

ปัญหาการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการใช้งานสะพานลอยและแนวทางในการแก้ไข

ณัฐพงษ์ อาริมิตร^{*}

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นบทความวิชาการที่อธิบายถึงปัญหาการสั่นสะเทือนลักษณะต่างๆที่เกิดขึ้นกับสะพานลอยคนเดินและแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยผู้เขียนได้ยกตัวอย่างสะพานลอยที่เกิดปัญหาการสั่นสะเทือนในลักษณะต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น การสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง และการสั่นสะเทือนในแนวราบ จากนั้นจึงได้อธิบายถึงกลไกที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนรูปแบบต่างๆ โดยมีข้อมูลของมาตรฐานต่างๆ ในการออกแบบสะพานลอยอธิบายร่วมด้วยเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการสั่นสะเทือน สุดท้ายผู้เขียนได้อธิบายถึงวิธีการที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหการสั่นสะเทือนของสะพานลอยที่มีประสิทธิภาพ และได้นำไปประยุกต์ใช้แล้วบนโครงสร้างสะพาน

คำสำคัญ: สะพานลอย การสั่นสะเทือน การควบคุมสั่นสะเทือน แรงที่เกิดจากการเดิน

^{*} อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

อีเมล: natthapg@kku.ac.th

Vibration Serviceability of Footbridges and Its Mitigations

Natthapong Areemit *

Abstract

This article presents the vibration serviceability problems of footbridges and its mitigations. There are several newly designed and constructed footbridges over the world known to have vibration problems and some of them are presented herein, both vertical and horizontal vibration. Then, the mechanisms of vibration generation due to pedestrians are explained. The guidelines for bridge designers are subsequently given in order to prevent, as well as mitigate the excessive vibration problems. Finally, vibration mitigation measures are also given.

Keywords: footbridge, pedestrian bridge, vibration serviceability, vibration control

* Lecturer, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002,
E-mail: natthapg@kku.ac.th

1. บทนำ

หลักในการออกแบบสะพานลอยสำหรับคนเดินนั้น แตกต่างจากหลักในการออกแบบสะพานเพื่อรองรับการจราจรของยานพาหนะ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนสะพานลอยนั้นค่อนข้างน้อยและรูปทรงของสะพานลอยก็มักจะมีขนาดค่อนข้างเล็ก เนื่องจากผู้ออกแบบมักจะคำนึงถึงรูปลักษณะของสะพานลอยเป็นหลัก (Yang and Huang 1997) และด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ช่วยให้วิศวกรสามารถสร้างสะพานที่มีขนาดเล็กลงได้ และนั่นก็ส่งผลให้สะพานลอยสมัยใหม่มีความอ่อนไหวและโอกาสเกิดการสั่นสะเทือนได้ง่ายยิ่งขึ้น

ปัญหาการสั่นสะเทือนของสะพานลอยนั้นมาตั้งแต่ในอดีต มีรายงานว่าในช่วงที่มีการสวนสนามของทหารนั้น การเดินเป็นจังหวะอย่างพร้อมเพรียงกันเคยทำให้สะพานเกิดการวิบัติมาแล้ว จนภายหลังต้องมีการออกคำสั่งห้ามทหารสวนสนามบนสะพานเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว (Hearn and Metcalfe 1995) การสั่นสะเทือนลักษณะนี้มีสาเหตุมาจากการกำทอนอันเนื่องมาจากจังหวะการก้าวเดินมีความถี่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างสะพานลอยมักมีค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ที่ค่อนข้างต่ำ

นอกเหนือจากปัญหาการสั่นสะเทือนในแนวตั้งเนื่องจากจังหวะการเดินไปสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของสะพานแล้ว ในช่วง 10 กว่าปีที่ผ่านมา มีรายงานถึงปัญหาการสั่นสะเทือนของสะพานในอีกรูปแบบหนึ่ง คือ การสั่นในแนวตามขวางของสะพาน ซึ่งพบว่ามักเกิดและสาเหตุแตกต่างจากการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง งานวิจัยหลายชิ้นได้แสดงให้เห็นว่าปัญหาการสั่นสะเทือนทางด้านข้างนี้เกิดจากการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างผู้ใช้สะพานและการสั่นสะเทือนของสะพานเอง และการสั่นสะเทือนจะมีลักษณะเพิ่มระดับขึ้นเรื่อยๆ อย่างรวดเร็วหากจำนวนของผู้ใช้มากเพียงพอ (Fujino et al., 1993, Dallards et al., 2001a)

ในบทความนี้จะนำเสนอกลไกของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ตัวอย่างของสะพานที่เกิดปัญหา รวมถึงวิธีที่ใช้ใน

การแก้ไขปัญหาการสั่นสะเทือนดังกล่าว

2. ตัวอย่างสะพานลอยที่มีปัญหาการสั่นสะเทือน

2.1 สะพานลอยแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร

สะพานลอยนี้มีช่วงยาว 33.6 เมตร และมีความกว้าง 2.4 เมตร (รูปที่ 1) จากการตรวจวัดพบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานอยู่ที่ 2 Hz และมีค่าอัตราส่วนความหน่วงอยู่ที่ 0.005 การที่สะพานลอยแห่งนี้มีความลึกของโครงสร้างสะพานที่น้อยทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสะพานลอยอื่น ผู้ใช้สะพานลอยแห่งนี้สามารถรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนได้อย่างชัดเจนและมีความกังวลต่อความปลอดภัยในการใช้งาน สาเหตุของปัญหานี้มาจากจังหวะการเดินของผู้ใช้เท่ากันกับความถี่ธรรมชาติของสะพานลอย นอกจากนี้สะพานยังมีค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ค่อนข้างต่ำ



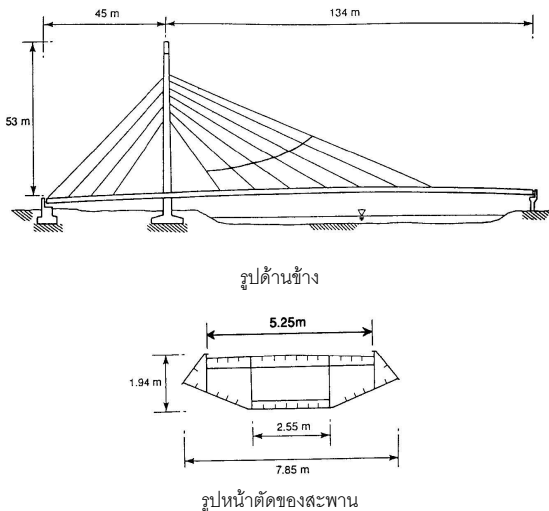
รูปที่ 1 สะพานลอยที่มีปัญหาการสั่นสะเทือนในกรุงเทพมหานคร (Poovarodom et al., 2003)

2.2 สะพานลอย T-Bridge ประเทศญี่ปุ่น

สะพานลอยแห่งนี้เชื่อมต่อสถานีรถไฟโดยสารไปยังสนามกีฬาขนาดใหญ่ ในวันหยุดจึงมักจะมีผู้คนจำนวนมากเดินทางมาชมกีฬาและต้องเดินข้ามสะพานแห่งนี้ (รูปที่ 2)

ลักษณะโครงสร้างของสะพานเป็นสะพานชิงแบบไม่สมมาตร มีความยาวทั้งหมด 180 เมตร และมีความกว้าง 5.25 เมตร สะพานแห่งนี้มีค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นในแนวตั้งของโหมดที่ 1 และ 2 อยู่ที่ 0.73 Hz และ 2 Hz ตามลำดับและมีค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นตามแนวขวางของโหมดที่ 1 อยู่ที่ 0.90 Hz ซึ่งหากพิจารณา

ลักษณะของแรงที่กระทำดังที่ได้กล่าวข้างต้น สะพานน่าจะมีการสั่นที่ค่อนข้างรุนแรงในแนวดิ่งเนื่องจากความถี่ธรรมชาติของสะพานสอดคล้องกับความถี่ของการก้าวเท้าพอดี



รูปที่ 2 สะพานลอย T-bridge ประเทศญี่ปุ่น (Fujino et al., 1993)

อย่างไรก็ดีจากการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของสะพานกลับพบว่าสะพานแห่งนี้มีปัญหการสั่นสะเทือนตามขวางแทนที่จะเกิดปัญหาจากการสั่นในแนวดิ่ง ปัญหการสั่นสะเทือนทางด้านข้างนี้จะไม่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด แต่จะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนของผู้ที่เดินอยู่บนสะพานเพิ่มขึ้นมากและต้องเดินอยู่บนสะพานมาแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่ง กลไกของการสั่นอย่างรุนแรงนี้ได้ถูกอธิบายไว้ว่า เมื่อสะพานเริ่มสั่นผู้ใช้สะพานจะพยายามปรับจังหวะการเดินให้เข้ากับจังหวะการสั่นของสะพานเพื่อรักษาสมดุล การปรับจังหวะการเดินนี้ทำให้จังหวะการเดินของผู้ใช้ถูกปรับเข้าหากัน และส่งผลทำให้ระดับการสั่นสะเทือนของสะพานมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น การศึกษานี้เป็นงานชิ้นแรกๆที่อธิบายถึงการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างผู้ใช้สะพานและการสั่นสะเทือนของสะพาน

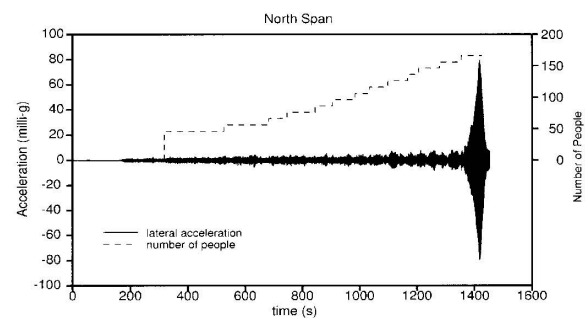
2.3 สะพานลอย Millennium Bridge ประเทศอังกฤษ

สะพาน Millennium Bridge แห่งนี้ทอดข้ามแม่น้ำเทมส์ในกรุงลอนดอน (รูปที่ 3) ตัวสะพานมีความยาวทั้งสิ้น 332 เมตร แบ่งออกเป็นความยาวช่วงกลางสะพาน 144 เมตร ความยาวช่วงฝั่งทิศเหนือ 80 เมตร และความ

ยาวช่วงฝั่งทิศใต้ 108 เมตร ทั้งสองข้างของสะพานมีเคเบิลเพื่อรับน้ำหนักสะพานด้านละ 4 เส้น โดยมีระยะตกท้องช้าง (Sag) ในช่วงกลาง 2.3 เมตร และมีการเบี่ยงตัวของเคเบิลสอบเข้าหาตัวสะพานในช่วงกลาง 1.73 เมตร ทางเดินบนสะพานมีความกว้าง 4 เมตร



รูปที่ 3 สะพานลอย Millennium Bridge กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ (Dallard et al., 2001a)



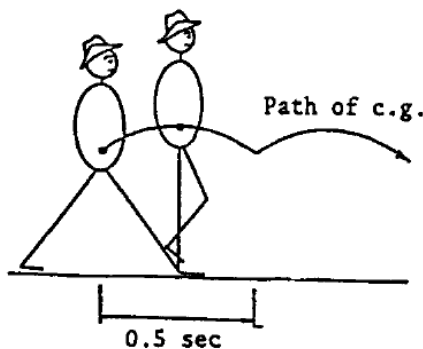
รูปที่ 4 ระดับการสั่นสะเทือนทางด้านข้างของสะพาน Millennium Bridge เมื่อจำนวนผู้ใช้มากขึ้นเรื่อยๆ (Dallard et al., 2001a)

สะพานแห่งนี้เปิดใช้งานเมื่อ 12 มิถุนายน 2543 ในวันนั้นมีผู้คนจำนวนมากมาร่วมเฉลิมฉลองและเดินอยู่บนสะพาน มีรายงานว่าขณะที่มีผู้คนเดินอยู่เต็มสะพาน พวกเขาสามารถรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนทางด้านข้างที่มีระดับสูงผิดปกติ จนผู้ใช้งานบางส่วนต้องจับราวสะพานหรือถึงกับหยุดเดินเพื่อรักษาสมดุลให้กับตัวเอง เมื่อเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของสะพานนี้พบว่าค่าทั้งสองก็อยู่ในช่วงที่พบได้ในสะพานอื่นๆ ปัญหการสั่นสะเทือนที่พบนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับการสั่นสะเทือนทางด้านข้างของสะพาน T-Bridge ในประเทศญี่ปุ่น คือเมื่อจำนวนคนที่เดินอยู่บน

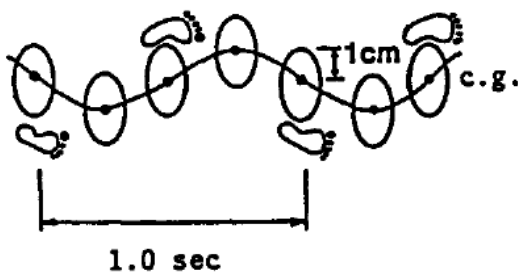
สะพานมีจำนวนมากจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้สะพานเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง (รูปที่ 4)

3. ลักษณะของแรงที่เกิดจากการเดินบนพื้นนี้

การสั่นสะเทือนของสะพานลอยมีสาเหตุหลักมาจากการเดินของผู้ใช้ การเดินตามปกติจะมีความเร็วเฉลี่ยในการก้าวเท้าอยู่ที่ 2 ก้าวต่อวินาที แรงที่เกิดจากการเดินนี้สามารถแยกองค์ประกอบได้เป็น 3 ทิศทาง คือตามแนวดิ่งตามแนวยาว และตามแนวขวางของทิศทางการเดิน ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งนั้นเกิดจากการที่จุดศูนย์ถ่วงของร่างกายมีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งตามจังหวะการก้าวเท้า (รูปที่ 5) โดยมีความถี่เฉลี่ยในการก้าวเท้าอยู่ที่ 2 ก้าวต่อวินาที ส่วนแรงตามขวางนั้นจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์ถ่วงเพื่อรักษาสสมดุลของร่างกาย (รูปที่ 6) ซึ่งจะมีค่าครึ่งหนึ่งของความถี่ในการก้าวเท้า จากการตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นพบว่าแรงในแนวดิ่งจะมีสัดส่วนสูงที่สุด



รูปที่ 5 การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของจุดศูนย์ถ่วงของร่างกายขณะเดิน (Fujino et al., 1993)

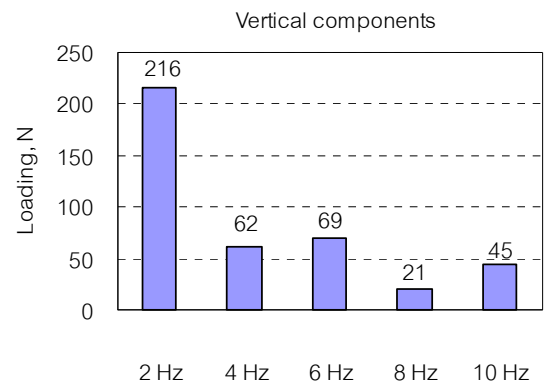


รูปที่ 6 การเคลื่อนที่ตามขวางของจุดศูนย์ถ่วงของร่างกายขณะเดิน (Fujino et al., 1993)

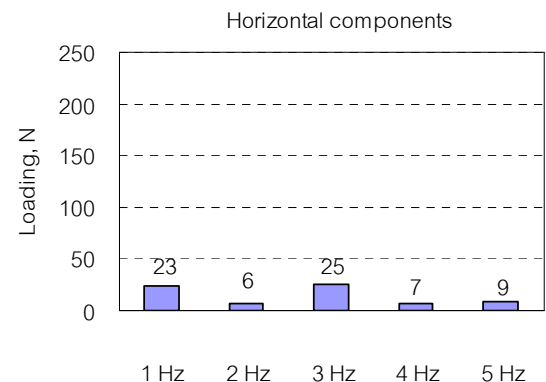
แบบจำลองเบื้องต้นที่พยายามอธิบายถึงรายละเอียดของแรงที่เกิดจากการเดินคือการแยกองค์ประกอบของแรงด้วยอนุกรมฟูเรียร์ เนื่องจากแรงที่เกิดจากการเดินมีลักษณะเกิดซ้ำเป็นวงรอบ องค์ประกอบของแรงนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$F_p(t) = G + \sum G\alpha_i \sin(2\pi f_p t - \phi_i) \quad (1)$$

โดย G คือน้ำหนักของคนที่เดิน (N) α_i คือสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์ f_p คือความถี่ในการก้าวเท้าและ ϕ_i คือเฟสของฮาร์โมนิกที่ i โดยที่ i คือหมายเลขของฮาร์โมนิกที่พิจารณาจากทั้งหมด n ฮาร์โมนิก



รูปที่ 7 องค์ประกอบของแรงในดิ่งที่เกิดจากการเดิน (Bachmann and Ammann, 1987)



รูปที่ 8 องค์ประกอบของแรงในแนวราบที่เกิดจากการเดิน (Bachmann and Ammann, 1987)

จากการศึกษาของ Bachmann and Ammann (1987) แสดงให้เห็นถึงการแยกองค์ประกอบของแรงที่เกิดจากการเดินเป็นฮาร์โมนิกต่างๆ โดยจะเห็นว่าสำหรับแรงในแนวดิ่งนั้น จะมีฮาร์โมนิกพื้นฐานอยู่ที่ 2 Hz โดยมีสัดส่วนของแรงสูงถึงร้อยละ 37 ของน้ำหนักตัวของผู้เดิน

(รูปที่ 7) ส่วนแรงที่เกิดขึ้นตามแนวขวางนั้นจะมีค่าเพียงร้อยละ 10 ของแรงที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาก (รูปที่ 8) และเนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นตามแนวขวางนั้นจะมีจังหวะตามการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ความถี่พื้นฐานของแรงที่พบจึงมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของความเร็วก้าว นั่นคือ 1 Hz

โดยปกติจังหวะการก้าวเท้าของผู้ใช้ที่เดินอย่างอิสระจะมีค่าความถี่เฉลี่ยในการก้าวเท้าประมาณ 2 ก้าวต่อวินาที แต่ถ้าหากสะพานมีผู้ใช้หนาแน่นมากอาจจะทำให้ไม่สามารถเดินได้อย่างอิสระ ส่งผลให้จังหวะในการก้าวเท้าถูกควบคุมโดยความเร็วของผู้คนส่วนใหญ่ และอาจทำให้ความถี่ในการก้าวเท้าลดลงเหลือ 1.4 ก้าวต่อวินาทีหรือต่ำกว่านั้น (Fujino et al., 1993)

เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นมีแนวดิ่งมีค่าที่สูงกว่าแรงที่เกิดขึ้นในตามแนวขวางมาก ในการออกแบบสะพานลอยผู้ออกแบบมุ่งเน้นไปที่การพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่มีรูปแบบการสั่นในแนวดิ่งไปสอดคล้องกับความถี่ของการเดิน ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการกำทอน (Resonance) เพราะในอดีตเคยมีเหตุการณ์ที่การสั่นสนามของทหารที่เดินเป็นจังหวะอย่างพร้อมเพรียงกัน ได้ทำให้สะพานลอยเกิดการวิบัติมาแล้ว ในประเทศญี่ปุ่นนั้น มีข้อกำหนดในการออกแบบว่าความถี่ธรรมชาติของสะพานลอยจะต้องไม่อยู่ในช่วง 1.5-2.3 Hz

สำหรับแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางตามขวางนั้น หากจำนวนของผู้ใช้สะพานไม่หนาแน่นมาก มักจะไม่ทำให้เกิดปัญหาการสั่นสะเทือนของสะพาน แต่ถ้าหากมีผู้ใช้สะพานจำนวนมากแล้วทำให้การเดินของผู้ใช้แต่ละคนไม่สามารถเดินได้อย่างอิสระ ผู้ใช้สะพานจะถูกบังคับให้เดินตามจังหวะของคนส่วนใหญ่ ซึ่งอาจจะทำให้แรงที่กระทำกับสะพานมีระดับที่มีนัยสำคัญและทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้

จากการถ่ายภาพเคลื่อนไหวของผู้ใช้สะพาน T-bridge นั้นพบว่า การสั่นสะเทือนในแนวราบจะไม่เกิดขึ้นทันทีทันใดที่มีผู้ใช้เดินอยู่บนสะพาน แต่จะเกิดขึ้นหลังจากกลุ่มผู้ใช้จำนวนมากเริ่มเดินบนสะพานไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง โดยจากภาพเคลื่อนไหวได้แสดงให้เห็นว่า ผู้ใช้สะพานบางส่วนจะปรับจังหวะการเดินของตนเองให้เข้า

กับจังหวะการสั่นสะเทือนของสะพาน และนั่นทำให้การสั่นสะเทือนมีระดับที่มากขึ้น ปัญหาการสั่นสะเทือนลักษณะนี้ยังพบได้ในอีกหลายสะพาน เช่น สะพาน Millennium Bridge (Dallard et al., 2001a) และสะพาน Clifton Suspension Bridge (Macdonald, 2008) ซึ่งกลไกการเกิดปัญหาลักษณะนี้จะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

4. ลักษณะของแรงที่เกิดจากการเดินบนพื้นผิวที่เคลื่อนที่

แรงที่เกิดจากการเดินบนพื้นที่ยืนนิ่งมีความแตกต่างจากแรงที่เกิดจากการเดินบนพื้นสะพานที่มีการเคลื่อนที่เนื่องจากผู้ใช้ที่เดินบนสะพานที่มีการเคลื่อนที่หรือสั่นสะเทือนจะพยายามรักษาสถิตของตัวเองให้ทรงตัวอยู่ได้ ลักษณะการเดินที่มีผลของการเคลื่อนที่ของพื้นมาเกี่ยวข้องแบบนี้เรียกว่า Synchronization phenomenon (Bachmann and Ammann, 1987) หรือ Lock-in effect (Dallard et al., 2001b) ผลที่ตามมาคือผู้ใช้สะพานจะพยายามปรับวิธีการเดินด้วยการกางขาที่กว้างขึ้น ซึ่งนั่นก็ส่งผลให้ส่วนของลำตัวมีการเคลื่อนที่ทางด้านข้างมากขึ้นและทำให้เกิดแรงทางด้านข้างมากขึ้นตามไปด้วย

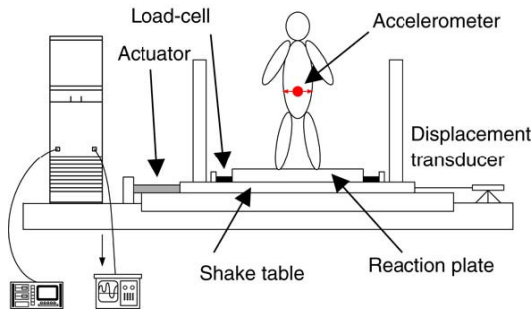
ในการศึกษาของ Dallard et al. (2001b) สรุปว่าเมื่อผู้ใช้สะพานเดินด้วยจังหวะที่สอดคล้องกัน และมีปฏิสัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของสะพาน จะทำให้เกิดแรงที่มีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของพื้นสะพาน

$$F(t) = k v(t) \quad (2)$$

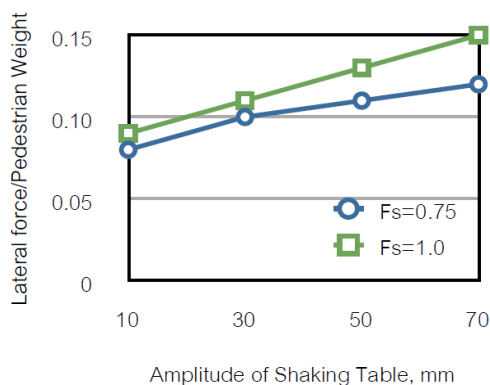
เมื่อ k คือสัมประสิทธิ์ของแรงตามขวางที่เกิดจากการเดิน และ $v(t)$ คือความเร็วของการสั่นสะเทือนทางด้านข้างของสะพาน ซึ่งหมายความว่าผู้ใช้สะพานที่เดินอยู่บนสะพานขณะที่เกิดพฤติกรรมแบบนี้ จะทำหน้าที่เสมือนเป็น Negative damping หรือช่วยเสริมการสั่นสะเทือนให้มีระดับรุนแรงขึ้น สุดท้ายผู้ใช้สะพานก็จะต้องหยุดเดินเพื่อรอให้การสั่นสะเทือนนั้นลดระดับลง นอกจากนี้ Dallard et al. (2001b) ยังได้ให้ข้อสรุปด้วยว่า ปัญหานี้จะเกิดกับสะพานที่มีความถี่ธรรมชาติต่ำกว่า 1.3 Hz และมีจำนวนผู้ใช่มากเพียงพอ ซึ่งจำนวนผู้ใช้ที่จะก่อให้เกิดปัญหานี้จะสามารถประมาณได้จาก

$$N_L = \frac{8\pi cfM}{k} \quad (3)$$

เมื่อ c คือค่าอัตราส่วนความหน่วง f คือค่าความถี่ธรรมชาติ M คือ modal mass และ k คือสัมประสิทธิ์ของแรงตามขวางที่เกิดจากการเดิน



รูปที่ 9 การทดสอบเพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการเดินบนพื้นที่มีการสั่นสะเทือนทางด้านข้าง (Nakamura et al., 2008)



รูปที่ 10 แรงทางด้านข้างที่เกิดขึ้นจากการเดินบนพื้นที่มีการสั่นสะเทือนทางด้านข้าง (Nakamura et al., 2008)

นอกเหนือจากการตรวจวัดและสังเกตพฤติกรรมการณ์การสั่นสะเทือนตามขวางของสะพานลอยจริงแล้ว ยังได้มีความพยายามในการศึกษาในห้องปฏิบัติการถึงแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเดินบนพื้นที่เคลื่อนที่ได้ โดย Nakamura et al. (2008) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อตรวจวัดแรงตามขวางเนื่องจากการเดินโดยพิจารณาผลของการเคลื่อนที่ของพื้นผิวที่เดินเข้าไปด้วย โดยให้กลุ่มตัวอย่างเดินอยู่บนพื้นของเครื่องเขย่า (Shaking Table) ที่สามารถเคลื่อนที่ทางด้านข้างได้ (รูปที่ 9) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงตามขวางที่เกิดขึ้นจากการเดินบนพื้นที่มีการเคลื่อนที่ไหวตามขวาง จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามระดับของการสั่นสะเทือน โดยพบว่าแรงทานด้านข้างจะมีขนาดอยู่

ในช่วงร้อยละ 10 ที่ระดับการเคลื่อนที่ของพื้น 10 มิลลิเมตร และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ของน้ำหนักตัวที่ระดับการเคลื่อนที่ของพื้น 70 มิลลิเมตร นอกจากนี้ความถี่ของการสั่นสะเทือนยังมีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นด้วย (รูปที่ 10) ถึงแม้จะมีการพยายามคาดการณ์ผลของการเดินของผู้ใช้หลายคน แต่การทดลองก็ยังทำโดยให้เดินบนแผ่นพื้นที่ละคน แล้วนำผลมารวมกันภายหลัง

5. มาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ

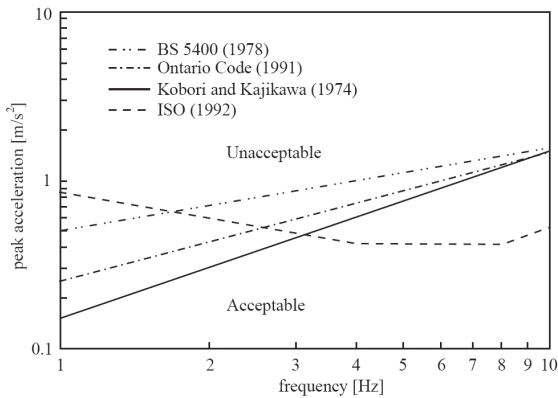
แนวทางในการออกแบบปัจจุบันมีอยู่ 2 แนวทาง คือ การคำนวณหาการตอบสนองจริงของสะพานแล้วตรวจสอบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ กับอีกแนวทางคือการพยายามออกแบบให้สะพานมีค่าความถี่ธรรมชาติสูงกว่าความถี่ที่จะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้สะพานและตัวสะพานเอง

AASHTO (1997) ได้แนะนำให้ทำการประเมินประสิทธิภาพด้านพลศาสตร์ของสะพาน หากพบว่าสะพานที่ออกแบบมีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำกว่า 3 Hz อย่างไรก็ดี เงื่อนไขนี้จะได้รับการยกเว้นหากโครงสร้างของสะพานมีน้ำหนักมากกว่าสมการที่แนะนำในมาตรฐาน

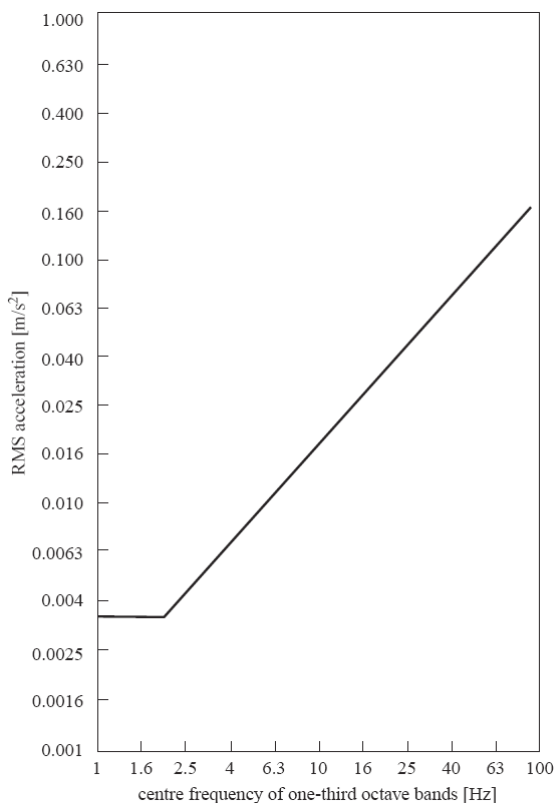
มาตรฐาน BS5400 (1978) ได้อธิบายถึงวิธีการตรวจสอบการสั่นสะเทือนของสะพานที่มีการสั่นในแนวดิ่งสำหรับสะพานที่มีความถี่ธรรมชาติต่ำกว่า 5 Hz นอกจากนี้ยังกำหนดด้วยว่า หากสะพานใดมีความถี่ธรรมชาติของการสั่นตัวตามขวางต่ำกว่า 1.5 Hz จะต้องทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยวิธีการทางพลศาสตร์อย่างละเอียด

Ontario Highway Bridge Design Code (1983) กำหนดให้พิจารณาสะพานที่มีความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนในแนวดิ่งต่ำกว่า 4 Hz ซึ่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ใน BS5400 ค่าความถี่สูงสุดของสะพานที่พิจารณาตามทั้ง 2 มาตรฐานนี้จะต้องต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด นอกจากนี้เพื่อป้องกัน Modal Coupling ระหว่างการสั่นสะเทือนในแนวราบและแนวดิ่ง จึงได้มีการกำหนดไว้ในมาตรฐานด้วยว่า ความถี่ธรรมชาติของสะพานไม่ควรต่ำกว่า 4 Hz และ $1.5f$ เมื่อ f คือความถี่ธรรมชาติที่ต่ำที่สุดของสะพานนั้น

Pimentel (1997) ได้ทำการเปรียบเทียบขีดจำกัดของการสั่นสะเทือนที่กำหนดไว้ในมาตรฐานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ระดับการสั่นสะเทือนในแนวดิ่งที่ยอมรับได้ (Pimentel, 1997)



รูปที่ 12 ระดับการสั่นสะเทือนในแนวนอนที่ยอมรับได้ โดยจะต้องคูณค่า 60 เข้าไปด้วย (ISO, 1992)

ข้อกำหนดเกี่ยวกับระดับการสั่นสะเทือนส่วนใหญ่จะพิจารณาเฉพาะการสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง ISO 10137 ได้กำหนดข้อจำกัดการสั่นสะเทือนในแนวนอนดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งจะพบว่าช่วงที่ผู้ใช้สะพานจะรับรู้ถึงการ

สั่นสะเทือนในแนวนอนได้ง่ายที่สุดคือการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ขึ้นไปถึง 2 Hz

6. การแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนของสะพานลอย

แนวทางในการแก้ไขปัญหาการสั่นสะเทือนของสะพานลอยแบบพื้นฐานที่สุดสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนรูปแบบของโครงสร้างสะพานเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ วิธีการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ความถี่พื้นฐานของสะพานไปตรงกับความถี่ประกอบของแรงที่เกิดจากการเดิน อันจะทำให้เกิดการกำทอน นั่นคือ หลีกเลี่ยงไม่ให้สะพานมีความถี่ธรรมชาติในช่วง 1.6-2.4 Hz สำหรับการสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง และหลีกเลี่ยงความถี่ธรรมชาติในช่วง 0.8-1.2 Hz สำหรับการสั่นสะเทือนตามขวาง ตัวอย่างการแก้ปัญหาดังกล่าวนี้คือสะพาน Craggs Bridge ซึ่งได้มีการเสริมความแข็งแรงเพื่อเพิ่มสติฟเนสของสะพานเพื่อทำให้ความถี่ธรรมชาติสูงขึ้น (Wilkinson and Knapton, 2006)

แต่หากไม่สามารถออกแบบหรือเปลี่ยนแปลงให้ความถี่ธรรมชาติอยู่นอกช่วงดังกล่าวได้ วิธีการที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหการสั่นสะเทือนของสะพานลอยคือการเพิ่มค่าอัตราส่วนความหน่วงให้สูงพอที่จะควบคุมการสั่นสะเทือนของสะพานให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย ทั้งในแง่ความรู้สึกของผู้ใช้และความปลอดภัยของโครงสร้างสะพาน ตัวอย่างของวิธีการที่ใช้ในการเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงคือ มวลหน่วงปรับค่า Tuned Mass Damper (TMD) ซึ่งจะประกอบไปด้วยสปริง (Spring) มวล (Mass) และตัวหน่วง (Damper) หลักการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าคือการทำให้มวลหน่วงมีความถี่ธรรมชาติเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ต้องการควบคุมการสั่นสะเทือนด้วยการเลือกมวลและสปริงที่เหมาะสม การนำมวลหน่วงปรับค่าที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ไปติดตั้งไว้บนโครงสร้างจะช่วงลดการสั่นสะเทือนบนตัวโครงสร้างได้ อย่างไรก็ดี ประสิทธิภาพของมวลหน่วงจะลดลงอย่างมากหากความถี่ธรรมชาติของมวลหน่วงไม่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างที่ต้องการควบคุม การเพิ่มตัวหน่วงเข้าไปจะช่วยให้ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักแม้ความถี่ธรรมชาติของมวล

หน่วยปรับค่าจะไม่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง
พอดี ตัวอย่างของสะพานลอยที่มีการนำมวลหน่วยปรับค่า
มาช่วยแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนคือ สะพานลอยใน
กรุงเทพมหานคร (Poovarodom et al., 2003)
สะพานลอย Millennium Bridge (Newland 2002)

การเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงให้กับโครงสร้างยัง
สามารถทำได้อีกวิธีด้วย Tuned Liquid Damper (TLD)
วิธีการนี้จะอาศัยการบรรจุของเหลวในปริมาณที่เหมาะสม
ลงในภาชนะ โดยภาชนะนั้นจะยึดอยู่กับโครงสร้างที่
ต้องการควบคุมการสั่นสะเทือน เมื่อโครงสร้างมีการ
เคลื่อนที่ ความเฉื่อยจะทำให้ของเหลวในภาชนะมีการ
เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับการสั่นสะเทือนของ
สะพาน และช่วยลดระดับการสั่นสะเทือนของสะพานลงได้
ในบางกรณีถ้าต้องการเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงให้สูงขึ้น
จะมีการนำตะแกรงหรือตาข่ายไปขวางการเคลื่อนที่
ของเหลว เพื่อให้มีการสลายพลังงานได้มากยิ่งขึ้น
สะพานลอย T-Bridge ในประเทศญี่ปุ่นก็ได้นำเอา TLD
ไปใช้ในการควบคุมการสั่นสะเทือน (Fujino et al., 1992)

7. สรุป

ปัญหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับสะพานลอยมี
หลายรูปแบบ ผู้เขียนได้ยกตัวอย่างปัญหาที่เกิดขึ้นกับ
สะพานลอยต่างๆที่มีการรายงานมา โดยได้อธิบายถึง
พฤติกรรมรูปแบบต่างๆที่ทำให้สะพานลอยเกิดการ
สั่นสะเทือนในระดับที่ก่อให้เกิดความกังวลของผู้ใช้ จาก
ตัวอย่างของสะพานลอยสมัยใหม่จะเห็นว่า ลักษณะ
โครงสร้างสะพานมักจะมีขนาดที่ค่อนข้างเพรียวบาง ทำ
ให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาการสั่นสะเทือนได้ง่าย
ในส่วนท้ายของบทความผู้เขียนจึงได้อธิบายถึงวิธีการที่
นิยมใช้ในการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง
สะพานลอยแบบต่างๆ

8. เอกสารอ้างอิง

American Association of State Highway and
Transportation Officials (AASHTO). 1997. Guide
Specification for Design of Pedestrian Bridges.
Washington, D.C.

British Standards Institution (BSI). 1978. British
Standard Specification for load; Steel, Concrete
and Composite Bridges, Part 2. BS5400,
London.

Bachmann, H. and Ammann, W. (1987). Vibrations
in Structures Induced by Man and Machines.
*IABSE-AIIPC-IVBH, Structural Engineering
Documents*, 3e.

Dallard, P., Fitzpatrick, T., Flint, A., Low, A., Smith,
R.R., Willford, M. and Roche, M.. (2001a).
London Millennium Bridge: Pedestrian-induced
Lateral Vibration. *Journal of Bridge Engineering*.
Vol. 6, No. 6, 412-417.

Dallard, P., Fitzpatrick, A.J., Flint, A., Bourva, S.L.,
Low, A., Smith, R.M. and Willford, M. (2001b).
The London Millennium Footbridge. *The
Structural Engineer*. Vol. 79, No. 22, 17-33.

Fujino, Y., Sun, L., Pacheco, B.M. and Chaiseri, P.
(1992). Suppression of Horizontal Motion by
Tuned Liquid Damper. *Journal of Engineering
Mechanics*. Vol. 118, 2017-2030.

Fujino, Y., Pacheco, B.M., Nakamura, S.I. and
Warnitchai, P. (1993). Synchronization of human
walking observed during lateral vibration of a
congested pedestrian bridge. *Earthquake
Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 22,
No. 9, 741-758.

Hearn, G.E. and Metcalfe, A.V. (1995). Spectral
Analysis in Engineering: Concepts and Cases.
Butterworth-Heinemann.

ISO. 1992. Bases for Design of Structures-
Serviceability of Buildings Against Vibrations.
ISO 10137. International Standardization
Organization. Geneva, Switzerland.

Macdonald, J.H.G. (2008). Pedestrian-induced
vibrations of the Clifton Suspension Bridge, UK.

- Proceedings of the ICE - Bridge Engineering*. Vol. 161, No. 2, 69-77.
- Nakamura, S., Kawasaki, T., Katsuura, H. and Yokoyama, K. (2008). Experimental studies on lateral forces induced by pedestrians. *Journal of Construction Steel Research*. Vol. 64, 247-252.
- Newland, D.E. (2002). Vibration of the London Millennium Footbridge: Part 2 - Cure. *Proceedings of the 9th International Congress on Sound and Vibration*. Orlando, Florida, July 2002.
- Ontario Highway Bridge Design Code. 1983. Ministry of Transportation and Communications, Highway Engineering Division, Ontario.
- Pimentel, R.L. (1997). Vibration Performance of Pedestrian Bridges Due to Human-Induced Loads. PhD Thesis, University of Sheffield, Sheffield, UK.
- Poovarodom, N., Kanchanosot, S. and Warnitchai, P. (2003). Application of non-linear multiple tuned mass dampers to suppress man-induced vibrations of a pedestrian bridge. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 32, 1117-1131.
- Wilkinson, S.M. and Knapton, J. (2006). Analysis and solution to human-induced lateral vibration on a historic footbridge. *Journal of Bridge Engineering*. Vol. 11, No. 1, 4-12.
- Yang, S. and Huang, D. (1997). Aesthetic considerations for urban pedestrian bridge design. *Journal of Architectural Engineering*. Vol. 3, No. 1, 3-8.