

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กรมทางหลวง. (2545). การสำรวจความเรียบของถนนโดยเครื่องมือ Bump Integrator. สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง.
- ฐาวรรัตน์ จังชัยศิริวัฒนา. (2545). ผลกระทบของความขรุขระของผิวทางที่มีต่อพลวัตของแรงกระทำที่เพลลาของรถบรรทุก. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยนวัตกรรมศาสตร์.
- ทรงศิริ แต่สมบัติ. (2548). การวิเคราะห์การถดถอย (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธีระศักดิ์ อุรัจนามานนท์. (2546). ความน่าจะเป็นและสถิติประยุกต์ เล่ม 2. กรุงเทพฯ: สกายบุ๊กส์.
- ปฤษทัศว์ ศีตะปันย์, เอกสิทธิ์ ไม้วัฒนา และ สมชาย ชูชีพสกุล. (2548). ความสำคัญของความขรุขระพื้นผิวต่อยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐาน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, SIE, p. 40-45.
- ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, ปิตุภูมิ จันทรสมาภู และ เอกลักษณ์ ประเสริฐพรศรี. (2545). การวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่โดยใช้เส้นอิทธิพล. วิทยานิพนธ์ วศ.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- พิษณุ เจียวคุณ. (2548). การวิเคราะห์การถดถอย. เชียงใหม่: ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. (2543). คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ: อินโฟเพรส.
- ราโอ, สิงค์จิเรชู เอส. (2545). การสันตะเทือนทางกล. (กนต์ธร ชำนิประศาสน์, ผู้แปล). กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า. (ต้นฉบับพิมพ์ในปี ค.ศ. 2002).
- วิรัชช พานิชวงศ์. (2549). การวิเคราะห์การถดถอย (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วีระ ตันศิริชัยยา. (2542). วิธีวิเคราะห์ปัญหาการสั่นไหวในเชิงปฏิสัมพันธ์ของระบบพาหนะและโครงสร้างที่รองรับ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยนวัตกรรมศาสตร์.

- Ahlin, K., EduTech S. & Sweden. (2001). International Roughness Index, IRI, and ISO 2631 vibration evaluation. Transportation Research Board: Committee Properties – Vehicle Interaction
- Auersch, L. (2005). The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines. *Journal of Sound and Vibration*, (284), 103-132.
- Biggs, J. M. . (1964). *Introduction to Structural Dynamics*. United States of America: McGraw-Hill.
- Clough, R. W. , Penzien, J . (1993). *Dynamics of Structures*. Singapore: McGraw-Hill.
- Lei, X. & Noda, A. N. (2002). Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical. *Journal of Sound and Vibration*, 258(1), 147-165.
- Magrab, B. E. et al. (2000). *An Engineer's Guide to MATLAB*. United States of America: Prentice Hall.
- Seetapan, P. & Gasparini, D. (2002). Dynamic of Bridge for Very High Speed Vehicle. *EuroDyn2002*, 1123-1128.
- Seetapan, P., Maiwattana, A. & Chucheepsakul S. (2005). Dynamic responses of a two-span beam subjected to 2DOF sprung vehicles. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10*, STR, 52-57.
- Timoshenko, S. (1926). Method of analysis of statical and dynamical stresses in rail. *Proceedings of Second International Congress for Applied Mechanics*, 407-418.
- Xia, H., Zhang N. & Roeck, D. G. (2003). Dynamic analysis of high speed railway bridge under articulated trains. *Computers and Structures*, (81), 2467-2478.
- Yang, Y. B., Yau, J. D., & Wu, Y. S. (2004). *Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: With application to High-Speed Railways*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Yonglin, Z. & Jiafan, Z. (2006). Numerical simulation of stochastic road process using white noise filtration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (20), 363-372.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

อยู่ระหว่างเขียน manuscript เพื่อตีพิมพ์ใน International Journal of Structural Stability and Dynamics

ผลงาน ในการประชุมวิชาการ

เสนอผลงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2550 จำนวน 2 เรื่อง ได้แก่

-ผลของความเร่งและความหน่วงของยานพาหนะต่อระบบยานพาหนะ-โครงสร้าง-ความชรุชระ

Vol. 7 pp405-410

-การศึกษาพารามิเตอร์ในระบบรางรถไฟความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Vol. 7 pp399-404

ผลของความเร่งและความหน่วงของยานพาหนะต่อระบบยานพาหนะ-โครงสร้าง-ความขรุขระ

EFFECT OF VEHICLE ACCELERATION AND DECELERATION TO ROUGHNESS-STRUCTURE-VEHICLE SYSTEM

ปฤษฎัศว์ สีตะปันย์ (Pritsathat Seetapan)¹
ศรัณย์ จันทร์ประเสริฐ (Saran Chanprasert)²
สมชาย ชูชีพสกุล (Somchai Chuchepsakul)³.

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

e-mail:pseetapan@hotmail.com

²นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

e-mail:saran_chanprasert@hotmail.com

³ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

e-mail:somchai.chu@kmutt.ac.th

คำย่อ : บทความนี้นำเสนอการศึกษาวิเคราะห์และแสดงถึงพฤติกรรมของระบบยานพาหนะ โครงสร้างเนื่องจากการเพิ่ม-ลดความเร็วของยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวถนน โดยใช้แบบจำลองของยานพาหนะซึ่งมีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับสองเคลื่อนที่ด้วยความเร่งแตกต่างกันไปผ่าน โครงสร้างพื้นฐานแบบจำลองคานช่วงเดียว ซึ่งมีค่าความขรุขระแบบเร็นดอมที่ใช้ตัวอย่าง ในการคำนวณตัวแปรทั้งหมดจะอยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของตอบสนองที่เกิดขึ้นในยานพาหนะและ โครงสร้างพื้นฐาน เนื่องจากการเพิ่ม - ลด ความเร็วของยานพาหนะ

ABSTRACT : This paper presents behavior of a coupled vehicle-structure system due to acceleration-deceleration of vehicle.

2DOF vehicle model traveling at different acceleration/deceleration is used. A simply supported beam with rough surface is used structure model. System equations are formulated by using dimensionless parameters. The vehicle and structure response subjected to acceleration-deceleration are presented.

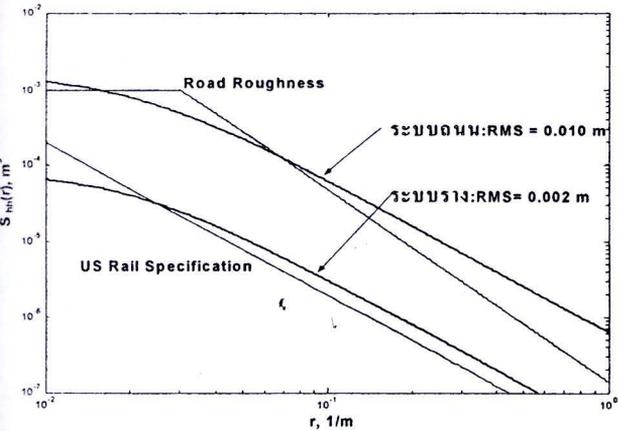
KEYWORDS : Random roughness, Acceleration, Dynamic response, Simple beam.

บทนำ

การศึกษางานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบเนื่องจากการเพิ่ม-ลดความเร็วของยานพาหนะลำดับชั้นความอิสระเท่ากับสอง (2 Degree Of Freedom, 2-DOF) เคลื่อนที่

ผ่านสะพานช่วงเดียวบนความขรุขระที่มีฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectral Density, PSD) ดังนี้ ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับถนน และระบบขนส่งระบบราง ดังแสดง ในรูปที่ 1. โดยแกน x แสดงค่าจำนวนคลื่น (wave number, r)

ด้วยความเร็วต้นแตกต่างกันไปโดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม MATLAB คำนวณหาผลตอบสนองของระบบ โดยผลตอบสนองของยานพาหนะจะพิจารณาถึงความเร่งทางแนวตั้งของห้องโดยสารเพื่อบ่งบอกความรู้สึกของผู้สัญจรนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ISO2631 และผลตอบสนองของโครงสร้างการโค้งตัวที่กึ่งกลางคานจะแสดงในรูปของกำลังขยายเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Amplification Factor, DAF)



รูปที่ 1 แสดง PSD ของแบบจำลองโปรไฟล์ของผิวถนน และ พื้นผิวระบบราง [1]

หลักการพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 สมการของระบบยานพาหนะ โครงสร้างในสเปซเฟส การตอบสนองทางพลวัตของโครงสร้างที่ยานพาหนะสัญจรผ่านได้สมมุติเป็นค่าจำกัดความที่สมบูรณ์โดยฟังก์ชันระยะการโค้งทางแนวตั้ง, $V(x, t)$ ซึ่งจะหาค่าได้ดังนี้[2,7]

$$V(x, t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) \phi_i(x) \quad (1)$$

โดยที่ $\phi_i(x)$ คือ i^{th} mode shape และ $y_i(t)$ คือ i^{th} modal coordinate

โดยเมื่อพิจารณาถึงระยะการโค้งที่จุดสัมผัสของยานพาหนะกับโครงสร้างถนนที่พื้นผิวมีความขรุขระ, $h(x)$ จะได้ดังนี้

$$V'(x, t) = V(x, t) + h(x) \quad (2)$$

ซึ่งความขรุขระของพื้นผิว, $h(x)$ สามารถหาได้จากสมการผลเฉลย ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์ที่มีไวท์นอยซ์ (white noise, W) เป็นอินพุต (input) และค่าความขรุขระของพื้นผิวจะเป็นเอาต์พุต(output) ดังนี้

$$\Delta_c h'(x) + h(x) = W(x) \quad (3)$$

โดย Δ_c คือ ระยะคอรีเรลชัน (correlation distance) และ $W(x)$ คือ zero-mean white process โดย มีความเข้มของไวท์นอยซ์

(white noise intensity) เท่ากับ S_0

ในการพิจารณาระบบยานพาหนะ โครงสร้าง จะพิจารณาในรูปสเปซเฟส (state space) ซึ่งแสดงดังนี้

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)W(t) + C(t) \quad (4)$$

โดย X คือ สเปซเวกเตอร์ (state vector), W คือ ไวท์นอยซ์เวกเตอร์ (vector of white noise), A, B และ C เป็นเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระ ยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน โดยรูปของสมการในส่วนของค่าเฉลี่ยหรือค่าที่คาดหมาย (mean or expected value) อยู่ในรูปสเปซเฟสเวกเตอร์จะเป็นดังนี้

$$E[\dot{X}(t)] = A(t)E[X(t)] + C(t) \quad (5)$$

เมทริกซ์ความแปรปรวน zero-time-lag ของสเปซเวกเตอร์,

Σ_{XX} สามารถหาได้จากสมการอันดับหนึ่งของ Lyapunov ดังนี้

$$\dot{\Sigma}_{XX} = A \Sigma_{XX} + \Sigma_{XX} A^T + B Q B^T \quad (6)$$

โดยที่ Q คือ เมทริกซ์กำลัง สำหรับเวกเตอร์ไวท์นอยซ์

$$Q = q_0 \begin{pmatrix} 1 & \cdots & \rho_{w_i w_j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{w_i w_j} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

เมื่อ q_0 คือ กำลังของไวท์นอยซ์ และ

$\rho_{w_i w_j}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ time-zero-lag ระหว่างไวท์นอยซ์ทั้งสอง

เนื่องจากกรณีศึกษาที่ยานพาหนะสัญจรเพียงหนึ่ง จึงได้ดังนี้

$$Q = q_0 \quad (8)$$

ในการวิเคราะห์ระบบ ตัวแปรต่างๆ จะถูกจัดอยู่ในรูป ตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ดังนั้นตัวแปรไร้มิติแต่ละตัวจะเป็นอิสระต่อกัน[6,7]

$$f_v = \frac{V/L}{\omega_1}, f_{k_1} = \sqrt{\frac{k_1/\bar{m}L}{\omega_1^2}}, f_{k_2} = \sqrt{\frac{k_2/\bar{m}L}{\omega_1^2}}$$

$$f_c = \frac{c/\bar{m}L}{\omega_1}, f_g = \sqrt{\frac{g/L}{\omega_1^2}}, \mu = M/\bar{m}L, \eta = m/\bar{m}L$$

อัตราส่วนของความถี่พื้นฐานของสะพานโหมคที่ i ต่อโหมคที่ 1

$$f_i = \omega_i / \omega_1, \text{ โดย } f_1 = 1.00 \text{ และ } f_2 = 4.00$$

พารามิเตอร์ของแบบจำลองความขรุขระ - $\Delta_c / L, S_0 / L^3$

2.2 สมการความเร็วไม่คงที่

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเริ่มต้นกับความเร็วที่ระยะทางใดๆ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านไปโดยความเร็วที่แน่นอน ไม่คงที่เนื่องจากมีค่า

แรงคงที่ดังนี้

ความสัมพันธ์ทางระยะทาง

$$X = \int \int a dt^2 \rightarrow X = ut + \frac{1}{2} at^2 \quad (9)$$

ความสัมพันธ์ทางความเร็ว

$$V = u + at \rightarrow a = \frac{V - u}{t} \quad (10)$$

สมการที่ 9 และ 10 จะได้ดังนี้

$$\sqrt{u^2 + 2aX} \quad (11)$$

V คือ ความเร็ว ณ ตำแหน่งใดๆ; u คือ ความเร็วเริ่มต้น, X คือ ระยะทางที่เปลี่ยนแปลง และ a คือ ความเร่งทางตรงของยานพาหนะ

สมการที่ 9 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของเวลาในรูปของตัวแปรหน่วยจะให้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{X}{L} = \frac{ut}{L} + \frac{1}{2} \frac{at^2}{L} \quad (12)$$

t' คือ ระยะเวลาหรือระยะทางต่อการเคลื่อนที่ผ่านคานหนึ่ง (ไร้หน่วย), t คือ ระยะเวลา และ L คือ ระยะทางช่วงคาน

แทนค่าความเร่งจะได้ดังนี้

$$\left(\frac{u + \sqrt{u^2 + 2aLt'}}{2L} \right) t \quad (13)$$

หาคอมอนุพันธ์จะได้สมการดังนี้

$$= \frac{L}{V} dt' = \frac{L}{\sqrt{u^2 + 2aLt'}} dt' \quad (14)$$

สมการที่ 14 จะให้ความสัมพันธ์ในเทอมอนุพันธ์โดยเวลา ความเร็วจึงแสดงนี้[2]

อันดับหนึ่ง ดังสมการ

$$= \sqrt{\left(\frac{u}{L}\right)^2 + \left(\frac{2at'}{L}\right)} V' \quad (15)$$

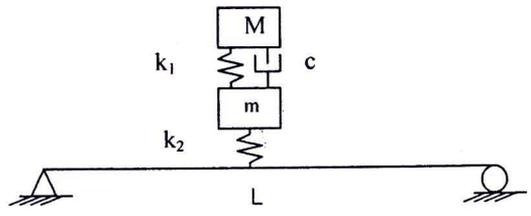
อันดับสอง ดังสมการ

$$= \left(\frac{u^2 + 2aLt'}{L^2}\right) V'' + \frac{a}{L} V' \quad (16)$$

แบบจำลองยานพาหนะและ โครงสร้างพื้นฐาน

งานวิจัยนี้ใช้คานช่วงเดียว และยานพาหนะ 2-DOF [1] ดังแสดงในรูปที่ 2 และใช้เทคนิคการวิเคราะห์โมดอล (modal

ysis)



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองยานพาหนะและ โครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัย

3. ผลการวิเคราะห์

จากการใช้ค่าตัวแปร

ความเร็วต้น = 140, 160, 180 และ 200 กม./ชม.

ค่าความเร่ง (Acceleration) = 0, 3, 6 และ 9 เมตร/วินาที²

ค่าความหน่วง (Deceleration) = 0, 5, 10 และ 15 เมตร/วินาที²

$f_{k_1} = 0.05, f_{k_2} = 0.2, f_c = 0.02, f_g = 0.01$

ค่า f_{k_1}, f_{k_2}, f_c และ f_g ถูกคำนวณจากข้อมูล ค่าคงที่สปริง ตัวหน่วง จากระบบ suspension ยานพาหนะ อัตราส่วนของมวลห้องโดยสารของยานพาหนะต่อมวลสะพาน $\mu = 0.2,$

อัตราส่วนของมวลของระบบเพลลาของยานพาหนะต่อมวล

สะพาน $\eta = 0.02,$ ความหน่วงของโครงสร้าง $\xi = 0.01,$

$\Delta_c / L = 2.50, S_0 / L^3 = 0.0625 \times 10^{-6}$ สำหรับระบบราง และ 1.25×10^{-6} สำหรับระบบถนน

ค่าเฉลี่ย และค่าความแปรปรวน ของผลตอบสนองของระบบสามารถคำนวณได้โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

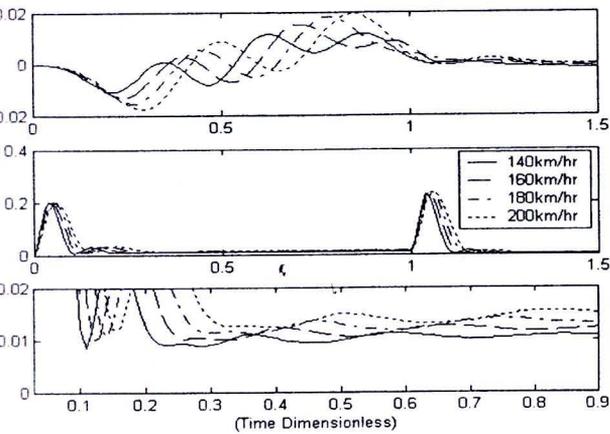
3.1 ผลตอบสนองของยานพาหนะ

โดยทั่วไปผลตอบสนองของยานพาหนะที่สนใจคือความเร่งในห้องโดยสาร ซึ่งบ่งบอกความรู้สึกของผู้ใช้ยานพาหนะ ตามค่ามาตรฐาน ISO 2631 แสดงในตารางที่ 1

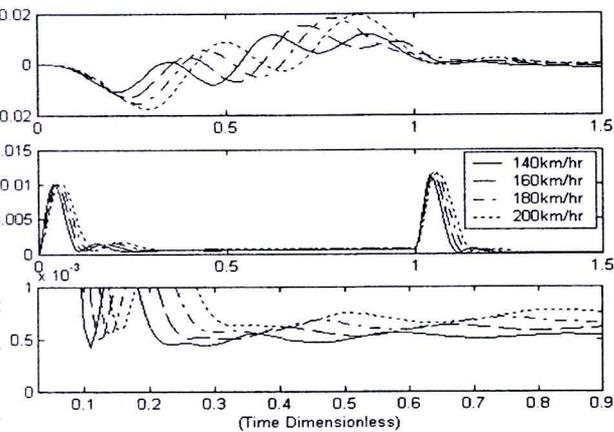
ตารางที่ 1 แสดงค่าอัตราเร่งสูงสุดที่มีผลต่อความรู้สึกของผู้ใช้ยานพาหนะตามมาตรฐาน ISO 2631

อัตราเร่งสูงสุด	ความรู้สึกของผู้ใช้ยานพาหนะ
< 0.032 g	สะดักสบาย
0.032 g to 0.064 g	ไม่สะดักสบายบ้าง เล็กน้อย
0.051 g to 0.102 g	เกือบจะไม่สะดักสบาย
0.082 g to 0.160 g	ไม่สะดักสบาย
0.127 g to 0.255 g	ไม่สะดักสบาย มาก
> 0.200 g	ไม่สะดักสบาย ที่สุด

รูปที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยของความเร่งแนวตั้งของยานพาหนะ ความเร็วคงที่ที่ 140-200 กม./ชม. จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.0118g ถึง 0.0195g อยู่ในช่วงที่ผู้ใช้ยานพาหนะยอมรับได้ แต่มีค่าความแปรปรวนสูง 0.011 ถึง 0.0155 บนพื้นผิวที่มีความขรุขระจำลองถนน โดยเมื่อลดค่าความขรุขระเป็นพื้นผิวที่มีความขรุขระของระบบรางค่าความแปรปรวนจะมีค่าลดลงมาอยู่ในช่วง 0.005 ถึง 0.00078 ซึ่งมีค่าน้อยมาก แต่ค่าเฉลี่ยจะมีค่าเท่าเดิม แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 แสดง time history ของค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของความเร่งแนวตั้งของยานพาหนะ ในช่วงความเร็วคงที่ที่ 140-200 กม./ชม. บนค่าความขรุขระระบบถนน

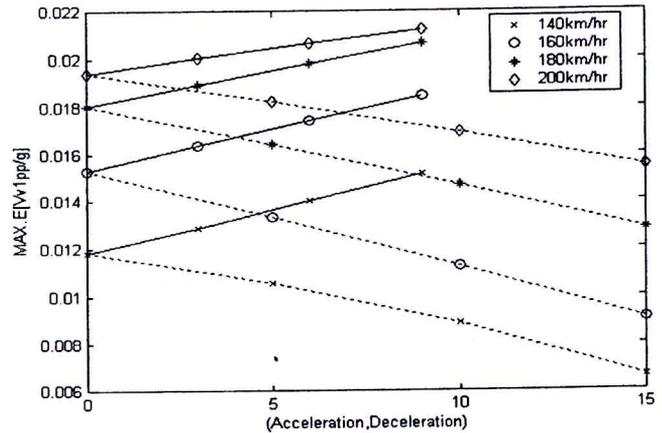


รูปที่ 4 แสดง time history ของค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของความเร่งแนวตั้งของยานพาหนะ ในช่วงความเร็วคงที่ที่ 140-200 กม./ชม. บนค่าความขรุขระระบบราง

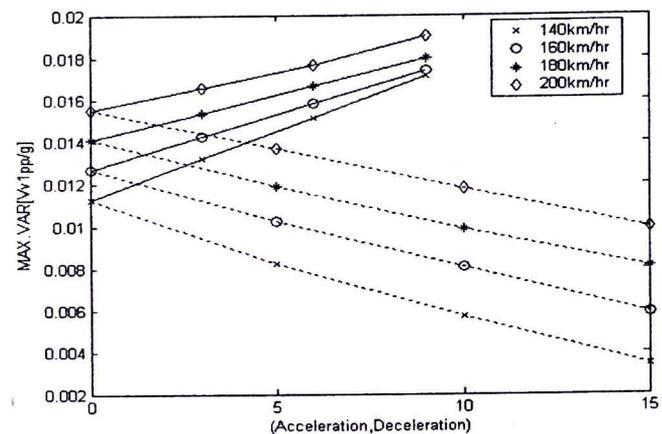
พื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความขรุขระพื้นผิวแบบฉับพลันจะทำให้เกิดค่าความแปรปรวนที่สูงเกินปกติ (overshoot) ในความเร่งแนวตั้งของยานพาหนะ และ ในกรณียานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ความเร่งแนวตั้งจะเข้าสู่สถานะนิ่ง (stationary) ได้เร็วกว่ากรณีความเร็วต่ำ

ความเร็วต้นต่างกันค่าความเร่งที่เพิ่มขึ้น จะให้ค่าสูงสุดของค่าเฉลี่ย และ ค่าความแปรปรวนของความเร่งแนวตั้งสูงขึ้น

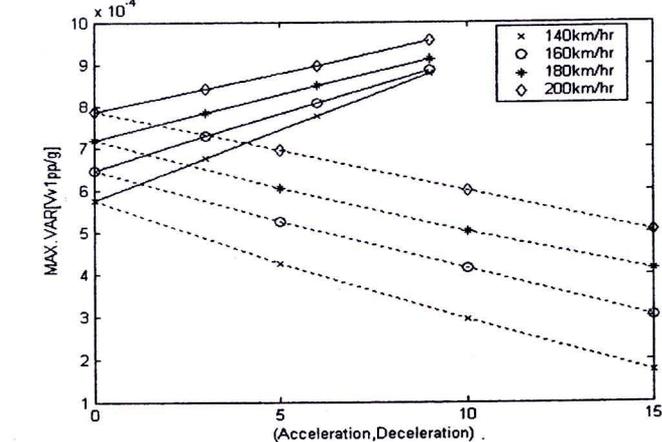
ส่วนกรณีค่าความหน่วงเพิ่มขึ้น จะให้ค่าสูงสุดของค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนลดลง ทั้งบนความขรุขระระบบถนนและระบบราง ดังแสดงในรูปที่ 5, 6 และ 7



รูปที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยสูงสุดของความเร่งทางแนวตั้งของยานพาหนะ ในช่วงความเร็วต้น 140-200 กม./ชม. บนค่าความขรุขระระบบถนน (—; Acceleration,; Deceleration)



รูปที่ 6 แสดงค่าความแปรปรวนสูงสุดของความเร่งทางแนวตั้งของยานพาหนะในช่วงความเร็วต้น 140-200 กม./ชม. บนค่าความขรุขระระบบถนน (—; Acceleration,; Deceleration)

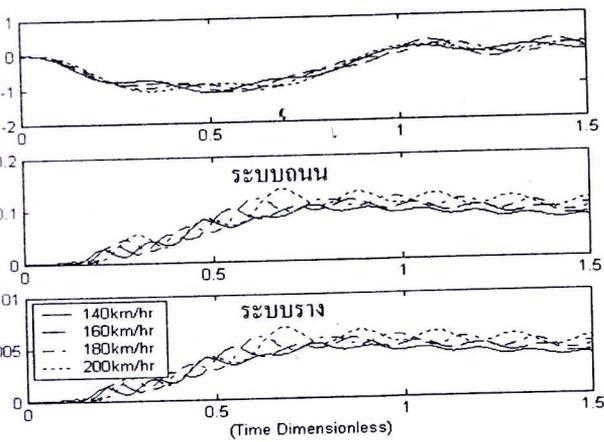


รูปที่ 7 แสดงค่าความแปรปรวนสูงสุดของความเร่งทางแนวตั้งของยานพาหนะในช่วงความเร็วต้น 140-200 กม./ชม. บนค่าความขรุขระระบบราง (—; Acceleration,; Deceleration)

ผลตอบแทนของโครงสร้าง

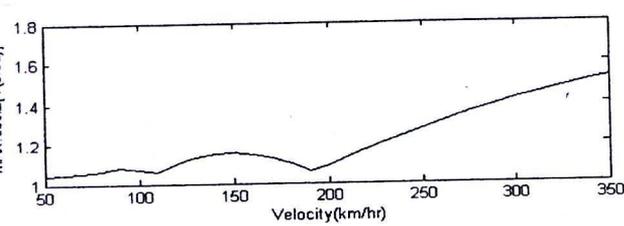
ที่ 8 ในช่วงความเร็วคงที่ 140-200 กม./ชม. ค่าเฉลี่ยของ (Dynamic Amplification Factor) ของระยะโค้งที่กึ่งกลางสะพานช่วงเดียวอยู่ในช่วง 1.067 ถึง 1.28 ในส่วนของค่าแปรปรวนของ DAF ของระยะโค้งที่กึ่งกลางสะพานช่วงความขรุขระระบบถนน มีค่าอยู่ในช่วง 0.104 ถึง 0.136 ข้อลดค่าความขรุขระเป็นระบบราง ค่าความแปรปรวนจะอยู่ในช่วง 0.0056 ถึง 0.0071

ความเร็วสูงขึ้น ค่าความแปรปรวนของระยะโค้งที่กึ่งกลางจะมีการขยับขึ้นลงที่รุนแรงมากขึ้น (strongly fluctuated) ไม่เข้าสู่สถานะนิ่ง

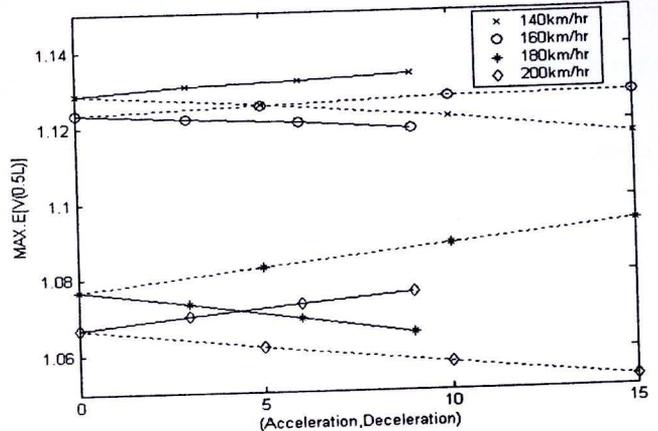


8 แสดง time history ของค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของระยะโค้งกึ่งกลางคาน ในช่วงความเร็วเดิน 140-200 กม./ชม.

รับสูงสุดของค่าเฉลี่ย DAF ของระยะโค้งกึ่งกลางคานนั้น ขึ้นอยู่กับความเร็วเดิน 140 และ 200 กม./ชม. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดของค่าเฉลี่ย DAF ของระยะโค้งกึ่งกลางคานมีค่าสูงขึ้น แต่ในกรณีที่ความเร็วเดิน 160 และ 180 กม./ชม. ค่าสูงสุดของค่าเฉลี่ย DAF ของระยะโค้งกึ่งกลางคานกลับมีค่าลดลง ซึ่งในกรณีที่ยานพาหนะมีความหน่วงจะผลตรงกันข้าม ดังได้แสดงในรูปที่ 10 ซึ่งให้ผลที่สัมพันธ์กับกรณีกรณียานพาหนะมีความเร็วคงที่ [2] ดังแสดงในรูปที่ 9

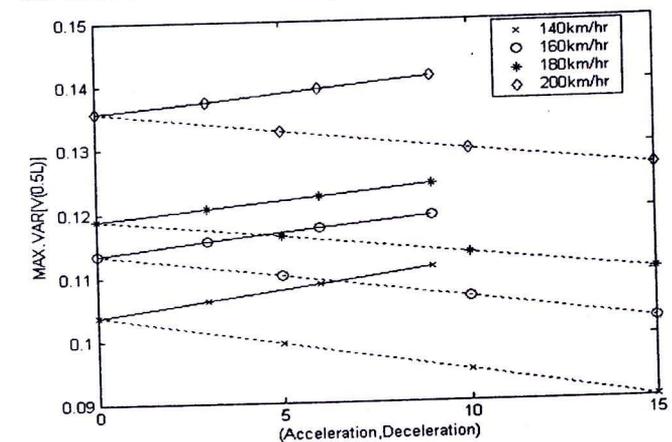


9 แสดงค่าเฉลี่ยสูงสุดของระยะโค้งกึ่งกลางคาน ในช่วงความเร็วคงที่ 140-350 กม./ชม.

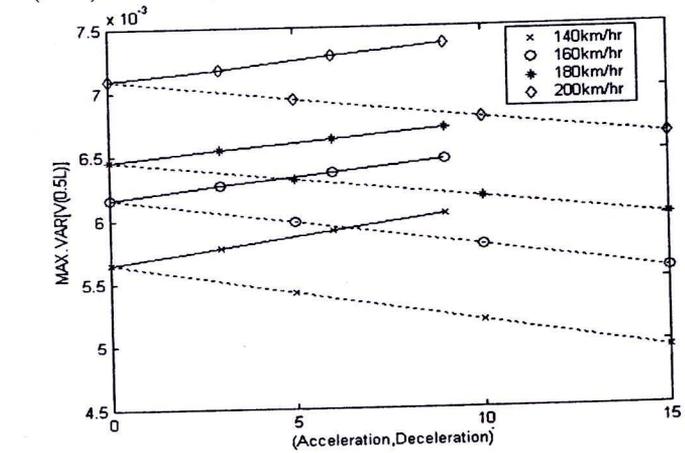


รูปที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยสูงสุดของระยะโค้งกึ่งกลางคาน ในช่วงความเร็วเดิน 140-200 กม./ชม. ค่าความขรุขระระบบถนน (—; Acceleration,; Deceleration)

ในรูปที่ 11 และ 12 ที่ความเร็วเดินต่างกัน เมื่อค่าความเร่งเพิ่มขึ้น จะให้ค่าสูงสุดของค่าความแปรปรวนของระยะโค้งกึ่งกลางคานสูงขึ้น และเมื่อค่าความหน่วงเพิ่มขึ้นจะให้ค่าสูงสุดของค่าความแปรปรวนลดลง ทั้งบนความขรุขระระบบถนนและระบบราง



รูปที่ 11 แสดงค่าความแปรปรวนสูงสุดของระยะโค้งกึ่งกลางคาน ในช่วงความเร็วเดิน 140-200 กม./ชม. ค่าความขรุขระระบบถนน (—; Acceleration,; Deceleration)



รูปที่ 12 แสดงค่าความแปรปรวนสูงสุดของระยะโค้งกึ่งกลางคาน ในช่วงความเร็วเดิน 140-200 กม./ชม. ค่าความขรุขระระบบราง (—; Acceleration,; Deceleration)

4. สรุปผลการวิจัย

ค่าความเร็ว ค่าความเร่ง และ ค่าความหน่วง ของยานพาหนะ มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของระบบยานพาหนะโครงสร้าง โดยใน ส่วนผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐานนั้น ค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงของความเร็วต้นที่ความเร่ง และ ความหน่วงแตกต่างกัน ค่าสูงสุดของ DAF ก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันโดยสัมพันธ์กันกับกรณียานพาหนะมีความเร็วคงที่ ซึ่งต่างจากค่าความแปรปรวน และผลตอบสนองของยานพาหนะที่เมื่อยานพาหนะมีค่าความเร่งค่าสูงสุดที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อยานพาหนะมีค่าความหน่วงค่าสูงสุดที่ได้จะมีค่าลดลง ความขรุขระมีผลต่อความแปรปรวน แต่ไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองของระบบ เนื่องจาก ไวท์นอยซ์ เป็น โพรเซสที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้นในสมการที่ (5) พจน์ BW จะหายไปเมื่อทำการหาค่าเฉลี่ย โดยค่าความขรุขระของผิวทางที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าความแปรปรวนมีค่าลดลงตาม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในทางปฏิบัติเมื่อผิวทางสัญจรใช้งานจนเสื่อมสภาพเป็นผลให้โครงสร้างต้องรับผลตอบสนองมากขึ้นด้วยจึงส่งผลให้ผิวทางนั้นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา(สกอ.) ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยสำหรับงานวิจัยนี้และ (MRG5080061)

เอกสารอ้างอิง

- [1]ปฤษฎาศว์ ศีตะปิ่นยฺ เอกสิทธิ์ ไม้วัฒนา และ สมชาย ชูชีพสกุล. (2548). ความสำคัญของความขรุขระพื้นผิวต่อยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐาน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, SIE 40-45
- [2]ศรัณย์ จันทร์ประเสริฐ. (2550). ผลของการเพิ่ม-ลดความเร็วต่อระบบยานพาหนะ-โครงสร้าง-ความขรุขระ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [3]Dodds, C.J. and Robson, J.D., The description of road surface roughness. J. of Sound and Vibration, 31(1973): pp175-183.
- [4]Fryba, L., 1972. Vibration of solid and structures under moving loads. Groningen : Noordhoff International Publishing.
- [5]Mitschaltso, G.T. (2002). Dynamic behaviour of a single-span beam subjected to load moving with variable speeds. Journal of Sound and Vibration 258(2), 359-372

[6]Seetapan P. and Gasparini D.A., 2002. Dynamic of bridge for very high speed vehicle. EuroDyn2002, Munich, Germany.

[7]Seetapan, P., Maiwattana, A., & Chucheepsakul, S. (2005). Dynamic responses of a two-span beam subjected to 2DOF sprung vehicles. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, STR 52-57

เกี่ยวกับผู้เขียน



ดร. ปฤษฎาศว์ ศีตะปิ่นยฺ
อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



นาย ศรัณย์ จันทร์ประเสริฐ
นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
51-52 ถ.ชาญเวชกิจ ค.ในเมือง อ.เมือง จ.พิษณุโลก
65000



ศ. ดร. สมชาย ชูชีพสกุล
ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี



การศึกษาพารามิเตอร์ในระบบรางรถไฟความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Study of Parameters in High-Speed Railways System

via Response Surface Methodology

ปฤษัทศว์ สีตะปันย์ (Pritsathat Seetapan)¹

เอกสิทธิ์ ไม้วัฒนา (Akesit Maiwattana)²

สมชาย ชูชีพสกุล (Somchai Chuchepsakul)³

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ e-mail: pseetapan@hotmail.com

²วิศวกรโยธา สำนักงานหลวงที่ 4(พิษณุโลก) กรมทางหลวง e-mail.com: key22@hotmail.com

³ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี somchai.chu@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้นำเสนอค่าการโก่ง สูงสุดของโครงสร้างพื้นฐาน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ที่พิจารณาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ระบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐาน ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ลักษณะของพื้นผิวของโครงสร้าง พิจารณาเป็นชุดข้อมูล สเตชันนารี เกาส์เซียน แรนดอม โพรเซส ซึ่งมีแบบจำลองพื้นผิว ถูกสร้างขึ้นด้วย ฟิลเตอร์ไวท์นอยซ์ แบบจำลองยานพาหนะ 1 คัน ประกอบด้วย 2 เพลา ลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 4 เคลื่อนที่บนพื้นผิวระบรางของคานช่วงเดียว จากนั้นสร้างสมการการเคลื่อนที่ระบบคู่ควบ ยานพาหนะ-โครงสร้างพื้นฐาน โดยกำหนดค่าตัวแปรแบบไร้หน่วยและใช้โปรแกรม MATLAB หาคำตอบ สมการอนุพันธ์ด้วยวิธีรุ่งเง-คุตดา อันดับที่ 4 และ 5 คำนวณค่าความสำคัญ ตัวคูณกำลังขยายพลศาสตร์ ของโครงสร้างพื้นฐาน ด้วยความสัมพันธ์เชิงเปรียบเทียบ พารามิเตอร์ วิธีพื้นผิวตอบสนอง

ABSTRACT : This research presents structural responses subjected to moving sprung vehicles. Railway surface roughness is considered as realizations of stationary Gaussian random processes. Analytical model of random surface can be constructed by using filtered white noise. Vehicle is modeled as a two axle vehicle model with 4DOF. Nondimensionalized equation of motion for the coupled vehicle-structure system is formulated. Parameters in the system are studied via response surface methodology.

KEYWORDS : Random roughness, Coupled vehicle-structure system, Response surface methodology.

1. บทนำ

ในขณะที่ ยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน เนื่องจาก คุณสมบัติ ความขรุขระของพื้นผิว คุณสมบัติของยานพาหนะ และ คุณสมบัติของโครงสร้างพื้นฐาน โดยทำการสร้างแบบจำลองความขรุขระพื้นผิว เป็นชุดข้อมูล สเตชันนารี เกาส์เซียน แรนดอม โพรเซส โดยใช้ฟิเตอร์ไวท์

นอยซ์ และ สร้างแบบจำลองยานพาหนะ 2 เพลา 4DOF ที่มีระบบสปริงคู่รถไฟ ระบบตัวหน่วง(Damping) และระบบสปริงเพลา ตามข้อกำหนดของยานพาหนะประเภทรถไฟ ในส่วนของโครงสร้างพื้นฐานพิจารณาเป็นโครงสร้างประเภทสะพาน ช่วงเดียว เนื่องจากก่อให้เกิดการโก่งตัวทางสถิตสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างสะพานแบบสองช่วง และหลายช่วง

จากนั้นนำค่าความขรุขระพื้นผิว แบบจำลองยานพาหนะ และแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน มาสร้างสมการเคลื่อนที่ระบบคู่ คิวยานพาหนะต่อโครงสร้างพื้นฐาน และทำการปรับค่าตัวแปรให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย และ ทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่ (Equation of motion) เพื่อคำนวณผลตอบสนองต่อยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน รวมทั้งคำนวณค่าความแปรปรวนที่จะเกิดขึ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square, RMS) จากรากที่สองของผลรวมค่าคาดหวังยกกำลังสองกับค่าความแปรปรวน โดยค่าเฉลี่ยรากที่สองนั้น คือ ค่าผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจริงของยานพาหนะ และของโครงสร้างพื้นฐาน โดยในการคำนวณการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานนั้น เกี่ยวเนื่องกับตัวแปรจำนวนมาก ที่สำคัญได้แก่ ตัวแปรความยาวคาน ตัวแปรความเร็วยานพาหนะ ตัวแปรความขรุขระของพื้นผิว ตัวแปรความเค้นของขบวนการไวท์นอยซ์ ตัวแปรระบบสปริงคู่รถไฟ ตัวแปรระบบตัวหน่วง และ ตัวแปรระบบสปริงเพลลา จากตัวแปรดังกล่าวทำการสร้างความสัมพันธ์ทางสถิติของพารามิเตอร์เกี่ยวข้องด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) จากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ พารามิเตอร์ระบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

งานวิจัยนี้นำเสนอความสำคัญของวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน และเป็นแนวทางในการสร้างสมการถดถอยผลตอบสนองต่อยานพาหนะ และ ผลตอบสนองต่อโครงสร้างพื้นฐานประเภทต่างๆ ต่อไป

2. หลักการพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย

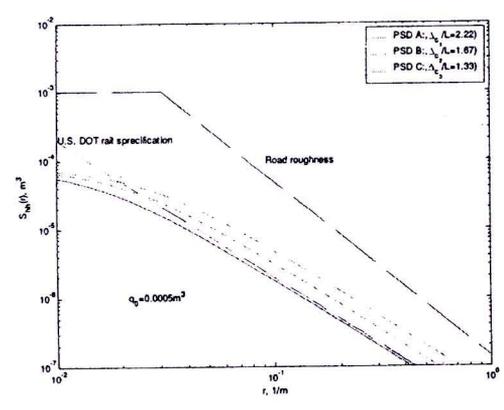
2.1 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

การเคลื่อนที่ของยานพาหนะความเร็วสูงบนพื้นผิวระบบรางนั้น เมื่อเวลาผ่านไประบบรางที่มีคุณภาพดีจะเริ่มชำรุดโดยเฉพาะที่พื้นผิวราง เนื่องจากคุณสมบัติของรางที่ใช้ในการออกแบบ การรับแรงกระทำซ้ำจากน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะ ปริมาณจราจร และ สภาพแวดล้อมบริเวณดังกล่าว ดังนั้นจำเป็นต้องเก็บรวบรวมข้อมูลความเสียหายของพื้นผิวระบบราง เพื่อใช้ในการประเมินผล และ จัดลำดับความสำคัญในการบำรุงรักษาทางต่อไป แต่การเก็บข้อมูลภาคสนามมีความยุ่งยากและค่าแปร

เปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อม [1] ดังนั้นกระบวนการสุ่มคือวิธีการสุ่มข้อมูลความขรุขระของพื้นผิวระบบรางและเป็นทางเลือกในการวิเคราะห์ข้อมูล [2] โดยค่าความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวอาศัยหลักการตัวกรองไวท์นอยซ์ ซึ่งสามารถแปลงรูปหรือจัดรูปความขรุขระของพื้นผิวในรูปแบบสเปกตรัล [3] ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขของสมการอนุพันธ์โศดเคสติก ลำดับขั้นหนึ่งดังสมการ

$$\frac{\dot{h}_d}{r_f} + h_d = W_d \quad (1)$$

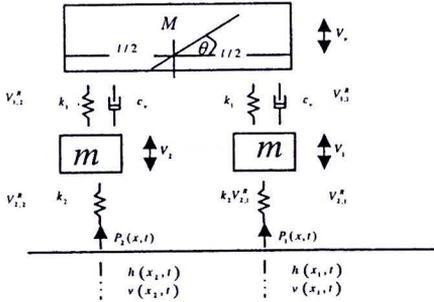
โดยกำหนดให้ ค่า W_d คือ ตัวกรองไวท์นอยซ์ ค่า h_d คือ ค่าความขรุขระของพื้นผิว และ ค่า r_f คือ จำนวนคลื่น จากนั้นทำการจัดค่า PSD โดยกำหนดค่าระดับความขรุขระจำนวน 3 ระดับ ดังรูปที่ 1 ค่าแกน x แสดงถึงจำนวนคลื่น และ แกน y แสดงถึงค่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล



รูปที่ 1 แสดงค่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล ของพื้นผิวระบบรางที่ระดับความขรุขระต่างๆ เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานระบบรางของสหรัฐอเมริกา

2.2 แบบจำลองยานพาหนะ

การศึกษาแบบจำลองยานพาหนะ มีทั้งที่เป็นแบบยึดแน่น (Rigid) หรือแบบยืดหยุ่น (Flexible) [4] โดยมีวัสดุเชื่อมต่อ ในรูปแบบสปริง (Springs) ตัวหน่วง (Dampers) และพื้นผิวระบบราง (Wheel-rail contact) จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองยานพาหนะ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองยานพาหนะสองเพลานึ่งคัน
ลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 4

จากรูปที่ 2 แสดงแบบจำลองยานพาหนะประกอบด้วยยานพาหนะหนึ่งคัน สองเพล ลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 4 (4 Degree Of Freedom, 4DOF) โดยกำหนดให้ค่า M คือ มวลตู้รถไฟ ค่า k_1 คือ ระบบสปริงตู้รถไฟ ค่า c_1 คือ ระบบตัวหน่วง (Damping)รถไฟ ค่า m คือ มวลระบบเพล 2 เพล และ ค่า k_2 คือ ระบบสปริงเพล

2.3 แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน

แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานมีทั้งแบบคานช่วงเดียว คานสองช่วง และคานต่อเนื่อง งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานคานช่วงเดียว [5] เนื่องจากคานช่วงเดียวก่อให้เกิดค่าการโก่งตัวสูงกว่า คานสองช่วง และคานต่อเนื่อง

2.4 ความสัมพันธ์พื้นผิวระบอบราง ยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน

ทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ระบบคู่ควยานพาหนะ-โครงสร้างพื้นฐาน ดังสมการ

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + BW(t) + C(t), X(0) \quad (2)$$

โดยกำหนดให้ ค่า X คือ สเตทเวกเตอร์ ค่า W คือ เวกเตอร์สัมพันธไวท์นอยซ์ ค่า A และ B ขนาดของเมตริกซ์ และค่า C คือ เวกเตอร์จากแรงกระทำ จากนั้นทำการจัดรูปสมการสมดุลของยานพาหนะ และ สมการโมดอลของคานให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วยที่เป็นอิสระต่อกัน ค่า $f_v = \frac{V/L}{\omega_1}$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ ค่า $f_{k_1} = \sqrt{\frac{k_1/mL}{\omega_1^2}}$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยระบบสปริงตู้รถไฟ ค่า $f_c = \frac{c/mL}{\omega_1}$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยระบบตัว

หน่วง(Damping)รถไฟ ค่า $f_{k_2} = \sqrt{\frac{k_2/mL}{\omega_1^2}}$ คือ ตัวแปรไร้หน่วย

ระบบสปริงของเพล ค่า $f_g = \sqrt{\frac{g/L}{\omega_1^2}}$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยแรง

โน้มถ่วงโลก ค่า $\mu = M/mL$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยมวลตู้รถไฟ

ค่า $\eta = m/mL$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยมวลเพล ค่า $f_i = \omega_i/\omega_1$

คือ อัตราส่วนของความถี่พื้นฐานของสะพานโหมดที่ i ต่อโหมด

ที่ 1 โดย $f = 1.00, 2.00, 3.00, \dots, 10.00$ ค่า $\Delta_c/L, S_0/L^3$ คือ

พารามิเตอร์ของแบบจำลองความขรุขระ จากนั้นทำการแก้ปัญหา

สมการเชิงอนุพันธ์นั้น ด้วยวิธีการรุงกุดตา (Runge-Kutta

method) อันดับที่ 4 และ 5 โดยใช้ฟังก์ชัน ODE45 ของ

โปรแกรม MATLAB [6] สามารถคำนวณค่าระยะโก่งในแนวดิ่ง

ของคาน ดังสมการ

$$V(x,t) = \sum_{i=1}^n Y_i(t)\phi_i(x) \quad (3)$$

โดยกำหนดให้ ค่า $\phi_i(x)$ คือ โหมดการสั่นสะเทือนอิสระ

ภายใต้ช่วงเวลาพิคัดโมดอล $Y_i(t)$

เนื่องจากพื้นผิวมีความขรุขระ ส่งผลต่อค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้น

กับยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐาน ดังนั้นทำการคำนวณ

ค่าผลตอบสนองที่แท้จริงในรูปของ ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root

Mean Square, RMS) [7] ดังสมการ

$$RMS = \sqrt{E^2[x] + VAR[x]} \quad (4)$$

โดย $E[x]$ คือ ค่าเฉลี่ย หรือ ค่าที่คาดหมาย ของ x (mean or

expected value of x) $VAR[x]$ คือ ค่าความแปรปรวนของ x

(variance of x)

2.5 วิธีพื้นผิวตอบสนอง

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

พบว่า ค่าผลตอบสนองอยู่ในรูปของตัวแปรอิสระ (Independent

variable) ที่มีความสัมพันธ์กัน ได้แก่ ตัวแปรความยาวคาน

ความเร็วยานพาหนะ ความขรุขระของพื้นผิว ความเค้นของ

ขบวนการไวท์นอยซ์ ระบบสปริงตู้รถไฟ ระบบตัวหน่วง และ

ระบบสปริงเพล ซึ่งจะส่งผลต่อตัวแปรตาม (Dependent

variable) คือ ผลตอบสนองต่อค่าระยะโก่งกึ่งกลางคาน แต่การที่

จะแสดงผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในรูปแบบกราฟ มีข้อจำกัด ด้าน

การแสดงผลข้อมูลเพียง 2 ตัวแปร คือ ตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อตัว

แปรตาม ภายในช่วงที่กำหนด ข้อมูลไม่สามารถครอบคลุมเชิงมิติ

เช่นเดียวกับ วิธีทางสถิติขั้นสูง ดังนั้น การศึกษาความสัมพันธ์ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลทางสถิติ เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการ วิเคราะห์พารามิเตอร์เกี่ยวกับวิธีวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) [8] แบบฟังก์ชันโพลิโนเมียล (Polynomial function) เนื่องจาก ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับ ตัวแปรตามในรูปแบบเส้นโค้ง

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 \dots + \beta_k X^k + \varepsilon \quad (5)$$

โดยกำหนดให้ ค่า $k=1$ แทนค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ค่า $k=2$ แทนค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งหนึ่งจุดกลับ และ ค่า $k=3$ แทนค่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งสองจุดกลับ การศึกษา รูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลนั้น พิจารณาถึงความเหมาะสมของ ลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ และ ตัวแปรตาม ใน แผนภาพการกระจาย โดยลำดับที่เหมาะสมที่สุด ต้องเป็นลำดับที่ต่ำสุด ที่สามารถอธิบายลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ และ ตัวแปรตาม ได้ดีที่สุดใน การเลือกลำดับที่เหมาะสมจะ พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 และ การทดสอบ สมมติฐาน

3. ผลการวิเคราะห์

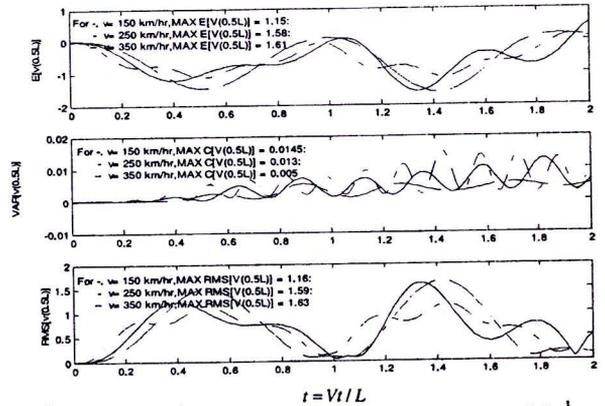
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการข้ามช่วงคาน (Effect of span passage rate, f_v) คือ ค่าอัตราส่วนความเร็วยานพาหนะต่อความ ยาวคาน V/L หากด้วย ค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานลำดับที่ หนึ่ง สมมติค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของคานช่วงเดียว เท่ากับ 7 Hz. และ กำหนดให้ค่าความยาวช่วงคาน 20 เมตร คำนวณ ค่าความเร็วยานพาหนะที่เข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติของคาน

ผลการคำนวณแสดงว่า ที่ความเร็ว $V=140(m/s)=540(km/hr)$ จะก่อให้เกิดการสั่นพ้องของคานช่วงเดียว บนความถี่ธรรมชาติ พื้นฐาน ลำดับที่หนึ่ง แครตไฟความเร็วสูงส่วนใหญ่ เคลื่อนที่ ด้วยความเร็วไม่เกิน 400 km./hr. ดังนั้นโอกาสที่ยานพาหนะจะ เคลื่อนที่เข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติของคานช่วงเดียวเป็นไปได้ น้อยมากและ ถ้าพิจารณาอัตราการมาถึงของเพลลา (Effect of axle arrival rate, f_a) คือ ค่าอัตราส่วนความเร็วยานพาหนะต่อค่า ระยะห่างระหว่างเพลลา V/l หากด้วย ค่าความถี่ธรรมชาติ พื้นฐานลำดับที่หนึ่ง และ กำหนดให้ค่าความยาวช่วงคาน 20 25 และ 30 เมตรดังตารางที่ 1 แสดงว่า ค่าความยาวคานที่

เปลี่ยนแปลงไป ไม่ส่งผลต่อ ค่าอัตราการมาถึงของเพลลา เนื่องจาก สูตรการคำนวณ ค่าอัตราการมาถึงของเพลลา ขึ้นอยู่กับ ค่าระยะห่างระหว่างเพลลา l โดยกำหนดให้ $l=18m$ และ ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น ถ้ายานพาหนะ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วตั้งแต่ 150 - 350 km./hr. จะไม่ก่อให้เกิด การสั่นพ้อง

ตารางที่ 1 แสดงค่าอัตราการมาถึงของเพลลา ที่ความเร็ว และ ความยาวคานต่างๆ

$f_a, L = 20m$	$f_v(\text{speed, km/hr})$		
	0.047 (150)	0.079 (250)	0.11 (350)
$l/L = 0.90$	0.33	0.55	0.77
$f_a, L = 25m$	$f_v(\text{speed, km/hr})$		
	0.038 (150)	0.063 (250)	0.088 (350)
$l/L = 0.72$	0.33	0.55	0.77
$f_a, L = 30m$	$f_v(\text{speed, km/hr})$		
	0.032 (150)	0.053 (250)	0.074 (350)
$l/L = 0.60$	0.33	0.55	0.77



รูปที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และ RMS ของระยะโค้งกึ่งกลาง คานในช่วงความเร็ว 150 - 350 km./hr.

$$r_f = 0.015m^{-1} \text{ และ } L = 20m$$

จากรูปที่ 3 แสดงว่า ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 km./hr. ค่าเฉลี่ยของ DAF (Dynamic Amplification Factor) ของระยะโค้งกึ่งกลางคาน เท่ากับ 1.15 และ เมื่อยานพาหนะ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น เท่ากับ 250 - 350 km./hr. ค่าเฉลี่ย ของ DAF ของระยะโค้งกึ่งกลางคาน จะสูงขึ้นถึง 1.61 มากกว่า มาตรฐาน AASHTO ที่กำหนดค่าเท่ากับ 1.30 และ เมื่อทำการ พิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่าในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่

ด้วยความเร็ว 150 km/hr. จะทำให้มีค่าความแปรปรวนสูงสุด และมีลักษณะขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง (Strongly fluctuated) รวมทั้งค่าความแปรปรวนจะค่อยๆ ลดลง เมื่อความเร็วยานพาหนะเพิ่มขึ้น และ สังเกตได้ว่า ค่าความแปรปรวนของโครงสร้าง เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา หรือ ผลตอบสนองไม่เข้าสู่สภาวะนิ่ง เมื่อทำการรวมค่าความแปรปรวน พบว่า ค่า RMS ระยะ โคง่กึ่งกลางคาน จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

สำหรับการวิเคราะห์สมการถดถอย พบว่าเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ระบบ ได้แก่ พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน และ พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ โดยแต่ละพารามิเตอร์เชื่อมโยงถึงตัวแปรอิสระ ที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองของยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน ดังนั้นทำการสร้างความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เกี่ยวเนื่องของตัวแปรอิสระ Δ_c / L , q_0 / L^3 , f_v , l / L , f_{k_1} , f_{k_2} และ f_c โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทดสอบ 2,187 ครั้งของตัวแปรอิสระที่แปรเปลี่ยนไป ที่ส่งผลต่อค่าตัวแปรตามระยะ โคง่กึ่งกลางคาน $RMS[V(0.50L)]$ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดง สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value ของ $RMS[V(0.50L)]$

สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2	p-value
$H_0: \beta_k = 0$	329.27	$F_{0.05,(7,\infty)} = 2.01$	0.84271	0
$H_1: \beta_k \neq 0$				

ทดสอบสมมติฐาน
 $H_0: \beta_k = 0$
 $H_1: \beta_k \neq 0$
 เนื่องจาก $F - ratio \geq F_{0.05,(7,\infty)}$ และ $p - value \leq 0.05$ แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า $\beta_k \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระ l / L , f_v , Δ_c / L , q_0 / L^3 , f_{k_1} , f_{k_2} และ f_c กับค่าตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ มีความสัมพันธ์แบบพหุนามลำดับที่ 2
 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 แสดงว่า ตัวแปรอิสระ l / L , f_v , Δ_c / L , q_0 / L^3 , f_{k_1} , f_{k_2} และ f_c สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ ได้ในระดับสูง 84%

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยพหุนามลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน Y ดังสมการ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_1^2 \dots + \beta_9 X_1 X_2 + \beta_{10} X_1 X_3 + \beta_{11} X_1 X_4 + \beta_{12} X_1 X_5 + \beta_{13} X_1 X_6 + \beta_{14} X_1 X_7 \dots + \beta_{15} X_2^2 + \beta_{16} X_2 X_3 + \beta_{17} X_2 X_4 + \beta_{18} X_2 X_5 + \beta_{19} X_2 X_6 + \beta_{20} X_2 X_7 \dots + \beta_{21} X_3^2 + \beta_{22} X_3 X_4 + \beta_{23} X_3 X_5 + \beta_{24} X_3 X_6 + \beta_{25} X_3 X_7 + \beta_{26} X_4^2 \dots + \beta_{27} X_4 X_5 + \beta_{28} X_4 X_6 + \beta_{29} X_4 X_7 + \beta_{30} X_5^2 + \beta_{31} X_5 X_6 + \beta_{32} X_5 X_7 \dots + \beta_{33} X_6^2 + \beta_{34} X_6 X_7 + \beta_{35} X_7^2 \dots \quad (6)$$

จากนั้น ทำการเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองต่อโครงสร้างจากการแก้สมการอนุพันธ์ กับค่าผลตอบสนองต่อโครงสร้างจากสมการถดถอย เพื่อทดสอบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ที่เกิดขึ้น ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 – 350 km/hr. และ ตัวแปรอิสระอื่นคงที่

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่า $RMS[V(0.50L)]$ จากการแก้สมการอนุพันธ์กับ ค่า $RMS[V(0.50L)]$ จากสมการถดถอยที่ความเร็ว f_v 150 – 350 km./hr.

f_v	RMSสมการอนุพันธ์	RMSสมการถดถอย	%error
150	1.1623	1.2632	8.68%
250	1.5942	1.5041	5.65%
350	1.6273	1.6466	1.19%

จากตารางที่ 3 แสดงว่าค่า $RMS[V(0.50L)]$ จากสมการถดถอยให้ผลใกล้เคียงกับจากการแก้สมการอนุพันธ์ และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำ (1.19 – 8.68%) ดังนั้น สมการถดถอย แบบพหุนามลำดับที่ 2 ของผลตอบสนองต่อค่าการ โคง่กึ่งกลางคานเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์เกี่ยวเนื่องของระบบการเคลื่อนที่ ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

4. สรุปผลการวิจัย

1. ผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน ไม่เข้าสู่ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานลำดับที่ 1 เนื่องจาก ความสัมพันธ์ของ ค่าระยะห่างระหว่างเพลลา ความยาวคาน และ ความเร็วยานพาหนะที่กำหนด และ พบว่า โครงสร้างพื้นฐานมีการสั่นสะเทือนตลอดเวลา และ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนทางพลวัต มากกว่าการสั่นสะเทือนทางสถิต โดยพิจารณาในรูปของค่าเฉลี่ยของ DAF ของระยะโค้งกึ่งกลางคาน มีค่าสูงสุด เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 350 กม. ต่อ ชม. และ สูงกว่ามาตรฐาน AASHTO สำหรับค่าความแปรปรวนของโครงสร้างพื้นฐาน พบว่า ค่าความแปรปรวนจะไม่เข้าสู่ระดับอันตราย และ ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 กม. ต่อ ชม. ค่าความแปรปรวนมีค่าสูงสุด และมีลักษณะการขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง

2. วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปร ระบบคู่ควยานพาหนะต่อโครงสร้างพื้นฐาน ในรูปของสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 2

3. การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน พบว่า ผลตอบสนองจากสมการถดถอย ใกล้เคียงกับผลตอบสนองจากการแก้สมการอนุพันธ์ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) (MRG5080061)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Auersch, L. (2005). The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines. *Journal of Sound and Vibration*, (284), 103-132.
- [2] Yonglin, Z. & Jiafan, Z. (2006). Numerical simulation of stochastic road process using white noise filtration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (20), 363-372.

- [3] ปฤษฎาศ์ ศิตะปินย์, เอกสิทธิ์ ไม้วัฒนา และ สมชาย ชูชีพสกุล. (2548) ความสำคัญของความขรุขระพื้นผิวต่อยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐาน.การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, SIE, p. 40-45.
- [4] สุวรรณ์ จังชัยศิริวัฒนา. (2545). ผลกระทบของความขรุขระของผิวทางที่มีต่อพลวัตของแรงกระทำที่เพลลาของรถบรรทุก. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [5] เอกสิทธิ์ ไม้วัฒนา. (2550). การศึกษาตัวแปรในระบบบรรจุดไฟความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [6] มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. (2543). คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ: อินโฟเพรส.
- [7] Seetapan, P., Maiwattana, A. & Chucheepsakul S. (2005). Dynamic responses of a two-span beam subjected to 2DOF sprung vehicles. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติครั้งที่ 10, STR, 52-57.
- [8] พิชญ์ เจียวคุณ. (2548). การวิเคราะห์การถดถอย. เชียงใหม่: ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.



