

การศึกษาเปรียบเทียบข้อกำหนดในการออกแบบทางพลศาสตร์ของสะพานคนเดิน A Study on Design Code for Dynamics Analysis of Pedestrian Bridge

รศ.ดร. หวังทวิทรัพย์¹, สุรนุชา สืบตา², สุรพันธุ์ นพรัตน์³ และ ผศ.ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

ด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในการก่อสร้างในปัจจุบัน ทำให้แนวโน้มในการออกแบบรูปแบบของโครงสร้างประเภทสะพานนั้น มีรูปแบบที่มีความละเอียดที่สูงขึ้นกว่าการออกแบบในอดีต ปัจจัยเหล่านี้เองจึงส่งผลให้สะพานมีความอ่อนไหวต่อการสั่นสะเทือนที่มากยิ่งขึ้น จึงทำให้เกิดการศึกษา และวิจัยในเรื่องนี้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ ที่ต้องการจะรวบรวม ข้อกำหนด, คำแนะนำในการออกแบบ และมาตรฐาน ที่มีอยู่ของการออกแบบสะพานคนเดินในต่างประเทศ แต่ยังคงไม่พบที่เป็นรูปแบบข้อกำหนดที่ชัดเจนในประเทศไทย โดยจากการรวบรวมเอกสาร พบว่าเอกสารแต่ละฉบับนั้นมีมุมมองในการออกแบบที่แตกต่างกัน แต่มีขั้นตอนในการออกแบบที่เป็นจุดร่วม เช่น มีการกำหนดเกณฑ์ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ต้องพิจารณาผลทางพลศาสตร์, การกำหนดเกณฑ์ความเร่งสะทกสวายในการใช้งาน ฯลฯ ในการศึกษาครั้งนี้จะนำแนวทางในการออกแบบของมาตรฐาน UK National Annex และ European Design Guide มาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่จะได้จากสะพานตัวอย่างที่มีความยาว 36 เมตร กว้าง 3 เมตร ซึ่งตั้งอยู่ในเขตเมืองใหญ่ โดยมีรูปแบบโครงสร้างเป็นสะพานเหล็กคอมโพสิตและพื้นคอนกรีต โดยเป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองแบบประวัติเวลา (Time History Analysis) จากการวิเคราะห์ทั้งสองข้อกำหนดพบว่า ผลความเร่งของการตอบสนองของสะพานที่ได้จากแรงประเภทฝูงชนเต็มสะพานนั้น จะมีค่าที่มากกว่าผลตอบสนองจากแรงประเภทกลุ่มคนที่เคลื่อนที่ผ่านบนสะพาน ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่ผ่านเกณฑ์ในด้านของการใช้งาน แต่ในทางปฏิบัติกรณีของฝูงชนเต็มสะพานเป็นกรณีที่เกิดขึ้นได้ยาก และมีลักษณะความแปรผันต่อปัจจัยอื่นที่มาก การปรับปรุงสะพานให้ผ่านเกณฑ์สามารถทำได้จริง แต่อาจไม่เหมาะสมในบางกรณี ในการพิจารณาเลือกใช้มาตรฐานในการออกแบบโครงสร้างประเภทนี้ จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากที่วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจพื้นฐานที่มาของพฤติกรรม และแนวคิดในการออกแบบในแต่ละข้อกำหนด เพื่อที่จะได้สามารถปรับใช้ให้เข้ากับกรณีของสะพานที่มีความเฉพาะได้อย่างเหมาะสมต่อไป

คำสำคัญ: สะพานคนเดิน, การวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์, การสั่นสะเทือน

Abstract

The demand for more interesting bridges has risen in recent decades, resulting in longer, slenderer, and more aesthetically constructed pedestrian bridges. As a result, the bridge becomes more vulnerable to vibration, demonstrating that constructing footbridges solely from a static perspective is insufficient. Several studies and research have been conducted in order to develop a design guideline for dynamic analysis of footbridges. The aim of this thesis is to serve as a reference for those in Thailand who are interested in learning more about this phenomenon. It has been shown that the literature evaluated takes different approaches to this phenomenon, but the design methodologies seem to be very similar. For this thesis' design example, a composite steel girder bridge with a span of 36 meters and a width of 3 meters are subjected to a time-history analysis according to UK National Annex and European Design Guide. The analysis showed that the acceleration response due to a crowded condition from both the UK National Annex and the European Design Guide is significantly high in comparison to walking and jogging conditions and does not meet the codes' comfort criteria. To counter this phenomenon, a bridge may be improved by installing a damping device or changing the bridge structure to adjust the natural frequencies. The crowded condition, on the other hand, occurs rarely and, according to those who develop these load models, it does not provide a reliable result. As a result, engineers who will need to use this approach to design a bridge must have a thorough understanding of the behavior and design philosophy of the design method in order to better apply it to the bridge's particular design situation.

Keywords: Pedestrian Bridge, Dynamics, Vibration, Footbridge

1. คำนำ

สะพานคนเดิน (Pedestrian Bridge) เป็นสะพานที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และการออกแบบสะพานในยุคปัจจุบันนั้น จะเน้นไปในด้านความสวยงามที่มากกว่าเดิม ส่งผลให้สะพานที่ใช้ในปัจจุบันมีความขะลุคมากยิ่งขึ้น ปัจจัยเหล่านี้เองจึงส่งผลให้สะพานมีความอ่อนไหวต่อการสั่นสะเทือนที่มากยิ่งขึ้น หากการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเป็นการสั่นสะเทือนที่มากเกินไปจะขีดความสามารถในการรับรู้ของมนุษย์ (Comfort Criteria) จะส่งผลให้ผู้ใช้งานสะพานเกิดความรู้สึกว่าสะพานมีความไม่มั่นคง หรือไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลต่อการใช้งานสะพานของมนุษย์อย่างมากจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงผลของการสั่นสะเทือนเพิ่มไปจากเดิมที่วิเคราะห์เพียงแต่ผลของแรงสถิตเพียงเท่านั้น [1]

จึงเป็นที่มาของบทความฉบับนี้ ที่ต้องการจะทำการนำเสนอถึงข้อกำหนด, คำแนะนำในการออกแบบ และ มาตรฐาน ที่มีอยู่ของการออกแบบสะพานคนเดินทางพลศาสตร์ [1], [2] ซึ่งมีอยู่อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การตั้งข้อสังเกต และ เปรียบเทียบข้อกำหนดที่แตกต่างกัน ในด้านการใช้งาน (Serviceability) ที่นอกเหนือจากการตรวจสอบความมั่นคงแข็งแรงในด้านกำลังที่ส่วนมากจะถูกพิจารณาเป็นปกติในการออกแบบโครงสร้างอยู่แล้ว

2. ทฤษฎี และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติความหน่วงของโครงสร้าง

ค่าคุณสมบัติของความหน่วงในระบบโครงสร้างทางวิศวกรรม เป็นสิ่งที่ยากในการคำนวณหา โดยส่วนมากนั้นจะทำการทดสอบจากโครงสร้างจริง อย่างไรก็ตามการทดสอบนั้นมีต้นทุนที่สูงดังนั้นจึงมีการรวบรวมข้อแนะนำของอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างต่างๆ ดังตัวอย่างค่าประมาณของอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างชนิดต่าง ๆ ภายใต้งจรกระทำจากคนสัญจร [1] ดังรูปที่ 2

Construction type	Minimum ξ	Average ξ
Reinforced concrete	0.80%	1.3%
Prestressed concrete	0.5%	1.0%
Composite steel-concrete	0.30%	0.60%
Steel	0.20%	0.40%
Timber	1.50%	3.0%

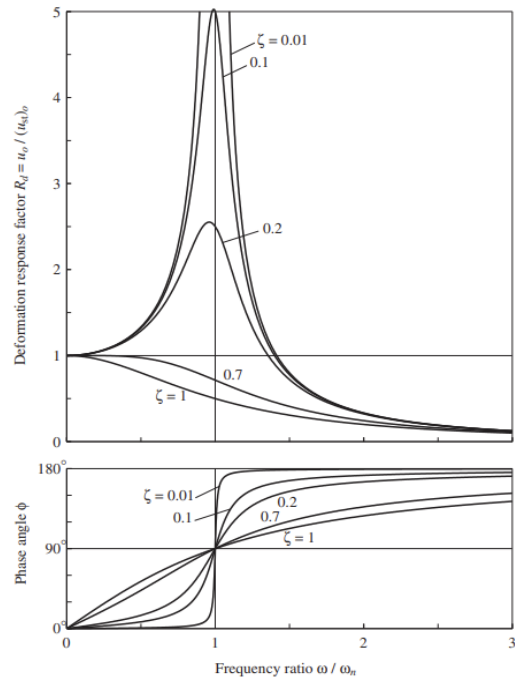
รูปที่ 1 ตัวอย่างค่าอัตราส่วนของความหน่วงในโครงสร้าง^[1]

2.2 ตัวคูณขยายค่าเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Magnification Factor, R)

ตัวคูณขยายค่าเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Magnification Factor, R_d) สามารถนิยามได้ว่า เป็นอัตราส่วนระหว่าง ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ต่อ ผลตอบสนองเชิงสถิต เขียนได้ดังสมการที่ (1) โดย $(x_{st})_0$ คือค่าผลการตอบสนองเชิงสถิต

$$R_d = x(t) / (x_{st})_0 \quad (1)$$

ซึ่งตัวคูณขยายค่าเชิงพลศาสตร์นี้ สามารถเทียบได้ทั้งในเทอมของผลตอบสนองที่อยู่ในรูปของการกระจัด, ความเร็ว, และ ความเร่ง



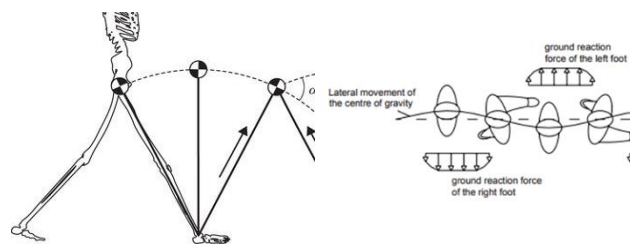
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวคูณขยายค่าเชิงพลศาสตร์ (R_d) และค่าความต่างมุมเฟสต่ออัตราส่วนความถี่ของระบบ $(\omega/\omega_n)^{[3]}$

ในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า ในช่วงที่อัตราส่วนความถี่ของแรงภายนอกต่อความถี่ธรรมชาติ มีค่าตรงกัน หรือ $(\omega/\omega_n = 1)$ จะทำให้ค่า R_d มีค่าสูงมากขึ้น และ แปรผกผันกับอัตราส่วนความหน่วง โดยยิ่งอัตราส่วนค่าความหน่วงยิ่งน้อย ก็จะทำให้เกิดผลของการสั่นไหวที่รุนแรงมากยิ่งขึ้นไป ไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าตามสมการที่ (2)

$$(R_d)_0 \approx 1/2\xi \quad (2)$$

2.3 Lateral Lock in Effect (Synchronized Lateral Vibration)

การสั่นสะเทือนของสะพานคนเดินในแนวราบนั้นมีความแตกต่างจากการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง เนื่องจากโดยธรรมชาติของมนุษย์นั้นจะมีการดูดซับแรงสั่นสะเทือนในแนวตั้งด้วยขา และ ข้อต่อ อยู่แล้ว จึงทำให้มนุษย์นั้นจะมีความอ่อนไหวต่อการสั่นสะเทือนในแนวราบของสะพานมากกว่า ในการเดินนั้นจุดศูนย์กลางถ่วงในแนวราบ และ แนวตั้ง จะมีการเคลื่อนย้ายอยู่เสมอ ดังรูปที่ 3 เพราะฉะนั้นหากมีการสัญจรอยู่บนสะพานที่มีการสั่นสะเทือนในแนวข้างที่มีค่าที่ใกล้เคียงกับย่านความถี่ในการเดินของมนุษย์แล้วนั้น มนุษย์จะพยายามปรับการเดินเพื่อให้การขยับของจุดศูนย์กลางถ่วงในแนวราบให้มีความใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนมากขึ้น ส่งผลเกิดปรากฏการณ์สันฟองของสะพานในแนวด้านข้างขึ้นหรือที่เรียกกันว่า Lateral Lock in Effect



รูปที่ 3 จุดศูนย์กลางถ่วงในแนวราบและแนวตั้งที่เปลี่ยนแปลงของคนในการเดิน^{[1][8]}

3. มาตรฐาน, ข้อกำหนด และ แนวทางการออกแบบ สะพานคนเดินทางพลศาสตร์

3.1 UK National Annex for EUROCODE 1

ข้อกำหนดของประเทศสหราชอาณาจักร จะถูกกำหนดเกี่ยวกับการออกแบบทางพลศาสตร์ของสะพานคนเดินไว้ในหัวข้อที่ 2.44 ของข้อกำหนด โดยข้อกำหนดจะมีการอ้างอิงมาจากการศึกษาของ Barker และ Mackenzie [5]

3.1.1 ประเภทของสะพานและตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์

สะพานคนเดินสามารถแบ่งประเภทตามระดับการใช้งานของสะพาน ซึ่งแต่ละระดับของสะพานจะให้ค่าตัวแปรที่จะนำไปใช้แตกต่างกัน ดังที่แสดงไว้ใน ตารางที่ 1

3.1.2 แรงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากกลุ่มคนเดินเท้า

แบบจำลองแรงที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแรงที่มีการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง $F(t)$ และมีค่าความเร็วในการสัจจรบนสะพานเท่ากับ v_r และจะมีค่าดังสมการที่ (3)

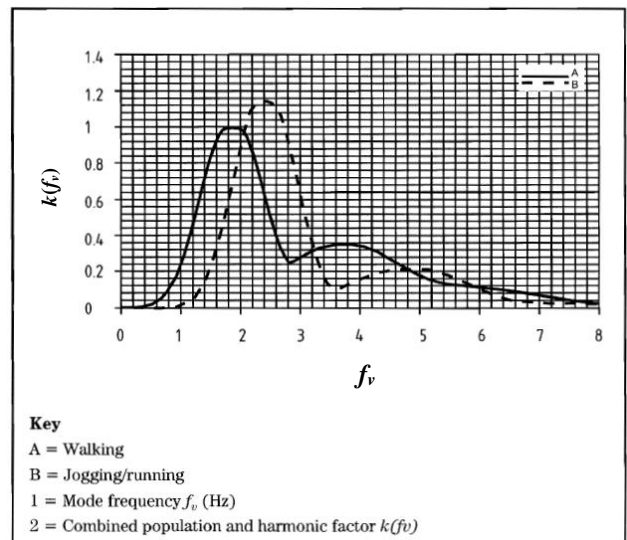
ตารางที่ 1 ประเภทสะพานและค่าตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์

ระดับ	ลักษณะการใช้งานของสะพาน	จำนวนคน (เดิน)	จำนวนคน (วิ่ง)	* ρ [P/m ²] (เดิน)
A	บริเวณชนบทหรือบริเวณที่มีประชากรเบาบาง มีผู้ใช้งานสะพานไม่มาก	N = 2	N = 0	0
B	บริเวณชานเมืองที่มีปริมาณแนวโน้มการใช้งานสะพานต่างกัน ในบางครั้ง	N = 4	N = 1	0.4
C	บริเวณในเมืองหรือเส้นทางที่มีประชากรใช้งานกันอย่างเป็นประจำ เช่น สะพานทางเดินเข้าสู่อาคาร สะพานทางเดินเข้าโรงเรียน	N = 8	N = 2	0.8
D	สะพานที่ใช้เป็นทางหลักของสถานที่ชุมชนสาธารณะ เช่น สะพานทางเข้าสนามกีฬา สะพานสำหรับระบบขนส่งมวลชน	N = 16	N = 4	1.5

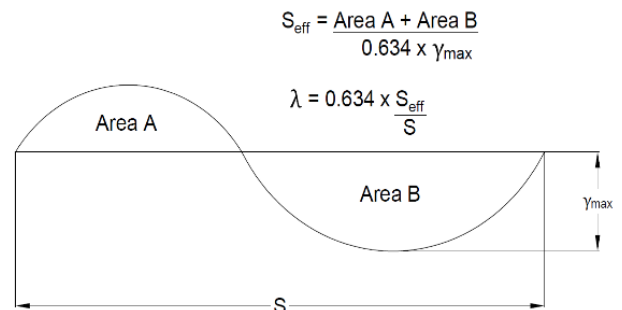
*P/m² คือ จำนวนคน ต่อ พื้นที่ 1 ตารางเมตร

$$F(t) = F_0 k(f_v) \sqrt{1 + \gamma(N-1)} \sin(2\pi f_v t) \quad (3)$$

โดย N คือจำนวนคนในกลุ่มที่ได้จากตารางที่ 1, f_v [Hz] คือ ความถี่ธรรมชาติในแนวตั้งของสะพานของโหมดที่พิจารณา, F_0 คือ ขนาดของแรงที่กระทำต่อสะพานที่ใช้เป็นแรงอ้างอิง (เดิน 280 [N], วิ่ง 910 [N]), $k(f_v)$ คือ ตัวปรับแก้เนื่องจาก ผลกระทบจากคนเดินเท้าที่มีการปรับให้มีความสมจริง, ผลตอบสนองต่อแรงฮาร์มอนิก และ ผลตอบสนองต่อความรู้สึกของคนเดิน ซึ่งจะมีค่าดังรูปที่ 4, t [s] คือ เวลาที่ใช้ในการข้ามสะพาน โดยจะคำนวณจาก ความเร็วในการสัจจร v_r (เดิน 1.7 [m/s²], วิ่ง 3.0 [m/s²]), S_{eff} [m] คือ ความยาวประสิทธิผลของสะพาน โดยการคำนวณอัตราส่วนการปิดล้อมของรูปร่างโหมดที่สนใจสามารถคำนวณได้ดังแสดงในรูปที่ 5 และ γ คือ ตัวปรับแก้เนื่องจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มคนเดินเท้ากับอัตราส่วนความหวังของระบบแบบลอการิทึมและความยาวประสิทธิผลของสะพาน ซึ่งมีค่าดังแสดงในรูปที่ 6 โดยในกรณีของกลุ่มคนจะใช้ค่าที่เป็นเส้นทึบจากในกราฟ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $k(f_v)$ และ ความถี่ธรรมชาติ f_v [2]

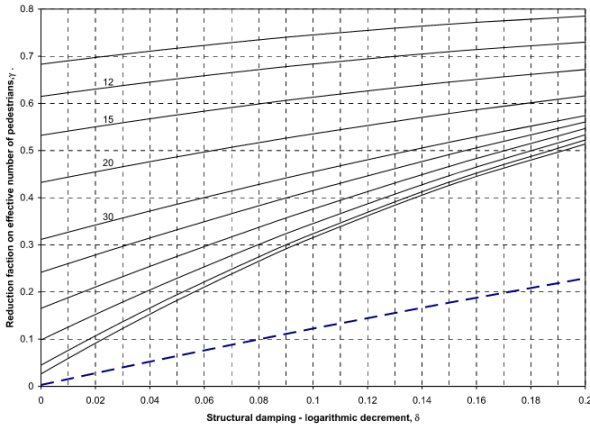


รูปที่ 5 การคำนวณความยาวประสิทธิผล S_{eff} ของสะพาน [2]

3.1.3 แรงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากฝูงชน

แบบจำลองแรงที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแรงกระจาย (Distributed Load) โดยมีการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง $w(t)$ ที่กระทำกับพื้นของสะพานในสภาวะคงที่ (Steady State) และจะมีค่าดังสมการที่ (4)

$$w(t) = 1.8 \left(\frac{F_0}{A} \right) k(f_v) \sqrt{\frac{\gamma N}{\lambda}} \sin(2\pi f_v t) \quad (4)$$



รูปที่ 6 ค่าปรับแก้ที่คำนึงถึงผลของการเดินที่ไม่พร้อมเพรียงกันของกลุ่มคน กับอัตราส่วนความหน่วงของระบบแบบลอการิทึม δ และความยาวประสิทธิผล $Seff$ ของสะพาน ของสะพาน (กลุ่มคน - เส้นทึบ, ผูกชน - เส้นประ)^[5]

โดย N คือ จำนวนคนสัญจรทั้งหมดที่อยู่ทั่วทั้งช่วงความยาวสะพาน โดยคำนวณมาจาก $N = \rho A$ ซึ่งก็คือการนำความหนาแน่นของฝูงชนคูณกับพื้นที่ของสะพาน และ λ คือ ตัวปรับแก้เพื่อลดจำนวนคนเดินบนช่วงความยาวประสิทธิผลของสะพานเมื่อเทียบกับช่วงความยาวของสะพานโดยที่จะสามารถคำนวณได้ดังรูปที่ 5

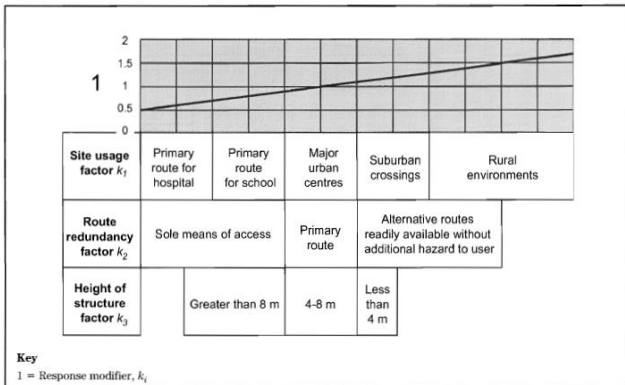
3.1.4 เกณฑ์ความสะทอนสบายในการใช้งานสะพาน

ความเร่งในแนวตั้งสูงสุดที่ได้จากการคำนวณควรจะมีค่าน้อยกว่าความเร่งแนวตั้งที่ได้จำกัดไว้ในการออกแบบดังค่าที่แสดงไว้ใน สมการที่ (9)

$$a_{limit} = 1.0 k_1 k_2 k_3 k_4 \quad (9)$$

$$0.5 \leq a_{limit} \leq 2.0$$

โดย k_1, k_2, k_3 และ k_4 คือ ปัจจัยด้านรูปแบบการใช้งานสะพาน, ทางเลือกการใช้งานของสะพาน, ความสูงของสะพาน และ ด้านความรู้สึกการใช้งานของผู้ใช้สะพานตามลำดับ โดย k_1, k_2 และ k_3 จะมีค่าดังแสดงในรูปที่ 10 และในส่วนของ k_4 นั้นโดยปกติจะมีค่าเท่ากับ 1 แต่อาจจะใช้ค่าที่แตกต่างกันไปตามแต่ละโครงการโดยจะเลือกใช้ตั้งแต่ 0.8 - 1.2



รูปที่ 7 กราฟเพื่อประมาณค่า k_1, k_2 และ k_3 ในแต่ละกรณี^[2]

3.2 European Design guide for footbridge vibration (Heinemeyer และ Feldman, 2008)

3.2.1 การจำแนกประเภทสะพานในการออกแบบ

ระดับการสัญจรของผู้ใช้สะพาน โดยแบ่งออกเป็นทั้งหมด 5 ระดับ เรียงจากน้อยไปมาก และ ระดับความสบายในการใช้งานสะพาน ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ระดับการจราจรของผู้ใช้งาน^[1]

ระดับการจราจร	ความหนาแน่น d ($P =$ จำนวนคน)	คำอธิบาย	ลักษณะการจราจรของผู้ใช้สะพาน
TC 1	กลุ่มคน 15 คน $d = 15 [P/A_{total}]$	การจราจรเบาบางมาก (Very weak traffic)	คนจำนวน 15 คน กระจายตัวทั่วสะพาน
TC 2	$d = 0.2 [P/m^2]$	การจราจรเบาบาง (Weak Traffic)	การจราจรคล่องตัว
TC 3	$d = 0.5 [P/m^2]$	การจราจรหนาแน่น (Dense Traffic)	การจราจรหนาแน่น
TC 4	$d = 1.0 [P/m^2]$	การจราจรหนาแน่นมาก (Very Dense Traffic)	การจราจรหนาแน่นมาก
TC 5	$d = 1.5 [P/m^2]$	การจราจรติดขัด (Exceptional dense traffic)	การจราจรแบบติดขัด

ตารางที่ 3 ระดับความสบายในการใช้สะพานและค่าความเร่งที่สอดคล้อง^[1]

Comfort level	ระดับความสบาย	ความเร่งแนวตั้ง $a_{vertical,limit}$	ความเร่งแนวราบ $a_{horizontal,limit}$
CL 1	มาก	$< 0.5 [m/s^2]$	$< 0.1 [m/s^2]$
CL 2	ปานกลาง	0.5 ถึง 1 $[m/s^2]$	0.1 - 0.3 $[m/s^2]$
CL 3	น้อย	1 ถึง 2.5 $[m/s^2]$	0.3 - 0.8 $[m/s^2]$
CL 4	ไม่สามารถยอมรับได้	$> 2.5 [m/s^2]$	$> 0.8 [m/s^2]$

3.2.2 ความถี่ธรรมชาติที่ต้องวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์

เอกสารฉบับนี้ยังได้มีการกำหนดช่วงของค่าความถี่ธรรมชาติที่หาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานตกอยู่ในช่วงแล้วจำเป็นที่จะต้องทำการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ โดยค่าที่กำหนดไว้จะแสดงใน ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เกณฑ์ความถี่ธรรมชาติที่จะต้องทำการออกแบบทางพลศาสตร์^[1]

กรณีในการออกแบบ	ความถี่
การสั่นในแนวตั้ง	1.3 ถึง 2.3 Hz
การสั่นในแนวราบ (ด้านข้าง)	0.5 ถึง 1.2 Hz

3.2.3 แบบจำลองของแรงกระทำของคนสัญจร

แบบจำลองของแรงกระทำของคนสัญจรจะมีค่าดังสมการที่ (10)

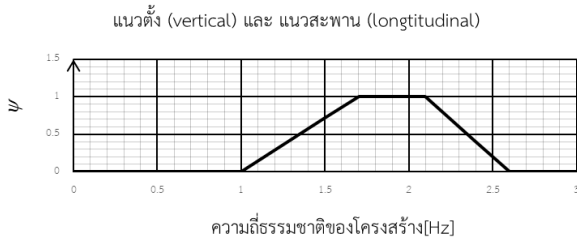
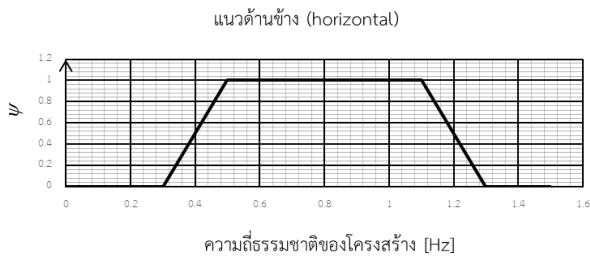
$$p(t) = G \cos(2\pi ft) n' \psi \quad (10)$$

โดย G คือ น้ำหนักบรรทุกของคนได้จาก ตารางที่ 5, f คือ ความถี่ธรรมชาติของโหมดที่สนใจ, n' คือ จำนวนแบบปรับแก้ของคนสัญจรได้จาก ตารางที่ 5, ψ คือค่าคงที่ในการปรับแก้ดังแสดงใน รูปที่ 8

ตารางที่ 5 ค่า G และ n' ของกรณีต่างๆ^[1]

แบบจำลองแรง	G [N]			n' [1/m ²]
	แนวตั้ง	ตามยาว	แนวราบ	
TC1 ถึง TC3	280	140	35	$\frac{10.8\sqrt{\xi n}}{S}$
TC4 ถึง TC5	280	140	35	$1.85\sqrt{n}$

โดยที่ S คือ พื้นที่การสัญจรบนสะพาน, n คือ จำนวนคนสัญจรบนพื้นที่ผิวของสะพานโดยสามารถคำนวณได้โดยนำพื้นที่การสัญจรบนสะพาน S มาคูณกับค่าความหนาแน่น d ที่ได้จากรายการที่ 2 และ ξ คือ อัตราส่วนความหน่วงของระบบ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ของแรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง^[1]

4. การวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของสะพานตัวอย่าง

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลทางพลศาสตร์ของสะพานตัวอย่าง โดยจะเปรียบเทียบแนวทางในการออกแบบสองแนวทาง ได้แก่ UK National Annex For Eurocode 1 (UKNA) และ European Design Guide for Footbridges (EDG)

4.1 รายละเอียดและแบบจำลองของสะพานตัวอย่าง

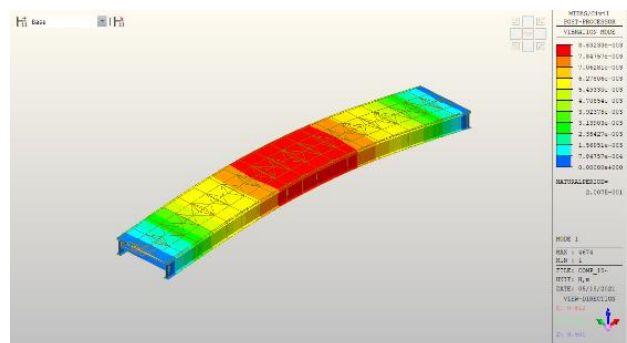
สะพานตัวอย่างที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษาจะมีคุณสมบัติ ดังนี้ พื้นคอนกรีตกว้าง 3 เมตร หนา 0.15 เมตร ที่รองรับด้วยคานเหล็กคู่ชนิด 710WB150 เกรด Fe360 ตามมาตรฐาน AS/NZS 3679 และมีค้ำยันด้านตั้งฉากและด้านทแยงมุมเว้นระยะห่าง 1.8 เมตร ตลอดความยาวสะพาน เป็นเหล็กทรงน้ำชนิด PFC250 เกรดเดียวกันกับคานเหล็ก โดยพิจารณาความยาวสะพาน 2 กรณีคือ 18 เมตร และ 36 เมตรและเลือกใช้โปรแกรม Midas Civil ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

4.2 ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่เข้าเกณฑ์ในการออกแบบ

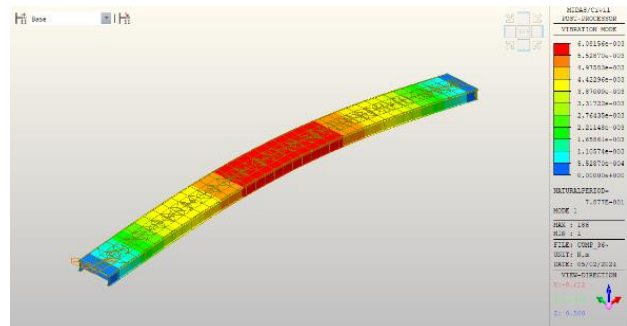
จากการวิเคราะห์ผล จะพบว่ากรณีที่ต้องทำการพิจารณาผลทางพลศาสตร์แสดงในตารางที่ 6 และจะมีรูปร่างของโหมดในการสั่นสะเทือนดังแสดงในรูปที่ 9 ถึง รูปที่ 12

ตารางที่ 6 ค่าความถี่ธรรมชาติที่เข้าเกณฑ์

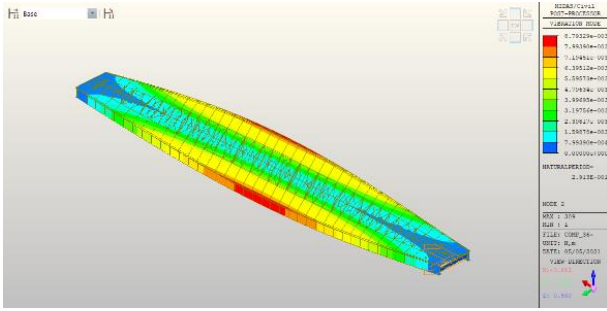
Span [m]	Mode	ความถี่ [Hz]	Modal Behavior	แนวทางในการออกแบบที่ต้องคำนึงถึง
18	1	4.98	Vertical Vibration (Single Curvature)	UKNA
36	1	1.270	Vertical Vibration (Single Curvature)	UKNA & EDG
	2	3.432	Torsional Vibration	UKNA
	3	4.978	Vertical Vibration (Double Curvature)	UKNA



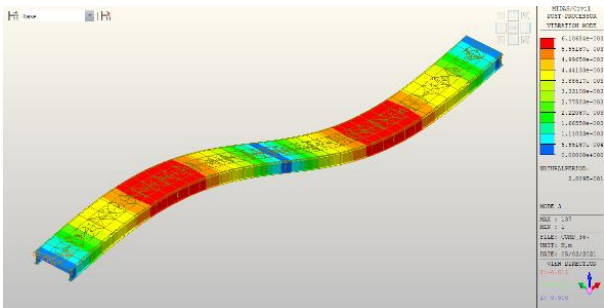
รูปที่ 9 รูปร่าง Mode Shape ของ Mode 1 (Span = 18เมตร)



รูปที่ 10 รูปร่าง Mode Shape ของ Mode 1 (Span = 36 เมตร)



รูปที่ 11 รูปร่าง Mode Shape ของ Mode 2 (Span = 36 เมตร)



รูปที่ 12 รูปร่าง Mode Shape ของ Mode 3 (Span = 36 เมตร)

4.3 วิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ตาม UK National Annex

4.3.1 การจำแนกรูปแบบของสะพาน และ ความเร่งที่มากที่สุดที่ยอมรับได้

สะพานที่ใช้ในการออกแบบจะเป็นสะพานที่อยู่ใน Class C หรือมีลักษณะเป็นสะพานที่อยู่บริเวณในเมือง (Urban City Routes) โดยจะมีค่าตัวแปรที่นำไปใช้ในการคำนวณแรงดังนี้ (1) สำหรับกลุ่มคนเดินเท้าจะมีค่า $N = 8$ คน (2) สำหรับกลุ่มคนวิ่งจะมีค่า $N = 2$ คน (3) สำหรับสภาวะคนเต็มสะพานจะมีค่า $\rho = 0.8$ [คน/ม²] โดยตัวแปรเหล่านี้จะถูกนำไปคำนวณตามสมการต่างๆที่ได้ไว้ในหัวข้อที่ 3.1 ของบทความฉบับนี้ และโดยแรงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 7 โดยที่ความเร่งมากที่สุดที่ยอมรับได้นั้นจะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ โดยจะมีค่าความเร่งมากที่สุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 1.1 [m/s²]

4.3.2 ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ใช้งาน

ใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงตามข้อกำหนด Eurocode 1 : Actions on Structures – Part 1-4 : General actions – Wind actions [6] โดยมีค่า อัตราส่วนความหน่วงแบบลอการิทึมไว้อยู่ที่ 0.04 ซึ่งจะสามารถแปลงไปเป็นค่าอัตราส่วนความหน่วงได้ที่ 0.006 หรือ 0.6%

4.3.1 ผลจากการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ผลนั้นจะได้ความเร่งดังแสดงในตารางที่ 8 โดยจะมีตัวอย่างในการอ่านประเภทของแรง เช่น UKC2 คือ UK National Annex Crowded Conditions – Mode 2

ตารางที่ 7 แรงตาม UKNA ของแต่ละความถี่ธรรมชาติ

Span [m]	ความถี่		ประเภทแรง	ชื่อย่อ	แอมพลิจูด*
	โหมด	ธรรมชาติ [Hz]			
18	1	4.98	กลุ่มคนเดิน	UKW1_18	82.51
			กลุ่มคนวิ่ง	UKJ1_18	167.84
			ฝูงชนเต็มสะพาน	UKC1_18	6.78
36	1	1.270	กลุ่มคนเดิน	UKW1_36	247.5
			กลุ่มคนวิ่ง	UKJ1_36	60.8
			ฝูงชนเต็มสะพาน	UKC1_36	6.56
	2	3.432	กลุ่มคนเดิน	UKW2	146.7
			กลุ่มคนวิ่ง	UKJ2	202.7
			ฝูงชนเต็มสะพาน	UKC2	3.91
3	4.978	กลุ่มคนเดิน	UKW3	82.51	
		กลุ่มคนวิ่ง	UKJ3	182.4	
		ฝูงชนเต็มสะพาน	UKC3	2.19	

*สำหรับกลุ่มคนจะมีหน่วยเป็น [N], สำหรับฝูงชนเต็มสะพานจะมีหน่วยเป็น [N/m²]

ตารางที่ 8 ความเร่งในแนวดิ่งที่มากที่สุดจากการวิเคราะห์ตาม UKNA

Span [m]	ประเภทของแรง	a_{vmax} [m/s ²]	$a_{vcomfort}$ [m/s ²]	ผ่านเกณฑ์หรือไม่
18	UKW1_18	0.34	≤ 1.1	ผ่าน
	UKJ1_18	0.50		ผ่าน
	UKC1_18	0.635		ผ่าน
36	UKW1_36	0.575		ผ่าน
	UKW2	0.416		ผ่าน
	UKW3	0.150		ผ่าน
	UKJ1_36	0.050		ผ่าน
	UKJ2	0.621		ผ่าน
	UKJ3	4.7×10^{-3}		ผ่าน
UKC1_36	1.33*	ไม่ผ่าน		
UKC2	0.532	ผ่าน		
UKC3	0.447	ผ่าน		

*ในประเภทของแรง UKC1_36, การวิเคราะห์ผลจะพบว่ามีความเร่งที่มากกว่าค่าที่ยอมรับได้ซึ่งจะมีการอภิปรายถึงผลนี้ในหัวข้อถัดไป

4.3.2 เปรียบเทียบผล

ในการสรุป และเปรียบเทียบผลนั้นจะมีการแบ่งหัวข้อสำคัญออกไว้ทั้งหมด 3 หัวข้อ ได้แก่ (1) การเปรียบเทียบผลจากแรงประเภทเดียวกันที่กระทำกับโหมดที่แตกต่างกันของสะพาน 36 เมตร (2) การเปรียบเทียบผลที่ได้ในโหมดที่มีความถี่เท่ากัน ของสะพาน 36 เมตร (3) เปรียบเทียบผลที่ได้จากสะพานที่มีความยาว 18 เมตร

- (1) เปรียบเทียบผลจากแรงประเภทเดียวกันที่กระทำกับโหมดที่แตกต่างกันของสะพาน 36 เมตร

ความเร่งจากกรณีของกลุ่มคนเดิน

ความเร่งจากทั้ง 3 โหมดเมื่อเปรียบเทียบขนาดความเร่งของกรณีกลุ่มคนเดินบนสะพานของทั้ง 3 โหมด พบว่าขนาดความเร่งของโหมด 1 มีขนาด 0.575 m/s^2 ซึ่งมีขนาดมากที่สุด เนื่องจากแอมพลิจูดของแรงที่กระทำกับสะพานมีค่ามากที่สุด กราฟคำตอบของความเร่งของแต่ละโหมดจะแสดงไว้ดังรูปที่ 13 เหตุผลหลักที่ขนาดของแรงมากที่สุดตามจากค่าตัวปรับแก้เนื่องจากผลของคอนเดน $k(f_v)$

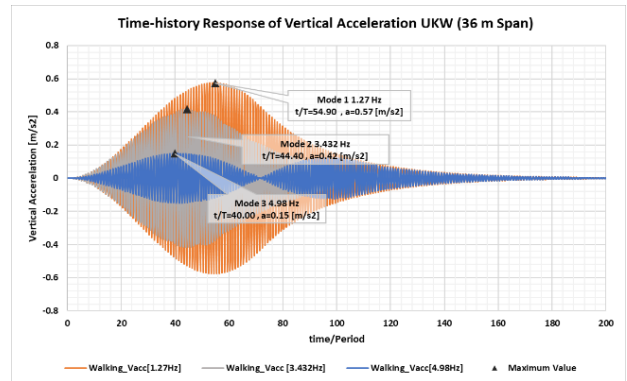
ความเร่งจากกรณีของกลุ่มคนวิ่ง

เนื่องจากแรงของกลุ่มคนวิ่งนั้นจะมีการกำกับที่เป็นสมการเดียวกับแรงจากกลุ่มคนเดินดังนั้นผลของความเร่งที่ได้นั้นจะมีรูปร่างที่คล้ายกันแต่จะมีแอมพลิจูดของการสั่นที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลจากการที่แรงนั้นมีค่าแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบขนาดความเร่งของกรณีกลุ่มคนวิ่งบนสะพานของทั้ง 3 โหมด จะเห็นได้ว่าขนาดความเร่งของโหมดที่ 2 มีขนาด 0.621 m/s^2 ซึ่งมีขนาดมากที่สุด เหตุผลเดียวกับกรณีกลุ่มคนเดินบนสะพานนั่นก็คือแอมพลิจูดของแรงที่กระทำกับสะพานมีค่ามากที่สุด โดยจะพล็อตกราฟคำตอบของความเร่งของแต่ละโหมดได้ดังรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าค่าความเร่งของโหมดที่ 1 และ 3 จะมีค่าน้อยกว่าจากโหมดที่ 2 อย่างเห็นได้ชัด จึงนำมาพล็อตกราฟเพิ่มเติมให้เห็นธรรมชาติของการสั่นสะเทือนได้ชัดเจนขึ้น ดังรูปที่ 15

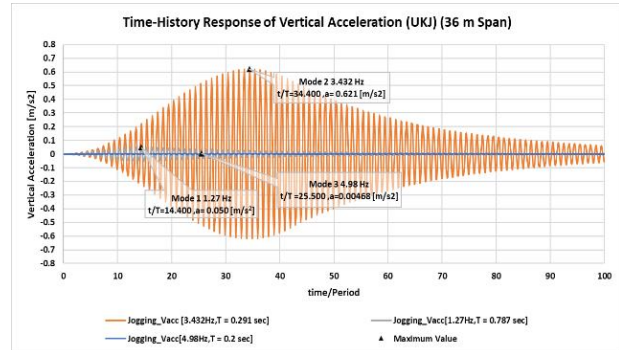
ความเร่งจากกรณีฝูงชนหนาแน่นเต็มสะพาน

ในกรณีของการวิเคราะห์ความเร่งของคนในกรณีที่มีคนอยู่เต็มสะพานนั้นจะแตกต่างจากสองกรณีก่อนหน้า โดยจะเป็นการวิเคราะห์ค่าโดยความเร่งที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นจะเป็นการนำค่าที่ได้มาจากการวิเคราะห์แบบ Steady State หรือก็คือการให้แรงกระทำกับสะพานจนค่าความเร่งเข้าสู่สภาวะคงตัว และเห็นว่าค่าที่เสถียรนั้นเป็นค่าความเร่งที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ กราฟของความเร่งที่เปลี่ยนไปตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 16, 17 และ 18 โดยจะมีค่าความเร่งในสภาวะ Steady State ที่มากที่สุดเกิดขึ้นใน โหมดที่ 1 ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ $1.33 \text{ [m/s}^2]$ ซึ่งมีค่าเกินกว่าค่าความเร่งที่ยอมรับที่จะถูกแสดงเอาไว้เป็นเส้นสีแดงในรูป

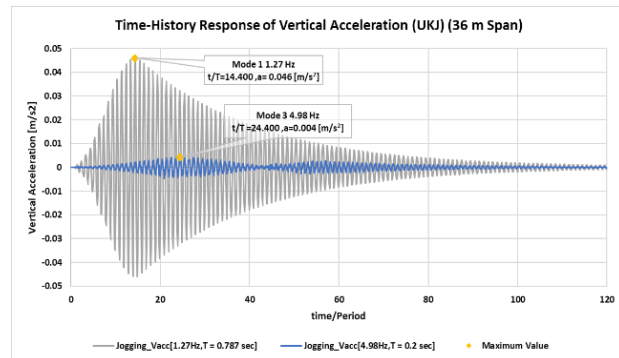
เพิ่มเติมจากที่กล่าวไว้ข้างต้นจะเห็นได้ว่าการที่ความเร่งจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) นั้น ยิ่งความถี่ของแรงยิ่งสูงเท่าไร ระยะเวลาที่ใช้ในการที่จะทำให้ความเร่งเข้าสู่สภาวะคงตัวก็จะยิ่งน้อยลงไปด้วย หรือก็คือระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ความเร่งเข้าสู่สภาวะคงตัว จะแปรผกผันกับค่าความถี่ของแรงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์



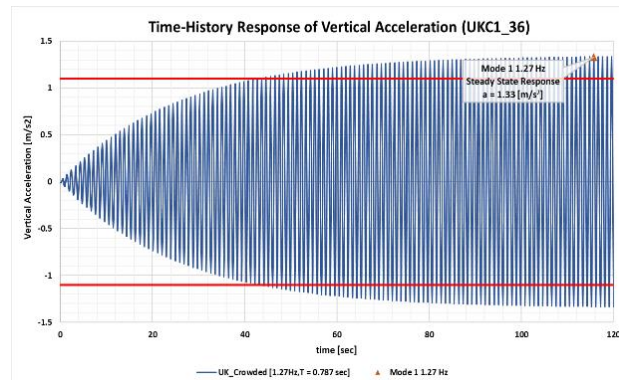
รูปที่ 13 ค่าตอบสนองของความเร่งต่อแรงประเภท UKW (Span = 36 m)



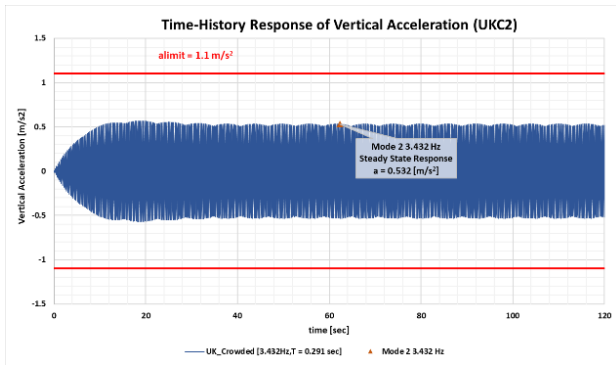
รูปที่ 14 ค่าตอบสนองของความเร่งต่อแรงประเภท UKJ (Span = 36 m)



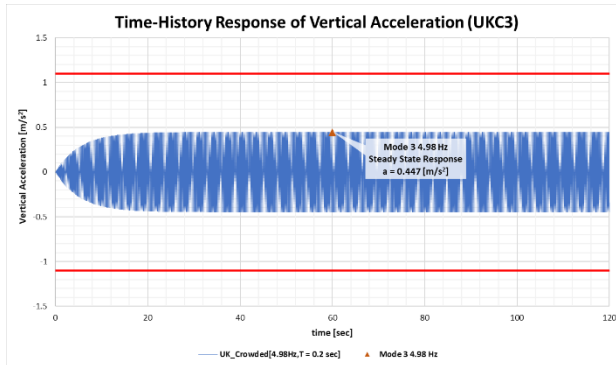
รูปที่ 15 ค่าตอบสนองของความเร่งต่อแรงประเภท UKJ เฉพาะ โหมด 1 และ 3



รูปที่ 16 ค่าตอบสนองของความเร่งต่อแรงประเภท UKC1_36 (Span = 36 m)



รูปที่ 17 ค่าตอบสนองของความเร่งต่อแรงประเภท UKC2 (Span = 36 m)



รูปที่ 18 ค่าตอบสนองของความเร่งต่อแรงประเภท UKC3 (Span = 36 m)

(2) เปรียบเทียบผลของแรงที่มีความถี่เดียวกันของสะพาน 36 เมตร รูปร่างของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในโหมดเดียวกัน (แรงกระทำมีความถี่เท่ากัน) นั้นจะมีรูปร่างที่คล้ายคลึงกันต่างกันที่ค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นผลมาจากการที่แรงที่กระทำในแต่ละโหมดนั้นมีค่าที่ไม่เท่ากัน และมีจำนวนจุดที่แรงกระทำกับสะพานที่ไม่เท่ากันเนื่องจากความเร็วของการสัญจรที่แตกต่างกันของกลุ่มคนวิ่งและกลุ่มคนเดิน

(3) ผลที่ได้จากสะพานที่มีความยาว 18 เมตร

เนื่องจากโหมดที่เข้าเกณฑ์ที่จะต้องวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของสะพานคนเดินที่มีความยาว 18 เมตร นั้นจะมีอยู่เพียงโหมดเดียว หรือก็คือโหมดที่ 1 ซึ่งจะมีความถี่ในการสั่นสะเทือนของสะพานดังรูปที่ 19 โดยจะมีความเร่งตอบสนองสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีของแรงแบบฝูงชนเต็มสะพานซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ 0.635 [m/s²] จะเห็นได้ว่ารูปร่างผลตอบสนองของความเร่งนั้นจะมีรูปแบบเดียวกับโหมดที่ 1 ของสะพานความยาว 36 เมตร แตกต่างกันในที่ค่าการเสียดสี ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการที่แอมพลิจูดของแรงที่กระทำนั้น มีค่าที่ไม่เท่ากัน และน้ำหนักของโครงสร้างที่แตกต่างกัน

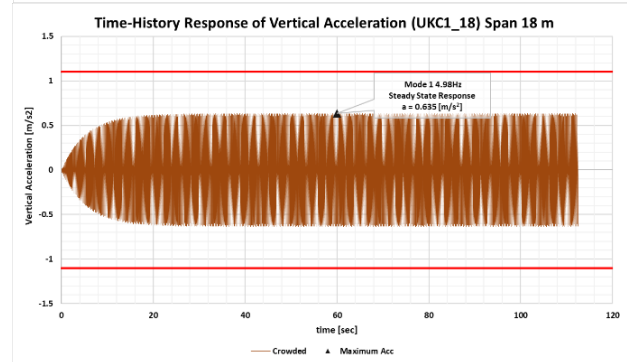
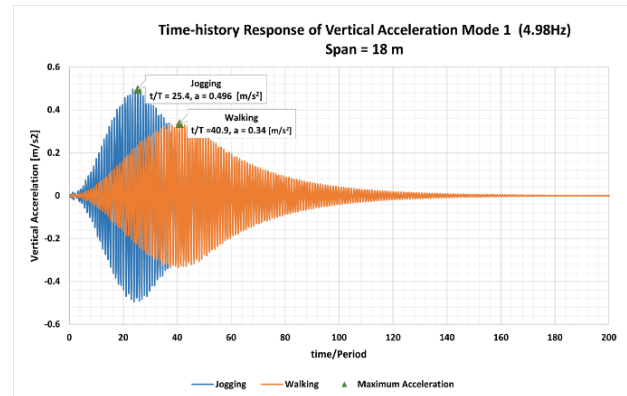
4.4 วิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ตาม EDG (European Design Guideline)

4.4.1 การจำแนกรูปแบบของแรง และ ความเร่งมากที่สุดที่ยอมรับได้

แรงที่ใช้ในการออกแบบจะเป็นแรงตามเกณฑ์ TC 3 (Traffic Class 3) หรือมีลักษณะเป็นการจราจรหนาแน่น, โดยจะมีตัวแปรที่นำไปใช้ในการคำนวณแรงคือ ความหนาแน่นของคนสัญจร $d = 0.8$ [คน/ตารางเมตร] โดยจะมีข้อสรุปของแรงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 9

โดยความเร่งมากที่สุดที่ยอมรับได้นั้น Heinemeyer และ Feldmann (2008) ได้แนะนำค่าความเร่งสำหรับเกณฑ์ TC 3 ว่าให้อยู่ในเกณฑ์ CL 2 โดยจะมีค่าเกณฑ์ความเร่งแนวตั้งมากที่สุดที่ 1.0 [m/s²] และความเร่ง

แนวราบมากที่สุดที่ 0.3 [m/s²]



รูปที่ 19 ผลความเร่งตอบสนองของสะพาน (Span = 18 m)

ตารางที่ 9 แรงตาม EDG ของแต่ละความถี่ธรรมชาติที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ [Hz]	ทิศแรง	d^*	ψ	n' [P/m ²]	แอมพลิจูด [N/m ²]
1	1.270	แนวตั้ง	0.8	0.38	0.057	6.15
		แนวราบ	0.8	0		0

* d คือ ความหนาแน่นของคนใช้สะพานโดยมีหน่วยเป็น [P/m²]

4.4.2 ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ใช้ในงาน

ใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงตามค่าที่ได้แนะนำไว้ในเอกสาร EDG [1] ซึ่งค่าที่แนะนำนั้นจะมีอัตราส่วนความหน่วงที่ 0.06% หรือ 0.006 ซึ่งมีค่าที่สอดคล้องกับค่าที่ได้จาก UK National Annex

4.4.3 ผลจากการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ผลนั้นจะได้อัตราส่วนความเร่งดังแสดงในตารางที่ 10 โดยจะมีตัวอย่างในการอ่านประเภทของแรง เช่น EDG1 คือ European Design Guide Vertical Load – Mode 1

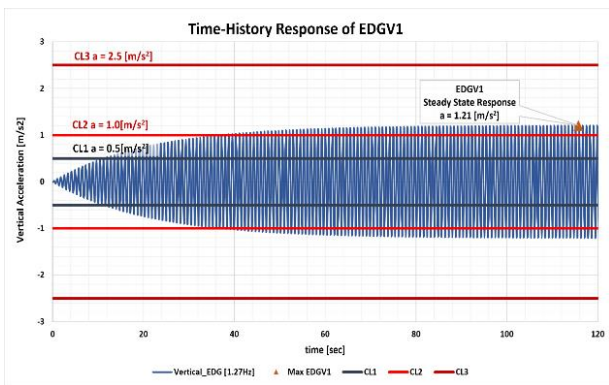
ตารางที่ 10 ความเร่งในแนวดิ่งที่มากที่สุดจากการวิเคราะห์ตาม EDG

ประเภทของแรง	a_{vmax} [m/s ²]	$a_{vcomfort}$ [m/s ²]	ผ่านเกณฑ์
EDG1	1.21	≤ 1.0	ไม่ผ่าน

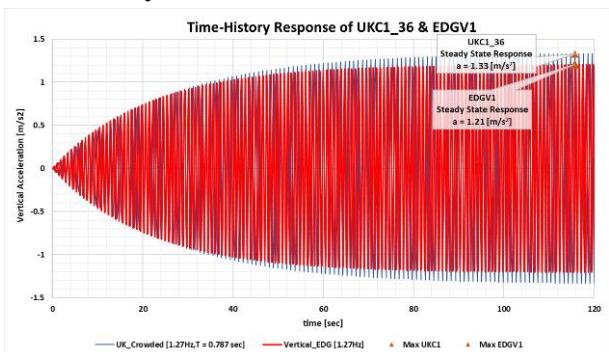
4.4.4 เปรียบเทียบผล

จากที่ได้ทำการวิเคราะห์ผลมานั้นจะพบว่าผลจากการวิเคราะห์นั้นจะมีรูปร่าง และ ความเร่งมากที่สุด ของผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับผลตอบสนองจากแรงแบบ UKC1_36 เนื่องจากจะมีทิศทาง, การผันแปรของแรงที่เหมือนกันเนื่องมาจากความถี่ธรรมชาติที่มีค่าเท่ากัน และ พื้นที่ในการกระทำกับสะพานที่เหมือนกัน อีกทั้งเป็นการวิเคราะห์ผลแบบสภาวะคงตัว เหมือนกันด้วย โดยจะมีผลตอบสนองดังรูปที่ 20 และ มีการเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่าง UKC1 และ EDGV1 ดังรูปที่ 21

จากรูปที่ 23 นั้นจะเห็นได้ว่าค่าผลตอบสนองของความเร่งในสภาวะคงตัวนั้นจะมีค่ามากกว่า CL2 (Comfort Level 2) ที่ทาง EDG ได้แนะนำเอาไว้ แต่อย่างไรก็ตามค่าของความเร่งที่ได้นั้นจะตกอยู่ในช่วงของ CL 3 ซึ่งมีระดับความสบายในการใช้งานสะพานแบบ “น้อย” โดยที่ยังไม่เกินระดับความสบายในการใช้งานสะพานแบบ “ระดับความสบายที่ไม่สามารถยอมรับได้”



รูปที่ 20 ผลความเร่งต่อแรงประเภท EDGV1



รูปที่ 21 ค่าตอบสนองของความเร่งต่อแรงประเภท EDGV1 และ UKC1

5. สรุปผล

จากการวิเคราะห์ผลนั้นจะพบว่าค่าความเร่งที่สูงนั้นในส่วนของ UK National Annex แรงที่มีการคำนวณแรงมาจากกลุ่มประชากรคนเดินนั้น ถ้าความถี่ธรรมชาติของสะพานนั้นใกล้เคียงกับความถี่ที่คนเดินที่ประมาณ 2 Hz จะส่งผลให้ค่า $k(f_n)$ ที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าแอมพลิจูดของแรงมีค่าที่มากขึ้น เมื่อค่าแอมพลิจูดที่ต้องการวิเคราะห์มีค่ามากขึ้นจึงส่งผลให้ความเร่งมีค่าที่มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในส่วนของกลุ่มคนวิ่งเป็นผลแบบเดียวกันกับแรงจากกลุ่มคนเดิน โดยจะมีความถี่ของคนวิ่งที่ประมาณ 2.5 – 3 Hz ซึ่งจะทำให้ค่า $k(f_n)$ ของแรงคนวิ่งในโหมดที่ 2 มีค่ามากกว่าแรงคนเดิน

การออกแบบด้วย European Design Guideline (EDG) เป็นรูปแบบของการออกแบบที่ค่อนข้างสะดวก เนื่องจากการปรับรูปแบบของสมการที่ใช้ในการออกแบบ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้อยู่ในทอมที่เหมาะสมกับการใช้งาน ในส่วนของกาวิเคราะห์จากตัวอย่างสะพานที่ได้ทำการตรวจสอบ จากโหมดที่เข้าเกณฑ์ที่ต้องทำการตรวจสอบผลเชิงพลศาสตร์ พบว่าได้ผลใกล้เคียงกับ ในกรณีของแรงกระทำจากฝูงชนของ UK National Annex ต่างกันที่แอมพลิจูด ยิ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางการออกแบบเพิ่มเติมได้ว่า รูปแบบที่ทำให้การพิจารณาเกณฑ์ความเร่งที่รู้สึกได้ไม่ผ่าน คือกรณีของฝูงชน ซึ่งการจะทำให้กรณีของฝูงชนผ่านเกณฑ์จำเป็นต้องปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อัตราส่วนค่าความหน่วงของสะพานโดยการใส่อุปกรณ์ Damping หรือ รูปแบบของสะพานเพื่อให้ค่าความถี่ธรรมชาติเปลี่ยนไป เพื่อที่จะทำให้ผ่านเกณฑ์

ความเร่งของสะพานที่มีความยาว 18 เมตร นั้นมีค่าที่น้อยกว่าความเร่งของสะพานที่มีความยาว 36 เมตร ผลข้างต้นนั้นเป็นผลที่ตอบสนองขั้นต่ำฐานที่ตั้งต้นไว้ได้ว่ายิ่งสะพานมีความขรุขระมากเท่าไรนั้นสะพานจะยิ่งมีความอ่อนไหวต่อการสั่นสะเทือนมากขึ้นตามไปด้วย

ข้อควรระวังที่ได้จากการศึกษาวิธีการในการออกแบบในแต่ละมาตรฐาน พบว่าในส่วนของการคำนวณที่เหมือนกัน แต่อยู่ในแต่ละมาตรฐาน จะใช้การอ้างอิง หรือการนำมาใช้งานที่ต่างแตกต่างกัน เช่น อัตราส่วนค่าความหน่วง ถ้าเป็นของ UK National Annex จะใช้อัตราส่วนค่าความหน่วงแบบ Logarithmic ซึ่งต่างจากการใช้อัตราส่วนค่าความหน่วงใน European Design Guide ที่จะใช้ค่าเป็นรูปแบบของร้อยละแทน

ค่าความเร่งที่เกินเกณฑ์มาตรฐานนั้นจะเป็นค่าที่ถูกวิเคราะห์มาจากแรงที่มีมุมมองแบบเดียวกันแล้วทั้งสิ้น นั่นก็คือแรงของฝูงชนที่อยู่เต็มสะพาน และเป็นการวิเคราะห์แบบสภาวะคงตัว (Steady State)

Barker และ Mackenzie (2008) ได้กล่าวเอาไว้ว่าแรงประเภทฝูงชนที่พวกเขาได้คิดขึ้นมาสำหรับ UK National Annex นั้นเมื่อได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าความเร่งที่ได้จากการวัดจริงนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ การจะนำไปใช้นั้นผู้ใช้ควรที่จะเข้าใจในจุดนี้ และพึงระลึกไว้เสมอว่าค่าที่ได้นั้นจะมีแนวโน้มที่จะมีค่ามากกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง [5]

ผลตอบสนองของแรงจากการเคลื่อนที่ผ่านของฝูงชนนั้นยังมีความไม่แน่นอนในการนำมาใช้ การศึกษาต่อไปในหัวข้อดังกล่าวจึงน่าจะเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ต่อการออกแบบสะพานคนเดินเพิ่มขึ้นต่อไปในอนาคต

เพิ่มเติมนั้นก็คือ การที่แรงประเภทฝูงชนเดินข้ามสะพานพร้อม ๆ กัน นั้นเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่ได้เกิดขึ้นบ่อย และ ยังมีความไม่แน่นอนในแบบจำลอง ซึ่งการออกแบบสะพานเพื่อให้รับผลจากแรงประเภทรูปนี้ นั้นอาจจะเป็นการออกแบบที่เปลืองเกินกว่าค่าความเป็นจริงที่สะพานจะได้รับ

สุดท้ายนี้จากการศึกษาทางผู้จัดทำจึงสรุปว่าการออกแบบด้วยแรงที่เป็นกลุ่มคนเคลื่อนที่ข้ามสะพานของ UK National Annex นั้นเป็นการออกแบบที่จะอธิบายการผลการตอบสนองจริงของสะพานได้ใกล้เคียงมากกว่าการออกแบบด้วยแรงประเภทฝูงชนของ UK National Annex และ European Design Guide ที่มีอยู่ในขณะนี้ อย่างไรก็ตามความเข้าใจในพฤติกรรมของคนที่จะกระทำต่อสะพานนั้นยังสามารถพัฒนาไปอีกมาก

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ. ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งท่านได้คอยให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยครั้งนี้ รวมไปถึงช่วยในการตรวจสอบ และแก้ไข กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่งมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุด กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดวิชาความรู้ทุกศาสตร์ ทุกแขนง

ท้ายที่สุดหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจต่อการศึกษา และนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Heinemeyer and M. Feldmann, "European Design Guide for Footbridge Vibration," 2008.
- [2] BSI, "UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges." pp. 24–33, 2008.
- [3] A. K. Chopra, *Dynamic of Structures*, 4th ed. Pearson, 2012.
- [4] J. S. Matthis and B. R. Fajen, "Humans exploit the biomechanics of bipedal gait during visually guided walking over complex terrain," *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 280, no. 1762, 2013, doi: 10.1098/rspb.2013.0700.
- [5] C. Barker and D. Mackenzie, "Calibration of the UK National Annex," 2008.
- [6] CEN, "Eurocode 1 : Actions on structures - Part 1-4 : General actions - Wind actions." p. 145, 2010.