

ความสัมพันธ์ของความเสียหายและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปช่วงสั้น

Relationship Between Damage and Dynamic Properties of a Short-Span Precast Concrete Slab

อมรชัย ไชยงค์¹ และ พัชรพงษ์ อาสนจินดา^{2,*}

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

*Corresponding author; E-mail address: pattarapong@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ของระดับการเปลี่ยนแปลงของค่าธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงในแต่ละระดับความเสียหายในเชิงกำลังของแผ่นพื้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาวิธีการตรวจประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างแผ่นพื้นด้วยวิธีการตรวจวัดทางอ้อมจากการประเมินคุณสมบัติทางพลศาสตร์แทนการทดสอบด้วยการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกับโครงสร้าง ซึ่งมีความสะดวกรวดเร็วและลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบได้ งานวิจัยได้ทำการทดสอบโดยใช้แผ่นพื้นคอนกรีตช่วงสั้นหนา 5 เซนติเมตร กว้าง 35 เซนติเมตร ซึ่งเสริมลวดเหล็กกล้า (PC Wire) ขนาด 4 มิลลิเมตรจำนวน 4 เส้น และมีความยาวช่วง 1, 1.5 และ 2 เมตร ซึ่งให้แรงกระทำแบบจุด ณ กึ่งกลางช่วง เพื่อให้เกิดความเสียหายในระดับต่าง ๆ ตามค่าการแอ่นตัวและสัดส่วนเทียบกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแผ่นพื้น ควบคู่กับการตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงของแผ่นพื้น ผลการศึกษาพบว่าเมื่อโครงสร้างแผ่นพื้นเกิดความเสียหายมากขึ้น ค่าความถี่ธรรมชาติและค่าสัดส่วนความหน่วงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนความหน่วงมีความชัดเจนกับระดับความเสียหายมากกว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติ โดยแผ่นพื้นจะเริ่มเกิดการแตกร้าวเมื่อค่าความถี่ธรรมชาติลดลงประมาณ 1-6% ขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 10-20% นอกจากนี้ยังนำเสนอแนวทางการศึกษาจากโครงสร้างประเภทแผ่นพื้นไปประยุกต์กับการประเมินความเสียหายกับแผ่นพื้นหรือคานสำหรับโครงสร้างสะพานได้ต่อไป

คำสำคัญ: ความเสียหายทางโครงสร้าง, ความถี่ธรรมชาติ, สัดส่วนความหน่วง, แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง, แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป

Abstract

This article presents a study on the relationship between damage levels and the dynamic properties of precast prestressed concrete slabs. The objective is to investigate the

correlation between changes in natural frequency and damping ratio at various damage levels in the slabs. The findings aim to contribute to the development of an indirect structural health assessment approach based on dynamic property evaluation instead of traditional load testing. This method offers greater convenience, speed, and cost-efficiency. The study involved testing short-span precast concrete slabs with a thickness of 5 cm, a width of 35 cm, and reinforcement with four 4-mm PC wires. The span lengths of the slabs were 1, 1.5, and 2 meters, and they were subjected to point loads at mid-span to induce damage at different levels based on the ratio of deflection to load capacity. During the testing, the natural frequency and damping ratio of the slabs were measured. The results reveal that as slab damage increases, the natural frequency decreases, while the damping ratio increases. Notably, changes in the damping ratio were more sensitive to damage levels than changes in the natural frequency. Cracking in the slabs was observed when the natural frequency decreased by approximately 1–6%, while the damping ratio increased by about 10–20%. The proposed methodology can be extended to evaluate damage in slabs or beams of bridge structures using similar dynamic-based assessment techniques.

Keywords: Structural Damage, Natural Frequency, Damping Ratio, Prestressed Concrete Slab, Precast Concrete Slab

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การก่อสร้างอาคารโดยใช้แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงมีหลายรูปแบบ หลายขนาด และหลายคุณภาพที่ตอบสนองความต้องการในการใช้งานที่หลากหลาย โดยทั่วไป แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงมีอายุการใช้งานยาวนาน และความเสียหายที่เกิดขึ้นมักเป็นไปอย่างช้า ๆ อย่างไร

ก็ตาม ปัญหาที่พบบ่อยคือการขาดการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสมและสม่ำเสมอ ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสียหายรุนแรงที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ดังนั้น การประเมินความแข็งแรงของแผ่นพื้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการตัดสินใจบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยและยาวนาน แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ได้รับ ความเสียหายมักแสดงอาการในรูปของรอยร้าวบริเวณด้านล่างของแผ่นพื้น ปัจจุบันโดยทั่วไปแล้วการประเมินความเสียหายของโครงสร้างประเภทคานหรือแผ่นพื้นโดยทั่วไปมักเริ่มต้นโดยอาศัยการตรวจพินิจด้วยตา (visual inspection) เป็นหลัก ซึ่งอาจมีส่วนของโครงสร้างที่เกิดความเสียหายแต่อาจสังเกตได้ยากหรือยังไม่มีนัยสำคัญเพียงพอให้สังเกตได้อย่างชัดเจนได้ ขณะที่การประเมินความเสียหายด้วยการทดสอบเชิงกำลังโดยการให้น้ำหนักบรรทุก (load test) จะพิจารณาดำเนินการเมื่อพบว่าความเสียหายเบื้องต้นจากการตรวจพินิจด้วยตาพบว่ามีนัยสำคัญต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ซึ่งการทดสอบการให้น้ำหนักบรรทุกนั้นมีค่าใช้จ่ายสูง โดยเฉพาะชิ้นส่วนคานหรือแผ่นพื้นสำหรับโครงสร้างประเภทสะพาน ดังนั้น หากการประเมินความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างด้วยวิธีการที่สะดวก รวดเร็ว และสามารถประเมินความสามารถในเชิงกำลังเบื้องต้นได้จึงมี ประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็งแรง (stiffness) ที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่ง สติเฟนสขององค์อาคารจะสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (elastic modulus) ของวัสดุ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) เนื่องจากรูปร่าง และความยาวช่วง (span Length หรือระยะช่วงพาดของคานหรือแผ่นพื้น) ในขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงนั้นส่งผลต่อความสามารถในการลดทอนขนาดผลตอบสนองการสั่นสะเทือนและเป็นคุณสมบัติเฉพาะของ วัตถุซึ่งได้จากการทดสอบเป็นหลัก

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยในอดีตหลายฉบับได้ศึกษา เกี่ยวกับการวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของคานหรือแผ่นพื้นสำหรับ โครงสร้างสะพานซึ่งมีนัยสำคัญกับความคุ้มค่าในการตรวจประเมิน อาทิ Salawu [1] ได้รายงานความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติและ ความเสียหายของโครงสร้างสะพาน โดยความเสียหายประเมินได้โดยตรงจาก สัดส่วนการลดลงของค่าความถี่ธรรมชาติ Gu และคณะ [2] ศึกษาการ ทำนายความเสียหายด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของการเปลี่ยนแปลงของ ความถี่ธรรมชาติในโหมดแรกเป็นหลัก Curadelli และคณะ [3] ได้ทดสอบ ในห้องปฏิบัติการและทำการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าความเสียหายของ โครงสร้างมีนัยสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความหน่วงและมีความไวต่อ ความเสียหายของโครงสร้างมากกว่าความถี่ธรรมชาติ Rucka [4] พบว่า ความเสียหายของโครงสร้างมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนรูปแบบการ สั่นสะเทือน (mode shape) อย่างมีนัยสำคัญและวิเคราะห์ได้ในความถี่ ธรรมชาติแปดโหมดด้วยวิธีการวิเคราะห์เวฟเลต (wavelet analysis) Golmohamadi และคณะ [5] จำลองสถานการณ์ความเสียหายของสะพาน ในหลายกรณีเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสติเฟนส Salgado และ คณะ [6] ได้ทดลองตรวจวัดพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์เทียบกับระดับความเสียหายของคานเหล็กรูปพรรณที่ถูกบากในแนวตั้งฉากกับความยาวคาน

พบว่า การติดตั้งจุดตรวจวัดใกล้กับจุดที่เสียหายจะมีโอกาสสูงในการตรวจพบ การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่อย่างมีนัยสำคัญ Mekjavic และ Damjanovic [7] ใช้แบบจำลององค์ประกอบไฟไนต์ (finite element model) เพื่อ ทำนายตำแหน่งและระดับความเสียหายของสะพานเหล็กเมื่อความถี่ ธรรมชาติและสติเฟนสมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ Sha และคณะ [8] รายงานว่าการประเมินความเสียหายโดยใช้ความถี่ธรรมชาติแสดงถึงความเสียหายในภาพรวมได้ แต่ยากต่อการนำไปวิเคราะห์เพื่อแสดงถึงความเสียหาย เฉพาะจุด (local damage) ขณะที่ Cao และคณะ [9] พบว่าการ เปลี่ยนแปลงค่าความหน่วงมีความไวกว่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการ สั่นสะเทือน และต้องพิจารณาศึกษาเพิ่มเติมในจากผลความไม่แน่นอนของ ความหน่วงในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear damping) นอกจากนี้การ ทราบความสัมพันธ์ของความเสียหายและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของ โครงสร้างยังใช้ประโยชน์ในการประมาณค่าความหน่วงที่แท้จริง พฤติกรรม ทางพลศาสตร์และความเสียหายของโครงสร้างจากข้อมูลตรวจวัดได้เช่นกัน [10,11]

จากงานวิจัยในอดีตข้างต้นซึ่งพิจารณาชิ้นส่วนโครงสร้างประเภท สะพานเป็นหลัก ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการ ประเมินความเสียหายของโครงสร้างโดยพิจารณาถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง ของค่าคุณลักษณะทางพลศาสตร์เทียบกับระดับความเสียหายเมื่อ เปรียบเทียบกับโครงสร้างในสภาพสมบูรณ์ โดยพิจารณาชิ้นส่วนโครงสร้าง ประเภทแผ่นพื้นอาคารซึ่งเป็นองค์อาคารที่รับน้ำหนักบรรทุกในอาคารจาก การใช้งานโดยตรง และมีความเหมาะสมในการทดสอบรวมถึงค่าใช้จ่ายที่ต่ำ กว่าทดสอบกับคานสะพานหรือแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำหรับงาน สะพาน งานวิจัยนี้จึงพิจารณาศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการประเมิน ความเสียหายระดับความเสียหายจากคุณสมบัติทางพลศาสตร์ผ่านการ ทดสอบกับแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปช่วงสั้นสำหรับงานอาคาร โดย ตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) และค่าสัดส่วน ความหน่วง (damping ratio) ที่ระดับน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกัน อีกทั้ง การทดสอบแผ่นพื้นสำเร็จรูปสามารถทำได้สะดวก และผลการศึกษาสามารถ นำไปพัฒนาต่อยอดกับการทดสอบกับโครงสร้างประเภทคานได้และนำไปใช้ คาดการณ์และวางแผนการบำรุงรักษาโครงสร้างอาคารรวมถึงสะพานได้ ต่อไป

2. กรอบแนวคิดและวิธีการทดสอบ

ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของโครงสร้างคานหรือแผ่น พื้นทางเดียวซึ่งมีหน้าตัดสม่ำเสมอและมีจุดรองรับอย่างง่าย มีความสัมพันธ์ กับค่าสติเฟนสในรูปของค่าอีลาสติคโมดูลัส E , โมเมนต์ความเฉื่อย I ของ หน้าตัด, ความยาวช่วง L และมวลต่อหน่วยความยาว โดยสมการที่ (1) แสดงความถี่ธรรมชาติในเชิงมุม (angular frequency) ของโหมดการสั่น ไหวที่ n ในหน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/s) และสมการที่ (2) แสดง ค่าความถี่ธรรมชาติแบบเชิงเส้นในหน่วยรอบต่อวินาทีหรือเฮิรตซ์ (Hz) โดย หากคานหรือแผ่นพื้นมีความเสียหายและเกิดการแตกร้าวจะส่งผลให้ค่า โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดมีค่าลดลง เช่นเดียวกับอีลาสติคโมดูลัสของ

วัสดุที่อาจลดลงจากพฤติกรรมหลังจากเกิดการคราก ดังนั้นหากองค์อาคารเกิดความเสียหายจะส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลง

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (1)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n^2 \pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (2)$$

สัดส่วนความหน่วง (damping ratio, ξ) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงอัตราการลดทอนขนาดผลตอบสนองการสั่นไหวของโครงสร้าง โดยมีค่าในรูปของอัตราส่วนระหว่างความหน่วง (damping, C) ของระบบเทียบกับค่าความหน่วงวิกฤติ (critical damping, C_{cr}) แสดงดังสมการที่ (3) โดยหากรบบมีค่าความหน่วงต่ำ (underdamped system) หรือกรณี $\xi < 1$ การสั่นเหือนจะมีลักษณะเป็นคลื่น แต่หากรบบมีค่าความหน่วงมากพอจนทำให้การสั่นสะเทือนไม่มีลักษณะเป็นคลื่นพอดีจะเรียกว่าระบบมีค่าความหน่วงวิกฤติ (critical damped system) หรือกรณี $\xi = 1$ ซึ่งความหน่วงวิกฤติมีค่าเท่ากับสองเท่าของผลคูณระหว่างมวลและความถี่ธรรมชาติเชิงมุม ($C_{cr} = 2m\omega$) และหากรบบมีความหน่วงสูงกว่าความหน่วงวิกฤติจะเรียกว่าความหน่วงมาก (overdamped system) ซึ่งการสั่นไหวจะมีรูปแบบที่ไม่เป็นคลื่นเช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ความหน่วงวิกฤติแต่มีการเคลื่อนตัวของภาระที่ช้ากว่าเมื่อ $\xi > 1$

$$\xi = \frac{C}{C_{cr}} = \frac{C}{2m\omega} \quad (3)$$

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่มีสภาพสมบูรณ์จะมีพฤติกรรมในรูปแบบความหน่วงต่ำซึ่งจะมีการสั่นไหวแบบเป็นคลื่นและค่าสัดส่วนความหน่วงจะสามารถคำนวณได้จากการตรวจวัดผลตอบสนองสูงสุดในแต่ละคลื่นของการสั่นสะเทือน ดังสมการที่ (4) โดยที่ x_i คือแอมพลิจูดสูงสุดของผลตอบสนองในคลื่นที่ i และ x_{i+N} คือแอมพลิจูดสูงสุดของผลตอบสนองในคลื่นถัดจากคลื่นที่ i เป็นจำนวน N คลื่น

$$\xi = \frac{1}{2\pi N} \ln \left(\frac{x_i}{x_{i+N}} \right) \quad (4)$$

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกกับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป จึงได้พิจารณาทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาโครงสร้างแผ่นพื้นซึ่งมีจุดรองรับอย่างง่าย โดยความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงของแผ่นพื้นจะได้รับการวิเคราะห์จากผลตอบสนองความถี่ที่ตรวจวัดได้จากการติดตั้งหัววัดความเร่ง (accelerometer) บริเวณจุดกึ่งกลางช่วงของแผ่นพื้นด้านล่าง เพื่อทำการทดสอบแบบสั่นไหวอิสระ (free vibration test) โดยใช้ค้อนยางเคาะเพื่อสร้างการสั่นสะเทือนและนำผลตอบสนองความถี่ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหว ขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงจะได้

จากการคำนวณอัตราลดทอนของแอมพลิจูดการสั่นไหวตามหลักการของการสั่นไหวอิสระแบบความหน่วงน้อย (underdamped free vibration) ทั้งนี้งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงในโหมดการสั่นไหวที่หนึ่งเท่านั้น สำหรับความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้จากการทดสอบโดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกด้วยแรงกระทำแบบจุด ณ กึ่งกลางช่วงด้วยแม่แรงไฮดรอลิก (hydraulic jack) และติดตั้งโหลดเซลล์ (load cell) เพื่อตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกทุกควบคู่กับการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงด้วยการติดตั้งหัววัดการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement transducer) โดยมีลักษณะการจัดเตรียมการทดสอบดังรูปที่ 1

เพื่อสามารถประเมินระดับความเสียหายควบคู่กับการตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของสะพาน จะอาศัยการทดสอบแผ่นพื้นตัวอย่าง เป็นกรณีควบคุม โดยทดสอบเชิงกำลังและวัดค่าการแอ่นตัวจนแผ่นพื้นวิบัติ และอาศัยค่าการแอ่นตัวที่ตรวจวัดได้เป็นพารามิเตอร์เพื่อกำหนดระดับของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของแผ่นพื้นสำหรับ สำหรับตัวอย่างแผ่นพื้นทดสอบอื่น ๆ จะทำการทดสอบเชิงกำลังควบคู่กับตรวจวัดผลตอบสนองทางพลศาสตร์ที่ระดับต่าง ๆ ของค่าแอ่นตัวของตัวอย่างควบคุม นอกจากนี้ยังได้พิจารณาผลของความยาวช่วงแผ่นพื้นที่แตกต่างกันเพื่อใช้วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบกรณีโครงสร้างแผ่นพื้นมีค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างกัน ตัวอย่างแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้ในการวิจัยทุกตัวอย่างมีความกว้าง 35 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร และเสริมลวดอัดแรงแบบ PC Wire ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น โดยลวดอัดแรงมีกำลังรับแรงดึงประลัย (ultimate tensile strength) 2,125 MPa หรือประมาณ 21,660 ksc กำลังอัดคอนกรีตของแผ่นพื้นซึ่งได้จากการทดสอบด้วยค้อนกระแทก (rebound hammer) มีค่าระหว่าง 270-330 ksc



รูปที่ 1 รูปแบบการทดสอบการให้น้ำหนักบรรทุกและการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

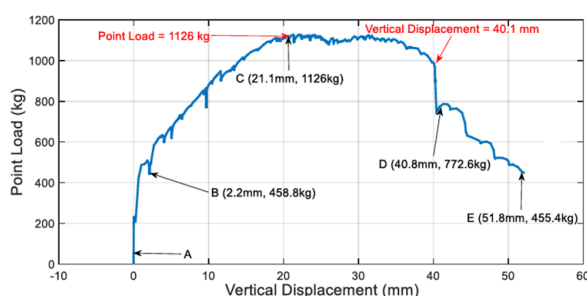
แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ทำการทดสอบมีทั้งหมด 12 ตัวอย่าง โดยมีความยาวช่วงที่แตกต่างกันได้แก่ ความยาวช่วง 1 เมตร, 1.5 เมตรและ 2 เมตร และแต่ละความยาวช่วงมีตัวอย่างควบคุมจำนวน 1 ตัวอย่าง โดยรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 โดยแต่ละความยาวช่วงทำการทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่างเพื่อพิจารณาการรอบของผลลัพธ์

ตารางที่ 1 ตัวอย่างแผ่นพื้นสำหรับการทดสอบ

ตัวอย่าง	ความยาวช่วง (m)	มวล (kg)	กำลังอัดคอนกรีต (ksc)	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)
L10-0*	1.0	38.76	274	86.55
L10-1	1.0	39.78	309	80.54
L10-2	1.0	40.02	316	88.95
L10-3	1.0	38.80	309	90.17
L15-0*	1.5	59.36	330	39.67
L15-1	1.5	58.46	323	40.77
L15-2	1.5	59.34	270	39.31
L15-3	1.5	56.70	306	38.41
L20-0*	2.0	80.30	316	22.84
L20_1	2.0	74.92	323	21.48
L20_2	2.0	78.75	316	23.27
L20_3	2.0	79.86	309	23.76

* ตัวอย่าง L10-0, L15-0 และ L20-0 เป็นตัวอย่างควบคุม

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบกำลังและการแอ่นตัวของแผ่นพื้นควบคุมความยาวช่วง 1 เมตร ควบคุมการสังเกตความเสียหาย โดยจุด A เป็นจุดเริ่มต้นที่แผ่นพื้นมีสภาพสมบูรณ์ จุด B เป็นตำแหน่งที่ตรวจพบรอยร้าวที่สังเกตได้ตั้งแต่ก่อนการทดสอบ จุด C เป็นตำแหน่งบันทึกความเสียหายบริเวณที่มีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด จุด D เป็นจุดบันทึกความเสียหายที่น้ำหนักเกิดแนวโน้มลดค่าลง จุด E เป็นตำแหน่งบันทึกความเสียหายที่รอยร้าวมีความกว้างเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนก่อนการวิบัติ โดยการบันทึกความเสียหายจะใช้ปากกาเมจิกขีดรอยร้าวและใช้กล้องวิดีโอเพื่อบันทึกภาพประกอบในแต่ละลำดับเหตุการณ์



รูปที่ 2 ผลการทดสอบกำลังและการแอ่นตัวของตัวอย่างแผ่นพื้นควบคุม L10-0

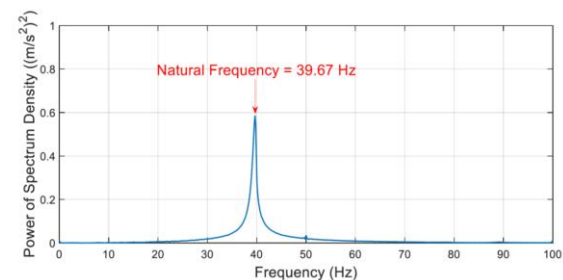
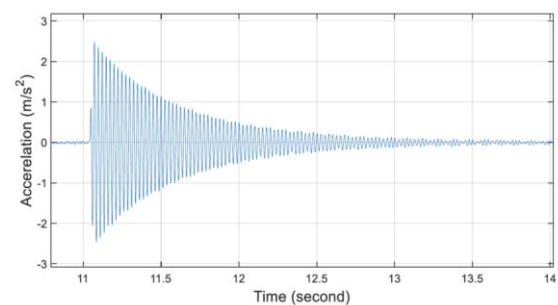
จากตัวอย่างควบคุม ผู้วิจัยจึงพิจารณาระดับการให้น้ำหนักบรรทุกเพื่อตรวจวัดความเสียหายและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้นในการทดสอบโดยพิจารณาจากระดับค่าการแอ่นตัวสูงสุด และน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแผ่นพื้นจากตัวอย่างควบคุมซึ่งมีค่าแสดงดังตารางที่ 2 เพื่อให้การทดสอบมีความปลอดภัยในการบันทึกความเสียหายและตรวจวัดค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแผ่นพื้น โดยเมื่อให้น้ำหนักบรรทุกถึงจุดที่พิจารณาความเสียหายและวัดการสั่นสะเทือน การทดสอบจะหยุดการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเพื่อบันทึกรอยร้าวและวัดค่าการแอ่นตัว จากนั้นคลายน้ำหนักบรรทุก (unload) เพื่อให้สามารถทดสอบการสั่นไหวแบบอิสระ แล้วจึง

ดำเนินการทดสอบต่อไปโดยให้น้ำหนักบรรทุกอีกครั้ง (reloading) จนถึงระดับความเสียหายที่พิจารณาในสภาวะถัดไป

ค่าความถี่ธรรมชาติของแผ่นพื้นได้จากการวิเคราะห์ความถี่การสั่นสะเทือนด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) ซึ่งมีค่าแสดงดังตารางที่ 1 ขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงจะได้รับการนำสัญญาณความถี่มาคำนวณด้วยสมการที่ (4) โดยผลทดสอบของตัวอย่างแผ่นพื้นควบคุม L15-0 แสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าการแอ่นตัวที่แต่ละระดับความเสียหายของตัวอย่างควบคุม

ระดับความเสียหาย / ตัวอย่างควบคุม	ค่าการแอ่นตัว (mm)		
	L10-0	L15-0	L20-0
B: เริ่มเกิดรอยร้าว	2.2	5.7	6.8
C: ที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกสูงสุด	21.1	35.6	40.1
D: ตำแหน่งที่เกิดการแอ่นตัวสูงสุดและน้ำหนักบรรทุกลดลง	40.8	55.7	62.9
E: ตำแหน่งที่รอยร้าวมีความกว้างขึ้นก่อนการวิบัติ	51.8	79.7	83.3
น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (kg)	1,126	792	497



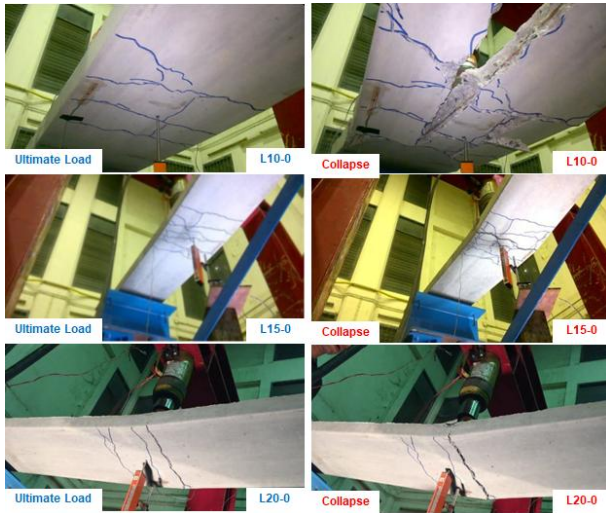
รูปที่ 3 ค่าความถี่และความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบการสั่นไหวแบบอิสระของตัวอย่างแผ่นพื้นควบคุม L15-0

3. อภิปรายผลการศึกษา

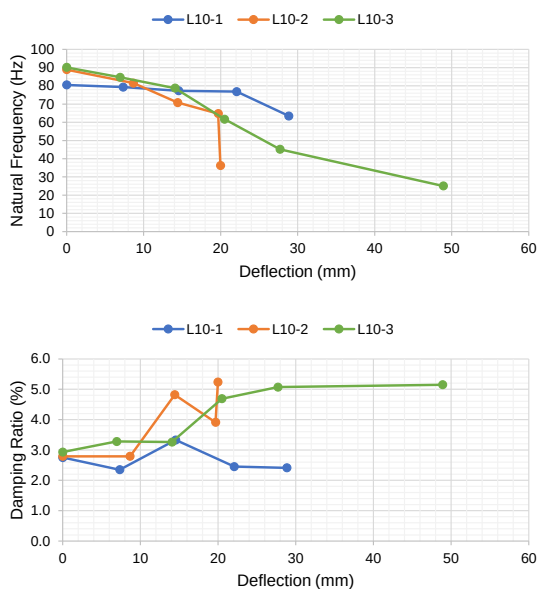
รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างความเสียหายของแผ่นพื้นควบคุมจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (ultimate load) และที่สภาวะวิบัติ (collapse) โดยแผ่นพื้นความยาวช่วง 1 เมตร มีการวิบัติในลักษณะแผ่นพื้นแตกออกตามแนวยาว ในขณะที่แผ่นพื้นความยาวช่วงมากขึ้นที่ 1.5 เมตรและ 2 เมตร มีการวิบัติในลักษณะของการดัด

รูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติและค่าสัดส่วนความหน่วงในแต่ละระดับของการแอ่นตัวของแผ่นพื้นความยาวช่วง 1 เมตร, 1.5 เมตร และ 2 เมตร ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าในแผ่นพื้นช่วงสั้นความ

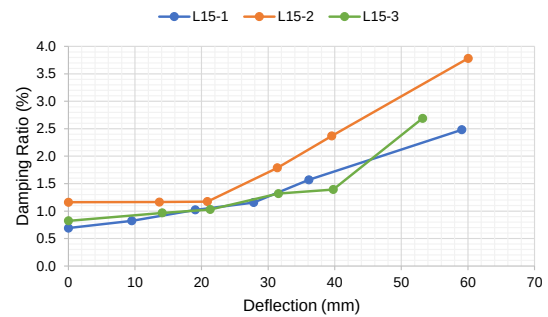
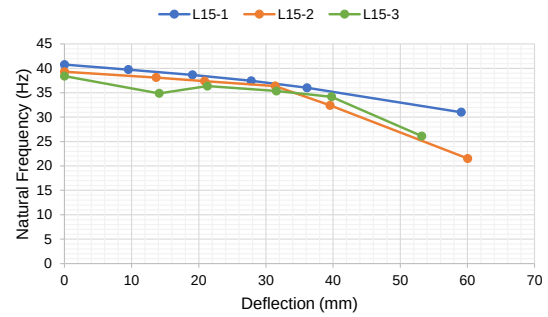
ยาวช่วง 1 เมตรมีความแปรปรวนของผลการทดสอบซ้ำจากสามตัวอย่างที่มากกว่าแผ่นพื้นความยาวช่วง 1.5 เมตรและ 2 เมตร ซึ่งเป็นผลจากรูปแบบการวิบัติที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม โดยภาพรวมแล้วค่าความถี่ธรรมชาติจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความเสียหายเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงจะมีพฤติกรรมตรงกันข้าม โดยมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเกิดความเสียหายเพิ่มมากขึ้น โดยจะสังเกตถึงแนวโน้มดังกล่าวได้ชัดในกรณีแผ่นพื้นความยาวช่วง 1.5 เมตรและ 2 เมตร



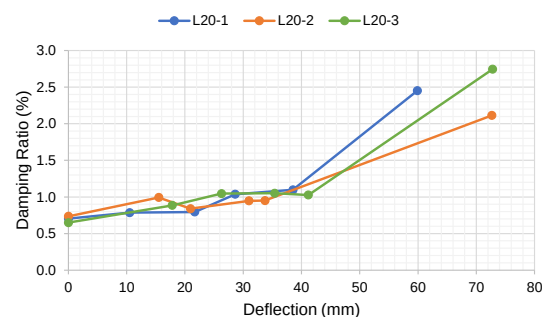
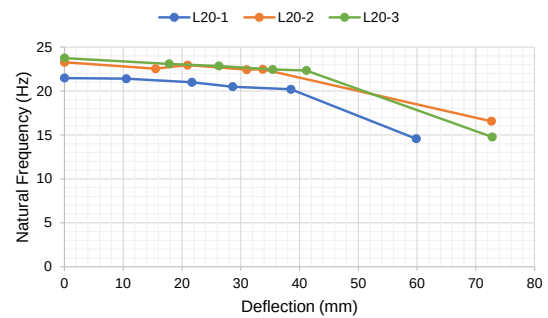
รูปที่ 4 ตัวอย่างความเสียหายที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (ซ้าย) และสภาวะวิบัติ (ขวา) ของตัวอย่างแผ่นพื้นคืบคุ่ม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงกับการแอ่นตัวของแผ่นพื้นความยาวช่วง 1.0 เมตร



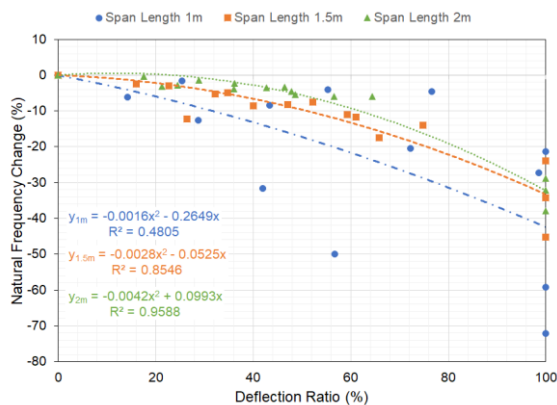
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงกับการแอ่นตัวของแผ่นพื้นความยาวช่วง 1.5 เมตร



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงกับการแอ่นตัวของแผ่นพื้นความยาวช่วง 1.5 เมตร

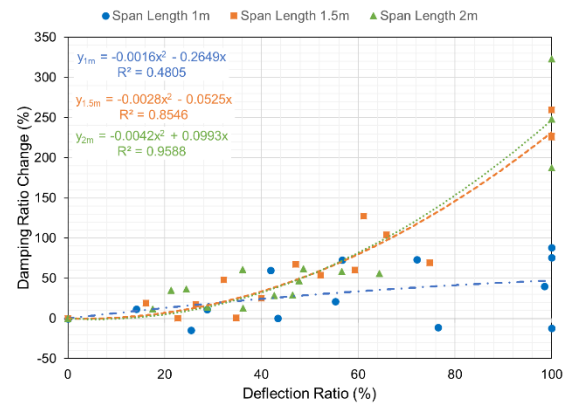
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของการลดลงของความถี่ธรรมชาติของแผ่นพื้นหลังจากรับน้ำหนักบรรทุกในแต่ละสภาวะตามสัดส่วนการแอ่นตัว โดยสัดส่วนการแอ่นตัวได้จากค่าการแอ่นตัวในสภาวะนั้นเทียบกับค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่แผ่นพื้นเกิดการวิบัติ จากรูปจะสังเกตได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงตามค่าสัดส่วนการแอ่นตัวหรือระดับความเสียหายของโครงสร้าง

โดยจะสังเกตได้ว่าอัตราการลดลงของค่าความถี่ธรรมชาติ ทั้งนี้การลดลงของความถี่ธรรมชาติในช่วงแรกจะมีอัตราที่ต่ำ โดยเฉพาะในช่วงสัดส่วนการแอ่นตัวไม่เกิน 20% ค่าความถี่ธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10% เท่านั้น และเมื่อพิจารณาจากแผนพื้นความยาวช่วง 1 เมตรพบว่าผลลัพธ์ที่ทดสอบได้มีความแปรปรวนที่สูงเนื่องจากรูปแบบการวิบัติที่ไม่แน่นอน ดังนั้นหากพิจารณากรณีแผนพื้นความยาวช่วง 1.5 เมตรและ 2 เมตรซึ่งมีพฤติกรรมการวิบัติในลักษณะเดียวกัน จะพบแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยเมื่อแผนพื้นเกิดความเสียหายมากขึ้น อัตราการลดลงของความถี่ธรรมชาติจะสูงขึ้น หากพิจารณาในระดับความเสียหายก่อนเกิดการวิบัติค่าความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงไม่เกิน 20%



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติ และสัดส่วนการแอ่นตัวของแผนพื้นที่มีความยาวช่วงแตกต่างกัน

ขณะที่รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนความหน่วงเมื่อเทียบกับสัดส่วนการแอ่นตัวของแผนพื้น โดยพบว่าเมื่อโครงสร้างมีการแอ่นตัวในระดับที่มากขึ้นหรือมีความเสียหายมากขึ้น ค่าสัดส่วนความหน่วงของโครงสร้างกลับมีค่าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ หรือแสดงว่ามีความสามารถในการลดทอนการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้น ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่วัสดุมีพฤติกรรมหลังจุดคราก ทำให้สูญเสียความยืดหยุ่นเมื่อเทียบกับพฤติกรรมในช่วงอีลาสติก จึงทำให้สัดส่วนความหน่วงมีแนวโน้มที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าสัดส่วนความหน่วงเมื่อเทียบกับสภาวะที่แผนพื้นมีสภาพสมบูรณ์นั้นมีความไวต่อระดับความเสียหายที่ชัดเจนกว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติ โดยหากพิจารณาในแผนพื้นความยาวช่วง 1.5 เมตรและ 2 เมตร จะสังเกตได้ว่าค่าสัดส่วนความหน่วงมีอัตราการเพิ่มขึ้นได้เกินกว่า 50% ก่อนเกิดการวิบัติ อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตว่าหากผลลัพธ์ของค่าสัดส่วนความหน่วงในแผนพื้นความยาวช่วง 1.5 เมตรและ 2 เมตร มีความแปรปรวนสูงกว่าค่าความถี่ธรรมชาติ ทั้งนี้มีสาเหตุจากการเปรียบเทียบเชิงตัวเลขเป็นร้อยละซึ่งค่าสัดส่วนความหน่วงมีค่าที่ต่ำมากในช่วงประมาณ 0.005 – 0.04 (หรือ 0.5% - 4.0%) ขณะที่ความถี่ธรรมชาติมีค่าอยู่ในหลัก 20 – 90 เฮิรตซ์ ทำให้การเปรียบเทียบกันเชิงสัดส่วนจึงมีกรอบความแปรปรวนที่สูงกว่า



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความหน่วง และสัดส่วนการแอ่นตัวของแผนพื้นที่มีความยาวช่วงแตกต่างกัน

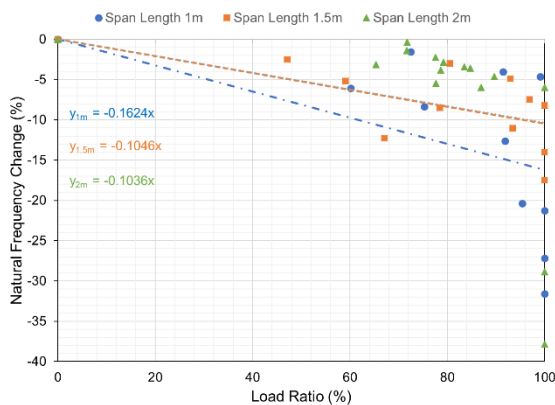
จากพฤติกรรมที่ได้จากการทดสอบจึงพิจารณาได้ว่าการประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้างแผนพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป สามารถพิจารณาได้จากระดับการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติจะมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อโครงสร้างแผนพื้นเกิดความเสียหาย ขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระดับความเสียหาย และค่าสัดส่วนความหน่วงเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงโอกาสของการเสื่อมสภาพหรือเกิดความเสียหายของโครงสร้างได้ไว (sensitive) กว่าการใช้ค่าความถี่ธรรมชาติ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าตั้งต้นในสภาวะที่โครงสร้างแผนพื้นมีความสมบูรณ์

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแผนพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปกับความเสียหายในแต่ละสภาวะ

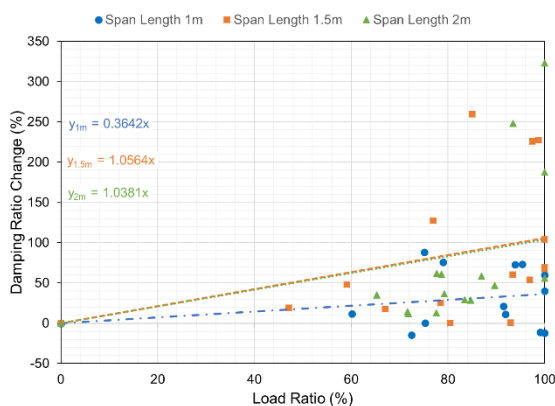
ระดับความเสียหาย	อัตราการเปลี่ยนแปลง* (%)	
	ความถี่ธรรมชาติ	สัดส่วนความหน่วง
ความยาวช่วง 1 เมตร		
B: เริ่มเกิดรอยร้าว	-6.05	11.83
C: ที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด	-12.64	11.18
D: ตำแหน่งที่เกิดการแอ่นตัวสูงสุดและน้ำหนักบรรทุกลดลง	-49.91	72.80
E: ตำแหน่งที่รอยร้าวมีความกว้างขึ้นก่อนการวิบัติ	-72.20	75.67
ความยาวช่วง 1.5 เมตร		
B: เริ่มเกิดรอยร้าว	-2.50	19.22
C: ที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด	-5.18	47.92
D: ตำแหน่งที่เกิดการแอ่นตัวสูงสุดและน้ำหนักบรรทุกลดลง	-11.68	127.36
E: ตำแหน่งที่รอยร้าวมีความกว้างขึ้นก่อนการวิบัติ	-23.59	259.69
ความยาวช่วง 2 เมตร		
B: เริ่มเกิดรอยร้าว	-0.37	11.65
C: ที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด	-2.23	12.72
D: ตำแหน่งที่เกิดการแอ่นตัวสูงสุดและน้ำหนักบรรทุกลดลง	-5.96	55.81
E: ตำแหน่งที่รอยร้าวมีความกว้างขึ้นก่อนการวิบัติ	-32.17	248.10

* เปรียบเทียบกับกรณีแผนพื้นอยู่ในสภาพสมบูรณ์ หากค่าเป็นลบหมายถึงมีค่าเพิ่มขึ้น และกรณีค่าเป็นลบหมายถึงมีค่าลดลง

เพื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางพลศาสตร์กับความเสียหายของแผ่นพื้นในแต่ละสภาวะ ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบจากตัวอย่างแผ่นพื้นในแต่ละช่วงความยาวตามระดับความเสียหาย โดยตัวอย่าง L10-3, L15-1 และ L20-1 เป็นตัวแทนของผลการทดสอบแผ่นพื้นที่ความยาวช่วง 1 เมตร, 1.5 เมตรและ 2 เมตร ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อแผ่นพื้นเริ่มเกิดรอยแตกกว้างค่าความถี่ธรรมชาติจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยในช่วงประมาณ 1-6% ขณะที่สัดส่วนความหน่วงมีค่าเพิ่มขึ้นในกรอบประมาณ 10-20% และที่สภาวะแผ่นพื้นเกิดความเสียหายเมื่อได้รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดค่าความถี่ธรรมชาติจะลดลงระหว่างประมาณ 3-13% ขณะที่สัดส่วนความหน่วงเพิ่มขึ้นประมาณ 11-48% และที่สภาวะที่แผ่นพื้นใกล้จะเกิดการวิบัติค่าความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงในกรอบประมาณ 24-73% ขณะที่สัดส่วนความหน่วงเพิ่มขึ้นในกรอบประมาณ 75-260% โดยแผ่นพื้นที่มีความยาวช่วงยาวซึ่งมีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำจะมีกรอบของการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติตามระดับความเสียหายในสัดส่วนที่แคบกว่าแผ่นพื้นที่มีความยาวช่วงสั้น ขณะที่สัดส่วนความหน่วงนั้นไม่ขึ้นกับความยาวช่วงของแผ่นพื้นอย่างมีนัยสำคัญ ผลของความยาวช่วงต่อการเพิ่มขึ้นของค่าสัดส่วนความหน่วงจึงไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนของน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นที่ความยาวช่วงแตกต่างกัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความหน่วงและสัดส่วนของน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นที่ความยาวช่วงแตกต่างกัน

รูปที่ 10 และรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกกระทำเทียบกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติจะเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 5% ขึ้นไปก็ต่อเมื่อโครงสร้างแผ่นพื้นรับน้ำหนักบรรทุกในระดับประมาณไม่น้อยกว่า 60% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในระดับ 10% ขึ้นไปที่ระดับน้ำหนักบรรทุกเดียวกัน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของความถี่ธรรมชาติพบว่ามีแนวโน้มที่มีค่าลดลงเพียงอย่างเดียวเมื่อเทียบกับสภาพสมบูรณ์ ในขณะที่สัดส่วนความหน่วงพบว่ามีค่าแปรปรวนมากกว่าโดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ดังนั้นเพื่อให้การประเมินระดับความเสียหายมีประสิทธิภาพจึงควรพิจารณาทั้งความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงควบคู่กัน

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนแบบอิสระเพื่อวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติและค่าสัดส่วนความหน่วงที่แต่ละสภาวะของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ได้รับน้ำหนักบรรทุกทุกในสัดส่วนเทียบกับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อโครงสร้างแผ่นพื้นมีความเสียหายเพิ่มมากขึ้น ความถี่ธรรมชาติจะมีค่าลดลงขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแบบสัมพัทธ์โดยเทียบกับค่าตั้งต้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนความหน่วงมีความไวต่อระดับความเสียหายมากกว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติ เมื่อพิจารณาระดับความเสียหายที่แตกต่างกันสามารถสรุปได้โดยสังเขปดังนี้

- 1) การประเมินความเสียหายในโครงสร้างแผ่นพื้นด้วยการตรวจวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงเพื่อเปรียบเทียบค่ากับสภาวะที่โครงสร้างมีความสมบูรณ์สามารถบ่งบอกถึงระดับความเสียหายของโครงสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ และมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้
- 2) แผ่นพื้นเริ่มเกิดการแตกกว้างที่สังเกตได้เมื่อค่าความถี่ธรรมชาติลดลงในสัดส่วน 1-6% โดยขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงเพิ่มขึ้นในสัดส่วน 10-20% ซึ่งแสดงว่าการประเมินความเสียหายเบื้องต้นโดยใช้ความถี่ธรรมชาติจะต้องการความละเอียดในการตรวจวัดที่สูงเพื่อจำแนกการลดลงของความถี่ในกรอบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงการประมาณความเสียหายในช่วงแรกให้แม่นยำได้ยากเมื่อเทียบกับการประเมินด้วยค่าสัดส่วนความหน่วง
- 3) ณ สภาวะที่แผ่นพื้นรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด ค่าความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงในสัดส่วน 3-13% ขณะที่ค่าสัดส่วนความหน่วงเพิ่มขึ้นในสัดส่วน 11-48% เมื่อเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงของโครงสร้างในสภาพสมบูรณ์
- 4) โครงสร้างแผ่นพื้นเกิดการวิบัติเมื่อความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงในสัดส่วนประมาณ 24-73% หรือสัดส่วนความหน่วงเพิ่มขึ้นในสัดส่วนประมาณ 75-260% เมื่อเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงของโครงสร้างในสภาพสมบูรณ์

5) เมื่อเปรียบเทียบแผ่นพื้นความหนาเท่ากันที่ความยาวช่วงต่างกัน พบว่าแผ่นพื้นที่มีความยาวช่วงมากกว่ามีโอกาสเกิดความเสียหายที่มากกว่า ในระดับการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในอัตราเดียวกัน ซึ่ง แสดงว่าความสัมพันธ์ของระดับความเสียหายกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ทางพลศาสตร์ในโครงสร้างที่มีความถี่ธรรมชาติต่ำจะมีความไวมากกว่า โครงสร้างที่มีความถี่ธรรมชาติสูงกว่า

6) ค่าสัดส่วนความหน่วงแม้จะมีนัยสำคัญของการเปลี่ยนแปลงค่าตาม ระดับความเสียหายที่ชัดเจนกว่าความถี่ธรรมชาติแต่จะมีความแปรปรวนที่สูงกว่า ดังนั้นเพื่อให้การประเมินระดับความเสียหายมีประสิทธิภาพจึงควร พิจารณาทั้งความถี่ธรรมชาติและสัดส่วนความหน่วงควบคู่กัน

สำหรับข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย มีดังต่อไปนี้

1) การประเมินระดับความเสียหายโดยตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติและ สัดส่วนความหน่วงนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจวัดครั้งแรกในขณะที่โครงสร้าง แผ่นพื้นอยู่ในสภาพสมบูรณ์ และควรตรวจวัดเพื่อเปรียบเทียบค่าเมื่อสงสัย หรือตรวจพบความเสียหายของโครงสร้างที่สามารถสังเกตด้วยตาได้

2) เพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทาง พลศาสตร์ของโครงสร้างกับระดับความเสียหาย การศึกษาวิจัยเพิ่มเติมกับ โครงสร้างแผ่นพื้นที่มีขนาดอื่น ๆ ที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักแตกต่าง จากงานวิจัยนี้ รวมถึงองค์อาคารประเภทคาน เป็นประเด็นที่น่าสนใจศึกษา และทดสอบเพิ่มเติม รวมไปถึงการพิจารณาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ใน โหมดการสั่นไหวอื่นที่มีความถี่ธรรมชาติสูงขึ้น ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ ประโยชน์ในการบำรุงรักษาโครงสร้างอาคารและสะพานได้อย่างมี ประสิทธิภาพ ทำให้ทราบสภาพของโครงสร้างได้อย่างสะดวกรวดเร็วและใช้ งบประมาณที่ลดลงได้

3) ควรประยุกต์แนวทางการทดสอบจากงานวิจัยนี้กับชิ้นส่วนคานและ แผ่นพื้นสำหรับโครงสร้างสะพานเพื่อทราบถึงอัตราการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติทางพลศาสตร์กับระดับความเสียหายว่ามีความแตกต่างจาก โครงสร้างแผ่นพื้นอาคารมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะทำให้ทราบผลลัพธ์ที่มี นัยสำคัญกับมูลค่าของการประเมินความเสียหายด้วยวิธีการที่นำเสนอ มากยิ่งขึ้น เนื่องจากโครงสร้างสะพานเป็นโครงสร้างที่ยากต่อการประเมิน ความเสียหายแบบปกติ เช่น ยากต่อการเข้าถึงพื้นที่บริเวณด้านใต้สะพาน และการทดสอบการให้น้ำหนักบรรทุกต้องใช้งบประมาณสูง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณนายธีรภัทร สำราญฤทธิ์, นายทศพล พิริยะโรจน์ทวี นายจตุรงค์ เสมอวงษ์ และนายยิ่งใหญ่ สามารถ สำหรับการเตรียมการ ทดสอบและบันทึกข้อมูล รวมถึงคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยสำหรับนิสิตระดับปริญญาตรี และให้ความ อนุเคราะห์สถานที่สำหรับการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] Salawu, O.S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, 19(9), pp. 718-723.

- [2] Xu, G.Y., Zhu, W.D. and Emory, B.H. (2007). Experimental and numerical investigation of structural damage detection using changes in natural frequencies. *Journal of Vibration and Acoustics*, 129(6), pp. 686-700.
- [3] Curadelli, R.O., Riera, J.D., Ambrosini, D. and Amani, M.G. (2008). Damage detection by means of structural damage identification. *Engineering Structures*, 30(12), pp. 3497-3504.
- [4] Rucka, M. (2011). Damage detection in beams using wavelet transform on higher vibration modes. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 49(2), pp. 399-417.
- [5] Golmohamadi, M., Badri, H. and Ebrahimi, A. (2012). Damage diagnosis in bridges using wavelet. *IACSIT Press, Singapore*, 28, pp. 202-207.
- [6] Salgado, R., Cruz, P.J.S., Ayala, G. and Zamora, S.A. (2014). Performance of damage detection methods used in bridge structures through dynamic tests in steel beams. *American Journal of Civil Engineering*, 2(2), pp. 18-26.
- [7] Mekjavić, I. and Damjanović, D. (2017). Damage assessment in bridges based on measured natural frequencies. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17(2), 1750022, 20pp.
- [8] Cao, M.S., Sha, G.G., Gao, Y.F. and Ostachowicz, W. (2017). Structural damage identification using damping: a compendium of used and features. *Smart Materials and Structures*, 26, 043001, 14pp.
- [9] Sha, G., Eadzuenski, M., Cao, M. and Ostachowicz, W. (2019). A novel method for single and multiple damage detection in beams using relative natural frequency changes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132, pp. 335-352.
- [10] Sehgal, S. and Kumar, H. (2020). Damage and damping identification in structure through novel damped updating method. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, pp. 61-74.
- [11] Khanahmadi, M., Mirzaei, B., Dezhkam, B., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and Amiri, G.G. (2024). Vibration-based health monitoring and damage detection in beam-like structures with innovative approaches based on signal processing: A numerical and experimental study. *Structures*, 68, 1072211, 17pp.