

บทที่ 4

ผลการวิจัย และ การอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน เริ่มจากการศึกษาความชุกของพื้นผิว รูปแบบยานพาหนะ และ รูปแบบโครงสร้างพื้นฐาน จากนั้นสร้างสมการการเคลื่อนที่ ในรูปแบบ ตัวแปรไร้หน่วย และ กำหนดค่าตัวแปรไร้หน่วย ดังนี้

$$\text{ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยซ์ } q_0 / L^3 = 1.67 \times 10^{-8} - 6.88 \times 10^{-8}$$

$$\text{ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ } \Delta_c / L = 1.33 - 3.33$$

$$\text{ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา } \ell / L = 0.60 - 0.90$$

$$\text{ตัวแปรไร้หน่วยมวลตุ้รถไฟ } \mu = 0.056 - 0.083$$

$$\text{ตัวแปรไร้หน่วยมวลเพลลา } \eta = 0.009 - 0.014$$

$$\text{ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตุ้รถไฟ } f_{k_1} = 0.03 - 0.08$$

$$\text{ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหยุ่นของเพลลา } f_{k_2} = 0.09 - 0.24$$

$$\text{ตัวแปรไร้หน่วยระบบโช้คอัพรถไฟ } f_c = 0.002 - 0.032$$

$$\text{ตัวแปรไร้หน่วยแรงโน้มถ่วงโลก } f_g = 0.013 - 0.016$$

$$\text{และ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ } f_v = 0.03 - 0.11$$

จากนั้นทำการแก้ปัญหาสมการอนุพันธ์ด้วยโปรแกรม MATLAB จะได้ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และ RMS ของยานพาหนะ และ ของโครงสร้างพื้นฐาน

ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 4 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว ได้แก่ ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ Δ_c / L

ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยซ์ q_0 / L^3 และ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

กลุ่มที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ได้แก่ ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา ℓ / L และ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

กลุ่มที่ 3 พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ ได้แก่ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตุ้รถไฟ f_{k_1} ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหยุ่นของเพลลา f_{k_2} และ

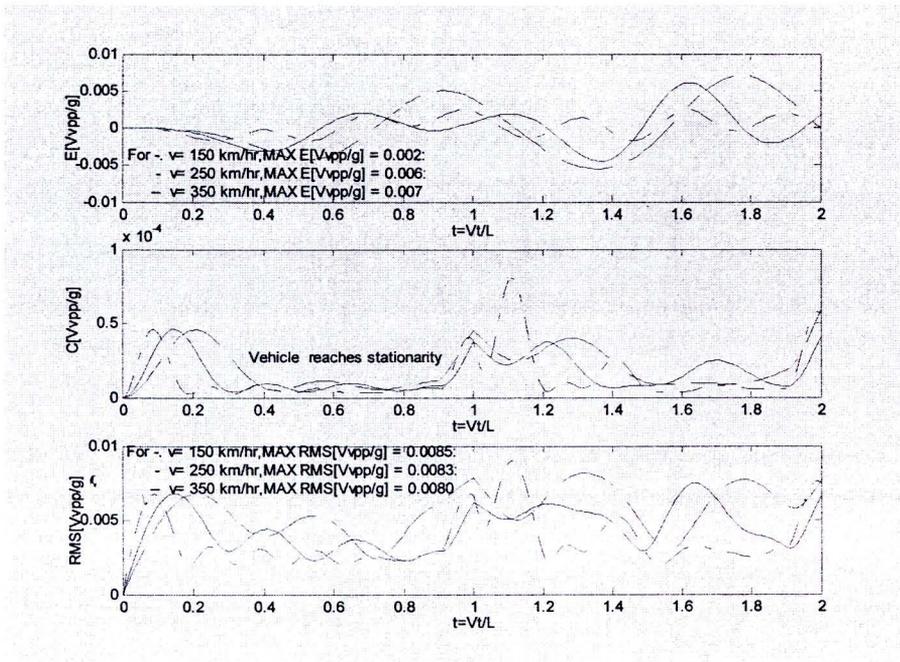
ตัวแปรไร้หน่วยระบบโช้คอัพรถไฟ f_c

กลุ่มที่ 4 พารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ได้แก่ ตัวแปรไร้หน่วย ระยะทางสหสัมพันธ์ Δ_c / L ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยส์ q_0 / L^3 ตัวแปรไร้หน่วย ของความเร็วยานพาหนะ f_v ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา l / L ตัวแปรไร้หน่วย ระบบกันสะเทือนตุ้รไฟ f_{k_1} ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหยุ่นของเพลลา f_{k_2} และ ตัวแปรไร้หน่วย ระบบใช้คัพพอร์ทไฟ f_c

จากการคำนวณค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในแต่ละกลุ่ม ทำการสร้างสมการถดถอยของระบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน และ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อชี้วัดถึง เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และ แนวทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยอธิบายผลการวิจัย และการอภิปรายผลการวิจัย เรียงตามลำดับ ดังนี้

ผลตอบสนองของยานพาหนะ

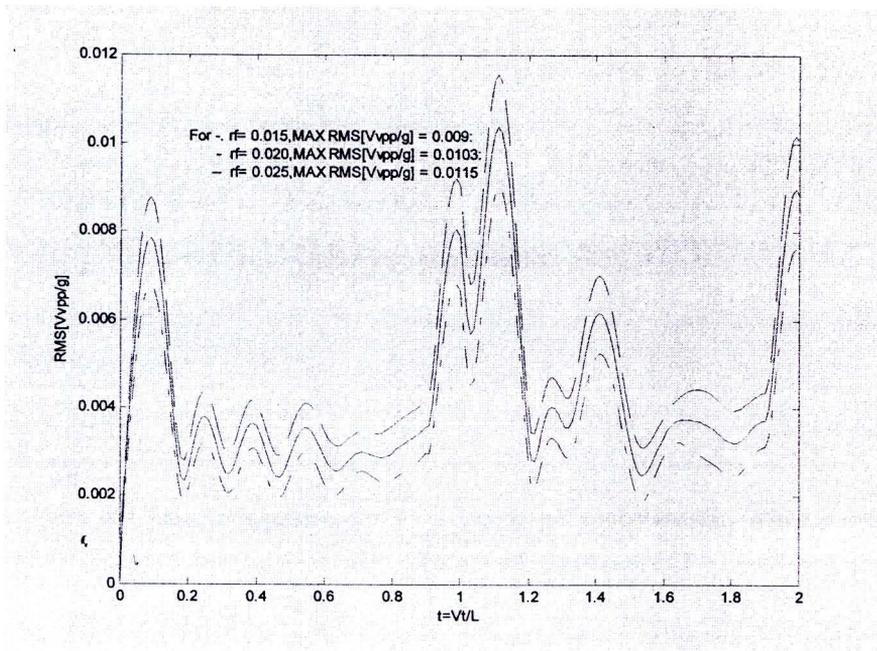
ขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น-ลง ตลอดเวลา โดยสามารถประมวลผลการสั่นสะเทือนในรูปแบบ ค่าความเร่งภายในห้องโดยสาร และ ทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ISO-2631 เพื่อใช้ในการวัด ความรู้สึกสะตอกสบายของ ผู้ใช้ยานพาหนะ และในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของยานพาหนะนั้น ให้มีความสำคัญกับ ค่าตัวแปรของพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานแบ่งได้เป็น 3 ระบบ ดังนี้ พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ พิจารณาค่าความเร็วระหว่าง 150 – 350 km./hr. ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว พิจารณา ค่าความขรุขระของพื้นผิวทาง ระหว่าง 0.015 – 0.025 m^{-1} ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วยระยะทาง สหสัมพันธ์ และ พารามิเตอร์ของโครงสร้างพื้นฐาน พิจารณา ค่าความยาวช่วงคาน ระหว่าง 20 – 30 m ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา โดยแสดงผลการวิเคราะห์ และ อภิปรายผล ตามลำดับ ภาพ 49 ถึง 51



ภาพ 49 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และ RMS ความเร่งแหวดิ่งของห้องผู้โดยสาร ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$

จากภาพ 49 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยความเร่งแหวดิ่งของห้องผู้โดยสาร อยู่ในช่วง 0.002g – 0.007g เป็นช่วงที่ผู้โดยสารพบนะรู้สึกละดวกสบาย แต่เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวนพบว่า ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะเข้าสู่ สเตชันนารี (Stationary) ได้ช้ากว่า ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ

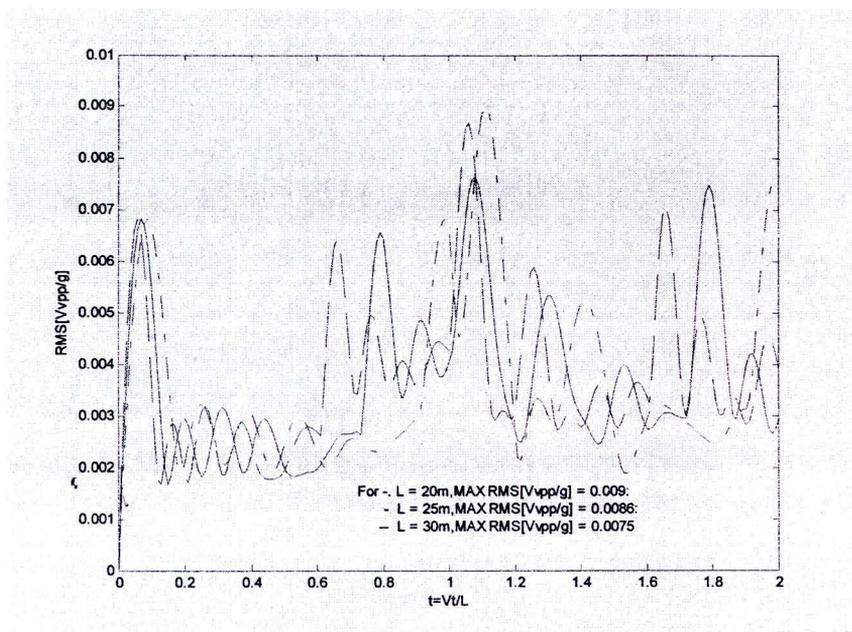
และ เมื่อทำการรวมค่าความแปรปรวนเข้ามาใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ยรากที่สอง (RMS) ดังภาพ 49 พบว่า ค่า RMS ความเร่งแหวดิ่งของห้องผู้โดยสาร เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 0.0080g – 0.0085g ผู้โดยสารพบนะยังคงรู้สึกละดวกสบาย เนื่องจากค่าความขรุขระพื้นผิว อยู่ในช่วงมาตรฐานระบบรางรถไฟของสหรัฐอเมริกา (America railway standard)



ภาพ 50 แสดงค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร ช่วงความขรุขระ $r_f = 0.015 - 0.025 m^{-1}$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $L = 20m$

จากภาพ 50 ในขณะที่ ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 350 km./hr. ถ้าทำการเพิ่มค่าความขรุขระพื้นผิว $r_f = 0.015 - 0.025 m^{-1}$ จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร อยู่ในช่วง 0.009g - 0.0115g และ เป็นช่วงที่ผู้ใช้งานพาหนะยังคงยอมรับได้

และ จากภาพ 51 แสดงว่า ค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสารลดลงเล็กน้อย โดยค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร อยู่ในช่วง 0.0075g - 0.009g และ เป็นช่วงที่ผู้ใช้งานพาหนะรู้สึกสะดวกสบาย



ภาพ 51 แสดงค่า RMS ความเร่งแวนดิงของห้องผู้โดยสาร ช่วงความยาวคาน

$L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 150 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$

จากการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนองของยานพาหนะ สรุปได้ว่า เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความเร่งแวนดิงของห้องผู้โดยสาร พบว่า อยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ใช้งานพาหนะรู้สึกสะดวกสบาย เนื่องจากได้กำหนดคุณสมบัติของระบบรางตามมาตรฐานระบบรางรถไฟของสหรัฐอเมริกา (America railway standard) และ กำหนดคุณสมบัติของแบบจำลองยานพาหนะ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างเพลลา มวลตู้รถไฟ มวลเพลลา ระบบกันสะเทือนตู้รถไฟ และ ระบบใช้คัพรถไฟ ตามตำรา Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: With application to High-Speed Railways ของผู้แต่ง Yang, Y. B., Yau, J. D., & Wu, Y. S. (2004) ของแบบจำลองยานพาหนะ รุ่น T18

สำหรับค่าความแปรปรวน เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่มีความขรุขระ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ค่าความแปรปรวนจะคงที่ หรือผลตอบสนองของยานพาหนะเข้าสู่สภาวะนิ่ง โดยยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะเข้าสู่สภาวะนิ่งได้เร็วกว่า ยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำกว่า

และ เมื่อทำการรวมค่าความแปรปรวน เพื่อคำนวณค่า RMS พบว่า ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร เพิ่มขึ้น และ ในกรณีนี้ที่ ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร สูงเกินมาตรฐานที่ผู้ใช้งานพาหนะจะยอมรับ ควรจะทำการลดค่าความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแปรปรวนที่ลดลง และ ทำให้ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร ลดลงตามลำดับ

ผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน

การพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานนั้น สร้างแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานประเภทคานช่วงเดียวที่มีรูปแบบการสั่นสะเทือน จำนวน 10 โหมด และ พิจารณาผลของอัตราความมาถึงในช่วงคาน และ อัตราความมาถึงของเพลลา จากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรความยาวคาน ตัวแปรรั้วหน่วยระยะทาง สหสัมพันธ์ และ ตัวแปรรั้วหน่วยของความเร็วยานพาหนะ เพื่อวิเคราะห์ถึงโอกาสที่ผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐานจะเกิดการสั่นพ้อง จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างในรูปของแฟกเตอร์กำลังขยายเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Amplification Factor, DAF) โดยคำนึงถึงผลรวมของการสั่นสะเทือนของโครงสร้างแบบพลวัต (Dynamic Load) กับ พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต (Static Load) หารด้วย พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต

และ เนื่องจากพื้นผิวของโครงสร้างพื้นฐานระบบราง มีความไม่สม่ำเสมอ หรือพื้นผิวมีความขรุขระ แต่ผลของค่าความขรุขระไม่ได้แสดงในรูปแบบ ค่าเฉลี่ย ผลตอบสนองของโครงสร้าง เนื่องจากไวทินอยซ์ เป็นโพรเซสที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้น ทำการคำนวณค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นโดยพื้นผิวที่มีความขรุขระมาก ส่งผลให้ค่าความแปรปรวนสูง

จากค่าความแปรปรวนที่ได้นำไปรวมกับค่าเฉลี่ย เพื่อคำนวณค่าผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐานที่แท้จริง ในรูปของค่า RMS (Root Mean Square) และ ทำการแสดงผลตอบสนองที่เกิดขึ้น เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรความเร็วยานพาหนะ และ ตัวแปรความยาวคาน เนื่องจากตัวแปรทั้งสอง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคาดหวัง DAF ของโครงสร้างพื้นฐานอย่างเห็นได้ชัด รายละเอียด ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐาน แสดงตามลำดับ ต่อไป

เมื่อพิจารณาผลของอัตราการมาถึงในช่วงคาน (Effect of span passage rate, f_v) คือ ค่าอัตราส่วนความเร็วยานพาหนะต่อความยาวคาน $\frac{V}{L}$ หากด้วย ค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน ลำดับที่หนึ่ง สมมติค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของคานช่วงเดียว เท่ากับ 7 Hz. และ กำหนดให้ค่าความยาวช่วงคาน 20 เมตร คำนวณ ค่าความเร็วยานพาหนะที่เข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติของคาน ดังสมการ

$$f_{res} = \frac{V}{L} \quad (107)$$

แทนค่าในสมการ 107

$$7(\text{Hz}) = \frac{V(\text{m/s})}{20(\text{m})}$$

จากสมการ 107 แสดงว่า ถ้าค่าความเร็วยานพาหนะ $V = 140(\text{m/s}) = 540(\text{km/hr})$ จะก่อให้เกิดการสั่นพ้อง ที่ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของคานช่วงเดียว ลำดับที่หนึ่ง ในขณะที่รถไฟความเร็วสูงส่วนใหญ่ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เกิน 400 km./hr. ดังนั้นโอกาสที่ยานพาหนะจะเคลื่อนที่เข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติของคานช่วงเดียว เป็นไปได้ได้น้อยมาก

และ ถ้าพิจารณาอัตราการมาถึงของเพลลา (Effect of axle arrival rate, f_a) คือ ค่าอัตราส่วนความเร็วยานพาหนะต่อค่าระยะห่างระหว่างเพลลา $\frac{V}{l}$ หากด้วย ค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐาน ลำดับที่หนึ่ง และ กำหนดให้ค่าความยาวช่วงคาน 20 25 และ 30 เมตร ดังตาราง 12

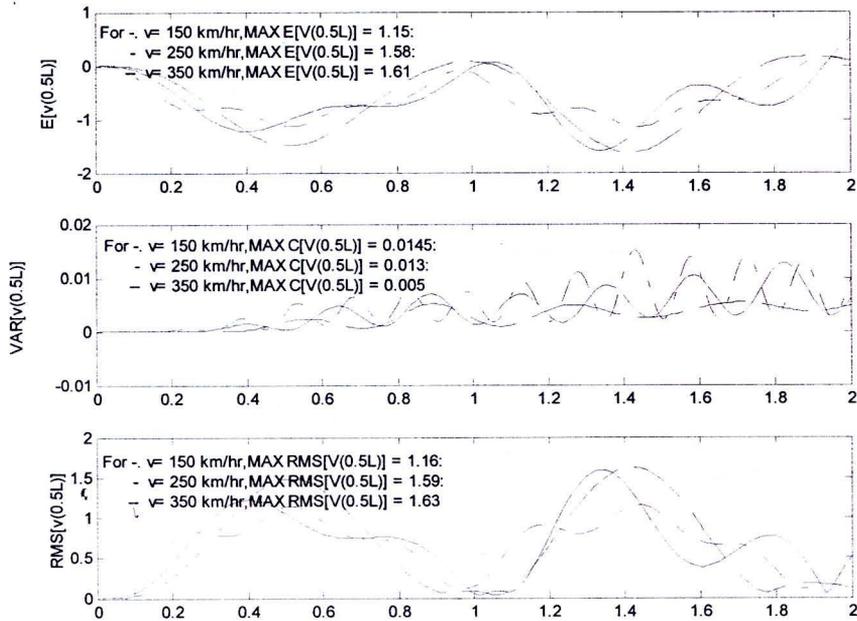
ตาราง 12 แสดงค่าอัตราการมาถึงของเพลลา ที่ความเร็ว และ ความยาวคานต่างๆ

$f_a, L = 20m$	$f_v(\text{speed}, km / hr)$		
	0.047 (150)	0.079 (250)	0.11 (350)
$\frac{l}{L} = 0.90$	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)
$\frac{l}{L} = 0.72$	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)
$\frac{l}{L} = 0.60$	0.33	0.55	0.77

จากตาราง 12 แสดงว่า ค่าความยาวคานที่เปลี่ยนแปลงไป ไม่ส่งผลต่อค่าอัตราการมาถึงของเพลลา เนื่องจาก สูตรการคำนวณ ค่าอัตราการมาถึงของเพลลา ขึ้นอยู่กับค่าระยะห่างระหว่างเพลลา l โดยกำหนดให้ $l = 18m$ และ ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้น ถ้ายานพาหนะเคลื่อนด้วยความเร็วตั้งแต่ 150 - 350 km./hr. จะไม่ก่อให้เกิดการสิ้นพ้องเนื่องจากค่าความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ธรรมชาติลำดับที่ 1

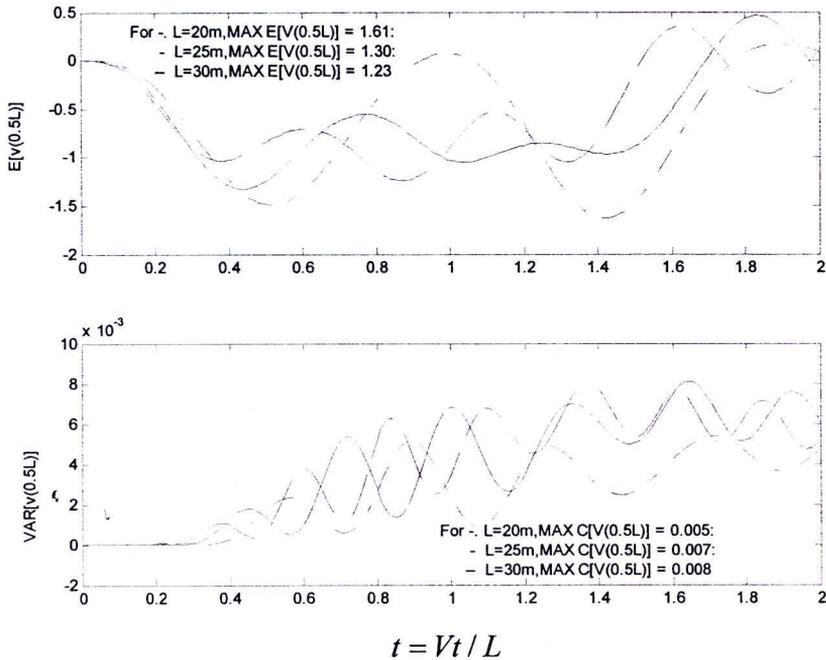
จากนั้นทำการคำนวณผลตอบแทนของโครงสร้าง ดังภาพ 52 ถึง 57



ภาพ 52 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และ RMS ของระยะโค้งกึ่งกลางคาน
ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$

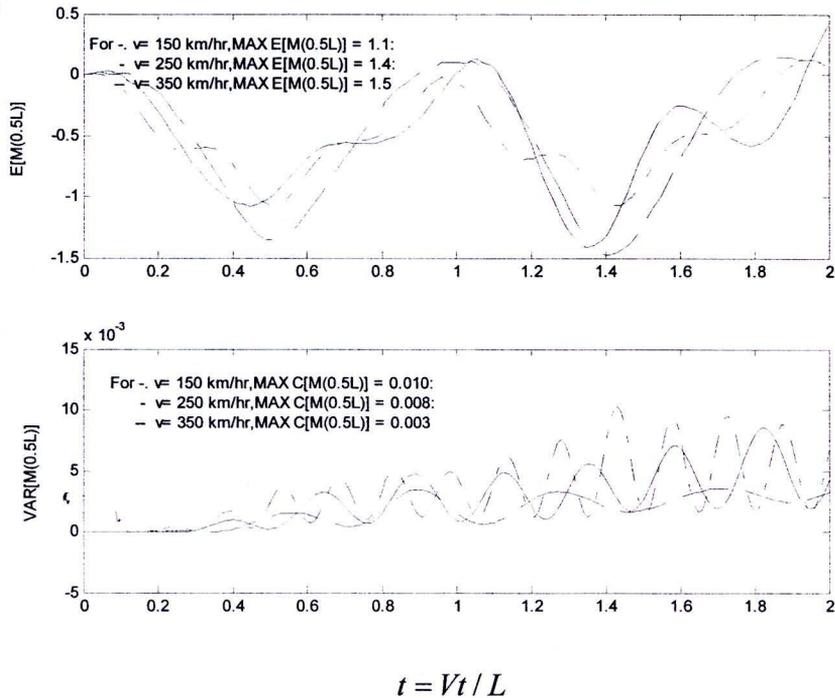
จากภาพ 52 แสดงว่า ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 km./hr. ค่าเฉลี่ยของ DAF (Dynamic Amplification Factor) ของระยะโค้งกึ่งกลางคาน เท่ากับ 1.15 และ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น เท่ากับ 250 - 350 km./hr. ค่าเฉลี่ยของ DAF ของระยะโค้งกึ่งกลางคาน จะสูงขึ้นถึง 1.61 มากกว่ามาตรฐาน AASHTO ที่กำหนดค่าเท่ากับ 1.30

และ เมื่อทำการพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่าในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 km./hr. จะทำให้มีค่าความแปรปรวนสูงที่สุด และมีลักษณะขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง (Strongly fluctuated) รวมทั้งค่าความแปรปรวนจะค่อยๆ ลดลง เมื่อความเร็วยานพาหนะเพิ่มขึ้น และ สังเกตได้ว่า ค่าความแปรปรวนของโครงสร้าง เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา หรือ ผลตอบสนองไม่เข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อทำการรวมค่าความแปรปรวน พบว่า ค่า RMS ระยะโค้งกึ่งกลางคาน จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



ภาพ 53 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของระยะโค้งกึ่งกลางคัน ช่วงความยาวคัน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$

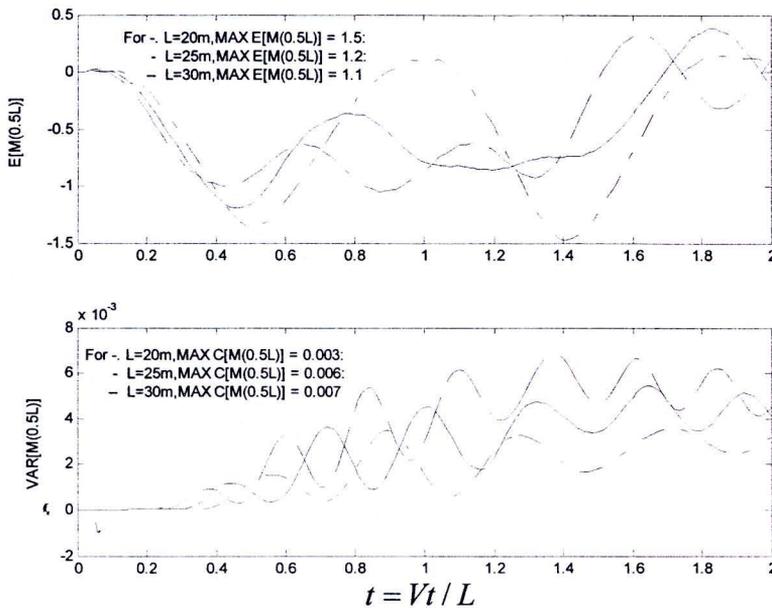
จากภาพ 53 แสดงว่า ที่ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. ค่าความยาวคันที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ ค่าเฉลี่ย DAF ระยะโค้งกึ่งกลางคัน ลดลง โดยที่ค่าความยาวคัน 30 เมตร ค่าเฉลี่ย DAF ระยะโค้งกึ่งกลางคัน เท่ากับ 1.23 และมีค่าต่ำกว่า ค่าเฉลี่ย DAF ระยะโค้งกึ่งกลางคัน ของมาตรฐาน AASHTO และ เมื่อพิจารณา ค่าความแปรปรวน พบว่า ค่าความยาวคันที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ ค่าความแปรปรวนสูงขึ้น .



ภาพ 54 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของโมเมนต์กึ่งกลางคาน
ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$

จากภาพ 54 แสดงว่า ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 km./hr. ค่าเฉลี่ยของ DAF (Dynamic Amplification Factor) ของโมเมนต์กึ่งกลางคาน เท่ากับ 1.1 และ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น เท่ากับ 250 - 350 km./hr. ค่าเฉลี่ยของ DAF ของโมเมนต์กึ่งกลางคาน จะสูงขึ้นถึง 1.5

และ เมื่อทำการพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่าในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 km./hr. จะทำให้มีค่าความแปรปรวนสูงที่สุด และมีลักษณะขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง (Strongly fluctuated) รวมทั้งค่าความแปรปรวนจะค่อยๆ ลดลง เมื่อความเร็วยานพาหนะเพิ่มขึ้น

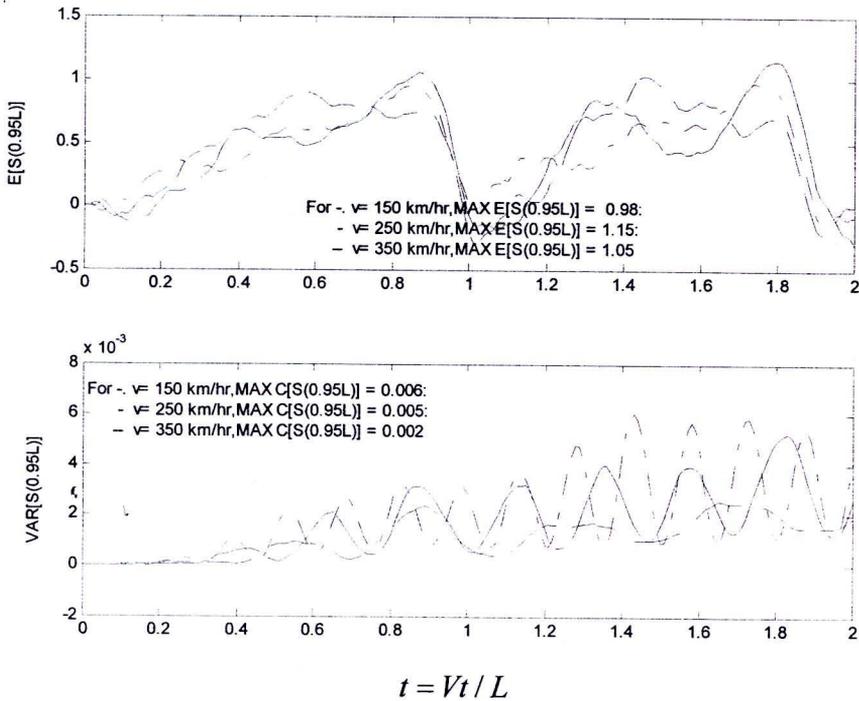


ภาพ 55 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของโมเมนต์กึ่งกลางคาน

ช่วงความยาวคาน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$

จากภาพ 55 แสดงรูปร่างของ ค่าเฉลี่ย DAF โมเมนต์กึ่งกลางคาน โดยช่วงแรก ค่าโมเมนต์ จะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่น้ำหนักเพลาน้ำของยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าสู่คานนับจากจุดเริ่มต้น จากนั้นจะลดลงเล็กน้อย และ ค่าโมเมนต์ เพิ่มขึ้นอีกครั้ง จากผลของน้ำหนักเพลาลังเคลื่อนที่ เข้าสู่คานจากจุดเริ่มต้น จากนั้น ค่าโมเมนต์ จะลดลง เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าใกล้ฐานของ คานอีกด้านหนึ่ง

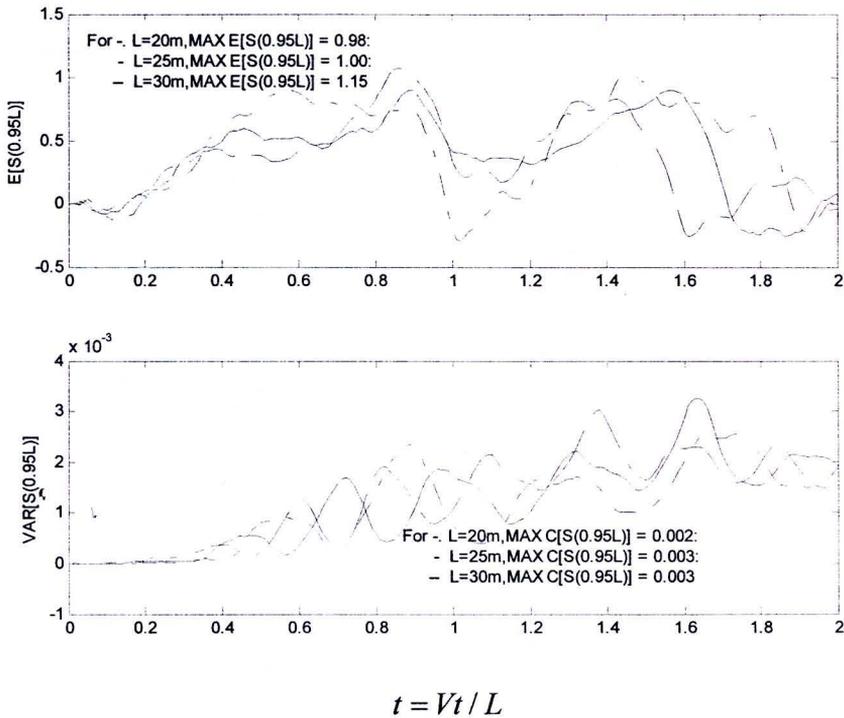
และ ถ้าค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ ค่าเฉลี่ย DAF โมเมนต์กึ่งกลางคาน ลดลง โดยที่ค่าความยาวคาน 30 เมตร จะได้ค่าเฉลี่ย DAF โมเมนต์กึ่งกลางคาน เท่ากับ 1.1 และ เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่า ค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ ค่าความแปรปรวนสูงขึ้น



ภาพ 56 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของแรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$

จากภาพ 56 แสดงว่า ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 km./hr. ค่าเฉลี่ยของ DAF (Dynamic Amplification Factor) ของแรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ เท่ากับ 0.98 และ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น เท่ากับ 250 - 350 km./hr. ค่าเฉลี่ยของ DAF ของแรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ จะสูงขึ้น เท่ากับ 1.15

และ เมื่อทำการพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่าในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 km./hr. จะทำให้มีค่าความแปรปรวนสูงที่สุด และมีลักษณะขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง (Strongly fluctuated) รวมทั้งค่าความแปรปรวนจะค่อยๆ ลดลง เมื่อความเร็วยานพาหนะเพิ่มขึ้น



$$t = Vt / L$$

ภาพ 57 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของแรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ ช่วงความยาวคาน

$L = 20 - 30\text{ m}$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr.

และ $r_f = 0.015\text{ m}^{-1}$

จากภาพ 57 แสดงรูปร่างของ ค่าเฉลี่ย DAF แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ โดยช่วงแรก ค่าแรงเฉือน จะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่น้ำหนักเพลาน้ำของยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าสู่คาน และ ค่าแรงเฉือนสูงสุด เมื่อเข้าใกล้ฐานรองรับอีกด้านหนึ่ง หรือที่ขอบคาน ตำแหน่ง $0.95L$ จากนั้น ค่าแรงเฉือน จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง จากผลของน้ำหนักเพลาลังเคลื่อนที่เข้าสู่คานจากจุดเริ่มต้น และมีค่าแรงเฉือนสูงสุด เมื่อเข้าใกล้ฐานรองรับอีกด้านหนึ่ง หรือที่ขอบคาน ตำแหน่ง $0.95L$ เช่นกัน

และ ถ้าค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ ค่าเฉลี่ย DAF แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความยาวคาน 30 เมตร จะได้ค่าเฉลี่ย DAF แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ เท่ากับ 1.15 และ เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่า ค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ ค่าความแปรปรวน เพิ่มขึ้นเล็กน้อย .

จากการวิเคราะห์ค่าผลตอบแทนของโครงสร้างพื้นฐาน สรุปได้ว่า อัตราการมาถึงในช่วงคาน และ ค่าอัตราการมาถึงของเพลลา ไม่เข้าสู่ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานลำดับที่หนึ่ง ทำให้ไม่เกิดการสั่นพ้องขึ้น และการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ก่อให้เกิดการสั่นไหวภายในโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และ ทำให้ ค่าผลตอบแทนต่อโครงสร้างสูงกว่า พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต โดยเฉพาะ ถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว สูงกว่า 350 km./hr. จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของ DAF ของระยะโค้งกึ่งกลางคาน สูงถึง 1.61 มากกว่ามาตรฐาน AASHTO และ ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 350 km./hr. การเพิ่มขึ้นของค่าความยาวคาน จากเดิม 20 เมตร เป็น ความยาวคาน 30 เมตร จะช่วยลดค่าเฉลี่ยของ DAF ของระยะโค้งกึ่งกลางคาน ลงเหลือ 1.23 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน AASHTO กำหนด

ดังนั้น ตัวแปรความเร็วยานพาหนะ และ ตัวแปรความยาวคาน มีความสำคัญต่อผลตอบแทนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างพื้นฐาน

และ ขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน จะพบว่า จุดสัมผัสระหว่างยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน เป็นจุดสัมผัสที่มีความไม่สม่ำเสมอ ที่พิจารณาในรูปของตัวแปรความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งจากการศึกษาสมการไวท์นอยซ์ แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการคำนวณค่าเฉลี่ยพจน์ของสมการไวท์นอยซ์จะหายไป เนื่องจาก ไวท์นอยซ์ เป็นโพรเซสที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และจากการศึกษาแบบจำลองพื้นผิว พบว่า ค่าความขรุขระพื้นผิว อยู่ในรูปของค่าความแปรปรวน ถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่มีความขรุขระสูง จะทำให้มีค่าความแปรปรวนสูงตามด้วยเหตุนี้ การศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน โดยรวมค่าความแปรปรวนเพื่อคำนวณค่า RMS ของระบบ จะทำให้ได้ค่าผลตอบแทนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างอย่างแท้จริง

การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน พบว่าเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ระบบ ได้แก่ พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน และพารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ โดยแต่ละพารามิเตอร์เชื่อมโยงถึงตัวแปรอิสระ ที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองของยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน แต่การที่จะแสดงผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในรูปแบบกราฟ มีข้อจำกัด ด้านการแสดงผลข้อมูลเพียง 2 ตัวแปร คือ ตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม ภายในช่วงที่กำหนด ข้อมูลไม่สามารถครอบคลุมเชิงมิติ เช่นเดียวกับ วิธีทางสถิติขั้นสูง คือ วิธีการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ในรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียล ลำดับที่ 2 เป็นวิธีการที่สามารถสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีมากกว่า 1 ตัวแปร ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง และ ทำการเลือกสรร ตัวแปรอิสระ 7 ตัวแปร นำมาจัดเรียงข้อมูลทางสถิติ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 กลุ่ม เพื่อให้ครอบคลุมพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และ ภาพรวมของระบบการเคลื่อนที่ที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ดังรายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูล ตามลำดับ

กลุ่มที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว

กำหนดตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ได้แก่

ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสัมพันธ์ Δ_c / L

ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวน้อยยซ์ q_0 / L^3

และ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้งของตัวแปรอิสระที่แปรเปลี่ยนไป ที่ส่งผลต่อค่าตัวแปรตาม คือ

ค่า $RMS[V_{pp} / g]$ ความเร่งแนวตั้งของห้องผู้โดยสาร

ค่า $RMS[V(0.50L)]$ ระยะโก่งกึ่งกลางคาน

ค่า $RMS[M(0.50L)]$ โมเมนต์กึ่งกลางคาน

และ ค่า $RMS[S(0.95L)]$ แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ ดังตาราง 13

ตาราง 13 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value ของ พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว จำนวนตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้ง

ตัวแปรตาม	สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2	p-value
$RMS[V_v pp / g]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	133.87	$F_{0.05,(3,24)} = 3.01$	0.98609	5.4734e-014
$RMS[V(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	2.5863e+006	$F_{0.05,(3,24)} = 3.01$	1.00	0
$RMS[M(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	3.4564e+006	$F_{0.05,(3,24)} = 3.01$	1.00	0
$RMS[S(0.95L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	2.6989e+006	$F_{0.05,(3,24)} = 3.01$	1.00	0

ทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$

เนื่องจาก $F\text{-ratio} \geq F_{0.05,(3,24)}$ และ $p\text{-value} \leq 0.05$ ทุกค่าตัวแปรตาม

แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า $\beta_k \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระ Δ_c / L q_0 / L^3 และ f_v กับทุกค่าตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์แบบพหุนามเมื่อยล้าลำดับที่ 2

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 แสดงว่า ตัวแปรอิสระ Δ_c / L q_0 / L^3 และ f_v

สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V_v pp / g]$ ได้สูงมาก (98.61%)

และ สำหรับตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$

ตัวแปรอิสระ Δ_c / L q_0 / L^3 และ f_v สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ (100%)

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว Y
 ดังสมการ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_1 X_2 + \beta_6 X_1 X_3 + \beta_7 X_2^2 \dots \quad (108)$$

$$+ \beta_8 X_2 X_3 + \beta_9 X_3^2$$

โดยกำหนดให้

X_1 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ Δ_c / L

X_2 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวก์นอยซ์ q_0 / L^3

X_3 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยของความถี่ยานพาหนะ f_v

และ ค่า $\beta_0 - \beta_9$ แทนค่า พารามิเตอร์ของตัวแบบ ดังตาราง 14

ตาราง 14 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์
 ของระบบพื้นผิว ของค่า $RMS[V_v pp / g]$ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$
 และ $RMS[S(0.95L)]$

พารามิเตอร์ ของตัวแบบ	$RMS[V_v pp / g]$	$RMS[V(0.50L)]$	$RMS[M(0.50L)]$	$RMS[S(0.95L)]$
β_0	0.020836	-0.22664	0.044032	0.15061
β_1	-0.0039397	-0.0076654	-0.0057991	-0.0044579
β_2	1.5995e+005	3.0922e+005	2.3586e+005	1.6134e+005
β_3	-0.28899	38.841	28.493	24.766
β_4	0.0006125	0.00082955	0.000626	0.00057029
β_5	-23535	-29445	-22407	-18995
β_6	0.0072674	0.040393	0.030679	0.017524
β_7	5.3602e+010	-3.7488e+009	-2.8625e+009	-1.4186e+009
β_8	-5.4371e+005	-1.9622e+006	-1.4938e+006	-8.4279e+005
β_9	1.7823	-199.48	-140.16	-152.06

กลุ่มที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน

กำหนดตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร ได้แก่

ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลา l/L

และ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทดสอบ 9 ครั้งของตัวแปรอิสระที่แปรเปลี่ยนไป

ที่ส่งผลต่อค่าตัวแปรตาม คือ

ค่า $RMS[V_v pp/g]$ ความเร่งแนวตั้งของห้องผู้โดยสาร

ค่า $RMS[V(0.50L)]$ ระยะโก่งกึ่งกลางคาน

ค่า $RMS[M(0.50L)]$ โมเมนต์กึ่งกลางคาน

และ ค่า $RMS[S(0.95L)]$ แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ ดังตาราง 15

ตาราง 15 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value ของ พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 9 ครั้ง

ตัวแปรตาม	สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2	p-value
$RMS[V_v pp/g]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	0.38922	$F_{0.05,(2,6)} = 5.14$	0.39346	0.83253
$RMS[V(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	3.5179	$F_{0.05,(2,6)} = 5.14$	0.85430	0.16473
$RMS[M(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	2.7104	$F_{0.05,(2,6)} = 5.14$	0.81875	0.22067
$RMS[S(0.95L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	0.6394	$F_{0.05,(2,6)} = 5.14$	0.51589	0.69165

ทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$

เนื่องจาก $F\text{-ratio} < F_{0.05,(2,6)}$ และ $p\text{-value} > 0.05$ ทุกค่าตัวแปรตาม ดังนั้น ยอมรับ H_0 นั่นคือ ที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า $\beta_k = 0$ หรือจำนวนตัวอย่างทดสอบอาจจะไม่เพียงพอ ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ดังนั้นทำการเพิ่ม จำนวนตัวอย่างทดสอบเป็น 121 ครั้ง ดังตาราง 16

ตาราง 16 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value ของ พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 121 ครั้ง

ตัวแปรตาม	สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2	p-value
$RMS[V_{pp}/g]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	2.9944	$F_{0.05,(2,118)} = 3.07$	0.1152	0.014066
$RMS[V(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	27.016	$F_{0.05,(2,118)} = 3.07$	0.54015	0
$RMS[M(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	29.275	$F_{0.05,(2,118)} = 3.07$	0.56002	0
$RMS[S(0.95L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	10.387	$F_{0.05,(2,118)} = 3.07$	0.31111	3.0705e-008

ทดสอบสมมติฐาน จากจำนวนตัวอย่างทดสอบเป็น 121 ครั้ง

เนื่องจาก $F\text{-ratio} > F_{0.05,(2,118)}$ และ $p\text{-value} \leq 0.05$ ของตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$

$RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$

แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า $\beta_k \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระ l/L และ f_v กับทุกค่าตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 2

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 แสดงว่า ตัวแปรอิสระ l/L และ f_v สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ ได้ในระดับปานกลาง ($\approx 50\%$) และ อธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[S(0.95L)]$ ได้ในระดับต่ำถึงปานกลาง ($\approx 30\%$)

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน Y คือ ค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ ดังสมการ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_2^2 \quad (109)$$

โดยกำหนดให้

X_1 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลาล l/L

X_2 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยของความถี่ยานพาหนะ f_v

และ ค่า $\beta_0 - \beta_5$ แทนค่า พารามิเตอร์ของตัวแบบ ดังตาราง 17

ตาราง 17 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ จำนวนตัวอย่างทดสอบ 121 ครั้ง

พารามิเตอร์ ของตัวแบบ	$RMS[V(0.50L)]$	$RMS[M(0.50L)]$	$RMS[S(0.95L)]$
β_0	1.4118	0.7357	3.5251
β_1	0.47219	2.5905	-7.4083
β_2	-18.449	-26.529	5.6563
β_3	-1.2801	-2.6252	4.7568
β_4	28.148	28.572	2.9346
β_5	2.5519	52.86	-58.524

จากตาราง 16 ทดสอบสมมติฐานค่า $F\text{-ratio} < F_{0.05,(2,118)}$ ของตัวแปรตาม $RMS[V_v, pp/g]$ แสดงว่า ยอมรับ H_0 นั่นคือ ที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า $\beta_k = 0$ หรือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 อาจจะไม่เพียงพอในการอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้น

ดังนั้นทำการวิเคราะห์รูปแบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 1 ถึง 4 เพื่อคำนวณหา ลำดับของฟังก์ชันโพลีโนเมียล ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ สมการถดถอยของระบบโครงสร้างพื้นฐานของ $RMS[V_v, pp/g]$ ดังตาราง 18

ตาราง 18 แสดงโพลีโนเมียลลำดับที่ 1 ถึง 4 สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value ของ $RMS[V_v, pp/g]$ พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 121 ครั้ง

ลำดับที่	สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2	p-value
1	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	0.546	$F_{0.05,(2,119)} = 3.07$	0.0091695	0.58072
2	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	2.9944	$F_{0.05,(2,118)} = 3.07$	0.1152	0.014066
3	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	13.034	$F_{0.05,(2,117)} = 3.07$	0.51381	5.3846e-014
4	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	11.975	$F_{0.05,(2,116)} = 3.08$	0.61265	3.3307e-016

ทดสอบสมมติฐาน $F\text{-ratio} > F_{0.05,(2,117)}$ และ $p\text{-value} \leq 0.05$ ของฟังก์ชันโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า $\beta_k \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระ l/L และ f_v กับตัวแปรตาม $RMS[V_v, pp/g]$ มีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 3

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ r^2 แสดงว่า ค่า r^2 ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 สูงกว่า ค่า r^2 ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 และสามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V_v pp / g]$ ในระดับปานกลาง ($\approx 50\%$)

และ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ r^2 ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 กับค่า r^2 ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 4 แสดงว่า ค่า r^2 ไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้น ฟังก์ชันโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 ตัวแปรอิสระ l/L และ f_v มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการอธิบายความผันแปรของตัวแปรตาม $RMS[V_v pp / g]$

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 ของพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน Y คือ ค่า $RMS[V_v pp / g]$ ดังสมการ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_2^2 \dots + \beta_6 X_1^3 + \beta_7 X_1^2 X_2 + \beta_8 X_1 X_2^2 + \beta_9 X_2^3 \quad (110)$$

โดยกำหนดให้

X_1 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา l/L

X_2 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยของความถี่ยานพาหนะ f_v

และ ค่า $\beta_0 - \beta_9$ แทนค่า พารามิเตอร์ของตัวแบบ ดังตาราง 19

ตาราง 19 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลีโนเมียลลำดับที่ 3
ของพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_v pp / g]$

พารามิเตอร์ของตัวแบบ	$RMS[V_v pp / g]$
β_0	0.14754
β_1	-0.47822
β_2	-1.2659
β_3	0.50126
β_4	4.0039
β_5	-3.2694
β_6	-0.19774
β_7	-1.2164
β_8	-17.7
β_9	84.626

กลุ่มที่ 3 พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ

กำหนดตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร ได้แก่

ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตัวรถไฟ f_{k_1}

ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหยุ่นของเพลลา f_{k_2}

และ ตัวแปรไร้หน่วยระบบใช้ค้ำพรวดไฟ f_c



ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทดสอบ 81 ครั้งของตัวแปรอิสระที่แปรเปลี่ยนไป
ที่ส่งผลต่อค่าตัวแปรตาม คือ

ค่า $RMS[V_{vpp}/g]$ ความเร่งแฉวงดิ่งของห้องผู้โดยสาร

ค่า $RMS[V(0.50L)]$ ระยะโก่งกึ่งกลางคาน

ค่า $RMS[M(0.50L)]$ โมเมนต์กึ่งกลางคาน

และ ค่า $RMS[S(0.95L)]$ แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ ดังตาราง 20

ตาราง 20 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value ของ พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ จำนวนตัวอย่างทดสอบ 81 ครั้ง

ตัวแปรตาม	สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2	p-value
$RMS[V_{vpp}/g]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	177.67	$F_{0.05,(4,78)} = 2.51$	0.97415	0
$RMS[V(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	721.04	$F_{0.05,(4,78)} = 2.51$	0.99350	0
$RMS[M(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	877.71	$F_{0.05,(4,78)} = 2.51$	0.99466	0
$RMS[S(0.95L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	75.027	$F_{0.05,(4,78)} = 2.51$	0.94088	0

ทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$

เนื่องจาก $F-ratio \geq F_{0.05,(4,78)}$ และ $p-value \leq 0.05$ ทุกค่าตัวแปรตาม แสดงว่า ปฏิเสธ H_0

นั่นคือ ที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า $\beta_k \neq 0$ หรือ ตัวแปรอิสระ f_v f_{k_1} f_{k_2} และ f_c กับ

ทุกค่าตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์แบบพหุคูณเมื่อยล้าลำดับที่ 2

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 แสดงว่า ตัวแปรอิสระ f_v f_{k_1} f_{k_2} และ f_c สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V_{pp}/g]$ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ ได้ในระดับสูงมาก (94–99%)

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ Y ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 Y = & \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_1^2 + \beta_6 X_1 X_2 + \beta_7 X_1 X_3 \dots \\
 & + \beta_8 X_1 X_4 + \beta_9 X_2^2 + \beta_{10} X_2 X_3 + \beta_{11} X_2 X_4 + \beta_{12} X_3^2 + \beta_{13} X_3 X_4 \dots \\
 & + \beta_{14} X_4^2
 \end{aligned} \tag{111}$$

โดยกำหนดให้

X_1 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

X_2 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตัวรถไฟ f_{k_1}

X_3 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหนุ่ของเพลลา f_{k_2}

X_4 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระบบใช้คัพพอร์ทไฟ f_c

และ ค่า $\beta_0 - \beta_{14}$ แทนค่า พารามิเตอร์ของตัวแบบ ดังตาราง 21

ตาราง 21 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์
ของระบบยานพาหนะ ของค่า $RMS[V_v pp / g]$ $RMS[V(0.50L)]$
 $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$

พารามิเตอร์ ของตัวแบบ	$RMS[V_v pp / g]$	$RMS[V(0.50L)]$	$RMS[M(0.50L)]$	$RMS[S(0.95L)]$
β_0	-0.0078181	-0.042179	0.19255	0.26429
β_1	0.2423	35.655	26.045	23.611
β_2	-0.01324	0.52582	0.451	0.62955
β_3	-0.059009	-1.0304	-0.94514	-0.99025
β_4	0.70706	1.8998	2.0315	2.1514
β_5	-0.8689	-185.32	-129.38	-149.79
β_6	1.346	-3.6146	-2.982	-4.6861
β_7	-1.01	6.4227	5.8207	4.4067
β_8	-3.6196	-2.2951	-9.6486	7.8697
β_9	1.6825	0.98739	0.79849	1.7506
β_{10}	0.079692	-1.6267	-1.4227	-1.1193
β_{11}	-10.274	-1.6584	-1.7276	-6.6971
β_{12}	0.61336	2.5207	2.2798	2.6387
β_{13}	12.667	-20.481	-16.688	-21.404
β_{14}	-30.139	24.856	23.947	16.577

กลุ่มที่ 4 พารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

กำหนดตัวแปรอิสระ 7 ตัวแปร ได้แก่

ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ Δ_c / L

ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวนอยซ์ q_0 / L^3

ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา l / L

ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตุ้รถไฟ f_{k_1}

ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหยุ่นของเพลลา f_{k_2}

และ ตัวแปรไร้หน่วยระบบใช้คัพพอร์ทไฟ f_c

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทดสอบ 2,187 ครั้งของตัวแปรอิสระที่แปรเปลี่ยนไป
ที่ส่งผลต่อค่าตัวแปรตาม คือ

ค่า $RMS[V_{pp} / g]$ ความเร่งแนวตั้งของห้องผู้โดยสาร

ค่า $RMS[V(0.50L)]$ ระยะโก่งกึ่งกลางคาน

ค่า $RMS[M(0.50L)]$ โมเมนต์กึ่งกลางคาน

และ ค่า $RMS[S(0.95L)]$ แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ ดังตาราง 22

ตาราง 22 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value ของ ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 2,187 ครั้ง

ตัวแปรตาม	สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2	p-value
$RMS[V_v pp/g]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	2307.1	$F_{0.05,(7,\infty)} = 2.01$	0.97405	0
$RMS[V(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	329.27	$F_{0.05,(7,\infty)} = 2.01$	0.84271	0
$RMS[M(0.50L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	264.26	$F_{0.05,(7,\infty)} = 2.01$	0.81132	0
$RMS[S(0.95L)]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	70.386	$F_{0.05,(7,\infty)} = 2.01$	0.53386	0

ทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$

เนื่องจาก $F\text{-ratio} \geq F_{0.05,(7,\infty)}$ และ $p\text{-value} \leq 0.05$ ทุกค่าตัวแปรตาม

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 กับทุกค่าตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์แบบ โพลีโนเมียลลำดับที่ 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 $RMS[V_v pp/g]$

ได้ในระดับสูงมาก (97%) สำหรับตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ และ $RMS[M(0.50L)]$

สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้น ได้ในระดับสูง (81–84%) และ สำหรับตัวแปรตาม

$RMS[S(0.95L)]$ สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้น ในระดับปานกลาง (53%)

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน Y ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 Y = & \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_1^2 \dots \\
 & + \beta_9 X_1 X_2 + \beta_{10} X_1 X_3 + \beta_{11} X_1 X_4 + \beta_{12} X_1 X_5 + \beta_{13} X_1 X_6 + \beta_{14} X_1 X_7 \dots \\
 & + \beta_{15} X_2^2 + \beta_{16} X_2 X_3 + \beta_{17} X_2 X_4 + \beta_{18} X_2 X_5 + \beta_{19} X_2 X_6 + \beta_{20} X_2 X_7 \dots \\
 & + \beta_{21} X_3^2 + \beta_{22} X_3 X_4 + \beta_{23} X_3 X_5 + \beta_{24} X_3 X_6 + \beta_{25} X_3 X_7 + \beta_{26} X_4^2 \dots \\
 & + \beta_{27} X_4 X_5 + \beta_{28} X_4 X_6 + \beta_{29} X_4 X_7 + \beta_{30} X_5^2 + \beta_{31} X_5 X_6 + \beta_{32} X_5 X_7 \dots \\
 & + \beta_{33} X_6^2 + \beta_{34} X_6 X_7 + \beta_{35} X_7^2
 \end{aligned} \tag{112}$$

โดยกำหนดให้

X_1 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา l/L

X_2 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

X_3 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ Δ_c/L

X_4 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยส์ q_0/L^3

X_5 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตัวรถไฟ f_{k_1}

X_6 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหยุ่นของเพลลา f_{k_2}

X_7 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระบบใช้ค้ำพรวดไฟ f_c

และ ค่า $\beta_0 - \beta_{35}$ แทนค่า พารามิเตอร์ของตัวแบบ ดังตาราง 23

ตาราง 23 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์
ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_v, pp / g]$
 $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$

พารามิเตอร์ ของตัวแบบ	$RMS[V_v, pp / g]$	$RMS[V(0.50L)]$	$RMS[M(0.50L)]$	$RMS[S(0.95L)]$
β_0	0.10085	3.1438	3.549	4.3061
β_1	-0.47441	-5.782	-5.7873	-10.866
β_2	0.52382	-1.9348	-16.678	18.404
β_3	-0.021263	-0.0045783	-0.0067956	-0.0014131
β_4	2.9222e+006	1.3298e+005	8.2219e+005	2.3056e+005
β_5	0.61938	0.22401	0.69649	-0.079501
β_6	0.55287	-0.24354	-0.96491	-0.27775
β_7	2.8525	0.32206	-1.3326	2.0022
β_8	0.44582	4.078	3.1357	8.8661
β_9	-0.34991	10.571	22.177	-25.632
β_{10}	0.024912	0.0003843	0.0047477	-0.0009578
β_{11}	-4.4618e+006	-9.4421e+006	1.1517e+006	-1.5116e+007
β_{12}	-0.79589	0.070399	-0.81319	0.45519
β_{13}	-0.75665	-0.65008	0.84698	-0.10499
β_{14}	-2.3409	2.2159	4.3516	-0.0073209
β_{15}	-0.96533	-49.319	19.254	-40.933
β_{16}	-0.0088372	0.00057803	-0.0019498	-0.009444
β_{17}	-1.0313e+006	1.0556e+008	-8.3066e+006	1.7592e+008
β_{18}	0.95438	-2.718	-2.189	-2.3081
β_{19}	-0.45757	3.8509	3.9066	1.8754
β_{20}	-0.11008	2.5476	-1.2637	1.9105
β_{21}	0.0034371	0.00098732	0.00081494	0.00089796
β_{22}	-86574	-24081	-33430	-14589

พารามิเตอร์ ของตัวแบบ	$RMS[V_{pp}/g]$	$RMS[V(0.50L)]$	$RMS[M(0.50L)]$	$RMS[S(0.95L)]$
β_{23}	-0.049851	0.013338	0.010828	0.0066774
β_{24}	-0.076627	-0.0061934	-0.0037457	-0.014687
β_{25}	-0.33919	-0.040964	-0.02906	-0.0059415
β_{26}	5.7231e+012	6.6092e+011	1.2465e+012	-2.9177e+011
β_{27}	3.0405e+006	1.7854e+006	6.5717e+006	1.1462e+006
β_{28}	4.0387e+006	1.8912e+006	-6.4681e+006	-2.0316e+006
β_{29}	8.9182e+006	-2.1846e+007	-2.7749e+007	-6.593e+006
β_{30}	2.5675	0.30694	-0.057083	1.0236
β_{31}	0.48279	-1.201	-1.1992	-0.71959
β_{32}	-15.437	-1.1836	-0.8856	-5.1196
β_{33}	0.41655	1.9648	1.6456	1.6474
β_{34}	17.435	-16.318	-13.347	-15.902
β_{35}	-38.756	25.491	26.084	17.841

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) จะได้สมการถดถอยพหุคูณ แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 3 สำหรับ ค่าตัวแปรตาม $RMS[V_{pp}/g]$ ของพารามิเตอร์โครงสร้างพื้นฐาน และ สมการถดถอยพหุคูณ แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ทุกระบบ จากนั้น ทำการเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองต่อโครงสร้าง จากผลการทดลอง กับค่าผลตอบสนองต่อโครงสร้าง จากสมการถดถอย เพื่อทดสอบเปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน ที่เกิดขึ้น ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 – 350 km./hr. และ ตัวแปรอิสระอื่นคงที่ โดยสาเหตุที่เลือกตัวแปรอิสระ ความเร็วของยานพาหนะ เนื่องจาก ตัวแปรอิสระดังกล่าว อยู่ในภาวะวิเคราะห์ระบบความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ บนโครงสร้างพื้นฐาน ทุกกลุ่มที่ศึกษา ดังตาราง 24 ถึง 27

ตาราง 24 เปรียบเทียบค่า $RMS[V_{pp}/g]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[V_{pp}/g]$

จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr.

$RMS[V_{pp}/g]$	ความเร็วยานพาหนะ (km./hr.) และ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน					
	150	%	250	%	350	%
ผลการทดลอง	0.0090404	-	0.0074768	-	0.0081767	-
กลุ่มที่ 1	0.0092729	2.57	0.0070560	5.63	0.0083942	2.66
กลุ่มที่ 2	0.0089747	0.73	0.0077380	3.49	0.0081848	0.10
กลุ่มที่ 3	0.0057544	36.35	0.0075761	1.33	0.0076648	6.26
กลุ่มที่ 4	0.0137160	51.72	0.0131460	75.82	0.0106520	30.27

ตาราง 25 เปรียบเทียบค่า $RMS[V(0.50L)]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[V(0.50L)]$

จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr.

$RMS[V(0.50L)]$	ความเร็วยานพาหนะ (km./hr.) และ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน					
	150	%	250	%	350	%
ผลการทดลอง	1.1623	-	1.5942	-	1.6273	-
กลุ่มที่ 1	1.1623	0.00	1.5939	0.02	1.6276	0.02
กลุ่มที่ 2	1.1317	2.63	1.3593	14.73	1.5920	2.17
กลุ่มที่ 3	1.1875	2.17	1.5924	0.11	1.6277	0.02
กลุ่มที่ 4	1.2632	8.68	1.5041	5.65	1.6466	1.19

ตาราง 26 เปรียบเทียบค่า $RMS[M(0.50L)]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[M(0.50L)]$
จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr.

$RMS[M(0.50L)]$	ความเร็วยานพาหนะ (km./hr.) และ เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อน					
	150	%	250	%	350	%
ผลการทดลอง	1.0767	-	1.4182	-	1.4794	-
กลุ่มที่ 1	1.0768	0.01	1.4180	0.01	1.4797	0.02
กลุ่มที่ 2	1.0208	5.19	1.2060	14.96	1.4966	1.16
กลุ่มที่ 3	1.0954	1.74	1.4180	0.01	1.4825	0.21
กลุ่มที่ 4	1.1390	5.79	1.3156	7.23	1.5305	3.45

ตาราง 27 เปรียบเทียบค่า $RMS[S(0.95L)]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[S(0.95L)]$
จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr.

$RMS[S(0.95L)]$	ความเร็วยานพาหนะ (km./hr.) และ เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อน					
	150	%	250	%	350	%
ผลการทดลอง	0.98016	-	1.1558	-	1.0284	-
กลุ่มที่ 1	0.98006	0.01	1.1559	0.01	1.0284	0.00
กลุ่มที่ 2	0.97245	0.79	1.0010	13.39	0.91286	11.23
กลุ่มที่ 3	1.0045	2.48	1.1635	0.67	1.0237	0.46
กลุ่มที่ 4	1.0883	11.03	1.0933	5.41	1.0167	1.14

จากตาราง 24 ถึง 27 แสดงว่า ค่าผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐานจากสมการถดถอยของทุกกลุ่มศึกษา มีความคลาดเคลื่อนซึ่งแสดงในรูปของ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และสามารถอธิบายผลการศึกษา แยกตามกลุ่มศึกษาดังนี้

กลุ่มที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว แสดงว่า ค่า $RMS[V_{,pp}/g]$ ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำมาก (2.57–5.63%) ในขณะที่ค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ ให้ผลเทียบเท่าค่าจากผลการทดลอง และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเข้าใกล้ศูนย์ (0.00–0.02%)
 ดังนั้น สมการถดถอย แบบโพลิโนเมียล ลำดับที่ 2 เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว

กลุ่มที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน แสดงว่า ค่า $RMS[V_{,pp}/g]$ ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำมาก (0.10–3.49%)
 ในรูปของ สมการถดถอย แบบโพลิโนเมียล ลำดับที่ 3 ในขณะที่ค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ จากสมการถดถอย ส่วนใหญ่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำมาก (0.10–5.19%)
 ในขณะที่ค่าจากสมการถดถอยบางส่วน ที่ความเร็วยานพาหนะ 250 km./hr มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผลของ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 ที่ตัวแปรอิสระ l/L และ f_v สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ ได้ในระดับปานกลาง ($\approx 50\%$) และ อธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[S(0.95L)]$ ได้ในระดับต่ำถึงปานกลาง ($\approx 30\%$) แม้ว่าตัวแปรอิสระจะสามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ในระดับต่ำถึงปานกลาง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนยังคงอยู่ในระดับต่ำ ($\approx 14\%$) และ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติด้วยสมการถดถอยแบบโพลิโนเมียล ลำดับที่ 2 เพียงพอสำหรับกรณีศึกษาดังกล่าว
 ดังนั้น สมการถดถอย แบบโพลิโนเมียล ลำดับที่ 2 และ 3 เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ระบบโครงสร้างพื้นฐาน

กลุ่มที่ 3 พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ แสดงว่า ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำมากถึงปานกลาง (1.33–36.35%) โดยเฉพาะที่ความเร็ว 150 km./hr. มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ของตัวแบบ $\beta_0 - \beta_4$ ที่คำนวณค่าเหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียว ในขณะที่ค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ จากสมการถดถอยให้ผลเทียบเท่ากับค่าจากผลการทดลอง และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเข้าใกล้ศูนย์ (0.01–2.48%)
 ดังนั้น สมการถดถอย แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ระบบยานพาหนะ

กลุ่มที่ 4 พารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน แสดงว่า ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ จากสมการถดถอยให้ผล แตกต่างจากผลการทดลองมาก และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง (30.27–75.82%)
 ในขณะที่ค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ จากสมการถดถอยให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำ (1.14–11.03%)
 ดังนั้น สมการถดถอย แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 ของ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

และ สำหรับสมการถดถอยแบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 ของ $RMS[V_{pp}/g]$ แม้ว่า จากการทดสอบสมมติฐาน แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 และ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 สูงมาก (0.97405) แต่ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ดังนั้นทำการทดสอบ โพลีโนเมียล ลำดับที่ 3 ดังตาราง 28

ตาราง 28 แสดงโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 และ 3 สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value ของ $RMS[V, pp/g]$ ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 2,187 ครั้ง

ลำดับที่	สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2	p-value
2	$H_0: \beta_k = 0$ $H_1: \beta_k \neq 0$	2307.1	$F_{0.05,(7,\infty)} = 2.01$	0.97405	0
3	$H_0: \beta_k = 0$ $H_1: \beta_k \neq 0$	1850.0	$F_{0.05,(7,\infty)} = 2.01$	0.99152	0

จากตาราง 28 แสดงว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 เล็กน้อย และมีค่าเข้าใกล้ 1 หรือแสดงให้เห็นว่า ตัวแปรอิสระระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม ในระดับสูงมาก จากนั้นทำการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ของ $RMS[V, pp/g]$ จากสมการถดถอยโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 และ 3 เปรียบเทียบกับค่า $RMS[V, pp/g]$ จากผลการทดลอง ดังตาราง 29

ตาราง 29 เปรียบเทียบค่า $RMS[V, pp/g]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[V, pp/g]$ จากสมการถดถอยโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 และ 3 ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr.

$RMS[V, pp/g]$	ความเร็วยานพาหนะ (km./hr.) และ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน					
	150	%	250	%	350	%
ผลการทดลอง	0.0090404	-	0.0074768	-	0.0081767	-
ลำดับที่ 2	0.0137160	51.72	0.0131460	75.82	0.0106520	30.27
ลำดับที่ 3	0.0108480	19.99	0.0106280	42.15	0.0125900	53.97

จากตาราง 29 แสดงว่า แม้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ของค่า $RMS[V_v pp / g]$ ที่ความเร็วยานพาหนะ 150 และ 250 km./hr. ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 จะต่ำกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 แต่ถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 350 km./hr. ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 สูงกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง 53.90% ดังนั้น การเพิ่มลำดับของสมการถดถอยโพลีโนเมียล อาจจะไม่ใช่วิธีแนวทางแก้ปัญหาที่แท้จริง ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ $\beta_0 - \beta_{35}$ แสดงว่า พารามิเตอร์ของตัวแบบแต่ละตัว กำหนดในช่วงแห่งความเชื่อมั่นที่ 95 % ดังตาราง 30 ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ $\beta_0 - \beta_{35}$ ที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลต่อค่าผลตอบแทนของยานพาหนะ และ ของโครงสร้างพื้นฐาน

ยกตัวอย่าง จากสมการถดถอยโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_v pp / g]$ แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ β_0 เท่ากับ 0.10085 และ ที่ช่วงแห่งความเชื่อมั่นที่ 95 % ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ β_0 มีค่าระหว่าง $0.019873 \leq \beta_0 \leq 0.18182$ และ ถ้าคำนวณค่า $RMS[V_v pp / g]$ ที่ความเร็ว 150 km./hr. โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ β_0 เท่ากับ 0.0137160 ซึ่งค่าดังกล่าว ยังคงอยู่ในช่วงที่กำหนดของพารามิเตอร์ของตัวแบบ β_0 และ กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ $\beta_1 - \beta_{35}$ คงที่ จะทำให้ได้ค่า $RMS[V_v pp / g]$ ที่ความเร็ว 150 km./hr. จากสมการถดถอย เท่ากับ ค่า $RMS[V_v pp / g]$ จากผลการทดลอง ดังนั้น สมการถดถอย แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 ของ $RMS[V_v pp / g]$ เหมาะสมที่จะนำไปใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

ตาราง 30 แสดงพารามิเตอร์ และ ช่วงความเชื่อมั่นของตัวแบบ สมการถดถอยโพลีโนเมียล
ลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน
ของค่า $RMS[V, pp/g]$

ลำดับที่ของ พารามิเตอร์ของ ตัวแบบ	ช่วงความเชื่อมั่น ขีดจำกัดล่าง	ค่าพารามิเตอร์ของ ตัวแบบ	ช่วงความเชื่อมั่น ขีดจำกัดบน
0	0.019873	0.10085	0.18182
1	-0.79339	-0.47441	-0.15544
2	0.37203	0.52382	0.67561
3	-0.02838	-0.021263	-0.014147
4	8.8623e+005	2.9222e+006	4.9581e+006
5	0.39745	0.61938	0.84131
6	0.48202	0.55287	0.62372
7	2.5195	2.8525	3.1856
8	0.12884	0.44582	0.76281
9	-0.66288	-0.34991	-0.036944
10	0.0091488	0.024912	0.040674
11	-8.4434e+006	-4.4618e+006	-4.8026e+005
12	-1.2332	-0.79589	-0.35858
13	-0.89754	-0.75665	-0.61577
14	-3.0092	-2.3409	-1.6726
15	-1.4708	-0.96533	-0.45983
16	-0.025595	-0.0088372	0.0079211
17	-2.9243e+006	-1.0313e+006	8.6159e+005
18	0.44935	0.95438	1.4594
19	-0.6221	-0.45757	-0.29304

ลำดับที่ของ พารามิเตอร์ของตัว แบบ	ช่วงความเชื่อมั่น ขีดจำกัดล่าง	ค่าพารามิเตอร์ของ ตัวแบบ	ช่วงความเชื่อมั่น ขีดจำกัดบน
20	-0.89438	-0.11008	0.67423
21	0.0022146	0.0034371	0.0046595
22	-1.7532e+005	-86574	2173.9
23	-0.07353	-0.049851	-0.026173
24	-0.084341	-0.076627	-0.068913
25	-0.37596	-0.33919	-0.30242
26	-6.7543e+012	5.7231e+012	1.8201e+013
27	3.2821e+005	3.0405e+006	5.7527e+006
28	3.1551e+006	4.0387e+006	4.9223e+006
29	4.7647e+006	8.9182e+006	1.3072e+007
30	1.2135	2.5675	3.9216
31	0.25311	0.48279	0.71247
32	-16.545	-15.437	-14.329
33	0.30954	0.41655	0.52356
34	17.074	17.435	17.796
35	-41.226	-38.756	-36.286

จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ สรุปว่า ผลตอบสนองที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของ ยานพาหนะความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐาน เกี่ยวเนื่องกับความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของ ระบบพื้นผิว ระบบโครงสร้างพื้นฐาน และ ระบบยานพาหนะ โดยในแต่ละระบบจะมีค่าตัวแปร ที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบ และ ต่อผลตอบสนองต่อยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน ด้วยเหตุนี้ การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2

มีความเหมาะสมในการหาผลตอบสนองที่เกิดขึ้น และ สำหรับค่าผลตอบสนอง $RMS[V_{pp}/g]$ ระบบโครงสร้างพื้นฐาน วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 ไม่สามารถตอบปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และ ตัวแปรตามที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นทำการคำนวณค่าสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลีโนเมียล ลำดับขั้นสูงกว่า เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการถดถอย จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงว่า ค่าสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 3 เหมาะสมในการวิเคราะห์ ผลตอบสนอง ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ ระบบโครงสร้างพื้นฐาน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน นำค่า สมการถดถอยแบบโพลีโนเมียล มาคำนวณค่าผลตอบสนองเปรียบเทียบกับค่าผลตอบสนองจาก ผลการทดลอง พบว่า ส่วนใหญ่ ค่าผลตอบสนองจากสมการถดถอย ใกล้เคียงกับ ค่าผลตอบสนอง จากผลการทดลอง และ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำ ยกเว้นบางช่วงความเร็ว ของยานพาหนะ พบว่า ค่าผลตอบสนองจากสมการถดถอย มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ ในระดับปานกลางถึงสูง เนื่องมาจาก การกำหนดช่วงแห่งความเชื่อมั่นที่ 95 % ทำให้ ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ β_i ลำดับที่ i ใดๆ มีค่าอยู่ในช่วงระดับ ต่ำสุดถึงสูงสุด

$$\min \leq \beta_i \leq \max$$