนวณปริมาณรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันต่อช่องทางการจราจรนอกสุดนั้น จะทำการเปลี่ยนปริมาณรถบรรทุกที่ทำการตรวจนับปริมาณจากการตรวจวัดภาคสนามให้เป็นปริมาณของแบบจำลองรถบรรทุกนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของอัตราความเสียหายเนื่องจากความล้าเท่ากัน ซึ่งจะไม่รวมรถขนาดเล็ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย