

การบ่งชี้ระบบและการคาดการณ์ผลการตอบสนองของโครงสร้างที่เสื่อมสภาพ ด้วยวิธีเจเนติกเอโวลูชัน

System Identification and Response Prediction of Degrading Structures by Genetic Evolution

นภดนัย อาชวาคม^{1*}, ชิง เจิง² และ ไฟ หมา²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแห่งแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ สหรัฐอเมริกา

*ผู้ติดต่อ: E-mail nopdanai.a@chula.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-2218-6626, เบอร์โทรสาร 0-2252-2889

บทคัดย่อ

การขาดซึ่งทฤษฎีพื้นฐานของฮิสเทอรีซิส (hysteresis) เป็นอุปสรรคสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหว ลมกรรโชก และคลื่นทะเล การพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพให้ใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบจริงจึงเป็นงานที่สำคัญ บทความนี้มีวัตถุประสงค์สองอย่างคือ หนึ่ง สร้างอัลกอริทึมบ่งชี้ระบบสำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์ในสมการดิฟเฟอเรนเชียลของแบบจำลองฮิสเทอรีซิส โดยใช้ผลการทดลองเส้นภาระงาน (load) กับการกระจัด (displacement) อัลกอริทึมนี้ใช้พื้นฐานของเจเนติกเอโวลูชัน (genetic evolution) และการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวแบบกโบล (global sensitivity analysis) สอง แสดงการใช้ระบบในการคาดการณ์ผลตอบสนองชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้าง ถ้าแบบจำลองฮิสเทอรีซิสได้ถูกกำหนดขึ้นจากเส้นภาระงานกับการกระจัดแล้ว เราสามารถแสดงผ่านการทดสอบได้ว่าแบบจำลองนี้ใช้คาดการณ์ผลตอบสนองของระบบเดียวกันที่ได้รับภาระแบบวัฏจักรชนิดอื่นได้ บทความนี้ได้ชี้ถึงสิ่งจำเป็นสำหรับการคาดการณ์ที่ถูกต้อง

คำหลัก: การบ่งชี้ระบบ, ฮิสเทอรีซิส, โครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพ, ผลตอบสนองชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

Abstract

The absence of a fundamental theory of hysteresis is a major obstacle for designing degrading structures due to earthquakes, gusty winds, and sea waves. Development of a model of a degrading structure that matches the experimental results is an important task. This paper has two objectives. The first one is to set up a system identification algorithm to estimate the parameters in a differential hysteresis model from experimental load-displacement curves. This algorithm is based on the concept of genetic evolution and global sensitivity analysis. The second objective is to show the use of identification model to predict the nonlinear response, which is important in structural design. If the hysteretic model is generated with a given load-displacement curve, it can be shown experimentally that this model can

predict the response of the same system subjected to other cyclic loads. This paper also addresses the requirements for accurate prediction.

Keywords: System Identification, Hysteresis, Degrading Structures, Nonlinear Response

1. บทนำ

โครงสร้างจะเสื่อมสภาพเมื่อได้รับแรงแบบวัฏจักร เช่นแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหว ลมกรรโชก และคลื่นทะเล เป็นต้น การบ่งชี้และการคาดการณ์การเสื่อมสภาพนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในทางวิศวกรรมโครงสร้าง ทั้งนี้การเสื่อมสภาพของโครงสร้างเมื่อได้รับแรงวัฏจักรจะแสดงออกมาอยู่ในรูปแบบของวงแหวนฮิสเทอรีซิส

หลายปีที่ผ่านมาได้มีการทดสอบสมรรถภาพของข้อต่อโครงสร้าง ในเวลาเดียวกันนั้นได้มีการใช้ สมการดิฟเฟอเรนเชียลของแบบจำลองฮิสเทอรีซิสของ Bouc-Wen สำหรับการทำ curve fitting เส้นฮิสเทอรีซิสโดยใช้พารามิเตอร์จำนวน 13 ตัว [1,2] เราสามารถใช้สมการดิฟเฟอเรนเชียลของแบบจำลองฮิสเทอรีซิสและผลการทดสอบเส้นวงแหวนฮิสเทอรีซิสมาใช้ในการบ่งชี้ระบบที่ศึกษาได้

บทความนี้จะแสดงอัลกอริทึมเพื่อหาสมการดิฟเฟอเรนเชียลของแบบจำลองฮิสเทอรีซิสสำหรับโครงสร้างที่เสื่อมสภาพโดยใช้เส้นภาระงานกับการกระจัด และจะแสดงว่าสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้คาดการณ์สมรรถภาพของโครงสร้างดังกล่าวได้ เนื้อหาในบทความจะเริ่มจาก ตอนที่ 2 ซึ่งอธิบายสมการดิฟเฟอเรนเชียลของแบบจำลองฮิสเทอรีซิสของ Bouc-Wen ที่นำมาใช้ ส่วน อัลกอริทึมสำหรับบ่งชี้ระบบได้นำมาแสดงในตอน 3 เพื่อสร้างแบบจำลองฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างเสื่อมสภาพ โดยที่อัลกอริทึมนี้ใช้พื้นฐานของสมการดิฟเฟอเรนเชียลและเจเนติกเอโวลูชัน รวมทั้งการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวแบบกโบล แบบจำลองนี้ยังสามารถแสดงการ pinching ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของโครงสร้างเสื่อมสภาพได้อีกด้วย ตอนที่ 4 แสดงการทดสอบกับโครงสร้างไม้ที่มีข้อต่ออย่างง่าย จากนั้น แบบจำลองฮิสเทอรีซิสได้ถูกกำหนดขึ้นจากเส้นภาระงานกับการกระจัด และนำไป ใช้บ่งชี้

ค่าพารามิเตอร์ของระบบ เพื่อใช้คาดการณ์ผลการตอบสนองของโครงสร้างของระบบเดียวกันที่ได้รับภาระแบบวัฏจักรชนิดอื่นได้

2. แบบจำลองของ Bouc-Wen

เมื่อโครงสร้างได้รับภาระแบบวัฏจักร รูปแบบของวงแหวนฮิสเทอรีซิสจะไม่ขึ้นอยู่กับการเสียรูปในขณะนั้นเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับการเสียรูปที่เกิดขึ้นก่อนหน้าอีกด้วย สมการดิฟเฟอเรนเชียลของแบบจำลองฮิสเทอรีซิสของ Bouc-Wen เป็นสมการหนึ่งที่น่าสนใจในปัจจุบัน

สมมติให้สมการการเคลื่อนที่ของระบบเป็นดังนี้คือ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + r(x, z) = F_{ext}(t) \quad (1)$$

โดยที่ x คือการกระจัดของระบบ, z คือการกระจัดฮิสเทอรีซิส, $r(x, z)$ คือแรงคืนตัว, $F_{ext}(t)$ คือแรงภายนอก และ m, c คือ มวล และค่าคงที่การแดมป์ตามลำดับ ค่าแรงคืนตัว $r(x, z)$ แบ่งได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนยืดหยุ่นและส่วนฮิสเทอรีซิสดังสมการ

$$r(x, z) = \alpha kx + (1 - \alpha)kz \quad (2)$$

โดยที่ k คือค่าคงที่ความแข็ง (stiffness constant) และ $0 \leq \alpha \leq 1$ คือค่าพารามิเตอร์สัดส่วน (weighting parameter) ถ้าแรงคืนตัวเป็นฮิสเทอรีซิสล้วนจะได้ $\alpha = 0$ และ ถ้าแรงคืนตัวเป็นแบบยืดหยุ่นล้วนจะได้ $\alpha = 1$ วงแหวนฮิสเทอรีซิสเกิดจากการวาดกราฟระหว่าง การกระจัดฮิสเทอรีซิส z และการกระจัด x โดยมีความสัมพันธ์กันคือ [1,2]

$$\dot{z} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}|z^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n \quad (3)$$

โดยที่สมการ (2) และ (3) มีพารามิเตอร์จำนวนห้าตัวคือ $A, \alpha, \beta, \gamma,$ และ n เป็นสมการตั้งเดิมของ Bouc-Wen สมการตั้งเดิมนี้ได้ถูกเพิ่มเติมในส่วนของพารามิเตอร์ที่ใช้บอกรูปร่างของวงแหวนฮิสเทอรีซิสสำหรับโครงสร้างเสื่อมสภาพ โดยมีพารามิเตอร์รวมทั้งหมด 13 ตัว โดยที่

$$\dot{z} = h(z) \left\{ \frac{A\dot{x} - v(\beta|\dot{x}|z|^{n-1}z + \gamma\dot{x}|z|^n)}{\eta} \right\} \quad (4)$$

ในสมการข้างบน v และ η เป็นฟังก์ชันการเสื่อมสภาพ [3] และ $h(z)$ เป็นฟังก์ชันการ pinching [4] ปรกติแล้วการเสื่อมสภาพขึ้นอยู่กับระยะเวลาและความรุนแรงของแรงที่กระทำ โดยสามารถวัดได้โดยพลังงานที่สูญเสียไประหว่างเวลาเริ่มต้น $t = 0$ วินาที ถึงเวลา t

$$E(t) = \int_0^t (1 - \alpha)kz\dot{x}dt \quad (5)$$

เนื่องจาก

$$\varepsilon(t) = \int_0^t z\dot{x}dt \quad (6)$$

มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ $E(t)$ เราจึงจะนำมันมาใช้แทน สมมุติให้การเสื่อมสภาพของระบบขึ้นอยู่กับ $\varepsilon(t)$ พารามิเตอร์การเสื่อมสภาพจึงได้ถูกกำหนดขึ้นคือ

$$v(\varepsilon) = 1 + \delta_v \varepsilon \quad (7)$$

$$\eta(\varepsilon) = 1 + \delta_\eta \varepsilon \quad (8)$$

ฟังก์ชัน pinching $h(z)$ อยู่ในรูป

$$h(z) = 1 - \zeta_1 e^{-[z \operatorname{sgn}(\dot{x}) - qz_u]^2 / \zeta_2^2} \quad (9)$$

โดยที่ $\operatorname{sgn}(\dot{x})$ คือ ฟังก์ชันซิกนัม (signum) ของ \dot{x} และ z_u เป็นค่าสุดยอดของ z ซึ่งกำหนดโดย

$$z_u = \left(\frac{A}{v(\beta + \gamma)} \right)^{1/n} \quad (10)$$

ฟังก์ชัน $\zeta_1(\varepsilon)$ และ $\zeta_2(\varepsilon)$ ควบคุมการ pinching

$$\zeta_1(\varepsilon) = \zeta_s [1 - e^{(-p\varepsilon)}] \quad (11)$$

$$\zeta_2(\varepsilon) = (\psi + \delta_\psi \varepsilon)(\lambda + \zeta_1) \quad (12)$$

พารามิเตอร์ pinching ทั้งหมด 6 ตัวจึงมี $\zeta_s, q, p, \psi, \delta_\psi, \lambda$ และพารามิเตอร์รวมทั้งหมดมี 13 ตัวคือ $A, \alpha, \beta, \gamma, n, \delta_v, \delta_\eta, \zeta_s, q, p, \psi, \delta_\psi$ และ λ ซึ่งถึงลักษณะที่สำคัญต่างๆ คือ การเสื่อมสภาพทางความแข็งแรง, ทางความแข็ง , และทาง pinching หน้าที่ต่างๆ ของพารามิเตอร์เหล่านี้ และลำดับความอ่อนไหวแบบกโบบอล [5] ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 การบ่งชี้ระบบจะใช้พารามิเตอร์ส่วนหนึ่งของทั้งหมด 13 ตัวดังจะอธิบายต่อไป

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสมการดิฟเฟอเรนเชียลของแบบจำลองฮีสเทอรีซิส และลำดับความอ่อนไหวแบบกโบบอล

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ลำดับความอ่อนไหว (มากที่สุด = 1)
α	อัตราส่วนระหว่างผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นต่อที่ไม่เป็นเชิงเส้น	2
A	ควบคุมรูปร่างของฮีสเทอรีซิส	ไม่ได้เปลี่ยนแปลง
β	ควบคุมรูปร่างของฮีสเทอรีซิส	4
γ	ควบคุมรูปร่างของฮีสเทอรีซิส	5
n	Sharpness of yield	7
δ_v	Strength degradation	9
δ_η	Stiffness degradation	8
ζ_s	Measure of total slip	1
q	Pinching initiation	6
p	Pinching slope	10
ψ	Pinching magnitude	3
δ_ψ	Pinching rate	12
λ	Pinching severity	11

3. การบ่งชี้ระบบ

ผลการตอบสนองสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองของระบบและการกระตุ้นที่ใส่ ซึ่งสิ่งนี้เรียกว่าการแก้ปัญหาแบบไปข้างหน้า (forward) ในทางตรงกันข้าม การแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ (inverse) คือการหาแบบจำลองของระบบเมื่อทราบการกระตุ้นและผลการตอบสนอง ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นการบ่งชี้ระบบนั่นเอง การบ่งชี้ระบบเกี่ยวข้องกับการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ได้กำหนดขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องใช้การ optimization สำหรับการศึกษานี้ ก็คือการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 13 ตัวจากเส้นภาระงานกับการ

การจัดนั้นเอง การ optimization คือการหาค่า
 เวกเตอร์พารามิเตอร์

$$\mathbf{p} = (A, \alpha, \beta, \gamma, n, \delta_v, \delta_\eta, \zeta_s, q, p, \psi, \delta_\psi, \lambda) \quad (13)$$

ที่ทำให้ฟังก์ชันออปเจกทีฟ (objective)

$$g(\mathbf{p}) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [x(t_j) - \hat{x}(t_j | \mathbf{p})]^2 \quad (14)$$

มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ M คือจำนวนจุดของเวลา t_j
 คือลำดับของเวลา และ $x(t_j)$ คือการกระจัด ณ เวลา
 t_j ในทางตรงข้าม $\hat{x}(t_j | \mathbf{p})$ คือ การกระจัด ณ เวลา
 t_j ที่คำนวณมาจากสมการ (1) และ (4) เมื่อเวกเตอร์
 พารามิเตอร์คือ \mathbf{p} ฟังก์ชันออปเจกทีฟด้านบนคือ
 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (mean square
 error) นั้นเอง โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ทุกตัวยกเว้น
 γ มีค่าเป็นบวกเสมอ [5]

3.1 การลดจำนวนพารามิเตอร์

หนึ่งในจำนวนพารามิเตอร์จำนวน 13 ตัวใน
 สมการดิฟเฟอเรนเชียลสามารถใส่ให้เป็นค่าคงที่ได้
 โดยที่ไม่ทำให้การผลการบ่งชี้ระบบเปลี่ยนไป [5] เรา
 จึงให้ $A = 1$ การลดจำนวนของพารามิเตอร์ทำให้การ
 หาค่าพารามิเตอร์ที่เหลือทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้
 นี้ยังพบอีกด้วยว่ามีพารามิเตอร์จำนวน 3 ตัวที่มีค่า
 ความอ่อนไหวน้อยมาก [5] หมายความว่า การเปลี่ยนแปลง
 แปลงของพารามิเตอร์นี้ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการ
 บ่งชี้ระบบน้อยมาก พารามิเตอร์เหล่านี้คือ δ_v , δ_ψ
 และ λ เราจึงลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการหา
 เหลือเพียงแค่ 9 ตัวก่อนซึ่งทำให้เวกเตอร์พารามิเตอร์
 คือ

$$\mathbf{p}_1 = (\alpha, \beta, \gamma, n, \delta_\eta, \zeta_s, q, p, \psi) \quad (15)$$

หลังจากได้ \mathbf{p}_1 อย่างคร่าวแล้ว จึงนำค่ามาใส่ใน

$$\mathbf{p}_2 = (\alpha, \beta, \gamma, n, \delta_v, \delta_\eta, \zeta_s, q, p, \psi, \delta_\psi, \lambda) \quad (16)$$

เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ให้ครบ 12 ตัวและแม่นยำต่อไป

3.2 อัลกอริทึม optimization แบบไม่เป็นเชิงเส้น

เทคนิคที่ใช้สำหรับการแก้โจทย์ optimization ที่
 ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีการบ่งชี้ระบบฮิสเทอรีซิสมีหลาย
 แบบ ซึ่งแต่ละแบบมีความสามารถในการแก้โจทย์
 ต่างๆ กันไปตามแต่ฟังก์ชันออปเจกทีฟและข้อบังคับ
 (constraints) เทคนิคการหาผลเฉลยแบ่งได้เป็นแบบ

โลคอล (local) และกโอบอล (global) การหาผลเฉลย
 แบบโลคอล เป็นการหาด้วยหลักการการขยับเข้าสู่ค่า
 ต่ำสุดของฟังก์ชันออปเจกทีฟโดยใช้เกรเดียน
 (gradient) หรือ เมทริกซ์เฮสเซียน (Hessian matrix)
 ทั้งนี้เทคนิคชนิดนี้อาจจะหาค่าต่ำสุดได้เฉพาะช่วง
 นั้นๆ แต่อาจจะไม่สามารถหาจุดต่ำสุดโดยรวมของ
 ประชากรพารามิเตอร์ทั้งหมดได้

เทคนิคแบบกโอบอลใช้วิธีการหาผลเฉลยจากประ
 ชากรทั้งหมด เช่นวิธึแบบวิวัฒนาการ (evolution) ซึ่ง
 เป็นการหาผลเฉลยจากประชากรทั้งหมดผ่านทางเวก
 เตอร์ที่เก็บค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปได้ที่ควรจะเป็นผล
 เฉลยของโจทย์ โดยเลียนแบบการวิวัฒนาการของ
 สิ่งมีชีวิตที่ว่าผู้ที่แข็งแรงกว่าและสามารถปรับตัวกับ
 สภาพแวดล้อมได้จะอยู่รอด ในกระบวนการหาผล
 เฉลยของเทคนิคนี้ กลุ่มของเวกเตอร์ที่เก็บค่าพารา
 มิเตอร์จะถูกสร้างขึ้นจากกลุ่มของเวกเตอร์ชุดก่อน
 หน้า โดยที่มีการคัดเลือกและปรับค่าพารามิเตอร์ให้
 เหมาะสมยิ่งขึ้นในแต่ละครั้งผ่านการสุ่มเลือกค่าพารา
 มิเตอร์ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันออปเจกทีฟมีค่าลดลงตามที่
 ต้องการตามวิธึ optimization เมื่อผ่านกระบวนการนี้
 ซ้ำๆ เราจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับผล
 เฉลยได้มากขึ้นๆ เทคนิคแบบกโอบอลนี้ดีกว่าเทคนิค
 แบบโลคอลเพราะสามารถดโอกาสการได้จุดต่ำสุด
 เฉพาะช่วงได้มาก อย่างไรก็ตามเทคนิคแบบกโอบอล
 ปรกติจะใช้เวลาในการหาผลเฉลยมากกว่าแบบโลคอล
 เทคนิคแบบกโอบอลที่นิยมใช้ได้แก่ genetic
 algorithms, differential evolution และอื่นๆ

3.3 Differential Evolution

Differential evolution เป็นวิธึที่ค่อนข้างใหม่และมี
 ประสิทธิภาพสูงสำหรับการหาผลเฉลยของฟังก์ชันที่
 ไม่เป็นเชิงเส้น [6] ซึ่งสำหรับกรณีนี้เหมาะสมกับการ
 บ่งชี้พารามิเตอร์ฮิสเทอรีซิสของแบบจำลอง Bouc-
 Wen [7]

สมมุติให้ K เป็นขนาดของเวกเตอร์พารามิเตอร์
 \mathbf{p} ในสมการ (13) และให้ในแต่ละขั้นตอนของ
 กระบวนการมีประชากรทั้งหมด P เวกเตอร์ ชุดของ
 เวกเตอร์พารามิเตอร์จะถูกสร้างขึ้นใหม่ทุกๆ ครั้งของ
 กระบวนการ differential evolution เพื่อที่จะให้

เวกเตอร์นี้มีค่าพารามิเตอร์ที่ใกล้กับผลเฉลยของฟังก์ชันในแต่ละครั้ง กระบวนการของ differential evolution มี 4 ขั้นตอนหลักๆ คือ

3.3.1 การเริ่มต้น (Initialization)

ประชากรของเวกเตอร์พารามิเตอร์ในครั้งแรกสุด ถูกเลือกมาโดยสุ่มโดยพิจารณาจาก ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปได้ ถ้าพารามิเตอร์ค่าใดสามารถกำหนดเองได้ใกล้เคียงกับค่าผลเฉลย เราสามารถกำหนดให้เป็นจุดเริ่มต้นเพื่อที่จะได้หาผลเฉลยได้รวดเร็ว

3.3.2 การมิวเทท (Mutation)

สมมติถ้าเวกเตอร์พารามิเตอร์ทั้งหมด P ตัวในรุ่น (generation) G ถูกสร้างขึ้นมาแล้ว กำหนดให้เวกเตอร์เหล่านี้คือ $\mathbf{v}_{i,G}$ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, P$ และมีขนาด K ให้เวกเตอร์ที่มีมิวเททแล้วในแต่ละรุ่นเป็น \mathbf{w} โดยที่ \mathbf{w} เกิดจากเวกเตอร์ 3 ตัวมาคำนวณดังนี้

$$\mathbf{w} = \mathbf{v}_{r_3,G} + F(\mathbf{v}_{r_1,G} - \mathbf{v}_{r_2,G}) \quad (17)$$

โดยที่ $0 < r_1, r_2, r_3 \leq P$ เป็นเลขจำนวนเต็มที่แตกต่างกัน และถูกเลือกมาโดยสุ่ม และ $0 < F \leq 1$ เป็นแฟกเตอร์ค่าคงที่ค่าหนึ่งที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า

3.3.3 ครอสโอเวอร์ (Crossover)

การครอสโอเวอร์ระหว่าง $\mathbf{v}_{i,G}$ และ \mathbf{w} ช่วยเพิ่มความหลากหลายของประชากร เริ่มต้น ตัวเลขสุ่ม (random numbers) จะถูกเลือกขึ้นมา z_1, z_2, \dots, z_K โดยที่มีค่าคงที่ครอสโอเวอร์เป็น $0 \leq CR \leq 1$

เวกเตอร์ทดลอง $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_K]^T$ สร้างขึ้นมาจาก

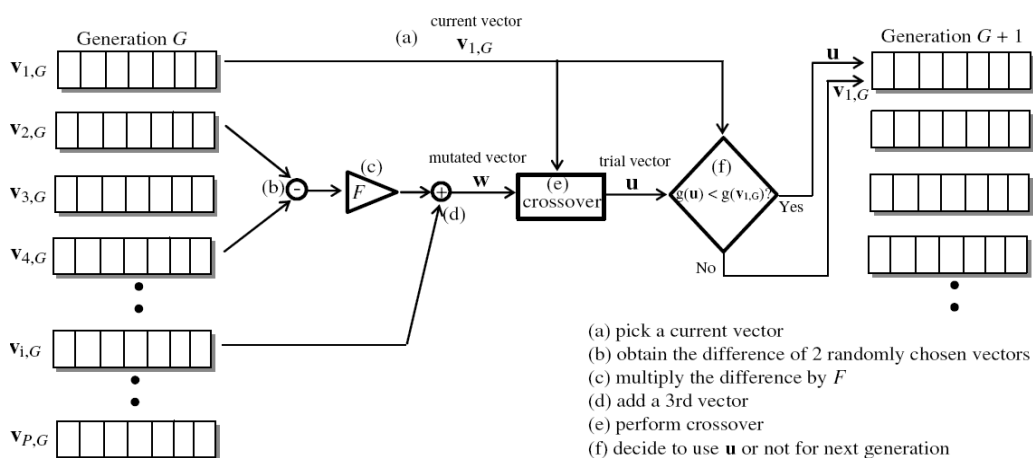
$$u_j = \begin{cases} w_j & \text{if } z_j \leq CR \\ (v_{i,G})_j & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

ค่าคงที่ครอสโอเวอร์ CR เป็นตัวช่วยเลือกว่าแต่ละค่าของเวกเตอร์ \mathbf{u} ควรจะมาจาก \mathbf{w} หรือ $\mathbf{v}_{i,G}$

3.3.4 การคัดเลือก (Selection)

การคัดเลือกเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสม เป็นแบบหนึ่งต่อหนึ่งผ่านทางค่าของฟังก์ชันออปเจกทีฟที่เวกเตอร์ทดลอง \mathbf{u} จะถูกเทียบกับเวกเตอร์ $\mathbf{v}_{i,G}$ ถ้าเวกเตอร์ \mathbf{u} ทำให้ค่าของฟังก์ชันออปเจกทีฟมีค่าน้อยลง เวกเตอร์นี้จะเป็น $\mathbf{v}_{i,G+1}$ ของรุ่นถัดไป ถ้าไม่เป็นเช่นนั้น $\mathbf{v}_{i,G+1}$ ก็เหมือนกักับ $\mathbf{v}_{i,G}$ กระบวนการมิวเทท ครอสโอเวอร์ และการคัดเลือกได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 กระบวนการนี้จะถูกทำซ้ำๆ กันเป็นจำนวน P ครั้ง แต่ครั้งก็จะได้ชุดของเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่ดีเหมาะสมขึ้นเรื่อยๆ

ในกระบวนการของอัลกอริทึม differential evolution ค่า P, F และ CR ต้องถูกกำหนดขึ้นก่อนการลู่เข้า (convergence) ของผลเฉลยขึ้นกับค่าเหล่านี้ไม่มากนัก [6] ในการทดสอบที่แสดงในบทความนี้ได้กำหนด $P = 100$, $F = 0.5$ และ $CR = 0.5$



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการของ Differential Evolution

4. การคาดการณ์สมรรถภาพ

อัลกอริทึมที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3 สามารถนำมาใช้หาแบบจำลองดิฟเฟอเรนเชียลของระบบที่เสื่อมสภาพได้โดยผ่านทางเส้นภาระและการกระจัด นอกจากนี้หลังจากระบบได้ถูกบ่งชี้แล้วแบบจำลองนี้ยังสามารถทำนายผลการตอบสนองของโครงสร้างเดียวกันแต่ได้รับภาระแบบวัฏจักรชนิดอื่นได้อีกด้วย เราทำการทดสอบโดยการสร้างโครงสร้างแบบข้อต่อที่เหมือนกันหลายๆ ชุดสำหรับภาระที่กระทำหลายแบบ เส้นภาระ - การกระจัดหนึ่งชุดสามารถนำไปใช้หาแบบจำลองฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างผ่านทาง การบ่งชี้ระบบ หลังจากนั้นระบบเดียวกันนี้ได้ถูกนำไปทำนายผลการตอบสนองสำหรับภาระชนิดอื่นได้ ผลการทำนายนี้จะได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงต่อไป

4.1 การทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปตัวที (T-connection) ประกอบด้วย แท่งไม้อัดคุณภาพสูง 2 แท่งซึ่งมีขนาดหน้าตัด 3.5x3.5 นิ้ว มีค่าอีลาสติกโมดูลัส (elastic modulus) 2.0×10^6 psi และแผ่นไม้อัดหนา 0.5 นิ้ว 2 แผ่น แผ่นไม้อัดสองแผ่นนี้ประกบเข้ากับแท่งไม้อัด 2 แท่งด้วยสกรูเหล็กยาว 2 นิ้วจำนวน 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2 ภาระได้ถูกใส่เข้ากับชิ้นงานทดสอบที่ตำแหน่งความสูง 36 นิ้วเหนือแท่งไม้แนวนอนตามรูป

ชิ้นงานได้ถูกทดสอบด้วยภาระที่เป็นวัฏจักรซ้ำๆ กัน ที่สามารถทำให้เกิดการสะสมของการเสื่อมสภาพของข้อต่อโครงสร้างได้ ภาระกระตุ้นนี้เป็นฟังก์ชันพหุนามที่มีค่าแอมพลิจูดต่างๆ กันเป็นเวลา 1000 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3 ค่าภาระกระตุ้นดังกล่าวนี้ ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นตัวแทนอย่างง่ายที่มีลักษณะใกล้เคียงกับภาระของแผ่นดินไหว

4.2 การบ่งชี้และการยืนยันระบบ

ชิ้นงานข้อต่อรูปตัวทีได้ถูกกระตุ้นด้วยภาระดังรูปที่ 3 และข้อมูลภาระ - การกระจัดได้ถูกบันทึกไว้และนำไปใช้หาแบบจำลองฮิสเทอรีซิสได้ คำถามที่เกิดขึ้นคือ 1. แบบจำลองฮิสเทอรีซิสที่ได้จากโหลด

หนึ่งๆ สามารถนำมาทำนายผลการตอบสนองของโครงสร้างเดิมภายใต้ภาระเดิมในอนาคตได้หรือไม่ และ 2. แบบจำลองฮิสเทอรีซิสที่ได้จากโหลดหนึ่งๆ สามารถนำมาทำนายผลการตอบสนองของโครงสร้างเดิมภายใต้ภาระที่แตกต่างได้หรือไม่

เมื่อนำเส้นภาระ-การกระจัดของการกระตุ้นตามรูปที่ 3 ที่เวลา 0 ถึง 500 วินาที มาเป็นข้อมูลในการบ่งชี้ระบบโดยที่เรากำหนดให้ $A=1$ แล้วนำมาหาค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เหลือ 12 ตัว เราจะได้แบบจำลองฮิสเทอรีซิสของระบบโครงสร้างนี้ แบบจำลองนี้สามารถนำมาทดลองใช้ทำนายผลการกระจัดของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบจริงดังที่แสดงในรูปที่ 4

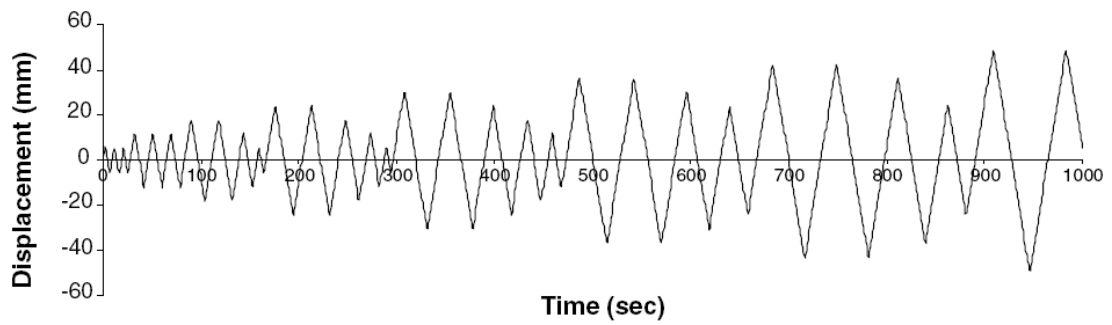
อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทำนายผลการทดสอบที่เวลามากกว่า 500 วินาที ผลที่ได้ต่างกับผลการทดสอบอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากแนวโน้มและลักษณะบางอย่างเช่น ค่า pinching ได้เปลี่ยนไปจากช่วง 500 วินาทีแรก อย่างไรก็ตามถ้าใส่อินพุตที่รวมเวลาทั้งหมดตั้งแต่ 0 ถึง 1000 วินาทีเพื่อการบ่งชี้ระบบแล้ว ผลการคำนวณที่ได้จากระบบดังกล่าวในช่วง 500 ถึง 1000 วินาทีจะใกล้เคียงกันมากขึ้นกว่าในกรณีแรก ถ้าทำการทดสอบไปเรื่อยๆ โดยการใส่ภาระเกินจาก 1000 วินาที จากการสังเกตโครงสร้างข้อต่อที่ใช้ทดสอบพบว่าข้อต่อเริ่มเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง และในที่สุดสกรูสองตัวที่ยึดด้านบนได้แตกหัก

นอกจากนี้ถ้าเราใช้แบบจำลองฮิสเทอรีซิสที่ได้จากภาระการกระตุ้นดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และแสดงในรูปที่ 3 มาใช้ทำนายการตอบสนอง (การกระจัด) ของโครงสร้างข้อต่อรูปตัวทีที่ได้จากการกระตุ้นแบบที่ต่างไปเช่นการกระตุ้นในรูปที่ 5 เมื่อผลการทำนายการกระจัดมาเทียบกับผลจากการทดสอบจริงกับโครงสร้างจะได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

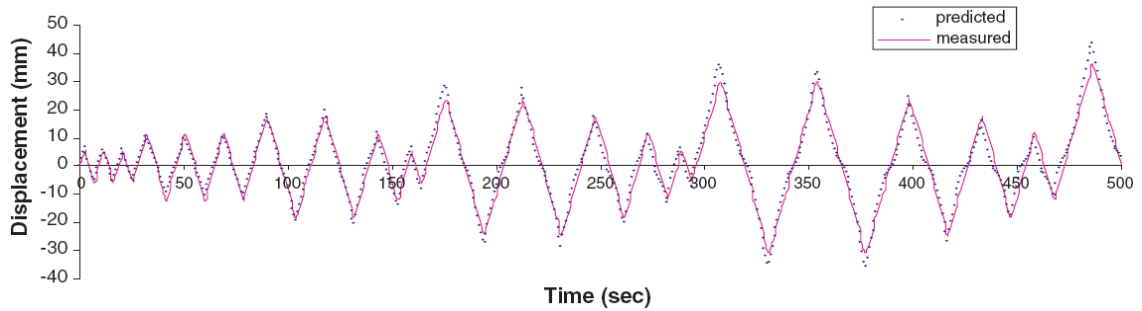
ฉะนั้นผลการสังเกตที่ได้ผลการทำนายการตอบสนองของระบบที่เกิดจากภาระอย่างหนึ่ง โดยที่ระบบนั้นได้ถูกบ่งชี้มาจากภาระอีกอย่างหนึ่ง จะมีความใกล้เคียงในระดับที่ดีก็ต่อเมื่อ ภาระทั้งสองมีแอมพลี



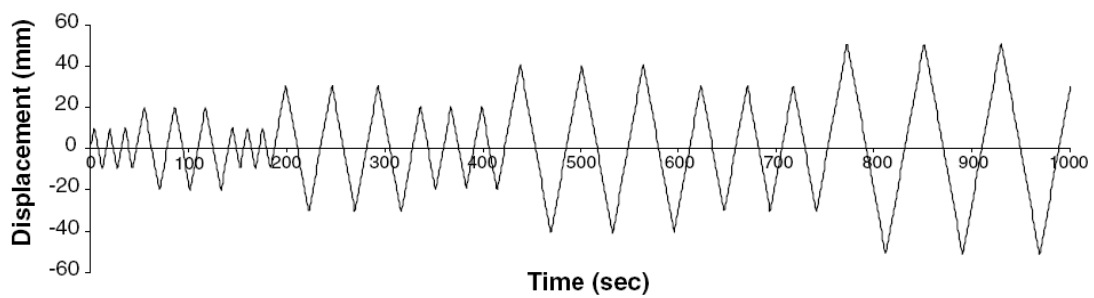
รูปที่ 2 การทดสอบชิ้นงาน



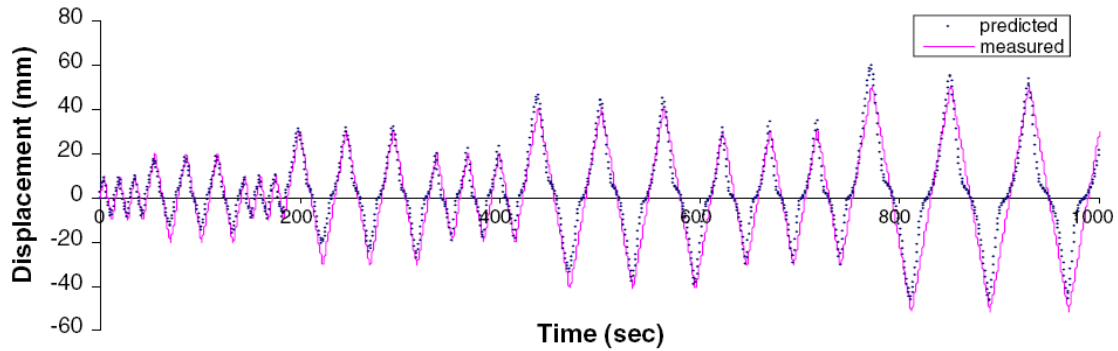
รูปที่ 3 รูปแบบการใส่ภาระกระตุ้นชิ้นงาน



รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลที่ได้จากการทดสอบจริง



รูปที่ 5 รูปแบบการใส่ภาระกระตุ้นชิ้นงานแบบที่ 2



รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลที่ได้จากการทดสอบจริงสำหรับการกระตุ้นแบบที่ 2

ทูดของการกระจัด และช่วงความถี่กระตุ้นใกล้เคียงกันซึ่งจะทำให้โครงสร้างมีการเชื่อมสภาพที่เทียบเคียงกันได้

5. สรุป

จุดประสงค์หลักของบทความนี้ เป็นการศึกษาวิธีการคาดการณ์สมรรถภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เชื่อมสภาพได้ เราสามารถแสดงให้เห็นว่า เราสามารถคาดการณ์ผลตอบสนองของระบบดังกล่าวได้เกินช่วงที่เป็นเชิงเส้นไปได้ดีโดยใช้สมการของ Bouc-Wen อัลกอริทึมบ่งชี้ระบบสามารถทำงานได้ผลในระดับที่น่าพอใจ โดยที่ ถ้าการกระตุ้นอินพุตที่ให้ได้ครอบคลุมคุณลักษณะที่สำคัญของโครงสร้างไว้ได้ เราจะสามารถทำนายผลที่เกิดจากการกระตุ้นแบบเต็มๆ ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงแบบจำลองที่ได้จากการบ่งชี้ระบบดังกล่าวยังสามารถนำไปทำนายผลที่เกิดจากการกระตุ้นแบบอื่นได้ถ้าโครงสร้างมีการเชื่อมสภาพที่พอกันกับที่ เกิดจากการกระตุ้นที่ใส่ไปแต่แรก

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนบางส่วนจาก National Science Foundation ประเทศสหรัฐอเมริกา ภายใต้หมายเลขกองทุน CMS-9908194

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Bouc, R., (1967). Forced Vibration of Mechanical Systems with Hysteresis, *Proceedings of the 4th Conference on Nonlinear Oscillations*, Prague, Czechoslovakia, pp. 315.

[2] Wen, Y.K. (1976). Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 102, pp. 249-263.

[3] Baber, T.T. and Wen, Y.K. (1981). Random Vibration of Hysteretic Degrading Systems, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 107, pp. 1069-1087.

[4] Baber, T.T. and Noori, M.N. (1986). Modeling General Hysteresis Behavior and Random Vibration Application, *ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, vol. 108, pp. 411-420.

[5] Ma, F., Zhang, H., Bockstedte, A., Foliente, G.C. and Paevere, P. (2004) Parameter Analysis of the Differential Model of Hysteresis, *ASME Journal of Applied Mechanics*, vol. 71, pp. 342-349.

[6] Lampinen, J., and Storn, R. (2004). *Differential Evolution, New Optimization Techniques in Engineering*, G. C. Onwubolu and B. V. Babu, ed., Springer-Verlag, Berlin, pp. 125-166.

[7] Kyprianou, A., Worden, K., and Panet, M. (2001). Identification of Hysteretic Systems using the Differential Evolution Algorithm, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 248, pp. 289-314.