

ดัชนีตรวจสอบสภาพโครงสร้าง

Health Index of Structures

บทคัดย่อ

โครงสร้างสะพาน อาคาร และสิ่งก่อสร้างทั่วไป ซึ่งได้ถูกก่อสร้างขึ้นและใช้ประโยชน์มาเป็นเวลานานนั้น ในปัจจุบันสิ่งก่อสร้างเหล่านี้บางแห่งได้ชำรุดทรุดโทรม อันเนื่องมาจากความเสื่อมสภาพของวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง การใช้งานเกินกว่าความสามารถของโครงสร้าง การขาดการบำรุงรักษาที่เหมาะสม และขาดความเข้าใจในพฤติกรรมของโครงสร้างนั้น นับว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเฝ้าติดตามความสมบูรณ์ของโครงสร้างเหล่านี้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดภัยพิบัติ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ที่จะหาดัชนีซึ่งสามารถใช้ชี้ความสมบูรณ์ของโครงสร้างในขณะนั้น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอันจะเป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจในการบำรุงรักษา การจำกัดการใช้งานหรือยกเลิกการใช้งานของโครงสร้างนั้น ๆ การวิจัยนี้ได้พบว่าดัชนีโอบอลเพลกซ์บิลิตีเป็นดัชนีใช้ตรวจสอบสภาพโครงสร้างได้ดี

การตรวจสอบประสิทธิภาพของดัชนีนี้ได้ทดสอบเชิงคณิตศาสตร์ การใช้งานจริงในโครงสร้างชนิดต่าง ๆ ทั้งในห้องทดลองและโครงสร้างจริง

ABSTRACT:

The structures such as bridges, buildings and infrastructure have been constructed for serving society for a long time. Nowadays, most of them are decaying due to age, deterioration, misuse, lack of proper repairing and lack of understanding the real characteristic behavior of existing structures. It is important to be able to identify and monitor the health of these structures to prevent potential sudden structural failures. The objective of this study is to find the effective index for monitoring the health of structures and this

index should have sensitive to the change of structure. Global Flexibility Index is introduced and shall be useful for making decision on what kind of action for maintenance. In this study, Global Flexibility Index is verified to be an effective index on the mathematic samples, models in laboratory and existing structures.

KEYWORDS: Global Flexibility Index, Health of Structures

1. บทนำ

โดยปกติโครงสร้างจะต้องเสื่อมสลายอันเนื่องมาจากอายุเก่าแก่ ถูกใช้งานมาเป็นเวลานาน ถูกภัยพิบัติต่างๆ ที่ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปหรือใช้งานผิดไปจากวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการออกแบบ การขาดการบำรุงรักษาและซ่อมแซมที่เหมาะสมกับสภาพที่แท้จริง ขาดการวินิจฉัยที่ถูกต้องต่อสภาพที่เป็นอยู่ บางครั้งอาจมีการยกเลิก จำกัดการใช้งาน โครงสร้างนั้นในขณะที่โครงสร้างนั้น แท้จริงยังสามารถถูกใช้งานได้ หากปล่อยให้อยู่ในสภาพเช่นนี้ อาจจะทำให้เกิดการตัดสินใจปฏิบัติต่อโครงสร้างไม่ถูกต้องหรือเกิดภัยพิบัติต่อสาธารณะชนในด้านชีวิตและทรัพย์สิน ถ้าสะพานพังหนึ่งครั้งจะต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายโดยตรงในการก่อสร้างสะพานขึ้นมาใหม่และผลกระทบทางอ้อมในด้านเศรษฐกิจและสังคมอันเนื่องมาจากการจราจรติดขัดเป็นเวลานาน ไม่มีมาตรการรองรับของระบบการคมนาคมขึ้นมาทดแทนในขณะนั้น ฉะนั้นความสามารถที่จะตรวจสอบติดตามความสมบูรณ์ของโครงสร้างที่มีข้ออยู่มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น (Dunker, 1993)

ความสนใจในงานด้านการตรวจสอบการเสื่อมสลายและการเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาอย่างแพร่หลายในวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอากาศยานและวิศวกรรมโยธา ในปัจจุบันการตรวจสอบอาจแบ่งได้เป็นการตรวจสอบโดยสายตาหรือการทดสอบเฉพาะตำแหน่งบนโครงสร้างนั้น เช่น การใช้วิธีทดสอบ

โดยอุลตราโซนิก อะคูสติค สนามแม่เหล็ก เรดิโอกราฟ หรือความร้อน (AASHTO, 1994) เป็นต้น วิธีเหล่านี้มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ต้องสามารถติดตั้งเครื่องมือเพื่อเข้าไปตรวจสอบในตำแหน่งที่ต้องการ และผลที่ได้ก็เป็นผลการเปลี่ยนแปลงเฉพาะตำแหน่งที่ตรวจวัดนั้น ถ้าหากต้องการจะรู้ทั้งโครงสร้างจะต้องใช้เวลาและงบประมาณเป็นจำนวนมากเพื่อตรวจวัดให้ทั่วทุกตำแหน่ง สุดท้ายก็ยิ่งหาข้อสรุปไม่ได้ว่า โครงสร้างโดยรวมนั้นมีความสมบูรณ์แข็งแรงหรือยังสามารถใช้งานได้อยู่หรือเปล่า สืบเนื่องมาจากข้อจำกัดเหล่านี้ ความต้องการวิธีที่จะบอกการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง จะต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงโดยวิธีใหม่นี้จะต้องเป็นการแสดงสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างที่เป็นทั้งองค์ประกอบโดยรวม และจะต้องแสดงให้เห็นได้ถึงแม้ว่าจะเป็นเพียงระยะเริ่มต้นของโครงสร้างที่เริ่มมีการเสียหาย เพื่อจะได้ควบคุมรักษา ยืดอายุการใช้งาน การใช้คุณลักษณะของคุณสมบัติการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง นับว่ามีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์นี้ โดยในหัวข้อที่จะกล่าวต่อไปนี้จะสามารถอธิบายว่าทำไมคุณสมบัติทางการสั่นสะเทือนของโครงสร้างนั้นสามารถใช้ชี้ความแข็งแรงของโครงสร้างโดยรวมได้ เป้าหมายของวิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างใหม่นี้จะต้องได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและง่ายกับการเปรียบเทียบในแต่ละครั้งอีกทั้งจะต้องลดความไม่แน่นอน

2. ดัชนีโกลบอลฟลักซ์บิลิตี

เป็นที่เข้าใจกันว่าเมื่อเกิดรอยร้าวในโครงสร้างก็จะทำให้เกิดการลดลงของความแข็งแรงหรือสติเฟ้นสหรืออีกนัยหนึ่งจะมีการเพิ่มขึ้นของเฟลกซ์บิลิตีของโครงสร้างนั้นและยังทำให้สามารถประเมินค่าระดับของความเสียหายโดยใช้พารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับเฟลกซ์บิลิตี ดังนั้นวิธีตรวจสอบที่มีการใช้การเปลี่ยนแปลงเฟลกซ์บิลิตีของโครงสร้างก็สามารถใช้เป็นตัวชี้สภาพการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างนั้นได้ และยังสามารถบอกระดับของความรุนแรงของการเสื่อมสลาย ในงานวิจัยทางด้านการสั่นสะเทือนของ

โครงสร้าง ความถี่ทางธรรมชาติ และรูปแบบของการสั่น ซึ่งจะใช้กล่าวต่อไปว่าเป็นพารามิเตอร์ของการสั่นสะเทือน พารามิเตอร์เหล่านี้ตอบสนองต่อสภาพของโครงสร้างในขณะนั้น ๆ ดังนั้นการใช้พารามิเตอร์ของการสั่นสะเทือนจะมีประโยชน์ต่อการวัดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง ในขั้นตอนต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ของการสั่นสะเทือน ถ้ามีการใช้แฟกเตอร์ที่เหมาะสมแล้วนำมาใช้คำนวณร่วมกันก็จะได้เฟลกซิบิลิตีของโครงสร้างซึ่งสะท้อนถึงสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างโดยรวม (Patjavit, 2005)

สมการการเคลื่อนที่ของ Multi-degree of freedom (MDOF) สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ (1)

จะเห็นได้ว่าเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ของ

$$[M]\{\ddot{r}(t)\} + [K]\{r(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

โดยที่ $[M]$ และ $[K]$ คือ $N \times N$ mass และ สติฟเนสเมตริกซ์ ตามลำดับ และ $\{r(t)\}$ และ $\{f(t)\}$ คือ $N \times 1$ เวกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและแรง ในการพิจารณาพารามิเตอร์ของการสั่นสะเทือน จะพิจารณาการสั่นแบบอิสระ นั่นคือ $\{f(t)\} = 0$

โดยสมมติผลลัพธ์ให้อยู่ในรูป

$$r(t) = X e^{j\omega t} \text{ และนำตัวคูณร่วมออก} \\ (K - \omega^2 M) X e^{j\omega t} = 0 \quad (2)$$

จากสมการ (2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการ (3) เนื่องจาก $e^{j\omega t} \neq 0$ สำหรับ ω ใด ๆ และเมื่อเป็น non-trivial solutions

$$\det[K - \omega^2 M] = 0 \quad (3)$$

จากเงื่อนไขนี้สามารถหา ω^2 และ $\{X\}$ เนื่องจากค่า eigenvector นั้นมีได้หลายค่าจึงสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ (4)

$$K\phi - \omega^2 M\phi = 0 \quad (4)$$

คูณ ϕ^T ที่สมการ (4) ได้

$$\phi^T K\phi - \omega^2 \phi^T M\phi = 0 \quad (5)$$

ถ้า ϕ เป็น mass-normalized modal vectors ทำให้ได้ผลลัพธ์ของ $\phi^T M\phi = I$

$$\phi^T K\phi - \omega^2 I = 0$$

หรือ

$$\phi^T K\phi = \omega^2 I \quad (6)$$

$$\phi^{-1} K^{-1} \phi^{-T} = \frac{1}{\omega^2} I$$

หรือ

$$[K]^{-1} = [\phi] \left[\frac{1}{\omega^2} \right] [\phi]^T \quad (7)$$

จะนั่นจะได้เฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ ซึ่งได้มาจาก mass-normalized modal vectors และความถี่ธรรมชาติดังแสดงในสมการที่ (8)

$$[F] = [\phi] \left[\frac{1}{\omega^2} \right] [\phi]^T$$

(8)

โดยที่

$[F]$ = modal flexibility matrix

$[\phi]$ = mass-normalized modal vectors

$\left[\frac{1}{\omega^2} \right]$ = diagonal matrix of ascending natural frequencies

3. ขั้นตอนในการหา Mass-normalized modal Vectors

ถ้า ϕ เป็น mass-normalized modal vectors แล้วจะมีคุณสมบัติในสมการต่อไปนี้

$$\phi^T M \phi = 1 \quad (9)$$

สมมติ β เป็นตัวคูณ ψ ที่ทำให้ได้ ϕ ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (10)

$$\phi = \psi \beta \quad (10)$$

โดยที่

ϕ = mass-normalized modal vectors

β = scaling factor in diagonal vectors

ψ = normalized modal vectors

แทนค่า mass-normalized modal vectors

จากสมการ(10) ลงในสมการ (9) ได้

$$\beta^T \psi^T M \psi \beta = 1 \quad (11)$$

โดยที่ modal mass matrix นิยามไว้ในสมการที่ (12)

$$M_r = \psi^T M \psi \quad (12)$$

โดยที่

M_r = modal mass matrix

M = mass matrix

ψ = normalized modal vectors

แทนค่า modal mass matrix จากสมการ

(12) ลงใน สมการ (11) ได้

$$\beta^T M_r \beta = 1 \quad (13)$$

เพราะฉะนั้น β สำหรับโหมดใด ๆ มีค่าใน

สมการ (14)

$$\beta_r = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \quad (14)$$

โดยที่

β_r = scaling factor for mode r

m_r = modal mass for mode r

โครงสร้างสามารถหาได้โดยตรงจากการวัดหาพารามิเตอร์การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง เมื่อเราทราบเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ของโครงสร้างนั้น ถ้าเรานำมาพัฒนาต่อเพื่อให้เป็นดัชนีที่เป็นเพียงสเกลาร์อันจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานในการเปรียบเทียบในแต่ละครั้ง ดัชนีนี้จะต้องมีคุณสมบัติที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ของโครงสร้างในงานวิจัยครั้งนี้ได้เสนอ เซคอันนอร์มของเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์จะใช้กล่าวต่อไปว่าเป็นดัชนีโอบอลเฟลกซิบิลิตี(GFI) แสดงอยู่ในสมการที่ (15) ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบให้เห็นกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของการสั่นสะเทือนบนสภาพต่าง ๆ ของโครงสร้างตัวอย่าง

$$GFI = \sqrt{\lambda_i \max(F^T F)} \quad (15)$$

โดยที่ GFI คือ ดัชนีโอบอลเฟลกซิบิลิตี F คือเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ และ

$\lambda_i \max(F^T F)$ คือ ค่าไอเกนแวลูที่มากที่สุดของ $F^T F$

4. ทดสอบเชิงคณิตศาสตร์

การคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ที่จะใช้ในการหาความไวต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีโอบอลเฟลกซิบิลิตีได้ทดสอบในเชิงคณิตศาสตร์เป็นจำนวนมาก ตัวอย่างต่อไปนี้เป็นหนึ่งในจำนวนนั้น ประกอบด้วยระบบสปริงกับมวล 5 ดิกรีอิอิสระ ค่าสัมประสิทธิ์ของสปริงและมวลสมมติให้มีค่าเดียวกัน ซึ่งเมตริกซ์และมวลเริ่มต้น คือ

สมมติว่า $k = 1 \text{ N/m}$, และ $m = 1 \text{ kg}$ จากถาร

แก้ปัญหาไอเกนแวลู ได้ค่าความถี่ทาง

ธรรมชาติ คือ $\omega_1 = 0.285 \text{ rad/s}$; $\omega_2 =$

$0.831 \text{ rad/s}; \omega_3 = 1.310 \text{ rad/s}; \omega_4 = 1.6825; \omega_5 = 1.919 \text{ rad/s}$

The mass-normalized modal vectors คือ

$$\{\phi\}_1^T = \{0.1699 \quad -0.4557 \quad 0.5969 \quad 0.5485 \quad -0.3260\}$$

$$\{\phi\}_2^T = \{0.3260 \quad -0.5969 \quad 0.1699 \quad -0.4557 \quad -0.5485\}$$

$$\{\phi\}_3^T = \{0.4557 \quad -0.3260 \quad -0.5485 \quad -0.1699 \quad -0.5969\}$$

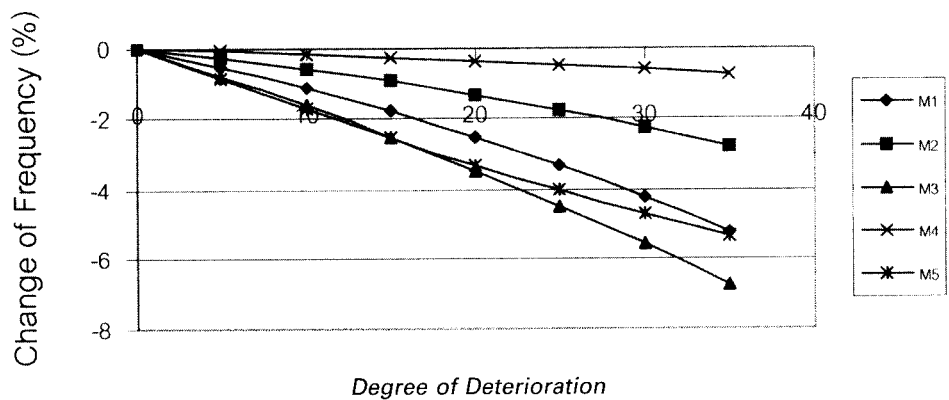
$$\{\phi\}_4^T = \{0.5485 \quad 0.1699 \quad -0.3260 \quad 0.5969 \quad 0.4557\}$$

$$\{\phi\}_5^T = \{0.5969 \quad 0.5485 \quad 0.4557 \quad -0.3260 \quad -0.1699\}$$

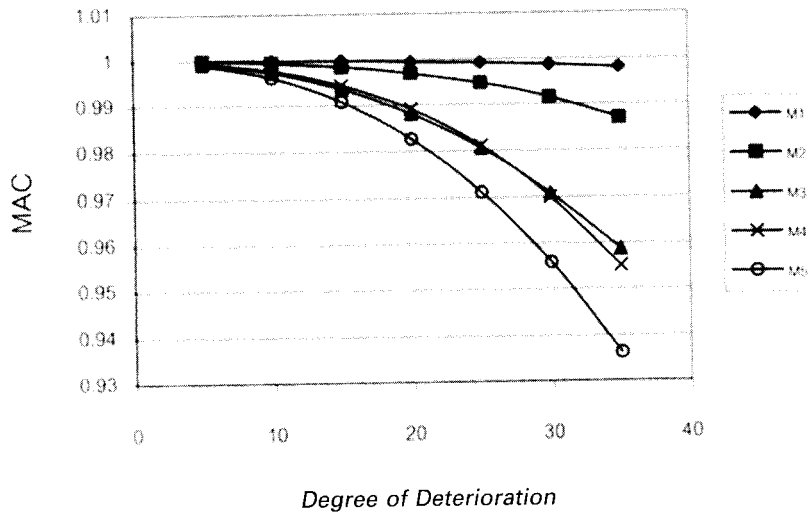
ความไวของค่าความถี่ทางธรรมชาติรูปร่างการสั่น และ modal flexibility matrix เป็นไปตามสมการที่ (8), และดัชนีโกบอลเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์เป็นไปตามสมการที่ (15) ถูกคำนวณขึ้นต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงของสปริงที่ k_3 โดยที่ k_3 ถูกทำให้มีค่า

สถิติในสลดลง 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30 % และ 35%. ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ทางธรรมชาติของแต่ละโหมด แสดงอยู่ในรูปที่ 1 สัญลักษณ์ M_i คือโหมดที่ i และเป็นไปตามลำดับตามอันดับของโหมด ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของการสั่นต่อรูปร่างของการสั่นของโครงสร้างปกติ ความสัมพันธ์ของรูปร่างของการสั่นอันนี้นิยมไว้ในค่าของ MAC ในสมการที่ 16 ผลลัพธ์ของค่า MAC แสดงอยู่ในรูปที่ 2 จะมีความรวดเร็วในการแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสถิติในสมการมากกว่าการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ทางธรรมชาติและรูปร่างของการสั่นโดยลำพัง ค่าของ ดัชนีโกบอลเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์เป็นเพียงสเกลาร์ซึ่งง่ายต่อการเปรียบเทียบต่อการเปลี่ยนแปลงของทั้งระบบของโครงสร้าง การเปลี่ยนแปลงของดัชนีโกบอลเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์แสดงอยู่ในรูปที่ 3

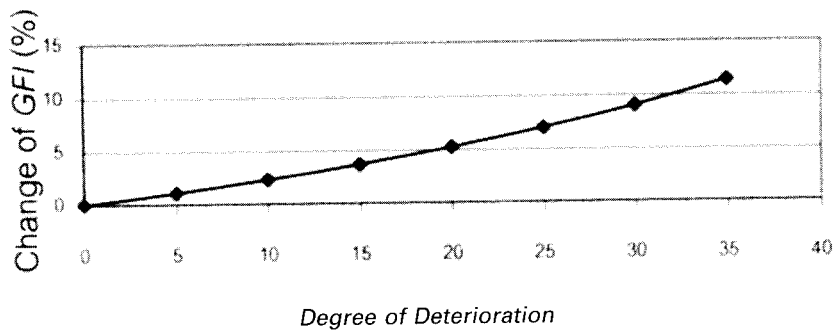
$$MAC(\{\phi\}_i, \{\phi\}_j) = \frac{|\{\phi\}_i^T \{\phi\}_j|^2}{(\{\phi\}_i^T \{\phi\}_i)(\{\phi\}_j^T \{\phi\}_j)} \quad (16)$$



รูปที่ 1 Change of Natural frequency



รูปที่ 2 Change of MAC



รูปที่ 3 Change of GFI

5. การประเมินค่าพารามิเตอร์ของการสันสะเทือน

จากที่กล่าวมาแล้วว่าพารามิเตอร์ของการสันสะเทือนสามารถนำไปเป็นประโยชน์ต่อการหาดัชนีโอบอลเฟลกซิบิลิตี ฉะนั้นจึงต้องมีการตรวจวัดหาพารามิเตอร์เหล่านี้ให้มีความถูกต้อง เหมาะสมกับสภาพของโครงสร้างและสภาพแวดล้อม ก่อนอื่นจะขอสรุปการวัดหาพารามิเตอร์ของการสันสะเทือน อาจแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ กลุ่มหนึ่ง คือ พวกที่ทำการวัดการสันสะเทือนโดยอาศัยการกระทำของสภาพแวดล้อม (Abdel-Gaffar, 1978 and McLamore, 1971) เช่น ลม น้ำหนักจากการจราจร เป็นต้น แต่วัดได้วัดแรงที่มากระทำต่อ

โครงสร้างนั้น เพื่อไปคำนวณหาพารามิเตอร์ของการสันสะเทือน ในกลุ่มที่สอง เป็นพวกที่วัดการสันสะเทือนโดยอาศัยเครื่องมือของการทดลองไปกระตุ้นให้โครงสร้างนั้นมีการสันสะเทือน (Salawu, 1995) จากนั้นจะมีการวัดการสันสะเทือนของโครงสร้างและวัดขนาดของแรงที่ไปกระตุ้นนั้นเพื่อนำไปคำนวณร่วมกัน อันจะได้มาซึ่งพารามิเตอร์ของการสันสะเทือน ถ้าเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ 2 วิธีนี้ วิธีแรกจะมีผลการรบกวนเนื่องมาจากสิ่งต่างๆ แต่ก็สะดวกในด้านที่ไม่ต้องหาเครื่องมือมากระตุ้นและการนำข้อมูลนี้ไปประมวลผลในภายหลัง ส่วนวิธีที่ 2

จะให้ผลในการวัดการตอบสนองของโครงสร้างได้ชัดเจนกว่าวิธีแรก อีกทั้งยังสามารถพัฒนาวิธีการประมวลผลได้อีกหลายรูปแบบ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการหาเฟลกซิบิลิตีเมตริกซ์ของโครงสร้างได้โดยตรง แต่วิธีนี้ต้องนำผลจากแรงกระตุ้นมาคิดคำนวณด้วยการกระตุ้นในวิธีที่ 2 นี้ อาจทำได้หลายรูปแบบ เช่น การใช้เครื่องเขย่าเพื่อสร้างสัญญาณกระตุ้นแบบฮาร์มอนิก การใช้ช้อนกระตุ้นและการกระตุ้นโดยเครื่องมือที่สร้างสัญญาณชนิดอื่น ๆ อีก(Harris, 1995)

การประมวลผลที่ได้จากการทดลองแบบใช้แรงกระตุ้นนี้มีอยู่หลายวิธี อาจเป็นโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่ขึ้นอยู่กับความคุ้นเคยของผู้ทำการศึกษาและความเหมาะสมเกี่ยวกับการทดลองนั้น การศึกษาในครั้งนี้ได้พัฒนาวิธีการนำผลเนื่องจากการตอบสนองของโครงสร้างและแรงกระตุ้นมาสร้างเป็นสมการขึ้นมาใหม่ (สมการที่17) แล้วนำสมการเหล่านี้ไปทำการหา Singular Value Decomposition ในแต่ละความถี่ (สมการที่18)

$$H_k(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{F_k(\omega)} \quad (17)$$

โดยที่ $X_i(\omega)$ คือ สัญญาณจากการตอบสนองของโครงสร้างที่วัดมาจากเครื่องวัดความเร่ง, $F_k(\omega)$ คือสัญญาณที่ได้จากเครื่องกระตุ้น

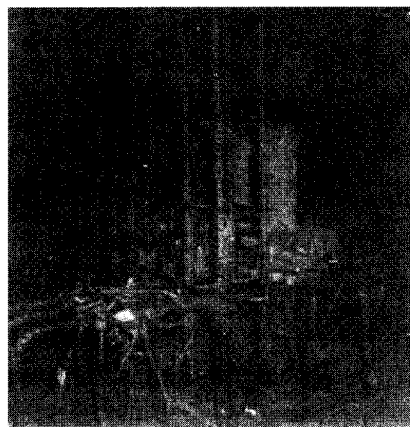
$$[H(\omega)] = [U(\omega)][\Sigma(\omega)][V(\omega)]^H \quad (18)$$

โดยที่ $[U(\omega)]$ คือ left singular matrix $[\Sigma(\omega)]$ คือ singular value matrix และ $[V(\omega)]$ คือ right singular matrix ซึ่ง singular value matrix จะนำไปหาความถี่ทางธรรมชาติของโครงสร้าง และ left

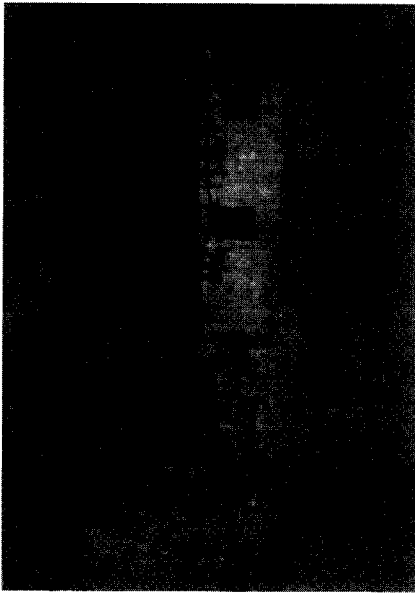
ซึ่ง singular value matrix จะนำไปหาความถี่ทางธรรมชาติของโครงสร้าง และ left singular matrix กับเฟสของ จะนำไปหารูปร่างของการสั่นสะเทือน ค่าของ singular value จะนำไปสร้างกราฟบนแกน Y ในแบบมาตราส่วนธรรมดาหรืออาจใช้ log scale เพื่อจะให้เห็น ความถี่ทางธรรมชาติที่มีขนาดต่ำ ๆ ส่วนแกน X จะเป็นแกนของความถี่ จุดยอดของกราฟนี้จะแสดงถึงความถี่ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้น

6. การดำเนินการทดสอบเมื่อมีความเสียหายของโครงสร้างในห้องปฏิบัติการ

ในการทดลองได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อจะหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความรุนแรงของความเสียหายกับผลของความเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของการสั่นสะเทือน รวมทั้งดัชนีโกบอลเฟลกซิบิลิตีที่ได้อธิบายไปแล้วในสมการข้างต้น ในการทดลองนี้ได้กระทำบนโครงสร้างตัวอย่างหลายประเภท เช่น คานเหล็ก คานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานคอนกรีตอัดแรง แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก เสาเหล็ก เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ระดับของความเสียหายที่ทำให้เกิดขึ้นในโครงสร้างตัวอย่างกระทำสามารถโดยการตัดโครงสร้างออกบางส่วน ทำให้โมเมนต์อินเนอร์เซียมีค่าลดลงตามความลึกของการตัด การเร่งให้เกิดสั่นในเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 การเตรียมแท่งทดสอบสำหรับเร่งให้เกิดสั่นในเหล็กเสริม

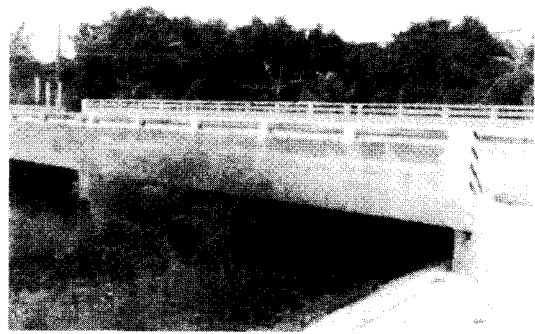


รูปที่ 5 ตัวอย่างแท่งทดสอบเมื่อเกิดสนิมในเหล็กเสริม

จากผลการทดลองเราอาจพอสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของควมดีทางธรรมชาติและรูปร่างมีค่าน้อยมากหรืออาจไม่เปลี่ยนแปลงเลย จากผลของการทดสอบเหล่านี้ชี้ชัดว่าจำเป็นต้องพัฒนาดัชนีขึ้นมาใหม่ โดยสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงได้ไว เมื่อโครงสร้างนั้นมีการเปลี่ยนสภาพและน่าจะเกิดจากการคำนวณร่วมกันในแต่ละความดีทางธรรมชาติและรูปร่างของมัน ซึ่งในที่นี้ คือ ดัชนีโบทอลเฟลกชิบิลิตี ตามที่นิยามไว้ข้างต้น

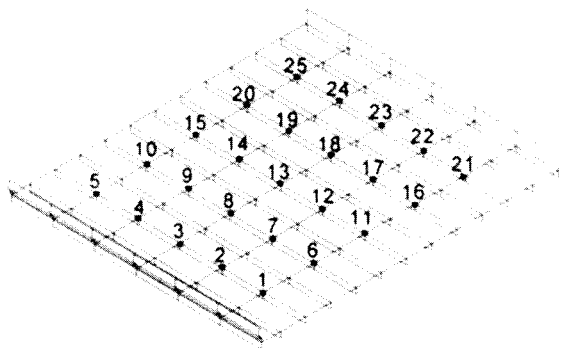
7. การประยุกต์ใช้กับโครงสร้างจริง

หลังจากการทดสอบในห้องทดลองได้ถูกพัฒนาขึ้นจนกระทั่งเกิดความเชื่อถือได้ทั้งรายละเอียดของการติดตั้งเครื่องมือและการประมวลผลที่ต้องการ การทดสอบในสนามก็ดำเนินการขึ้น โดยทุกครั้งที่จะมีการทดสอบในสนามจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือก่อน ตัวอย่างของโครงสร้างในสนามคือสะพานคอนกรีตอัดแรงเพราะเป็นสะพานที่มีจำนวนมากในประเทศไทย และถูกสร้างขึ้นในรูปแบบมาตรฐานอันเดียวกัน ในรูปที่ 6 แสดงภาพของสะพานแห่งหนึ่งจากจำนวนหลายแห่งที่ทำการทดสอบ

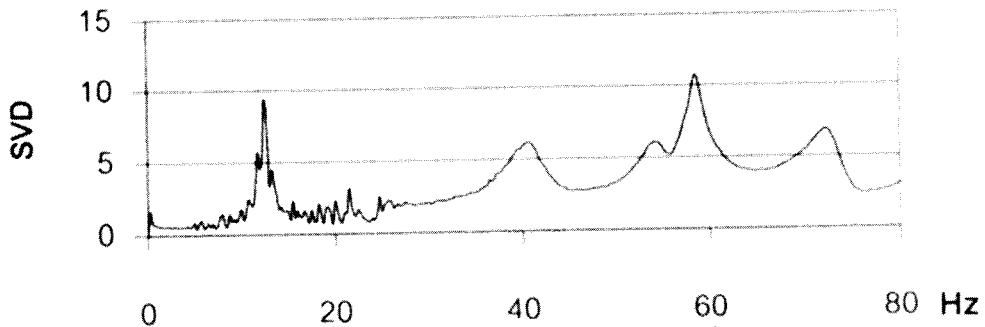
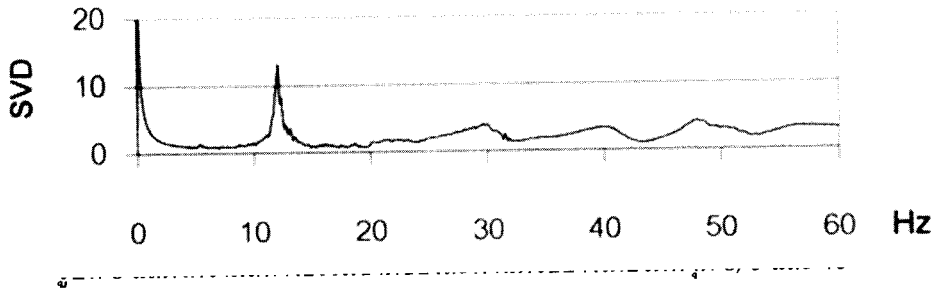


รูปที่ 6 แสดงรูปร่างทั่วไปของสะพานตัวอย่าง

ในรูปที่ 7 แสดงตำแหน่งของการติดตั้ง เครื่องวัดความเร่ง บนสะพานซึ่งจะกระจายไปเต็มผิวการจราจร ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองอาจมีจำนวนมากกว่าความต้องการแต่ก็เป็นผลดีในด้านการทดแทนการทดลองในบางครั้งที่มีผลการทดลองไม่ชัดเจน โดยการทดลองในแต่ละครั้งจะมีการติดตั้งเครื่องวัดความเร่งสามตำแหน่งและใช้หมอนกระตุ้นเคาะใกล้กับตำแหน่งทั้งสามนี้ หลังจากการติดตั้งทุกอย่างเรียบร้อยแล้วรวมทั้งการต่อสายดิน การทดลองและการประมวลผลก็ปฏิบัติเช่นเดียวกับในห้องทดลองที่กล่าวมาแล้ว ในรูปที่ 8 นี้แสดงผลที่ได้จากการประมวลผลโดยวางเครื่องวัดความเร่ง ที่ตำแหน่ง 8, 9 และ 10 จากนั้นเคาะที่ตำแหน่ง 10 ส่วนในรูปที่ 9 แสดงผลที่ได้จากการวาง เครื่องวัดความเร่ง ที่ตำแหน่งที่ 13, 14 และ 15 และเคาะที่ตำแหน่งที่ 15



รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องวัดความเร่ง



รูปที่ 9 แสดงความถี่ทางธรรมชาติของสะพานตัวอย่างโดยวัดที่จุด 13, 14 และ 15

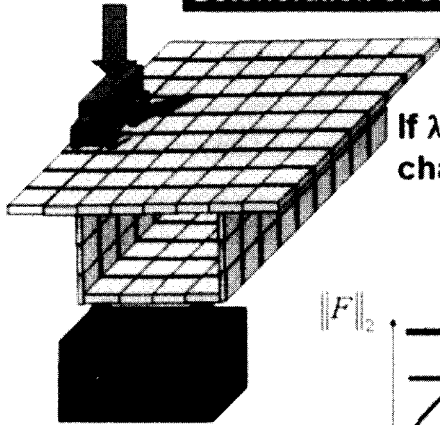
7. การนำดัชนีโอบอลเฟลกซิบลิตี ไปใช้ประโยชน์กับโครงสร้างจริง

ดัชนีโอบอลเฟลกซิบลิตีของสะพานตัวอย่างนี้ ก็ถูกคำนวณขึ้นตามหลักการเดียวกับที่ใช้ในสมการที่ (15) ซึ่งค่านี้ได้แก่ 6.39×10^8 เมตรต่อวินาที ค่านี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงอันจะเกิดขึ้นในอนาคต ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงค่า ดัชนีโอบอลเฟลกซิบลิตี เกิดขึ้น แสดงว่าโครงสร้างนั้นมีการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรง ทำให้ต้องตรวจสอบโดยละเอียด หากผลจากการตรวจสอบโดยละเอียดชี้ชัดว่าโครงสร้างมีความเสื่อมสลายถึงขั้นต้องบำรุง

รักษา ก็จะทำให้เกิดการปฏิบัติต่อโครงสร้างสะพานนี้ได้ ในระยะเบื้องต้นของการเสื่อมสลายอันจะประหยัดงบประมาณและป้องกันอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้น

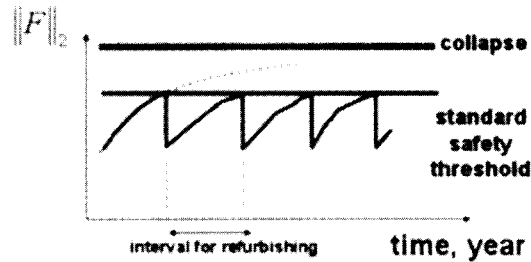
ถ้าข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าของ ดัชนีโอบอลเฟลกซิบลิตีนี้ ได้ถูกบันทึกเป็นเวลาต่อเนื่อง (health monitoring) ก็จะทำให้ได้แนวโน้มของการปฏิบัติต่อโครงสร้างในด้านระยะเวลาที่ควรจะทำเนิ่นการตรวจสอบ ระยะเวลาที่จะซ่อม ในรูปที่ 10 แสดงหลักการดังกล่าวนี้

Deterioration of Structure → [F] increases



If $\lambda_i (i=1,n)$ is variables of changes, then

$$[F(\lambda_i)] \{ R \} = \{ r \}$$



รูปที่ 10 ดัชนีโกบอลเฟลกชิบิลิตีเพื่อตรวจสอบสภาพโครงสร้าง

ในการตรวจสอบโครงสร้างทั่วไปควรมีการบันทึก ดัชนีโกบอลเฟลกชิบิลิตี ประกอบไปด้วยทุกครั้ง การตรวจสอบโครงสร้างนั้นว่าจะมีความสมบูรณ์เพียงพอที่จะใช้งานได้หรือไม่เพียงใด จะต้องมีการวิเคราะห์ในอีกขั้นหนึ่ง สำหรับโครงสร้างสะพานที่ใช้เป็นตัวอย่างนี้ ในการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ได้มีการพัฒนาการมาเป็นการทำ Structural Identification (Aktan and etc, 1993) โดยใช้ Finite Element Model (FE Model) ที่สามารถใช้เป็นตัวแทนพฤติกรรมของโครงสร้างที่มีอยู่จริง สำหรับ FE Model นี้จะได้รับการปรับพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อ

โครงสร้างเพื่อให้ได้ค่าตรงกับการหาเฟลกชิบิลิตีจากที่อธิบายมาแล้วข้างต้น เพื่อพิสูจน์ให้เห็นว่า FE Model นี้ใช้ได้จริง จึงได้มีการวางรบบรรทุกจริงบนสะพานและวัดการโก่งตัวที่เกิดขึ้น นำผลที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับการใช้ FE Model โดยใช้น้ำหนักขนาดเดียวกันวางลงบน FE Model ผลปรากฏว่าผลที่ได้จากการวัดการโก่งตัวในสนามกับการโก่งตัวโดยใช้ FE Model นั้นมีความถูกต้อง ในรูปที่ 11 แสดงการติดตั้ง displacement transducer ไว้ที่ท้องสะพานในขณะที่ข้างบนมีรถบรรทุกจอดอยู่บนสะพาน



รูปที่ 11 แสดงการติดตั้ง displacement transducer ไว้ที่ท้องสะพาน

8. สรุป

ในการวัดการตอบสนองของโครงสร้างโดยอาศัยตรวจสอบพฤติกรรมการสั่นภายในโครงสร้างด้วยเครื่องจับวัดความเร่ง สัญญาณดังกล่าวถูกส่งต่อไปยังเครื่องขยายสัญญาณซึ่งต่อกับเครื่องอ่านต่อเนื่องอัตโนมัติความถี่สูง และบันทึกลงในหน่วยเก็บความจำของคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปแปลงเป็นโดเมนความถี่ ในขณะที่มีการวัดการตอบสนองของโครงสร้างก็จะมี การวัดขนาดของแรงที่ไปกระตุ้นโครงสร้างข้อมูลนี้จะถูก

นำไปแปลงเป็นโดเมนความถี่เช่นกันเพื่อนำข้อมูล ที่มาจากการตอบสนองของโครงสร้างและขนาดของแรงที่ไปกระตุ้นโครงสร้างคำนวณร่วมกัน อันจะได้ มาของ ดัชนีโอบอลเพลกซิบิลิตีที่ใช้ในการติดตาม การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง นับว่าเป็นดัชนีที่มี ประสิทธิภาพในการวัดการเปลี่ยนแปลงของ โครงสร้างและเป็นประโยชน์ในการหาช่วงเวลาและ ความถี่ในการเฝ้าติดตามความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ก่อนที่โครงสร้างจะเกิดความเสียหายและพังทลาย

เอกสารอ้างอิง

- [1] AASHTO Manual, 1994. *Manual for Condition Evaluation of Bridges*. Washington, D.C.
- [2] Abdel-Gaffar, A.M., and Housner, G.W., 1978. Ambient Vibration Tests of Suspension Bridge. *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE* Vol. 104, No. EM5: 983-999.
- [3] Aktan, A.E., Chuntavan, C., Lee, K., and Toksoy, T., 1993. Structural Identification of a steel stringer bridge. *Transportation Research Record*.
- [4] Harris, Cyril M., 1995. *Shock and Vibration handbook*. Forth Edition, Mcgraw Hill.
- [5] Patjawit, A. 2005, *Structural Identification of Concrete Girder Bridge for Strength Evaluation*, D.Eng. Dissertation, Asian Institute of Technology, Thailand.
- [6] Dunker, K.F. and Rabbat B.G., 1993. Why America's bridges are crumbling. *Scientific American*, March. 66-72.
- [7] McLamore, V.R., Hart, G.C., and Stubbs, I.R., 1971. Ambient Vibrations of Two Suspension Bridges. *Journal of Structural Division, ASCE*. Vol. 97, No. 10: 2567-2582.
- [8] Salawu, O. S., and Williams C., 1995. Bridge Assessment Using Forced-Vibration Testing. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. Vol. 121, No2: 161-173.