



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาพารามิเตอร์ในระบบรางความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

โดย นายปฤษฎัศว์ ศีตะปันย์ และคณะ

ธันวาคม 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาพารามิเตอร์ในระบบรางความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. นายปฤษฎัฏ ศีตะปันย์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

2. ศาสตราจารย์สมชาย ชูชีพสกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ทบวงฯ และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษา ผลตอบสนองของยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐานจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะรถไฟความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐาน แบบสะพานช่วงเดียว และ ทำการสร้างความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เกี่ยวเนื่องของตัวแปรอิสระ ระบบพื้นผิว ระบบโครงสร้างพื้นฐาน และ ระบบยานพาหนะ ในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบ โพลีโนเมียล โดยทำการสร้างแบบจำลองความขรุขระของพื้นผิว ด้วยสเตชันนารี เกาส์เซียน แรนดอม โพรเซส ผ่านตัวกรองไวท์นอยซ์ และ ทำการสร้างแบบจำลองยานพาหนะ 2 เพลา 4 ล้อระดับชั้นความเป็นอิสระ เคลื่อนที่บนพื้นผิวสะพานช่วงเดียว จากนั้นทำการจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย และ ทำการแก้ปัญหสมการอนุพันธ์ ด้วยวิธีการรุงเงคุดตา อันดับที่ 4 และ 5 โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณค่าผลตอบสนองที่เกิดขึ้นต่อยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน และ จัดรูปสมการถดถอยพหุคูณ โพลีโนเมียล ต่อไป ผลการวิจัยพบว่า โดยทั่วไป ผลตอบสนองของยานพาหนะ เข้าสู่สเตชันนารี คือ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะส่งผลทำให้ค่าความแปรปรวนคงที่ แต่ผลตอบสนองต่อโครงสร้าง กลับตรงข้าม คือ จะไม่เข้าสู่สเตชันนารี และ ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 กม. ต่อ ชม. ค่าความแปรปรวนจะขยับขึ้น-ลง อย่างรุนแรง จากนั้นทำการสร้างความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เกี่ยวเนื่อง พบว่า ผลตอบสนองต่อยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน โดยทั่วไป จัดอยู่ในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 และ ผลตอบสนอง จากสมการถดถอย มีค่าใกล้เคียงกับ ผลตอบสนองจากผลการทดลอง แต่มีผลตอบสนองบางกลุ่ม คือ ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ ของพารามิเตอร์ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงมาก เนื่องจากผลของค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ β_i ลำดับที่ i ใดๆ และ จากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ แสดงให้เห็นว่า วิธีการพื้นผิวดตอบสนอง เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่ซับซ้อน เชิงมิติของ ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

ปัจจุบันการขนส่งคมนาคมทางบกเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจอุตสาหกรรม และคุณภาพชีวิตของประชาชน แต่เนื่องจากตอนนี้ภาวะเศรษฐกิจที่มีการแข่งขันอย่างรุนแรง ประกอบกับราคาน้ำมันที่ปรับตัวสูงขึ้น การจราจรทางถนนที่หนาแน่น และอุบัติเหตุที่เพิ่มขึ้นจากการจราจรที่เร่งรีบทำให้การขนส่งคมนาคมทางบก ประสิทธิภาพความเร็วสูง จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่พื้งนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการเดินทางของประเทศไทย จากการศึกษาแผนแม่บทรถไฟความเร็วสูงในประเทศไทยนั้น ได้ข้อสรุปว่า เส้นทางสาย (กรุงเทพ – สนามบินหนองงูเห่า – ระยอง) เป็นเส้นทางสายแรก รวมระยะทาง 190 กิโลเมตร เนื่องจากช่วยพัฒนาทางเศรษฐกิจ สังคม และสภาพแวดล้อมพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออกให้มีความเจริญ โดยหลีกเลี่ยงความแออัดในกรุงเทพมหานคร ความหมายของรถไฟความเร็วสูงคือ ยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนพื้นผิวระบบราง หรือระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (MAGLEV) บนความเร็ว 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป จากการวิจัยที่ผ่านมาด้านการเคลื่อนที่ของยานพาหนะความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐานเป็นที่แพร่หลายในต่างประเทศ แต่ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการวิจัยการเคลื่อนที่เป็น ประเภท รถยนต์ รถบรรทุก จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้เห็นถึงความสำคัญในการวิเคราะห์ตัวแปรในระบบรถไฟความเร็วสูง ด้วยวิธีของพื้นผิวดตอบสนอง เพื่อให้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นต่อยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐานโดยทำการจำลองความขรุขระพื้นผิว เป็นชุดข้อมูล สเตชันนารี เกาส์เซียน แรนดอม โพรเซส โดยใช้ฟิลเตอร์ไวท์นอยซ์ และสร้างแบบจำลองของพาหนะ 2 เพลลา 4DOF ที่มีระบบรถไฟเป็นตัวหน่วง (Damping) และระบบสปริงเพลลา ตามข้อกำหนดของรถไฟ ส่วนงานโครงสร้างพื้นฐานพิจารณาเป็นโครงสร้างสะพานช่วงเดียว เนื่องจากมีค่าการโก่งตัวสูงกว่าโครงสร้างแบบสะพานสองช่วง และหลายช่วง จากนั้นนำค่าของความขรุขระพื้นผิว แบบจำลองพาหนะ แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน มาสร้างสมการเคลื่อนที่ระบบคู่ควบ ยานพาหนะต่อโครงสร้างพื้นฐาน แล้วปรับค่าตัวแปรให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย และทำการสมการเคลื่อนที่ (Equation of motion) เพื่อคำนวณผลต่อยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน รวมทั้งคำนวณค่าความแปรปรวนที่จะเกิดขึ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root mean square ,RSM) จากรากที่สองของผลรวมค่าคาดหวังยกกำลังสองกับความแปรปรวน คือค่าเฉลี่ยที่สองนั้นคือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจริงของพาหนะ และของโครงสร้างพื้นฐาน โดยการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานนั้น ทั้งหมดเกี่ยวเนื่องมาจากตัวแปรจำนวนมาก จากตัวแปรดังกล่าวทำการสร้างความสัมพันธ์ทางสถิติของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการพื้นผิวดตอบสนอง (Response Surface Methodology) จากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ พารามิเตอร์ระบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้าง

การดำเนินการวิจัยนี้ เกิดขึ้นจากการที่ยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน เนื่องจากความขรุขระของพื้นผิว คุณสมบัติของยานพาหนะ และคุณสมบัติของโครงสร้างพื้นฐาน โดยการสร้างแบบจำลอง และกำหนดคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับคุณสมบัติยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐานระบบรางที่ใช้งานจริงในปัจจุบัน จากนั้นปรับให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรไร้หน่วย และทำการสร้างสมการเคลื่อนที่ (Equation of motion) เพื่อคำนวณผลตอบสนองต่อยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน โดยการคำนวณการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานนั้น เกี่ยวเนื่องกับตัวแปรจำนวนมาก ที่สำคัญได้แก่ ตัวแปรความยาวคาน ตัวแปรความเร็วพาหนะ ตัวแปรความขรุขระของพื้นผิว ตัวแปรความเข้มของขบวนการไวท์นอยซ์ ตัวแปรระบบสปริงรถไฟ และตัวแปรของความหน่วง และตัวแปรของสปริงเพลลา จากตัวแปรดังกล่าวทำการสร้างความสัมพันธ์ทางสถิติของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) จากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ ของพารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว พารามิเตอร์ระบบโครงสร้างพื้นฐาน พารามิเตอร์ระบบยานพาหนะ และพารามิเตอร์ระบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน โดยแสดงรายละเอียดการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เรียงตามลำดับ ดังนี้ 1.การวิเคราะห์พื้นผิวแบบสุ่ม (Random surface analysis) 2. แบบจำลองยานพาหนะ (Vehicle Model) 3. แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน (Structure system) 4. ความสัมพันธ์พื้นผิวทาง ยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน (Interface Models) 5.วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) แสดงถึงลำดับขั้นตอนการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

จากผลของการดำเนินการวิจัยจะพอสรุปได้ว่าผลตอบสนองยานพาหนะ ของค่าเฉลี่ยความเร่งในแนวดิ่งของห้องผู้โดยสารอยู่ในเกณฑ์ที่ผู้โดยสารรู้สึกสะดวกสบาย แต่ถ้าความขรุขระของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น จะแสดงผลตอบสนองของยานพาหนะ ในรูปของค่าความแปรปรวน โดยจากการศึกษาจะพบว่าขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปในระยะเวลาหนึ่ง ค่าความแปรปรวนจะคงที่ หรือผลตอบสนองของยานพาหนะจะเข้าสู่สภาวะเสถียร จากผลของค่าความแปรปรวนจะได้ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร และพิจารณาจาก ISO 2631 พบว่า ผู้โดยสารจะยังคงรู้สึกสะดวกสบาย ดังนั้นค่า RMS ของห้องผู้โดยสารอาจจะสูงถึงระดับผู้ที่ไม่สะดวกสบาย ด้วยอิทธิพลของค่าความขรุขระระดับพื้นผิว ในส่วนของผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน ไม่เข้าสู่ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานลำดับที่ 1 เนื่องจากค่าความสัมพันธ์ของ ค่าระยะห่างระหว่างเพลลา ความยาวคาน และความเร็วยานพาหนะที่กำหนด และพบว่าโครงสร้างพื้นฐานมีการสั่นสะเทือนตลอดเวลา และเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนทางพลวัต มากกว่าการสั่นสะเทือนทางสถิติ โดยพิจารณาในรูปของค่าเฉลี่ยของ DAF ของระยะโค้ง

กึ่งกลางคาน มีค่าสูงสุดที่พาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 350 กม/ชม. และสูงกว่ามาตรฐาน AASHTO สำหรับค่าความแปรปรวนของโครงสร้างพื้นฐาน พบว่าค่าความแปรปรวนจะไม่เข้าสู่สแตชันนารี และในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 กม/ชม. ค่าความแปรปรวนมีค่าสูงสุด และมีการขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง และจากการวิจัยจะทราบถึงว่าวิธีการ พื้นผิวตอบสนองเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปร ระบบคู่ควมยานพาหนะต่อโครงสร้างพื้นฐาน ในรูปของสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 และในส่วนของทวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน พบว่าผลตอบสนองจากสมการถดถอย จะมีผลใกล้เคียงกับผลตอบสนองจากการแก้สมการอนุพันธ์ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในระดับต่ำซึ่งทั้งหมดนี้คือสิ่งที่ได้จากการศึกษาตัวแปรในระบบรางรถไฟความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
	ขอบเขตของการวิจัย.....	3
	นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
	การวิเคราะห์พื้นผิวแบบสุ่ม.....	24
	แบบจำลองยานพาหนะ.....	45
	แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน.....	50
	ความสัมพันธ์พื้นผิวทาง ยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน.....	61
	วิธีการพื้นผิวดอปสันอง.....	82
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย.....	98
	ผลดอปสันองของยานพาหนะ.....	99
	ผลดอปสันองของโครงสร้างพื้นฐาน.....	104
	การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ.....	112

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
5	บทสรุป.....	138
	สรุปผลการวิจัย.....	138
	ข้อเสนอแนะ.....	140
	บรรณานุกรม.....	142

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงค่าความถี่อัตราการมาถึงของเพลลาเปรียบเทียบกับตัวแปรไร้หน่วย ความเร็วยานพาหนะ และระยะห่างระหว่างเพลลาต่อความยาวของคาน..	19
2 แสดงค่าอัตราเร่งสูงสุดที่มีผลต่อความรู้สึกของผู้ใช้ยานพาหนะ ตามมาตรฐาน ISO 2631.....	49
3 แสดงค่าตัวแปรไร้หน่วยความถี่พื้นฐานของคานช่วงเดียว จำนวน 10 โหมด.....	76
4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	85
5 ความสัมพันธ์ของค่า <i>RMS</i> ระยะโก่งกึ่งกลางสะพาน และ ตัวแปรไร้หน่วย ระยะทางสหสัมพันธ์ $\frac{\Delta_c}{L}$ จำนวนตัวอย่างทดสอบ 10 ครั้ง.....	88
6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	89
7 แสดงความสัมพันธ์ของค่า <i>RMS</i> ระยะโก่งกึ่งกลางสะพาน ตัวแปรไร้หน่วย ระยะห่าง ระหว่างเพลลา (ℓ/L) ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ (Δ_c/L) และตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวก์นอยส์ (q_0/L^3) จำนวนตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้ง	91
8 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	93
9 แสดงสมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ สำหรับรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียล ลำดับที่ 1 ถึง 3.....	94
10 แสดงสมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value สำหรับรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 ถึง 3 ของตัวแปร อิสระ (ℓ/L) (Δ_c/L) และ (q_0/L^3) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม <i>RMS</i> [<i>V</i> (0.50 <i>L</i>)] จำนวนตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้ง.....	95
11 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของ ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร (ℓ/L) (Δ_c/L) และ(q_0/L^3) ที่ส่งผลต่อ <i>RMS</i> [<i>V_{pp}</i> / <i>g</i>]	97

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
12	แสดงค่าอัตราการมาถึงของเพลลา ที่ความเร็ว และความยาวคานต่าง ๆ.....	100
13	แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ และp-value ของ พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว จำนวนตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้ง.....	113
14	แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว ของค่า $RMS[V_{pp}/g]$ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$	114
15	แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ และp-value ของ พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 9 ครั้ง.....	115
16	แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ และp-value ของ พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 121 ครั้ง.....	116
17	แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ จำนวนตัวอย่าง ทดสอบ 121 ครั้ง.....	117
18	แสดงโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 ถึง 4 สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และp-value ของ $RMS[V_{pp}/g]$ พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 121 ครั้ง.....	118
19	แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 3 ของพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_{pp}/g]$	120

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
20	แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ และp-value ของ พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ จำนวนตัวอย่างทดสอบ 81 ครั้ง..... 121
21	แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ ของค่า $RMS[V_{pp}/g]$ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ 123
22	แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ และp-value ของ ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบน โครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 2,187 ครั้ง..... 125
23	แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_{pp}/g]$ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ 127
24	เปรียบเทียบค่า $RMS[V_{pp}/g]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr. 129
25	เปรียบเทียบค่า $RMS[V(0.50L)]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[V(0.50L)]$ จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr. 129
26	เปรียบเทียบค่า $RMS[M(0.50L)]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[M(0.50L)]$ จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr. 130
27	เปรียบเทียบค่า $RMS[S(0.95L)]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[S(0.95L)]$ จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr. 130

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
28	แสดงโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 และ 3 สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value ของ $RMS[V_{pp}/g]$ ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 2,187 ครั้ง.....	133
29	เปรียบเทียบค่า $RMS[V_{pp}/g]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ จากสมการถดถอยโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 และ 3 ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr.	133
30	แสดงพารามิเตอร์ และช่วงความเชื่อมั่นของตัวแบบ สมการถดถอย โพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ บนโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_{pp}/g]$	136

บัญชีภาพ

ภาพ		หน้า
1	แสดงค่า DAF ของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของคานสำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกและ ความเร็วขนาดต่างๆ.....	7
2	แสดงค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งสูงสุดสำหรับอัตราส่วนค่าความหน่วงต่างๆ.....	7
3	แสดงแบบจำลองยานพาหนะทดสอบเพลาดเดี่ยว.....	8
4	แสดงตัวอย่างข้อมูลของกระบวนการสุ่ม.....	9
5	แสดงฟังก์ชัน PSD ของความขรุขระของผิวทาง.....	10
6	แสดงค่า DAF ของแรงกระทำที่เพลาลังสะสม ที่ความเร็ว 140 กม./ชม. และที่ระดับความขรุขระต่างๆ.....	10
7	แสดงผลตอบสนองต่อคานในกรณีที่ $f_v = 0.08$ และ อัตราส่วนความยาว ยานพาหนะต่อความยาวคาน $l/L = 0.50$	12
8	แสดงค่าความถี่ของยานพาหนะที่ระดับความขรุขระและความเร็วต่างๆ.....	14
9	แสดงค่าความเร่งในแนวดิ่งและแนวราบของรถไฟ 1 ขบวน (ค่า L คือ หัวรถจักร, T คือ ตู้สัมภาระ และ P คือ ห้องผู้โดยสาร).....	16
10	แสดงค่าคาดหวัง และ ค่าความแปรปรวน ของยานพาหนะในช่วงความเร็วสูง.	18
11	แสดงค่าคาดหวัง และ ค่าความแปรปรวนของโมเมนต์ภายใน.....	19
12	แสดงค่าการสั่นสะเทือน และ สเปกตรัมฟูเรียร์ ของพื้นผิวดิน จากการเคลื่อนที่ ของยานพาหนะที่ระดับความเร็ว 200 กม./ชม. โดยกำหนดระยะห่าง จากศูนย์กลางรางรถไฟ 2.5, 5, 10 และ 20 เมตร ตามลำดับภาพ (จากบนลงล่าง).....	21
13	แสดงค่าความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว ในรูปแบบโดเมนเวลา.....	23
14	แสดงเครื่องมือวัดความขรุขระของพื้นผิวทางแบบ อินทิเกรเตอร์ (Bump Integrator, BI).....	25

บัญชีภาพ(ต่อ)

ภาพ		หน้า
15	แสดงตัวอย่างโปรไฟล์ของพื้นผิวถนนสายหนึ่งในประเทศไทย.....	27
16	แสดงระดับค่าดัชนีชี้วัดความขรุขระผิวทาง ตามประเภทของถนน.....	28
17	แสดงค่าความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล ของพื้นผิวถนนสายหนึ่งในประเทศไทย.....	28
18	แสดงเครื่องมือวัดความขรุขระของพื้นผิวระบบราง ของ Noptel's PSM-220...	30
19	แสดงค่าความขรุขระพื้นผิวและผลตอบสนองจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ	30
20	แสดงความไม่สม่ำเสมอของแนวทาง.....	31
21	แสดงฟังก์ชันแปลงรูปค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสองของ ตัวแปร W_d และตัวแปร h_d ของลำดับขั้นที่หนึ่ง.....	32
22	แสดงฟังก์ชันแปลงรูปค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสองของ ตัวแปร W_d และตัวแปร $\frac{h_d}{r_f}$ ของลำดับขั้นที่หนึ่ง.....	33
23	แสดงฟังก์ชันแปลงรูปค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสองของ ตัวแปร W_d และตัวแปร h_d ของลำดับขั้นที่สอง.....	34
24	แสดงค่า PSD และค่าความแปรปรวนร่วมของ $h_d(x_d)$	37
25	แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ $h_d(x_d)$	38
26	แสดงค่า PSD และค่าความแปรปรวนร่วมของ $h_d(t_d)$	39
27	แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ $h_d(t_d)$	40
28	แสดงค่า PSD และค่าความแปรปรวนร่วมของตัวแปรไร้หน่วย $h(t_d)$	42
29	แสดงค่า PSD และค่าความแปรปรวนร่วมของตัวแปรไร้หน่วยเวลา $h(t)$	43
30	แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ ตัวแปรไร้หน่วยเวลา $h(t)$	44
31	แสดงค่าความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล ของพื้นผิวระบบรางที่ระดับ ความขรุขระต่างๆ เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานระบบรางของ สหรัฐอเมริกา.....	44

บัญชีภาพ(ต่อ)

ภาพ		หน้า
32	แสดงยานพาหนะประเภทต่างๆ.....	45
33	แสดงแบบจำลองยานพาหนะแบบต่าง ๆ.....	47
34	แสดงแบบจำลองยานพาหนะสองเพลานึ่งคัน ลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 4	48
35	แสดงค่าระยะโก่งตัวของโครงสร้างพื้นฐานยกระดับแบ่งตามช่วงความยาวคาน	51
36	แสดงผลของแรงกระทำเคลื่อนที่ต่อคาน รูป (1) แสดงส่วนประกอบ และตำแหน่งของคาน รูป (2) แสดงแรงกระทำต่อชิ้นส่วนคาน.....	52
37	แสดงองค์ประกอบของคานช่วงเดียว.....	56
38	แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนจำนวน 10 โหมดของคานช่วงเดียว.....	58
39	แสดงองค์ประกอบของคานสองช่วง.....	58
40	แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนจำนวน 10 โหมดของคานสองช่วง.....	60
41	แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) แบบสปริงเชิงเส้นบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น.....	62
42	แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) ที่มีทั้งระบบกันสะเทือน และสปริงแบบต่อขนานบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น.....	64
43	แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) ที่มีจุดสัมผัสเป็นมวลแข็งเกร็ง และมีระบบกันสะเทือน และสปริงต่อเชื่อมแบบขนานบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น....	66
44	แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง แบบสปริงเชิงเส้นบนพื้นผิวคานช่วงเดียว.....	80
45	แสดงค่าเฉลี่ยของระยะโก่งกึ่งกลางคาน.....	80
46	แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระสอง.....	81

บัญชีภาพ(ต่อ)

ภาพ		หน้า
47	แสดงค่าเฉลี่ยของระยะโค้งกึ่งกลางคัน เมื่อ $f_v = 0.06$	81
48	แสดงผลตอบสนองต่อค่าระยะโค้งกึ่งกลางของโครงสร้างพื้นฐาน (1) กรณีค่า ความขรุขระพื้นผิวคงที่ และความเร็วเปลี่ยนแปลง (2) กรณีค่า ความเร็วคงที่ และค่าความขรุขระพื้นผิวเปลี่ยนแปลง.....	83
49	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และRMS ความเร่งแนวดิ่งของห้อง ผู้โดยสาร ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$	101
50	แสดงค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร ช่วงความขรุขระ $r_f = 0.015 - 0.025m^{-1}$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $L = 20m$	102
51	แสดงค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร ช่วงความยาวคัน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 150 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$	103
52	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และRMS ของระยะโค้งกึ่งกลางคัน ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$..	105
53	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของระยะโค้งกึ่งกลางคัน ช่วงความยาวคัน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$	106
54	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของโมเมนต์กึ่งกลางคันในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$	107
55	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของโมเมนต์กึ่งกลางคัน ช่วงความยาวคัน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$	108

บัญชีภาพ(ต่อ)

ภาพ		หน้า
56	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของแรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$.	109
57	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของแรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ ช่วงความยาวคัน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$	110

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและ ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการขนส่งคมนาคมทางบกเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจอุตสาหกรรม และ คุณภาพชีวิตของประชาชน แต่เนื่องด้วยภาวะเศรษฐกิจที่มีการแข่งขันอย่างรุนแรง ราคาน้ำมันที่ปรับตัวสูงขึ้น การจราจรทางถนนที่หนาแน่น และ สถิติอุบัติเหตุบนท้องถนนที่เพิ่มขึ้น ทำให้การขนส่งคมนาคมทางบก ประเภทรถไฟความเร็วสูง เป็นทางเลือกหนึ่งที่พื้งนำมาดำเนินการในประเทศไทย จากการศึกษาแผนแม่บทรถไฟความเร็วสูงในประเทศไทย (ระหว่างปี 2535 - 2537) ได้ข้อสรุปว่า ควรสร้างรถไฟความเร็วสูง สายชายฝั่งทะเลตะวันออก (กรุงเทพฯ – สนามบินหนองงูเห่า – ระยอง) เป็นสายแรก รวมระยะทาง 190 กิโลเมตร เนื่องจากช่วยพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และ สภาพแวดล้อมพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออกให้เจริญก้าวหน้า เพื่อเดินทางไปทำงาน และ พักอาศัย โดยไม่ต้องเผชิญกับสภาพความแออัดในกรุงเทพมหานคร ความหมายของรถไฟความเร็วสูง คือ ยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนพื้นผิวระบบราง หรือระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (MAGLEV) ด้วยความเร็ว 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป เมื่อพิจารณาถึงงานวิจัยด้านการเคลื่อนที่ของยานพาหนะความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐานเป็นที่แพร่หลายในต่างประเทศ แต่ในประเทศไทยงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวิจัยการเคลื่อนที่ของยานพาหนะประเภท รถยนต์ รถบรรทุก บนโครงสร้างพื้นผิวถนน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาตัวแปรในระบบรถไฟความเร็วสูง ด้วยวิธีพื้นผิวดอปสันอง แนวทางการดำเนินการวิจัย ทำการศึกษาตัวอย่างภาคสนามข้อมูลความขรุขระของพื้นผิวถนน โดยเครื่องมือ บัม อินทิเกรเตอร์ (Bump Integrator, BI) เพื่อใช้ในการคำนวณดัชนีชี้วัดความขรุขระผิวทาง (International Roughness Index, IRI) และ ทำการแปลงรูปฟูเรียร์ หาฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectral Density function, PSD) เปรียบเทียบกับ ค่าวัดระดับความขรุขระพื้นผิวกับมาตรฐานสากลที่ยอมให้ จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองความขรุขระพื้นผิว โดยพิจารณาความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวด้วยขบวนการ สโตแคสติก (Stochastic process) ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล ในรูปของโดเมนความถี่ หรือฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability distribution (density) function) ในรูปของโดเมนแอมพลิจูด

ด้วยขบวนการ ซีโร มีน สเตชันนารี (Zero-mean stationary) และ เอ็ดโกติก เกาส์เซียน (ergodic Gaussian) บนพื้นฐานของตัวกรองไวท์นอยซ์ ให้สอดคล้องกับค่าความขรุขระของพื้นผิวระบบราง ตามมาตรฐานสากล สำหรับรถไฟความเร็วสูง สร้างแบบจำลองยานพาหนะ 2 เพลา 4DOF ที่มีระบบกันสะเทือน (k_1) ระบบโช้คอัพ (c_1) และ ระบบยืดหยุ่นของเพลา (k_2) ตามข้อกำหนดของยานพาหนะประเภทรถไฟ ในส่วนของโครงสร้างพื้นฐานพิจารณาเป็นโครงสร้างประเภท สะพาน ช่วงเดียว เนื่องจากก่อให้เกิดการโก่งตัวทางสถิติสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง สะพานแบบสองช่วง และ หลายช่วง นำค่าความขรุขระพื้นผิว แบบจำลองยานพาหนะ และ แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน มาสร้างสมการการเคลื่อนที่ระบบคู่ควมยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย แก้ปัญหาโดยเขียนสูตรคำนวณในโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณค่า การโก่ง โมเมนต์ และ ความเร่งของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน จากนั้นใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง สร้างความสัมพันธ์ทางสถิติของพารามิเตอร์เกี่ยวเนื่อง 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว ได้แก่ ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ ตัวแปรไร้หน่วย ความเข้มของไวท์นอยซ์ และ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ กลุ่มที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ได้แก่ ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลา และ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ กลุ่มที่ 3 พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ ได้แก่ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตัวรถไฟ ตัวแปรไร้หน่วยระบบยืดหยุ่นของเพลา และ ตัวแปรไร้หน่วยระบบโช้คอัพรถไฟ และ กลุ่มที่ 4 พารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ได้แก่ ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ ตัวแปรไร้หน่วย ความเข้มของไวท์นอยซ์ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่าง เพลา ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตัวรถไฟ ตัวแปรไร้หน่วยระบบยืดหยุ่นของเพลา และ ตัวแปร ไร้หน่วยระบบโช้คอัพรถไฟ เพื่อคำนวณค่าสมการถดถอยของระบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ บนโครงสร้างพื้นฐาน

งานวิจัยการเคลื่อนที่ของยานพาหนะความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐานมีความสำคัญต่อ การออกแบบระบบรางรถไฟความเร็วสูงให้เหมาะสมกับกลศาสตร์วัสดุของยานพาหนะ ความ ขรุขระของพื้นผิว และ เป็นแนวทางในการออกแบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้าง พื้นฐานประเภทต่างๆ ต่อไป

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองยานพาหนะรถไฟความเร็วสูง 2 เพลา 4 ลำดับชั้นความเป็นอิสระ (Degrees of Freedom, DOF)
2. วิเคราะห์ผลตอบสนองต่อโครงสร้างและ ค่าความรู้สึของผู้ใช้ยานพาหนะตามมาตรฐาน ISO2631
3. ศึกษาความสัมพันธ์ทางสถิติของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองยานพาหนะรถไฟความเร็วสูงที่ซับซ้อน
2. เป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างสะพานรถไฟ
3. เป็นแนวทางในการออกแบบกลศาสตร์วัสดุรถไฟความเร็วสูง
4. เป็นแนวทางในการลดต้นทุนการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน
5. เป็นแนวทางในการศึกษางานวิจัยที่ต่อเนื่องในอนาคต

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองยานพาหนะสองเพลา เคลื่อนที่บนแบบจำลองพื้นผิวระบอบทางรถไฟความเร็วสูง
2. ศึกษาแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานแบบสะพานช่วงเดียว
3. ศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของรถไฟความเร็วสูง ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

นิยามศัพท์เฉพาะ

ดัชนีชี้วัดความขรุขระผิวทาง (International Roughness Index, IRI) หมายถึง ค่าทางสถิติวัดความขรุขระของพื้นผิว

ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectral Density, PSD) หมายถึง ฟังก์ชันแสดงค่าความสำคัญเชิงสถิติผลตอบสนองสเปกตรัลของจำนวนช่วงคลื่น

แฟกเตอร์กำลังขยายเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Amplification Factors, DAF) หมายถึง แฟกเตอร์แสดงหน่วยวัดการสั่นสะเทือนแบบพลวัตเปรียบเทียบกับหน่วยวัดการสั่นสะเทือนแบบสถิต

วิธีพื้นผิวดตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) หมายถึง หลักการที่ใช้สร้างความสัมพันธ์ทางสถิติของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) หมายถึง ตารางวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และ ตัวแปรตาม ในรูปแบบทดสอบสมมติฐาน

บทที่ 2

เอกสารและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาแบบจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานเป็นที่แพร่หลายในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา ในปี พ.ศ. 2469 งานวิจัยของ Timoshenko เรื่อง Method of analysis of statical and dynamical stresses in rail ศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะระบบเพลานบนโครงสร้างพื้นฐานคานต่อเนื่อง ในรูปแบบโดเมนความถี่ หลักการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานแบ่งออกได้เป็น 2 โดเมน คือ โดเมนความถี่ และ โดเมนของเวลาเกี่ยวกับโดเมนความถี่ เป็นเทคนิคในการแก้ปัญหาอย่างง่าย สมการไม่ซับซ้อน อาศัยหลักการแปลงรูปทางคณิตศาสตร์ จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และ จุดรับแรงกระทำส่งผลต่อค่าความถี่ที่แตกต่างกัน ใช้ในการวัดค่าผลตอบสนองของระบบราง และ ระดับเสียงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ สำหรับโดเมนของเวลา เป็นเทคนิคในการแก้ปัญหาค่าความสัมพันธ์ของยานพาหนะที่แปรเปลี่ยนไปตามช่วงเวลา คำนวณค่าผลตอบสนองการโก่ง ความเร็ว ความเร่ง และ แรงกระทำในระบบยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

วิธีการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน เริ่มจากการสร้างแบบจำลองยานพาหนะให้ใกล้เคียงกับยานพาหนะที่ใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ แบบเพลเดียว สองเพล หรือหลายเพล เคลื่อนที่บนแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน ได้แก่ บนพื้นดิน บนคานช่วงเดียว หรือบนคานต่อเนื่อง และ แบบจำลองความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว ระบบราง หรือถนน ด้วยกระบวนการสโตแคสติก (Stochastic process) เปรียบเทียบกับค่าความขรุขระพื้นผิวตามมาตรฐานสากล จากนั้นทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่ และ คำนวณค่าโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือสมการอนุพันธ์เชิงเส้น เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ ทำให้มีการนำซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์มาใช้ในการคำนวณค่าผลตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว และ แม่นยำ มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงจากภาคสนาม สามารถนำผลการคำนวณมาใช้เป็นข้อมูลที่มีประสิทธิภาพในการประเมินสภาพผิวทางและ ระดับความรู้สึกสะดวกสบายของผู้ใช้ยานพาหนะ ดังรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ในระบบรางความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

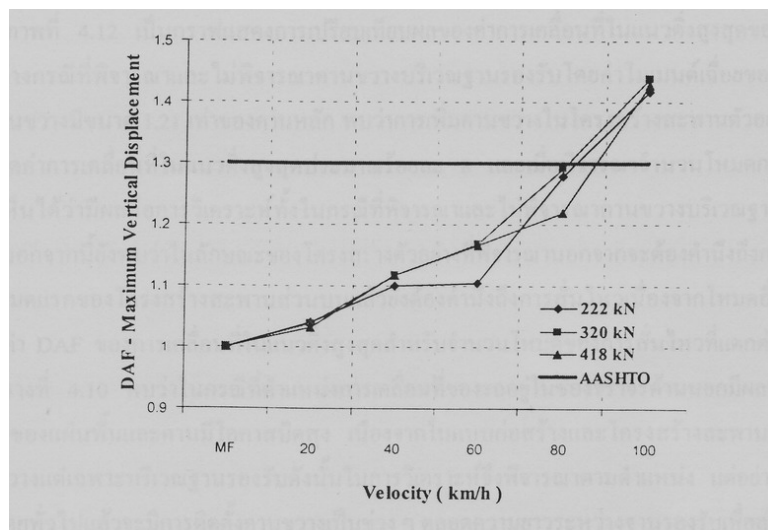
ในปี พ.ศ. 2542 งานวิจัยของ วีระ ตันศิริชัยยา เรื่อง วิธีวิเคราะห์ปัญหาการสั่นไหวในเชิง ปฏิสัมพันธ์ของระบบพาหนะและ โครงสร้างที่รองรับ นำหลักการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการ สร้างแบบจำลองและ วิธีซูเปอร์โพสิชัน (Superposition) เพื่อลดขนาดของสมการการสั่นไหว สร้างแบบจำลองยานพาหนะ รถบรรทุก ขนาด 2 เพลา แล่นผ่านบนแผ่นพื้นช่วงเดียว ที่มี ความลาดเอียง เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปร น้ำหนักบรรทุก และ ความเร็วของยานพาหนะ ในการวิเคราะห์แฟกเตอร์กำลังขยายเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Amplification Factor, DAF) ของโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time history response) นั้น จะต้องคำนึงถึง ผลรวมของการ สั่นสะเทือนของโครงสร้างแบบพลวัตรวมกับค่าพหุคูณ และ โครงสร้างแบบทางสถิต (R_{dyn}) หารด้วยค่าพหุคูณ และ โครงสร้างแบบสถิต (R_{sta}) ดังสมการ

$$DAF = \frac{R_{dyn}}{R_{sta}} \quad (1)$$

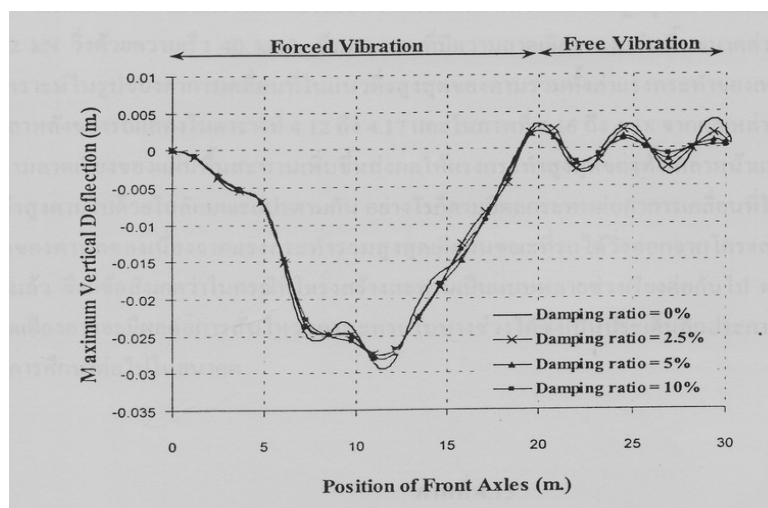
จากภาพ 1 พบว่า ค่าแรงรวมของรถบรรทุกมากที่สุด ไม่จำเป็น ที่จะทำให้ค่า DAF ของการ เคลื่อนที่ในแนวดิ่งของคานมีค่ามากที่สุด เนื่องจาก ต้องคำนึงถึงตำแหน่งของแรงรวม และ รูปแบบ การสั่นสะเทือน และ เมื่อทำการเปรียบเทียบ DAF กับ ค่าอิมแพคแฟกเตอร์ (Impact Factor, I) ตามมาตรฐาน AASHTO ที่กำหนดค่าเท่ากับ 1.30 พบว่า ในขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่า 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่งผลทำให้ ค่า DAF สูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด

และ จากภาพ 2 พบว่า ช่วงการสั่นสะเทือนจากแรงกระทำ(Forced vibration) ค่าความหน่วง มีผลต่อค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งเล็กน้อย และ สำหรับช่วงการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration) ค่าความหน่วงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งลดลงอย่างรวดเร็ว

จากการศึกษาพบว่า ค่า DAF เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อการ เคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นทางระบบรางความเร็วสูง



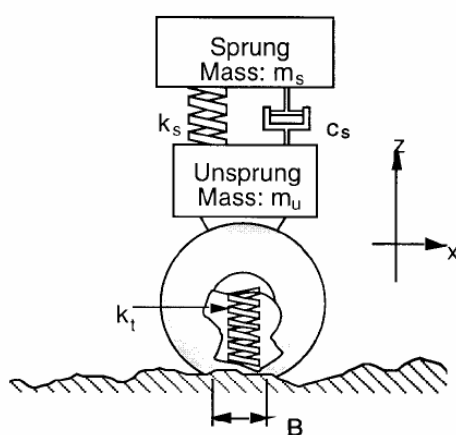
ภาพ 1 แสดงค่า DAF ของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของคานสำหรับน้ำหนักบรรทุก
และ ความเร็วขนาดต่างๆ



ภาพ 2 แสดงค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งสูงสุดสำหรับอัตราส่วนค่าความหน่วงต่างๆ

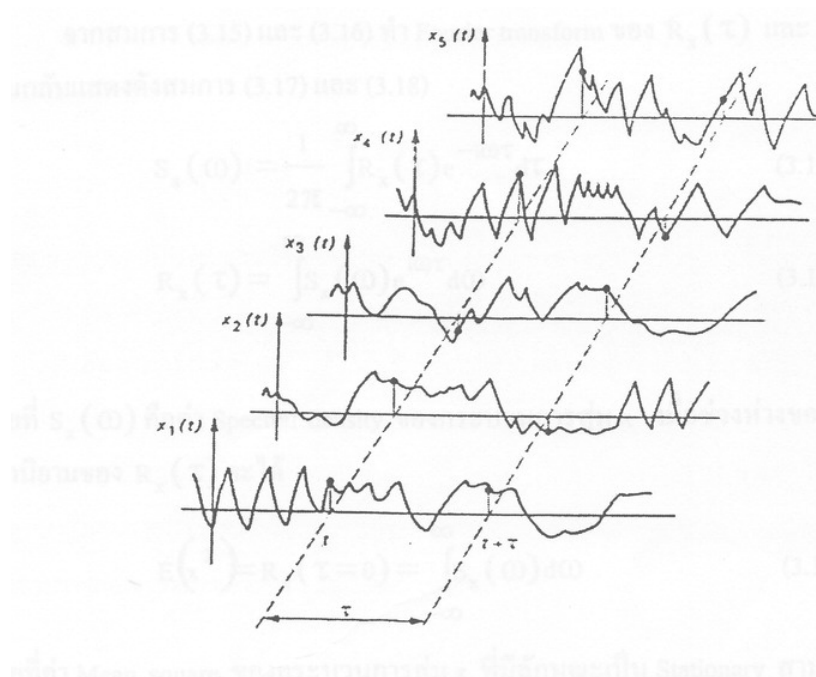
ในปี พ.ศ. 2544 งานวิจัยของ Ahlin, K., EduTech S. และ Sweden. เรื่อง International Roughness Index, IRI, and ISO 2631 vibration evaluation พบว่า ลักษณะของพื้นผิวทางมีความไม่สม่ำเสมอ ส่งผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ดังนั้นชี้วัดความขรุขระผิวทาง (International Roughness Index, IRI) เป็นแนวทางในการวัดค่าความขรุขระของพื้นผิว โดยทำการสร้างแบบจำลองยานพาหนะ เพลาเดียว เคลื่อนที่บนพื้นผิวที่มีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการ เคลื่อนที่ขึ้น-ลง ดังภาพ 3 และสามารถคำนวณค่า IRI หน่วยวัด IRI (mm/m) จากอัตราส่วนของความสัมพันธ์ของความเร็วเฉลี่ย ระหว่าง m_s และ m_u หารด้วยความเร็ว v และ จากความไม่สม่ำเสมอของผิวทาง ส่งผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนต่อผู้ใช้นยานพาหนะ (Whole Body Vibration, WBV) ในรูปของมาตรฐาน ISO2631 จากค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square, RMS) ของความเร่งห้องผู้โดยสารสะสม โดยคำนึงถึง ความรู้สึกสะดักสะบายนัย กิจวัตร และ สุขภาพของผู้ใช้นยานพาหนะ

จากการศึกษาพบว่า IRI และ ISO2631 เป็นเครื่องมือในการกำหนดมาตรฐานในการออกแบบพื้นผิวทาง และ สามารถนำมาใช้ในการกำหนดมาตรฐานความขรุขระของพื้นผิวระบบราง และ วัดค่าความรู้สึกสะดักสะบายนัยต่อผู้ใช้นยานพาหนะ



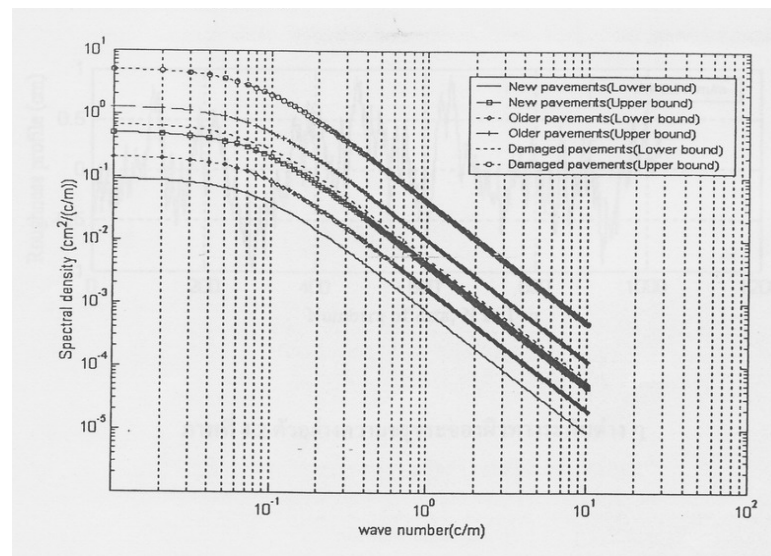
ภาพ 3 แสดงแบบจำลองยานพาหนะทดสอบเพลาเดียว

ในปี พ.ศ. 2545 งานวิจัยของ สุวรัตน์ จังชัยศิริวัฒนา เรื่อง ผลกระทบของความขรุขระผิวทางที่มีต่อพลวัตของแรงกระทำที่เพลารถบรรทุก ศึกษาผลกระทบของความขรุขระพื้นผิวทางในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ โดเมนความถี่ แสดงค่า ฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectral Density, PSD) ภายใต้ค่า IRI ที่สอดคล้องกับการประเมินสภาพผิวทางที่มีความเสียหาย ผิวทางเก่า และ ผิวทางใหม่ ตามลำดับ และ กำหนดน้ำหนักบรรทุกยานพาหนะ 20 - 40 ตัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 20 - 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แสดงผลตอบสนองในรูปแบบของค่า DAF และ ทำการพิจารณาการสั่นสะเทือนของรถบรรทุกที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวที่มีความขรุขระในรูปแบบโดเมนความถี่ (Frequency domain) โดยอาศัยทฤษฎีการสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random vibration) ดังภาพ 4

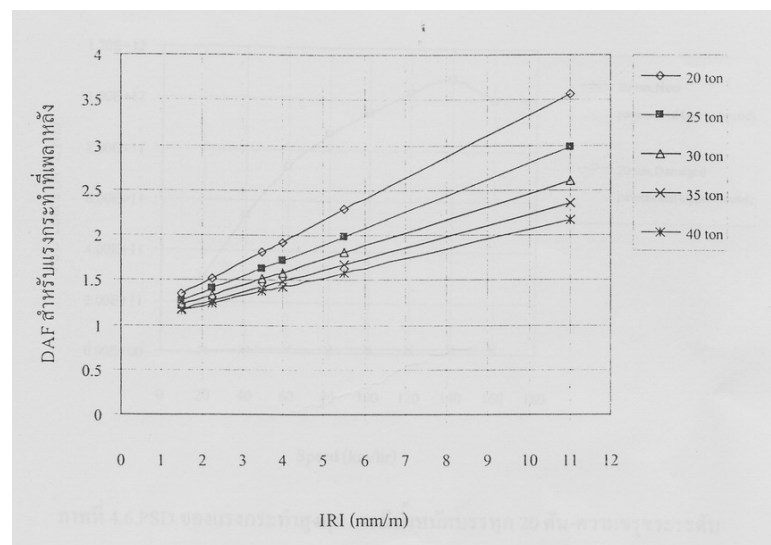


ภาพ 4 แสดงตัวอย่างข้อมูลของกระบวนการสุ่ม

การประเมินผลลัพธ์การตอบสนองด้วยฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) $R_x(\tau)$ ในรูปแบบการเคลื่อนที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา $E[x(t)x(t+\tau)]$ และ ทำการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) เพื่อให้ได้ค่า PSD ที่ระดับความขรุขระช่วงที่กำหนด ดังภาพ 5



ภาพ 5 แสดงฟังก์ชัน PSD ของความขรุขระของผิวทาง



ภาพ 6 แสดงค่า DAF ของแรงกระทำที่เพลาลังสะสม ที่ความเร็ว 140 กม./ชม.
และ ที่ระดับความขรุขระต่างๆ

จากภาพ 6 พบว่า ค่า DAF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยแปรผันเชิงเส้นตามระดับความขรุขระของพื้นผิวทาง เมื่อถนนมีการใช้งาน จะเกิดการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติของผิวทาง และ จากการใช้งานที่เพิ่มขึ้นนำไปสู่ แรงกระทำที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อเนื่องให้เกิดความเสียหายที่เพิ่มขึ้น และนำไปสู่แรงกระทำที่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง เป็นวัฏจักรของค่าความเสียหายของผิวทาง

จากการศึกษาพบว่า กระบวนการสุ่มในพิสัยความถี่ สามารถนำไปใช้ในการจัดระดับความขรุขระของพื้นผิวระบบราง ในรูปแบบของฟังก์ชัน PSD

ในปี พ.ศ. 2545 (ต่อ) งานวิจัยของ Seetapan, P และ Gasparini, D เรื่อง Dynamics of bridges for very-high-speed vehicles ศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐาน พิจารณาแบบจำลองยานพาหนะรถไฟความเร็วสูง 10 DOF จำนวน 4 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่บนโครงสร้างพื้นฐานคานสองช่วง ลักษณะพื้นผิวทำการสร้างแบบจำลองความขรุขระพื้นผิวด้วย ตัวกรองไวท์นอยซ์ จากนั้น คำนวณค่า DAF และ ค่าความแปรปรวนของโครงสร้างพื้นฐานในรูปแบบโดเมนเวลา และ จัดรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย ยกตัวอย่าง ตัวแปรไร้หน่วยความเร็วของยานพาหนะข้ามช่วงคาน (Span crossing rate) ดังสมการ

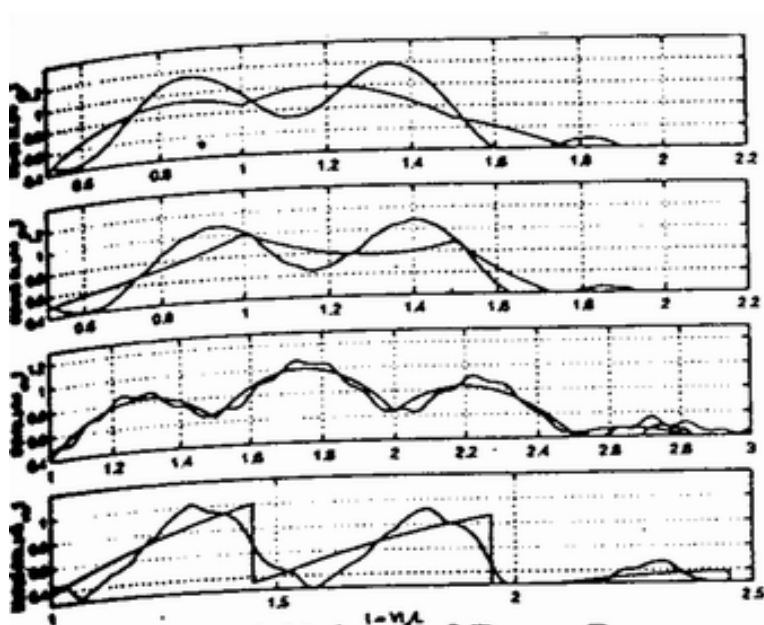
$$f_v = (V / L) / \omega_1 \quad (2)$$

โดยกำหนดให้

ค่า V คือ ความเร็ว หน่วย m/s

ค่า L คือ ความยาวช่วงคาน หน่วย m

และ ω_1 คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างลำดับที่ 1 หน่วย rad/s



ภาพ 7 แสดงผลตอบสนองต่อคานในกรณี $f_v = 0.08$ และ อัตราส่วนความยาวยานพาหนะต่อความยาวคาน $l/L = 0.50$

จากนั้นทำการคำนวณค่าผลตอบสนอง ค่า DAF ของระยะโค้งที่กึ่งกลางคาน ดังภาพ 7 พบว่าค่าระยะห่างระหว่างเพลาคือความยาวของคาน และ อัตราการมาถึงของเพลาคือค่าความถี่ธรรมชาติของคาน ลำดับที่ 1 ส่งผลทำให้ค่า DAF ของระยะโค้งที่กึ่งกลางคาน สูงสุดเท่ากับ 1.20 และ ถ้า $f_v = 0.12$ และ อัตราส่วนความยาวยานพาหนะต่อความยาวคาน $l/L = 0.50$ ค่าระยะห่างระหว่างเพลาคือความยาวของคาน และ อัตราการมาถึงของเพลาคือค่าความถี่ธรรมชาติของคาน ลำดับที่ 2 ส่งผลทำให้ค่า DAF ของโมเมนต์ภายในคาน สูงสุดเท่ากับ 1.30 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน จะส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงค่า DAF

จากการศึกษาพบว่า การกำหนดตัวแปรแบบไร้หน่วยทำให้สะดวกในการศึกษาพารามิเตอร์เกี่ยวเนื่อง และ ใช้คำนวณผลตอบสนองโดยไม่จำกัดเพียงหน่วยใดหน่วยหนึ่ง

ในปี พ.ศ. 2545 (ต่อ) งานวิจัยของ Lei, X. และ Noda, A. N. เรื่อง Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical ศึกษาแบบจำลองยานพาหนะรถไฟความเร็วสูง TGV จำนวน 10 DOF เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 80 – 250 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนโครงสร้างพื้นฐานระบบรางยกระดับ และ บนพื้นดิน นำค่าความสัมพันธ์ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน มาสร้างสมการการเคลื่อนที่ เพื่อคำนวณค่าผลตอบสนองต่อความเร็ว ความเร่ง และ แรงกระทำ ในรูปแบบโดเมนความถี่ โดยทั่วไปความไม่สม่ำเสมอของระบบรางในแนวดิ่งพิจารณาจากขบวนการสเตชันนารี เอ็ดโกติก เกาส์เซียน แรนดอม โพรเซส (Stationary ergodic Gaussian random process) ในรูปแบบสมการตรีโกณมิติ ดังสมการ

$$\eta^d(t) = \sum_{k=1}^N a_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (3)$$

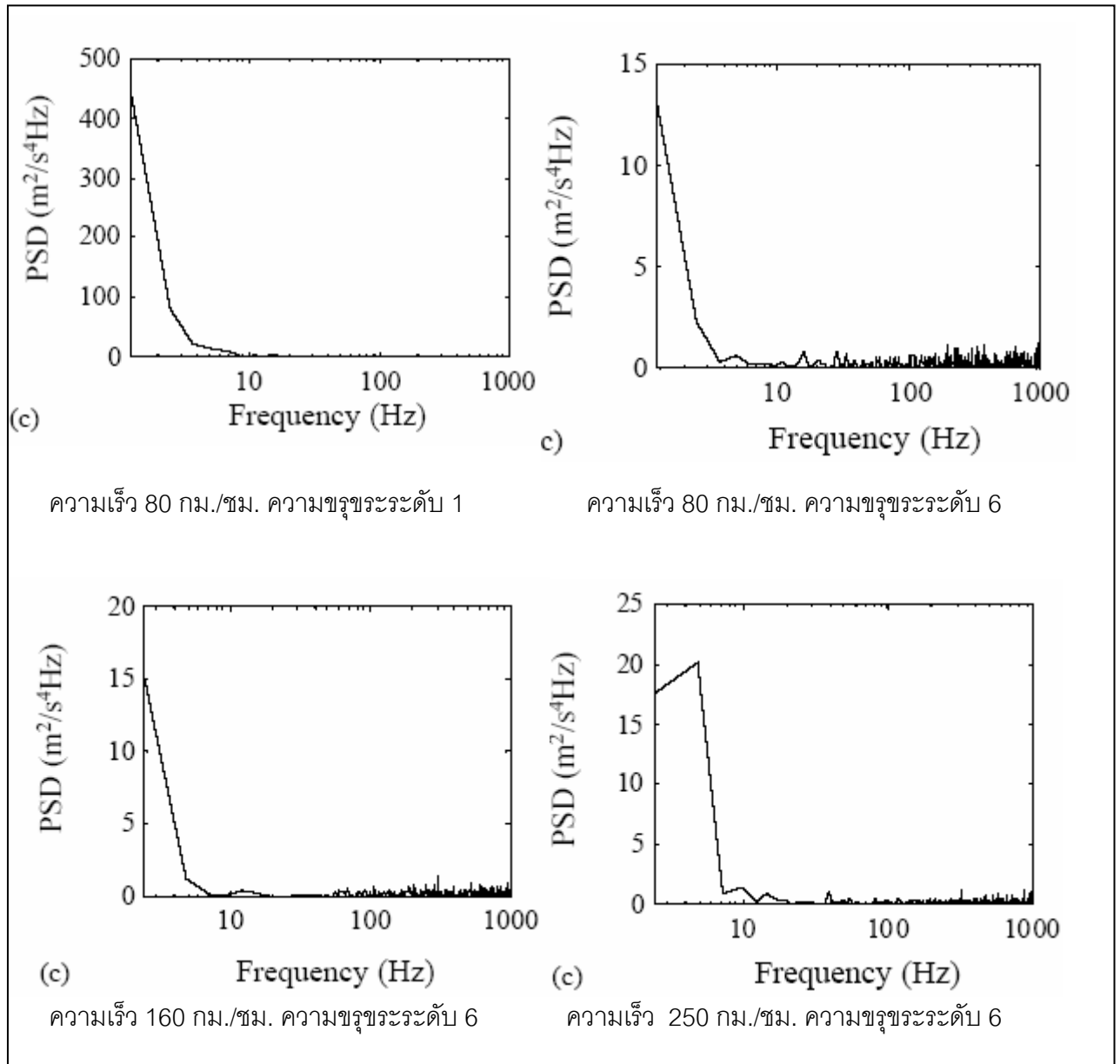
โดยกำหนดให้

a_k คือ ตัวแปรสุ่มเกาส์เซียน ที่ประกอบด้วยค่าคาดหวัง และ ค่าความแปรปรวน σ_k

ϕ_k คือ ตัวแปรสุ่มมีค่ากระจายสม่ำเสมอในช่วง $0 - 2\pi$

และ $\eta^d(t)$ คือ ขบวนการสโตแคสติก จัดอยู่ในรูปซีรีส์ของตรีโกณมิติ เพื่อคำนวณหาค่า PSD แบ่งตามระดับความขรุขระของระบบราง 6 ระดับ (ระดับที่ 1 ค่าความขรุขระสูงสุด และ ระดับที่ 6 ค่าความขรุขระต่ำสุด ตามลำดับ) โดยค่า PSD อ้างอิงตามมาตรฐานระบบรางรถไฟของสหรัฐอเมริกา (America railway standard)

สำหรับการวิเคราะห์สมการคู่ควบของยานพาหนะต่อระบบราง ใช้วิธีการเฮิร์ตซ (Hertz formula) เนื่องจากช่วยให้สะดวกในการแก้ปัญหาระบบไม่เชิงเส้น และ หลีกเลี่ยงการแก้ปัญหาคความไม่สมมาตรของระบบคู่ควบ



ภาพ 8 แสดงค่าความถี่ของยานพาหนะที่ระดับความขรุขระและ ความเร็วต่างๆ

จากภาพ 8 เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 80 กม./ชม. ค่าความถี่ของยานพาหนะเท่ากับ 1 Hz. ที่ระดับความขรุขระ ระดับที่ 6 (ค่าความขรุขระต่ำสุด) และ ถ้าพื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของยานพาหนะเล็กน้อย แต่ถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของยานพาหนะสูงถึง 5 - 8 Hz. ซึ่งทำให้ผู้ใช้นยานพาหนะรู้สึกไม่สะดวกสบาย และ เมื่อพิจารณาถึงแรงกระทำแนวดิ่งระหว่างเพลลา และ พื้นผิวระบอบราง พบว่า ค่าความขรุขระของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้แรงกระทำแนวดิ่งระหว่างเพลลา และ พื้นผิวระบอบรางสูงขึ้น และ ถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น จะส่งผลทำให้แรงกระทำแนวดิ่งระหว่างเพลลา และ พื้นผิวระบอบรางสูงขึ้น เช่นกัน

จากการศึกษาพบว่า ขบวนการ สเตชันนารี เอ็ดโกติก เกาส์เซียน แรนดอม โพรเซส (Stationary ergodic Gaussian random process) เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวระบอบราง

ในปี พ.ศ. 2546 งานวิจัยของ Xia, H., Zhang N. และ Roeck, D. G. เรื่อง Dynamic analysis of high speed railway bridge under articulated trains นำเสนอการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการสร้างแบบจำลองยานพาหนะรถไฟความเร็วสูง ชื่อ Thalys 1 ขบวน ประกอบด้วยหัวรถจักร 2 ตู้ และ ห้องผู้โดยสาร 8 ตู้ รวม 10 ตู้ ค่า DOF เท่ากับ 115 เคลื่อนที่บนโครงสร้างสะพาน Antoining แบบ U-shaped girder ระหว่าง Paris ถึง Brussels จากนั้นทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่เพื่อคำนวณค่าระยะโก่ง ความเร่งแนวดิ่ง และ แนวราบ ของโครงสร้างพื้นฐาน และ คำนวณค่าความเร่งแนวดิ่ง และ แนวราบ ของห้องผู้โดยสาร เปรียบเทียบกับ ค่าที่เก็บรวบรวมจากภาคสนาม

จากการทดลองพบว่า ค่าความเร่งในแนวดิ่ง และ แนวราบของยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน จะเพิ่มขึ้น เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ถึงระดับความเร็ว 325 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วที่ก่อให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonant) ค่าความเร่งในแนวดิ่ง และ แนวราบของยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐานถึงจุดสูงสุด

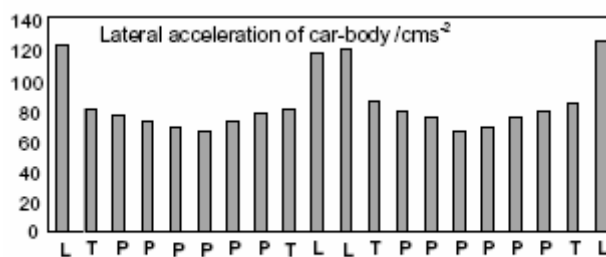
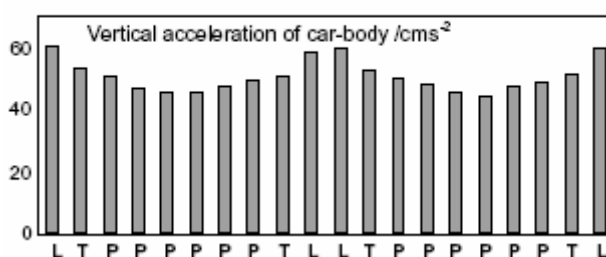


Fig. 22. Maximum lateral accelerations of vehicles.



ภาพ 9 แสดงค่าความเร่งในแนวดิ่งและ แนวนราบของรถไฟ 1 ขบวน (ค่า L คือ หัวรถจักร, T คือ ตู้สัมภาระ และ P คือ ห้องผู้โดยสาร)

จากภาพ 9 ตำแหน่งของหัวรถจักร รถไฟความเร็วสูง Thalys มีค่าความเร่งในแนวดิ่ง และแนวนราบสูงสุด และ ค่าความเร่งจะลดลงต่อเนื่อง ตามลำดับตู้โดยสาร โดยมีค่าความเร่งในแนวดิ่ง และ แนวนราบของตู้โดยสารต่ำสุดประมาณ 70 – 80 % ของค่าความเร่งในแนวดิ่ง และ แนวนราบของหัวรถจักร

จากการศึกษาพบว่า ค่าความเร่งสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดสนับสนุนของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน และ การสร้างแบบจำลองยานพาหนะควรมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับหัวรถจักรที่ใช้งานในปัจจุบัน

ในปี พ.ศ. 2548 งานวิจัยของ ปฤษฎาศ์ คีตะบันย์, เอกสิทธิ์ ไม้วัฒนา และ สมชาย ชูชีพสกุล เรื่อง ความสำคัญของความขรุขระพื้นผิวต่อยานพาหนะและ โครงสร้างพื้นฐาน นำเสนอตัวอย่าง ข้อมูลความขรุขระพื้นผิวของถนนในประเทศไทยที่เก็บรวบรวมด้วยเครื่องมือบัม อินทิเกรเตอร์ (Bump Integrator, BI) และ ทำการแปลงรูปฟูเรียร์ เป็นโดเมนความถี่ ในรูปของค่า PSD โดยแสดงถึงระดับความขรุขระของพื้นผิวทาง และ พื้นผิวระบอบราง เปรียบเทียบกับค่าความขรุขระ ตามมาตรฐานสากล จากนั้นสร้างแบบจำลองความขรุขระของพื้นผิว ด้วยสมการอนุพันธ์ไวท์นอยซ์ ในส่วนของยานพาหนะ ทำการสร้างแบบจำลองแบบเพลาดเดียว 2DOF เคลื่อนที่บนโครงสร้าง พื้นฐานสะพานช่วงเดียว จะได้ระบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่ ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย และ ใช้โปรแกรม MATLAB คำนวณค่าผลตอบแทนต่อยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน ในรูปของ DAF ค่าความ แปรปรวน และ ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square, RMS) โดยค่า RMS สามารถคำนวณได้ จากสมการ

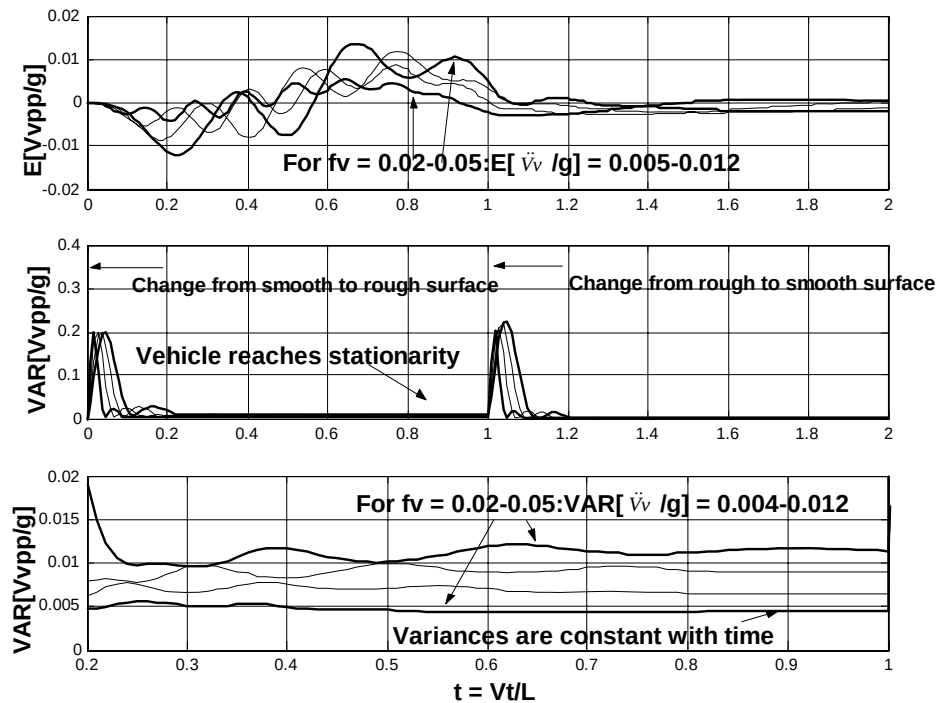
$$RMS = \sqrt{E^2[x] + VAR[x]} \quad (4)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $E[x]$ คือ ค่าคาดหวังของ x

และ ค่า $VAR[x]$ คือ ค่าความแปรปรวนของ x

และ จากภาพ 10 พบว่า เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง 190 ถึง 380 กม. ต่อ ชม. ค่าความเร่งในแนวดิ่ง ของยานพาหนะ อยู่ระหว่าง 0.018g ถึง 0.032g ส่งผลทำให้ผู้ใช้ยานพาหนะ ยังคงรู้สึกสะดวกสบาย และ ถ้าพิจารณาค่าความแปรปรวน ของยานพาหนะ ช่วงที่เข้าสู่สเตชันนารี มีค่าระหว่าง 0.015g ถึง 0.025g ดังนั้นทำการคำนวณ ค่า RMS พบว่า ค่า RMS ของค่าความเร่ง ในแนวดิ่ง ของยานพาหนะ สูงสุดถึง 0.16g ส่งผลทำให้ผู้ใช้ยานพาหนะรู้สึกไม่สะดวกสบาย



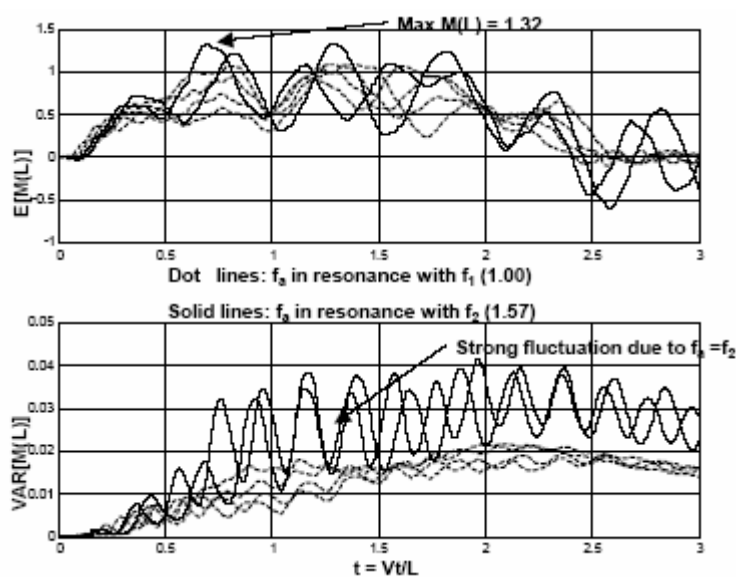
ภาพ 10 แสดงค่าคาดหวัง และ ค่าความแปรปรวน ของยานพาหนะ ในช่วงความเร็วสูง

จากการศึกษาพบว่า ค่าความแปรปรวนของยานพาหนะ เข้าสู่สภาวะเสถียรขึ้นนารี ในขณะที่ ค่าความแปรปรวนของโครงสร้างพื้นฐาน ไม่เข้าสู่สภาวะเสถียรขึ้นนารี และ ค่าคาดหวังเพียงค่าเดียว อาจจะไม่พอในการวิเคราะห์ผลตอบสนอง จำเป็นต้องพิจารณาค่าความแปรปรวน ในรูปแบบของ ค่า RMS เพราะพารามิเตอร์ที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์หลายระบบ ได้แก่ ระบบพื้นผิววาง ระบบโครงสร้างพื้นฐาน และ ระบบยานพาหนะ

ในปี พ.ศ. 2548 (ต่อ) งานวิจัยของ Seetapan, P., Maiwattana, A. และ Chucheeepsakul S. เรื่อง Dynamic responses of a two-span beam subjected to 2DOF sprung vehicles นำเสนอหลักการการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ 2 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่บนโครงสร้างพื้นฐานสะพาน 2 ช่วง ที่มีค่าความขรุขระด้วยขบวนการสุ่ม ผ่านตัวกรองไวท์นอยซ์ และทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่ ในรูปแบบของตัวแปรไร้หน่วย จากนั้นคำนวณค่าการโก่ง โมเมนต์แรงเฉือน และ ค่าความเร่งของโครงสร้างพื้นฐาน

ตาราง 1 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของเพลามาเปรียบเทียบกับตัวแปรไร้หน่วยความเร็วยานพาหนะ และ ระยะห่างระหว่างเพลาคือความยาวของคาน

f_a for $L = 20$ m and $f_{beam} = 7$ Hz.		f_v (speed, km/h)			
		0.06(190)	0.08	0.10	0.12(380)
ℓ/L	0.40	<u>0.94</u>	1.26	<u>1.57</u>	1.88
	0.50	0.75	<u>1.01</u>	1.26	<u>1.51</u>
	0.60	0.63	0.84	<u>1.05</u>	1.26
	0.70	0.54	0.72	0.90	<u>1.08</u>



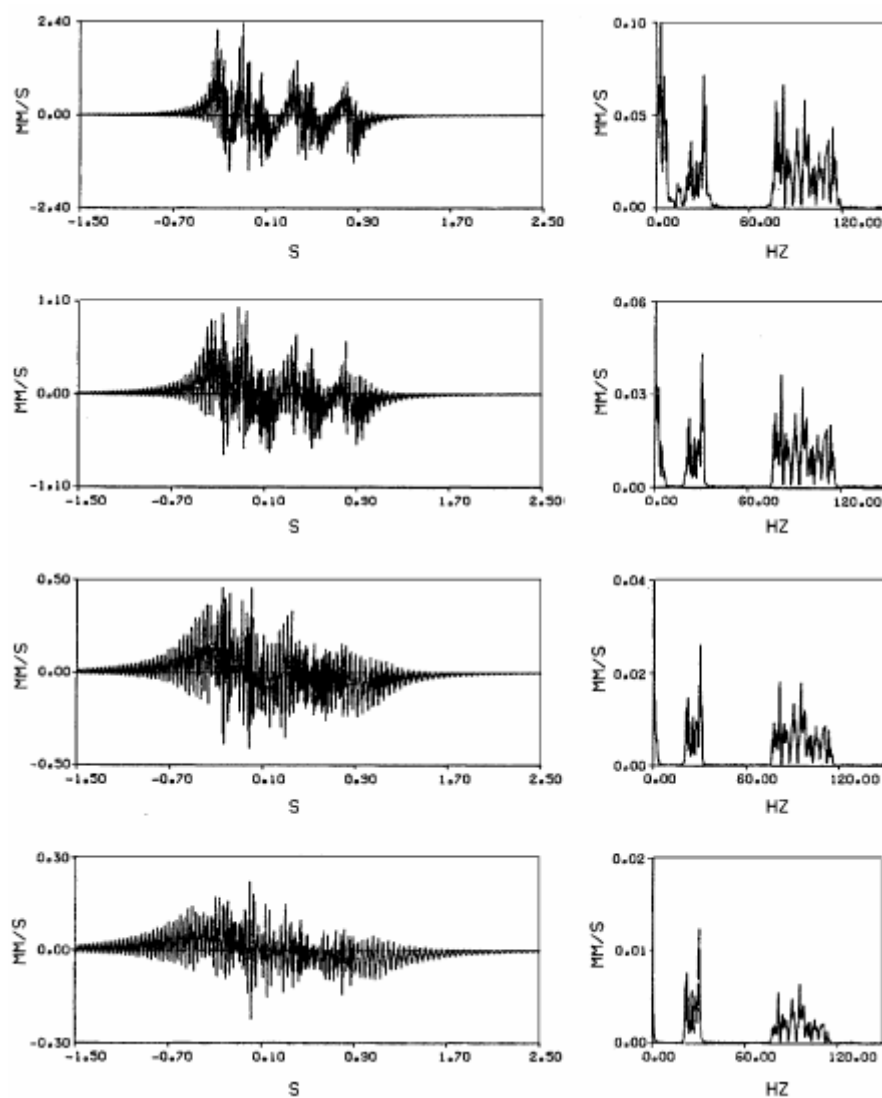
ภาพ 11 แสดงค่าคาดหวัง และ ค่าความแปรปรวนของโมเมนต์ภายใน

จากตาราง 1 พบว่า ค่าความถี่อัตราการมาถึงของเพลลา เข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติลำดับที่ 1 และ 2 เมื่อค่าระยะห่างระหว่างเพลลาต่อความยาวของคานาค่าหนึ่งสอดคล้องกับค่าความเร็วของยานพาหนะอีกค่าหนึ่ง ส่งผลให้มีค่า DAF สูง และ ค่าความแปรปรวนขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง ดังภาพ 11

จากการศึกษาพบว่า ยานพาหนะตั้งแต่สองเพลลาขึ้นไป จำเป็นต้องศึกษา ค่าระยะห่างระหว่างเพลลาต่อความยาวของคาน และ ค่าความเร็วของยานพาหนะ เพื่อวิเคราะห์ว่าค่าความถี่อัตราการมาถึงของเพลลาเข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติหรือไม่ ซึ่งถ้าค่าความถี่อัตราการมาถึงของเพลลาเข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติ จะส่งผลให้เกิดการสั่นพ้องขึ้น

ในปี พ.ศ. 2548 (ต่อ) งานวิจัยของ Auersch, L. เรื่อง The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines นำเสนอการเคลื่อนที่ของยานพาหนะระบบราง ที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนบริเวณพื้นผิวดิน ด้านข้างรางรถไฟ โดยใช้ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite-Element method) และ วิธีการเบอร์ดาร์ (Boundary method) เพื่อพิจารณาผลตอบสนองต่อค่าความถี่ พบว่า ความไม่สม่ำเสมอของระบบเพลลายานพาหนะ ทำให้เกิดผลตอบสนองที่ความถี่สูง และ ความไม่สม่ำเสมอของระบบรางทำให้เกิดผลตอบสนองที่ความถี่ต่ำ

และ สำหรับค่าการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ต่ำจะลดลง เมื่อระยะห่างจากศูนย์กลางรางรถไฟเพิ่มขึ้น สำหรับค่าการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่กลาง (10 – 40 Hz) จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อระยะห่างจากศูนย์กลางรางรถไฟเพิ่มขึ้น และ เนื่องจากคุณสมบัติของดินที่มีค่าความหน่วงสูง ทำให้ค่าการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่สูง (80 – 120 Hz) จะลดลงเป็นบริเวณกว้าง เมื่อระยะห่างจากศูนย์กลางรางรถไฟเพิ่มขึ้น ดังภาพ 12



ภาพ 12 แสดงค่าการสั่นสะเทือน และ สเปกตรัมฟูเรียร์ ของพื้นผิวดิน จากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ระดับความเร็ว 200 กม./ชม. โดยกำหนดระยะห่างจากศูนย์กลางวางรถไฟ 2.5, 5, 10 และ 20 เมตร ตามลำดับภาพ (จากบนลงล่าง)

จากการศึกษาพบว่า ระบบวางแบบวางบนพื้นผิวดิน มีผลกระทบต่อค่าความเสียหายของระบบรางต่ำ เนื่องจากคุณสมบัติของพื้นดินสามารถกระจายช่วงความถี่สูง เมื่อระยะห่างจากศูนย์กลางรางรถไฟเพิ่มขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานแบบสะพานแบบต่าง ๆ เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน เนื่องจาก ก่อให้เกิดค่าความเสียหายมากกว่าระบบโครงสร้างพื้นฐานที่วางบนพื้นผิวดิน

ในปี พ.ศ. 2549 งานวิจัยของ Yonglin, Z. และ Jiafan, Z. เรื่อง Numerical simulation of stochastic road process using white noise filtration นำเสนอวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ 6 เพลา (เพลาด้านซ้าย และ เพลาด้านขวา จำนวนด้านละ 3 เพลา) บนพื้นผิวถนนในรูปแบบโดเมนของเวลา โดยใช้ตัวกรองไวท์นอยซ์ ขบวนการสโตแคสติก ที่แสดงค่าการหลุดตัวของพื้นผิวทางที่ไม่สม่ำเสมอ $q_i(t)$ ที่จุด i ใดๆ ดังสมการ

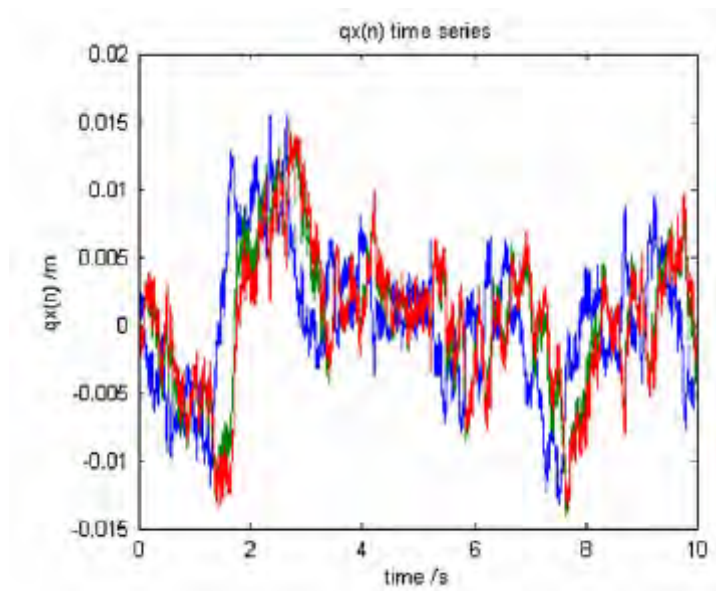
$$\dot{q}_i(t) + \alpha u q_i(t) = \xi_i(t) \quad (5)$$

โดยกำหนดให้

ค่า α คือ ค่าคงที่ของผิวทางที่สัมพันธ์กับระดับความขรุขระพื้นผิวทาง

และ ค่า $\xi_i(t)$ คือ ค่าเฉลี่ยไวท์นอยซ์ (Zero-mean white noise) ในรูปแบบความแปรปรวนร่วม $E[\xi_i(t)\xi_i(\tau)] = 2\alpha u \beta^2 \delta(t-\tau)$ โดยที่ ค่า β คือ ค่าคงที่ความไม่สม่ำเสมอของผิวทาง และ $\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันไดเรค (Dirac function)

จากสมการดังกล่าว นำมาจัดรูปสมการโดยอาศัยหลักการแปลงรูปลาปลาซ(Laplace transform) และ แก้สมการอนุพันธ์ เพื่อหาค่าความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวดังภาพ 13



ภาพ 13 แสดงค่าความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว ในรูปแบบโดเมนเวลา

จากการศึกษาพบว่า สามารถนำหลักการ ตัวกรองไวท์นอยซ์ ขบวนการสโตแคสติก มาใช้ในการ
สร้างแบบจำลองความขรุขระของพื้นผิว ระบบวางความเร็วสูง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในขณะที่ ยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน เนื่องจาก คุณสมบัติ ความขรุขระของพื้นผิว คุณสมบัติของยานพาหนะ และ คุณสมบัติของโครงสร้างพื้นฐาน โดยทำการสร้างแบบจำลอง และ กำหนดคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับคุณสมบัติยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐานระบบราง จากนั้นปรับค่าตัวแปรให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย และ ทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่ (Equation of motion) เพื่อคำนวณผลตอบสนองต่อยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน รวมทั้งคำนวณค่าความแปรปรวนที่จะเกิดขึ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square, RMS) จากรากที่สองของผลรวมค่าคาดหวังยกกำลังสองกับค่าความแปรปรวน ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานนั้น เกี่ยวเนื่องกับ ตัวแปรจำนวนมาก ที่สำคัญได้แก่ ตัวแปรความยาวคัน ตัวแปรความเร็วยานพาหนะ ตัวแปรความขรุขระของพื้นผิว ตัวแปรความเค้นของขบวนรถไฟท่อนอยซ์ ตัวแปรระบบกันสะเทือน ตัวแปรระบบโช้คอัพ และ ตัวแปรระบบยืดหยุ่น จากตัวแปรดังกล่าวทำการสร้างความสัมพันธ์ทางสถิติของพารามิเตอร์เกี่ยวข้องด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) จากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ ของพารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว พารามิเตอร์ระบบโครงสร้างพื้นฐาน พารามิเตอร์ระบบยานพาหนะ และ พารามิเตอร์ระบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน โดยแสดงรายละเอียดการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เรียงตามลำดับ ดังนี้

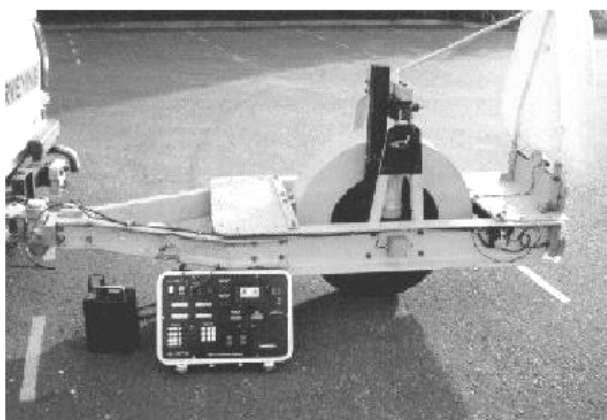
การวิเคราะห์พื้นผิวแบบสุ่ม (Random surface analysis)

ถนนเป็นเส้นทางคมนาคมหลักในการเดินทางไปยังจุดหมายปลายทาง เมื่อเวลาผ่านไปถนนที่มีคุณภาพดีจะเริ่มชำรุดโดยเฉพาะที่พื้นผิวทาง เนื่องจากคุณสมบัติของถนนที่ใช้ในการออกแบบการรับแรงกระทำซ้ำจากน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะ ปริมาณจราจร และ สภาพแวดล้อมบริเวณดังกล่าว ดังนั้นจำเป็นต้องเก็บรวบรวมข้อมูลความเสียหายของพื้นผิวทาง เพื่อใช้ในการประเมินผล และ จัดลำดับความสำคัญในการบำรุงรักษาทางต่อไป (กรมทางหลวง, 2545)

ในอดีตการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าความขรุขระของพื้นผิวภาคสนาม ใช้แรงงานคน และ เวลา ค่อนข้างมาก ต่อมา ธนาคารโลก (World Bank) ได้คิดค้นเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจ ค่าความขรุขระของพื้นผิวทาง (Road Roughness) โดยแบ่งตามประเภทของเครื่องมือวัด ได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. เครื่องมือวัดระดับ (Profilometer) คือ เครื่องมือวัดระดับ (Profile) หรือความลาดเอียง (Slope) ของถนนตามแนวยาว และสามารถนำมาคำนวณค่าทางสถิติ โดยเครื่องมือวัดที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องมือ Dipstick คือ เครื่องมือวัดค่าระดับจากความแตกต่างของขาทั้งสอง (ห่างกัน 30 ซม.) โดยใช้เครื่องมือวัดระดับอัตโนมัติ (Inclinometer) และ แสดงค่าระดับในรูปแบบ จอภาพ LCD เครื่องมือ Dipstick เป็นเครื่องมือกึ่งอัตโนมัติ ลักษณะการใช้งานค่อนข้างยุ่งยาก ทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือในรูปแบบ เทคโนโลยีแสงเลเซอร์ ยกตัวอย่าง เครื่องมือ Swedish laser-RST เป็นเครื่องมือวัดค่าระดับ และ เชื่อมโยงต่อเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผล และ แสดงกราฟของบริเวณที่ศึกษาได้

2. เครื่องมือวัดค่าความขรุขระ (Road meter) คือ เครื่องมือที่อาศัยหลักการเคลื่อนที่ขึ้น และ เคลื่อนที่ลงสะสม ของเพลาลัง โดยเครื่องมือวัดที่ได้รับความนิยม ได้แก่ บัม อินทิเกรเตอร์ (Bump Integrator, BI) เป็นเครื่องมือที่ออกแบบมาเพื่อการสำรวจ ความขรุขระของพื้นผิวทาง (Roughness surveys) ดังภาพ 14



ภาพ 14 แสดงเครื่องมือวัดความขรุขระของพื้นผิวทางบัม อินทิเกรเตอร์ (Bump Integrator, BI)

ลักษณะการทำงานของ BI อาศัยกลไกการเคลื่อนที่ยืดหยุ่นสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของระบบกันสะเทือนของรถยนต์ และ สำหรับวิธีการทดสอบ BI เริ่มจากการติดตั้งเครื่องมือยึดแน่นกับตัวถังรถยนต์ตรงกับตำแหน่งเพลาลัง และมีสายลวดสลิงพันรอกร้อยต่อผ่านรู หรือช่องที่ทำการเจาะพื้นรถยนต์ลงมายึดกับตัวเพลาลังของรถยนต์ที่ทำการทดสอบ ลูกรอกนี้จะตั้งอยู่ตลอดเวลา โดยมีขดลวดสปริงแบบนาฬิกาเหนียวไว้ ภายในลูกรอกจะหมุนไป-กลับ ได้ตามการเคลื่อนที่ขึ้นและ เคลื่อนที่ลงสะสม ของเพลาลัง ในขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ไปตามทางที่ถูกทดสอบ โดยเครื่องมือ BI นี้จะมีเครื่องส่งสัญญาณตามสายนำสัญญาณไปยังห้องควบคุมที่อยู่ภายในห้องคนขับ และ จะทำการบันทึกค่าการเคลื่อนที่ขึ้น และ เคลื่อนที่ลงสะสม ของเพลาลัง เมื่อรถยนต์เคลื่อนที่ไปตามทางด้วยความเร็ว 35 กม./ชม. (ในย่านชุมชน) และ ความเร็ว 60 กม./ชม. (นอกเมือง) ค่าที่บันทึกเป็นค่าความขรุขระที่ยังไม่ได้ปรับเทียบ ในรูปแบบของสมการ

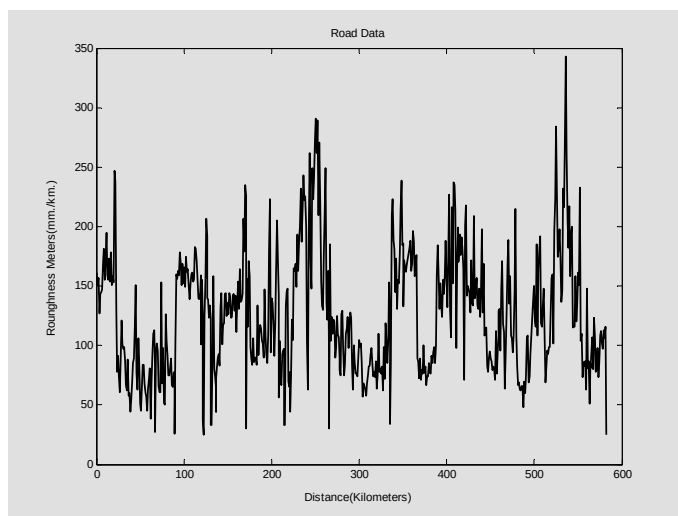
$$BI = \text{Count (cm.)} \times 10 / \text{Distance (km.)} \text{ หน่วย (mm./km)} \quad (6)$$

โดยกำหนดให้

Count (cm.) คือ ค่าการเคลื่อนที่ขึ้น และ เคลื่อนที่ลงสะสม ของเพลาลัง

และ Distance (km.) คือ ระยะทางของช่วงที่ทดสอบ

ในการทดสอบ BI นั้น ดำเนินการทดสอบต่อเนื่องในแต่ละตอน โดยรถทดสอบวิ่งด้วยความเร็วคงที่ ในขณะที่เครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการอ่านข้อมูลเมื่อถึงจุดสุดท้าย หรือครบตอน และ ใช้โปรแกรม ROMDAS ในการประมวลผลข้อมูล ดังภาพ 15 ข้อมูลมีความสม่ำเสมอ คล้ายสเตชันนารี เกาส์เซียน แรนดอม โพรเซส (Homogenous random process)



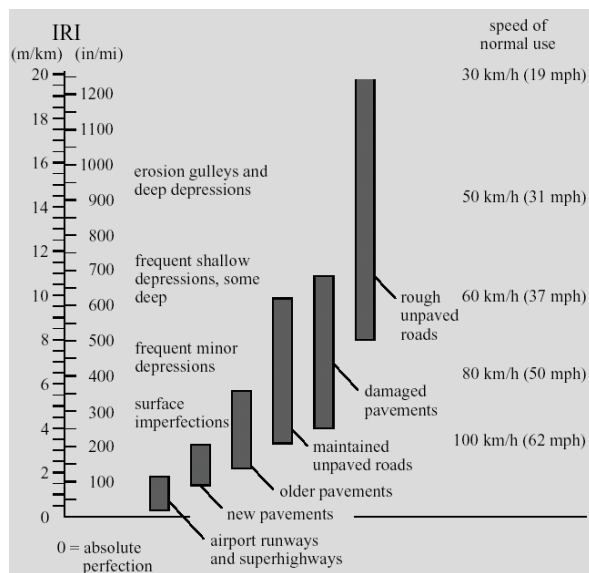
ภาพ 15 แสดงตัวอย่างโปรไฟล์ของพื้นผิวถนนสายหนึ่งในประเทศไทย

จากผลการทดสอบภาคสนามทำการปรับค่า BI เป็นค่า IRI ดังสมการ

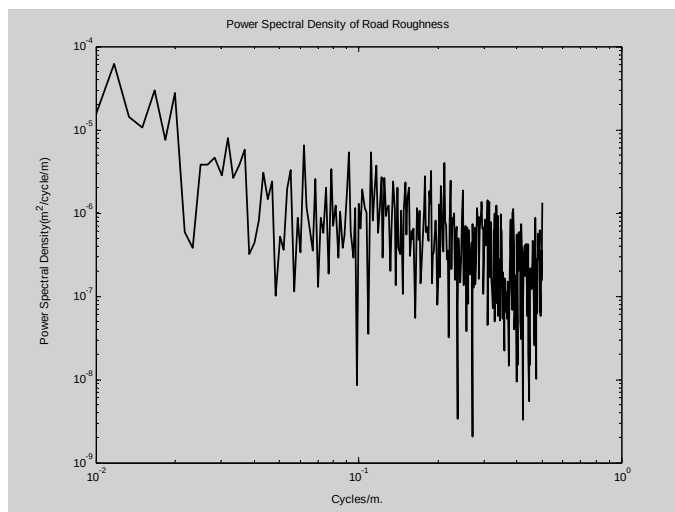
$$IRI = 0.0032BI^{0.89} \quad (7)$$

ค่า IRI คือ ดัชนีชี้วัดความขรุขระของผิวทาง (International Roughness Index) ที่มีความสำคัญในการประเมิน พื้นผิวทาง และ ต้นทุนการใช้น้ำมันพาหนะ ค่าความรู้สึกสะดักสวายของผู้ใช้ยานพาหนะ แรงกระทำที่เพลาของรถบรรทุก การหยุดรถเฉียบพลัน และ ความปลอดภัยต่อผู้ใช้น้ำมันพาหนะ โดยมีหน่วยวัด (m./km. และ in./mi)

ผลการทดสอบค่า IRI นั้น ใช้มาตรฐานของเอ็นซีเอสอาร์พี (The National Cooperative Highway Research Program, NCHRP) ลำดับที่ 228 ดังภาพ 16



ภาพ 16 แสดงระดับค่าดัชนีชี้วัดความขรุขระผิวทาง ตามประเภทของถนน



ภาพ 17 แสดงค่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล ของผิวถนนสายหนึ่งในประเทศไทย

และจากภาพ 15 แสดงโปรไฟล์ของผิวถนนสายหนึ่งในประเทศไทย ค่าที่ได้มีหลายรูปแบบของคลื่น นำมาจัดเรียงในรูปแบบความยาวคลื่นสเปกตรัลด้วยวิธีการฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectral Density, PSD) ดังภาพ 17 แสดงว่า แกน y แสดงค่ากำลังของโพรเซส ส่วนแกน x แสดงค่า จำนวนคลื่น (wave number, r) ในความเป็นจริง PSD จะมีทั้งสองด้าน คือ มีลักษณะสมมาตรทั้งทางด้านบวก และ ด้านลบ (ในภาพ 16 แสดงด้านบวกเท่านั้น) โดยจะแสดงค่ากำลังของโพรเซสที่ จำนวนคลื่น (ความถี่) ต่าง ๆ จาก $-\infty$ ถึง ∞ และค่า PSD มีกำลังสูง ที่จำนวนคลื่นต่ำ ๆ (low wave number) และ ค่า PSD มีกำลังต่ำลง ที่จำนวนคลื่นสูงขึ้น (high wave number)

ในการคำนวณค่าจำนวนคลื่นนั้น มีค่าเท่ากับ ส่วนกลับของค่าความยาวคลื่น ($r = 1/\lambda$) ดังนั้น ถ้าค่า $r = 0$ จะได้ว่า $\lambda \rightarrow \infty$ ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า เป็นค่าออฟเซตจากศูนย์ (offset) และเป็นจุดที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด ของโพรเซส ค่าความขรุขระ PSD ของข้อมูลนี้ ซึ่งนำไปสร้างเป็นแบบจำลองเป้าหมาย เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในระบบยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ต่อไป

ในหัวข้อที่กล่าวมา บรรยายถึงการวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวทาง ที่เป็นพื้นผิวถนน และ สำหรับพื้นผิวระบบราง คุณสมบัติเครื่องมือวัดค่าความขรุขระ มีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องมือวัดพื้นผิวทาง เพียงแต่เพิ่มเติมอุปกรณ์สำหรับการเคลื่อนที่บนระบบราง ยกตัวอย่าง เครื่องมือวัด Noptel's PSM-220 เป็นเครื่องมือวัดโดยใช้เทคโนโลยีแสงเลเซอร์ ที่มีอุปกรณ์ส่งสัญญาณ และ อุปกรณ์รับสัญญาณ ที่ติดตั้งด้านท้ายของขบวนรถไฟทดสอบดังภาพ 18

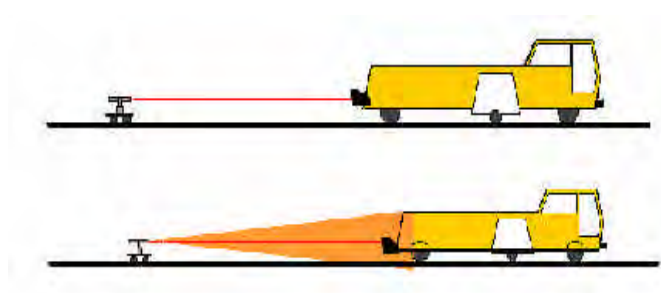
หลักการทำงาน เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างพื้นฐาน อุปกรณ์ส่งสัญญาณจะส่งสัญญาณแสงเลเซอร์ แบบระบุตำแหน่งสัญญาณ ที่มีระบบสัญญาณ 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ระบบสัญญาณแบบกำหนดแน่นอน (Fixed laser) คือ ระบบสัญญาณที่สามารถระบุตำแหน่ง และ ระดับในแนวเส้นตรงได้พร้อมกัน และ แบบที่ 2 ระบบสัญญาณแบบกวาด (Sweeping laser) คือ ระบบสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่กว้าง แต่แสดงเพียงพิกัดเดียวต่อครั้ง ในการรับ-ส่งสัญญาณของทั้งสองระบบนั้น มีระยะห่างไม่เกิน 350 เมตร และสามารถบันทึกข้อมูล 500 ครั้งต่อวินาที ข้อมูลที่ได้จะแสดงในรูปแบบกราฟ ดังภาพ 19



อุปกรณ์ส่งสัญญาณ

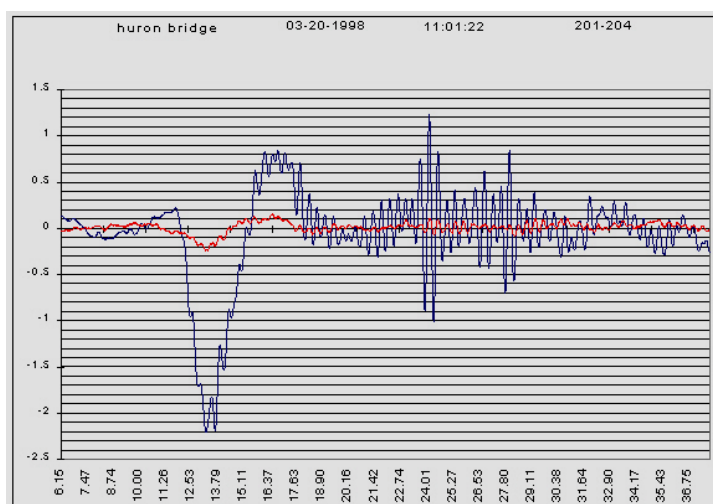


อุปกรณ์เฝ้ารับสัญญาณ



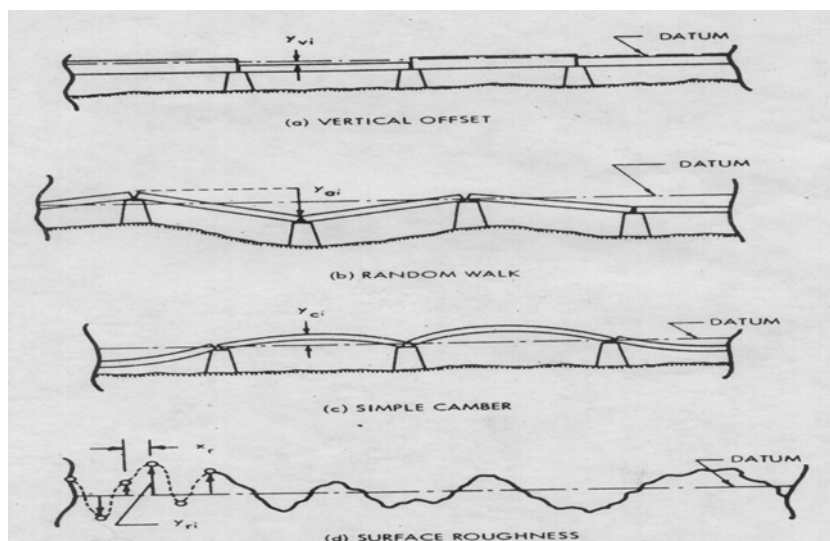
รูปแบบสัญญาณเลเซอร์

ภาพ 18 แสดงเครื่องมือวัดความขรุขระของพื้นผิวระบราง ของ Noptel's PSM-220



ภาพ 19 แสดงค่าความขรุขระพื้นผิว และ ผลตอบสนองจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

เมื่อพิจารณาการเก็บข้อมูลความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวภาคสนาม จากการเคลื่อนแนวตั้ง การสุ่มเดิน และ จากค่าระยะโก่ง ดังภาพ 20 แสดงว่า เป็นการยุ่งยากที่จะเก็บรวบรวมข้อมูล ในภาคสนามที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา ดังนั้นกระบวนการสุ่ม คือ วิธีการสุ่มข้อมูลความขรุขระ ของพื้นผิวเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว



ภาพ 20 แสดงความไม่สม่ำเสมอของแนวทาง

ค่าความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวอาศัยหลักการตัวกรองไวท์นอยซ์ ซึ่งสามารถแปลงรูป หรือจัดรูป ความขรุขระของพื้นผิวในรูปแบบสเปกตรัล ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขของสมการอนุพันธ์สโตแคสติก ลำดับชั้นหนึ่ง ดังสมการ

$$\frac{\dot{h}_d}{r_f} + h_d = W_d \quad (8)$$

โดยกำหนดให้

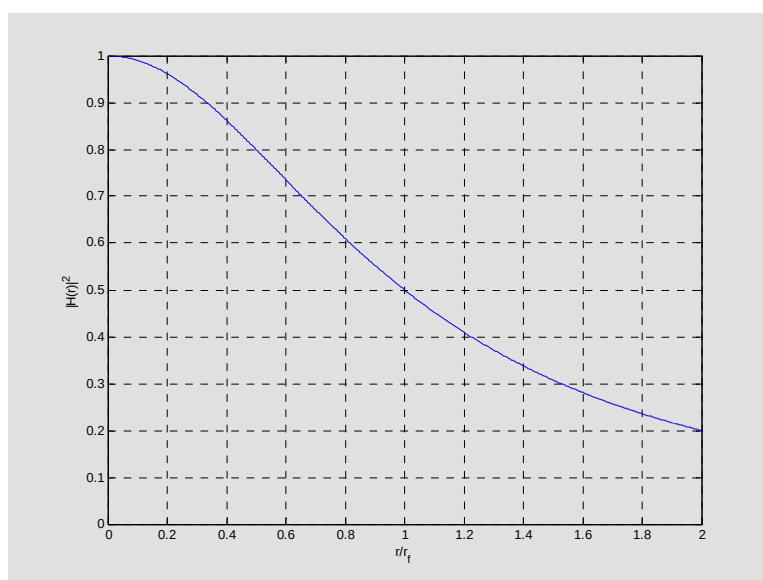
ค่า W_d คือ ตัวกรองไวท์นอยซ์

ค่า h_d คือ ค่าความขรุขระของพื้นผิว

และ ค่า r_f คือ จำนวนคลื่นที่จุดสัมบูรณ์ยกกำลังสอง (Square of the absolute value) ส่วนกลับ ของความยาวคลื่น, λ

จากสมการ 8 ทำการจัดสมการฟังก์ชันแปลงรูป (Transfer function) ค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสอง (Square of the absolute value) ระหว่างตัวแปร W_d และ ตัวแปร h_d ดังสมการ 9 และ ภาพ 21

$$|H(r)|^2 = \frac{1}{1+(r/r_f)^2} \quad (9)$$

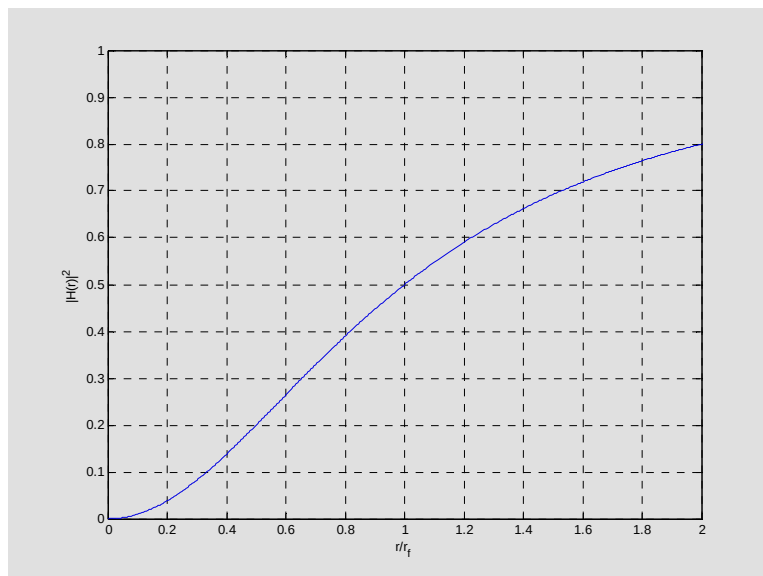


ภาพ 21 แสดงฟังก์ชันแปลงรูปค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสองของ ตัวแปร W_d และ ตัวแปร h_d ของลำดับขั้นที่หนึ่ง

จากภาพ 21 แสดงว่า ตัวกรองไวท์นอยซ์ กรองจำนวนคลื่นสูงออก และ ค่าตัวแปร h_d ประกอบด้วย จำนวนคลื่นต่ำ

และ จากสมการ 8 ทำการจัดสมการฟังก์ชันแปลงรูป (Transfer function) ค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสอง (Square of the absolute value) ระหว่างตัวแปร W_d และ ตัวแปร $\frac{\dot{h}_d}{r_f}$ ดังสมการ 10 และ ภาพ 22

$$|H(r)|^2 = \frac{(r/r_f)^2}{1+(r/r_f)^2} \quad (10)$$



ภาพ 22 แสดงฟังก์ชันแปลงรูปค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสองของ ตัวแปร W_d

และ ตัวแปร $\frac{\dot{h}_d}{r_f}$ ของลำดับชั้นที่หนึ่ง

จากภาพ 22 แสดงว่า ตัวกรองไวท์นอยซ์ กรองจำนวนคลื่นต่ำออก และ ค่าตัวแปร $\frac{\dot{h}_d}{r_f}$ ประกอบด้วย จำนวนคลื่นสูง

และ เมื่อพิจารณาตัวกรองลำดับขั้นที่สอง ดังสมการ

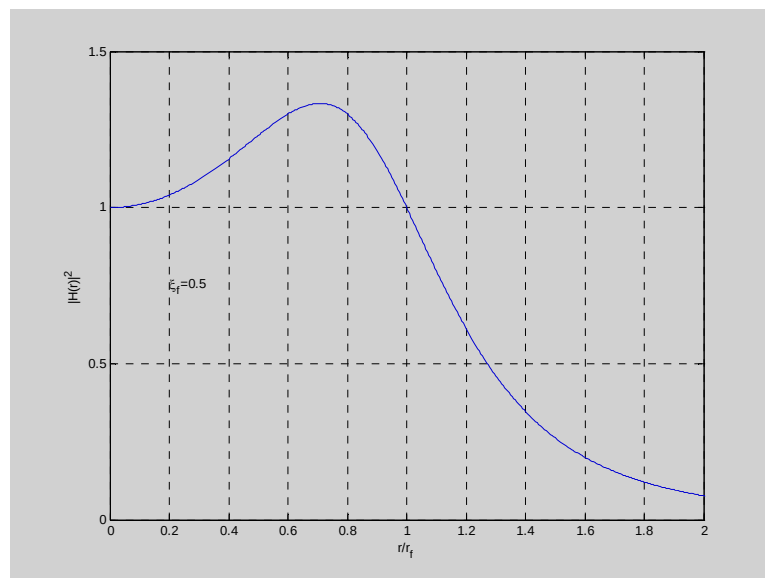
$$\frac{\ddot{h}_d}{r_f^2} + \frac{2\xi_f}{r_f} \dot{h}_d + h_d = W_d \quad (11)$$

โดยกำหนดให้

ค่า ξ_f คือ ค่าความหน่วงของที่จุดสัมบูรณ์ยกกำลังสอง

จากสมการ 11 ทำการจัดรูปสมการฟังก์ชันแปลงรูป (Transfer function) ค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสอง (Square of the absolute value) ระหว่างตัวแปร W_d และ ตัวแปร h_d ดังสมการ 12 และ ภาพ 23

$$|H(r)|^2 = \frac{1}{\left(1 - (r/r_f)^2\right)^2 + \left(2\xi_f r/r_f\right)^2} \quad (12)$$



ภาพ 23 แสดงฟังก์ชันแปลงรูปค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสองของ ตัวแปร W_d และ ตัวแปร h_d ของลำดับขั้นที่สอง

จากภาพ 23 แสดงว่า ตัวกรองไวท์นอยซ์ กรองจำนวนคลื่นสูงออก และ ค่าตัวแปร h_d ประกอบด้วยจำนวนคลื่นต่ำ และ จะได้ค่า $|H(r)|^2$ สูงสุด เมื่อค่า r/r_f อยู่ในช่วงจำนวนคลื่นต่ำกว่า 1

เมื่อพิจารณาตัวกรองไวท์นอยซ์ W_d เพื่อให้ได้ค่าสัญญาณที่เหมาะสม และได้ค่าความขรุขระพื้นผิว $h(x)$ โดยทำการแปลงรูปจาก สัญญาณโดเมนของเวลา เป็น สัญญาณโดเมนของความถี่ ด้วยฟังก์ชันแปลงรูปฟูเรียร์ เพื่อใช้ในการคำนวณ ค่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectral Density, PSD) ของ h_d ดังสมการ

$$S_{h_d h_d}(r) = |H(r)|^2 S_0 \quad (13)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $S_{h_d h_d}(r)$ คือ ค่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล

และ S_0 คือ ความเข้มของขบวนการไวท์นอยซ์ หน่วย $(length)^3$

จากสมการ (13) ทำการอินทิเกรต ค่า PSD จะได้ค่าความแปรปรวนของ ค่าความขรุขระพื้นผิว $\sigma_{h_d h_d}^2$ ดังสมการ

$$\sigma_{h_d h_d}^2(r) = \int_{-\infty}^{\infty} |H(r)|^2 S_0 dr \quad (14)$$

ค่าความแปรปรวนมีความสำคัญในการนำไปใช้คำนวณ ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square, RMS) รายละเอียดการคำนวณ จากสมการ 4

และ จากสมการ 8 ที่แสดงสมการการเคลื่อนที่ในรูปของตัวกรองไวท์นอยซ์

ทำการจัดรูปสมการใหม่ เป็นสมการอนุพันธ์ลำดับชั้นที่หนึ่ง ในโดเมนสเปซ (Real spatial domain) ดังสมการ 15

$$\Delta_c \frac{dh_d(x_d)}{dx_d} + h_d(x_d) = W_d(x_d) \quad (15)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $W_d(x_d)$ คือ ขบวนการวีโร มีน เกาส์เซียน ไวท์นอยซ์ (Zero mean Gaussian white noise)

หน่วย $(length)^1$

ค่า $\Delta_c = 1/r_f$ คือ ระยะสหสัมพันธ์ (Correlation distance) หน่วย $(length)^1$

และ ค่า $h_d(x_d)$ คือ ค่าเฉพาะของขบวนการ ค่าความขรุขระพื้นผิวเฉลี่ย หน่วย $(length)^1$

จากสมการ 13 คำนวณค่าความแปรปรวนร่วม (Autocovariance) โดยทำการแปลงรูปฟูรีเย์
ของ $S_{h_d h_d}(2\pi r)$ ดังสมการ

$$COV[h_d(x_d)h_d(x_d + \Delta)] = R_{h_d h_d}(\Delta) = \frac{q_0}{2\Delta_c} \exp\left[-\frac{|\Delta|}{\Delta_c}\right] \quad (16)$$

โดยกำหนดให้

ค่า Δ คือ สเปเชียลแลค (Spatial lag)

และ ค่า q_0 คือ ค่าความเค้นของขบวนการไวท์นอยซ์

จากนั้นทำการ จัดรูปความสัมพันธ์กับค่าความเข้มของขบวนการไวท์นอยซ์ ดังสมการ

$$q_0 = 2\pi S_0 \quad (17)$$

และ สามารถคำนวณค่าความแปรปรวน (Variance) ของ $h_d(x_d)$ ดังสมการ

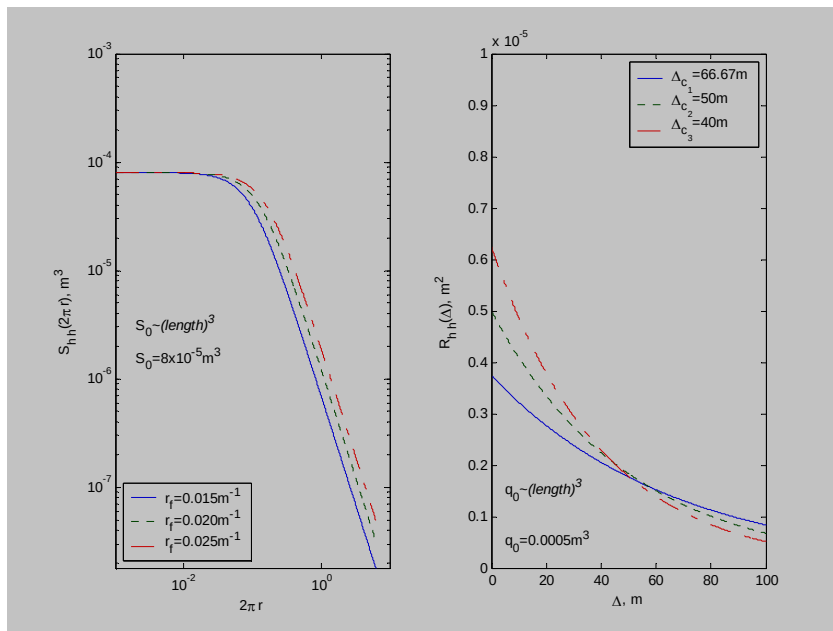
$$VAR[h_d(x_d)] = R_{h_d h_d}(0) = \frac{q_0}{2\Delta_c} \quad (18)$$

และ จัดรูปสมการฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ $h_d(x_d)$ ดังสมการ

$$\rho_{h_d h_d}(\Delta) = \frac{COV[h_d(x_d)h_d(x_d + \Delta)]}{VAR[h_d(x_d)]} = \exp\left[-\frac{|\Delta|}{\Delta_c}\right] \quad (19)$$

จากสมการ 13, 17 และ 19 กำหนดค่า $S_0 = 8 \times 10^{-5} m^3$ และ $r_f = 0.015, 0.020$ และ $0.025 m^{-1}$

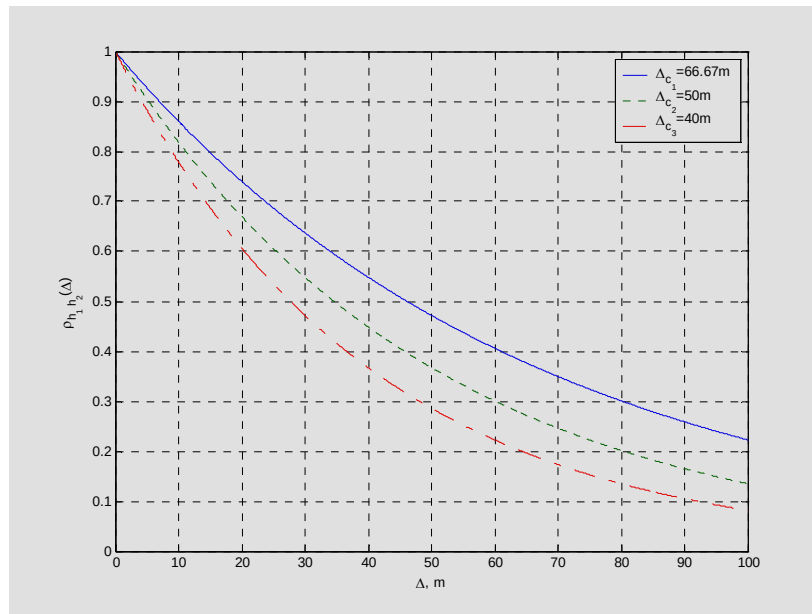
¹ ดังภาพ 24



ภาพ 24 แสดงค่า PSD และ ค่าความแปรปรวนร่วมของ $h_d(x_d)$

จากภาพ 24 แสดงว่า ถ้าจำนวนคลื่น r_f เพิ่มขึ้น หรือพื้นที่ผิวที่มีค่าความขรุขระสูงขึ้น จะส่งผลทำให้ค่า PSD เพิ่มขึ้น และ ถ้าพื้นที่ผิวที่มีค่าความขรุขระสูง และ ค่า Δ เท่ากับ 0 จะทำให้ได้ค่าความแปรปรวนสูงสุด และ ถ้าค่า Δ เพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวที่มีค่าความขรุขระสูง ค่าความแปรปรวนจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวที่มีค่าความขรุขระต่ำกว่า จนกระทั่งถึง ค่า Δ ค่าหนึ่ง ที่ทำให้ พื้นที่ผิวที่มีค่าความขรุขระต่ำ ค่าความแปรปรวนจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวที่มีค่าความขรุขระสูงกว่า

และ จากภาพ 25 แสดงว่า พื้นผิวที่มีค่าความขรุขระสูง จะส่งผลทำให้ ค่าสหสัมพันธ์ลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่มีค่าความขรุขระต่ำกว่า เนื่องจากผลของ ฟังก์ชันเอกโปเนนเชียล (Exponential function) ของ $|\Delta|/\Delta_c$



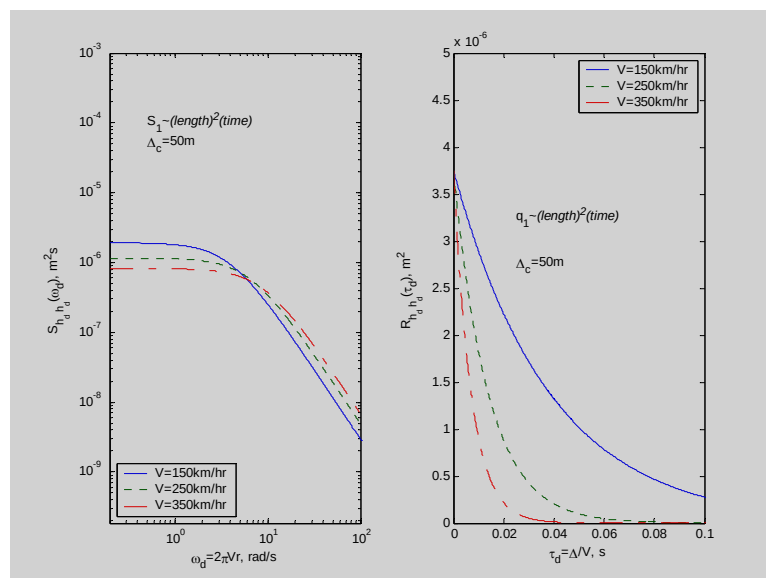
ภาพ 25 แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ $h_d(x_d)$

จากสมการ 15 สมการอนุพันธ์ลำดับชั้นที่หนึ่ง ในโดเมนสเปซเรียล (Real spatial domain) ทำการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ลำดับชั้นที่หนึ่ง ในโดเมนเวลา (Time domain) ดังสมการ 20 โดยกำหนดให้อยู่ในรูปตัวแปร V คือ ค่าความเร็วคงที่ จะได้ค่า $x_d = Vt_d$ และ $dx_d = Vdt_d$ ดังสมการ

$$\frac{\Delta_c}{V} \dot{h}_d(t_d) + h_d(t_d) = W_d(t_d) \quad (20)$$

$$COV[h_d(t_d)h_d(t_d + \tau_d)] = \frac{q_1}{2(\Delta_c/V)} \exp\left[-\frac{|\tau_d|}{(\Delta_c/V)}\right] \quad (21)$$

สำหรับค่าความเข้ม และ ความเค้นของไวน้อยซ์ กำหนดให้ $S_1 = S_0/V$ และ $q_1 = q_0/V$ หน่วย $(length)^2 (time)^1$ เพื่อหาค่า PSD และ ค่าความแปรปรวนร่วมของ $h_d(t_d)$ ดังสมการ 21 และ ภาพ 26



ภาพ 26 แสดงค่า PSD และ ค่าความแปรปรวนร่วมของ $h_d(t_d)$

จากภาพ 26 แสดงว่า ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น ค่า PSD จะสูงขึ้น ในช่วงค่าความถี่สูง และ ค่า PSD จะต่ำลง ในช่วงค่าความถี่ต่ำ และ สำหรับค่าความแปรปรวนร่วมจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น

และ ทำการจัดรูปสมการฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ $h_d(t_d)$

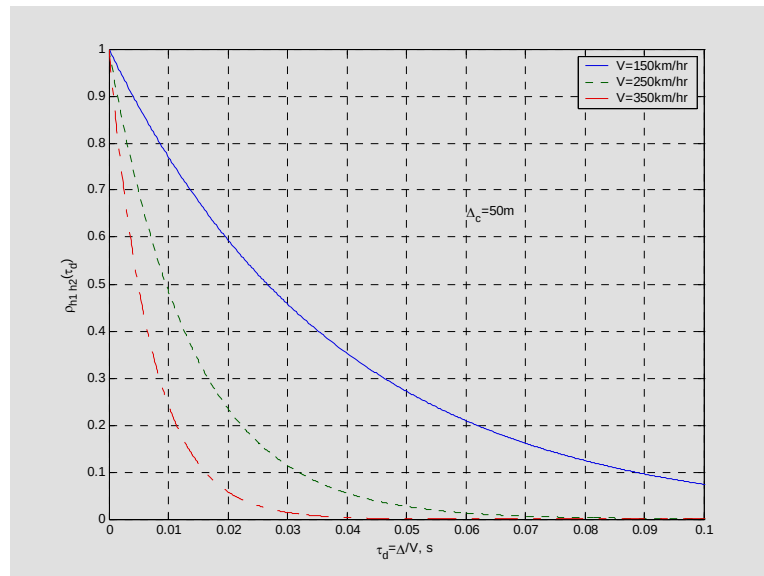
ดังสมการ 22 และ ภาพ 27

$$\rho_{h_d h_d}(\tau_d) = \exp\left[-\frac{|\tau_d|}{\Delta_c/V}\right] \quad (22)$$

โดยกำหนดให้

ค่า τ_d คือ ช่วงของเวลา (Time lag)

และ ค่า $\tau_{d_c} = \frac{\Delta_c}{V}$



ภาพ 27 แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ $h_d(t_d)$

จากภาพ 27 แสดงว่า ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น ส่งผลทำให้ ค่าสหสัมพันธ์ลดลงอย่างรวดเร็ว

จากการแปลงค่า โดเมนสเปซ (Real spatial domain) ให้อยู่ในรูปของ โดเมนเวลา แสดงว่า
ค่าตัวแปรยังคงอยู่ในรูปของ ตัวแปรที่มีหน่วย ดังนั้นจึงทำการปรับค่าตัวแปรให้อยู่ในรูป
ตัวแปรไร้หน่วย ดังสมการ

$$\frac{\Delta_c}{V} \dot{h}(t_d) + h(t_d) = W(t_d) \quad (23)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } h(t_d) = h_d(t_d)/L$$

$$\text{ค่า } W(t_d) = W_d(t_d)/L$$

และ ค่า L คือ ค่าความยาวช่วงคัน เท่ากับ 30 เมตร

จากนั้นทำการแปลง ค่า ความเค้นของไวท์นอยซ์ ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย $q_2 = q_0/(VL^2)$

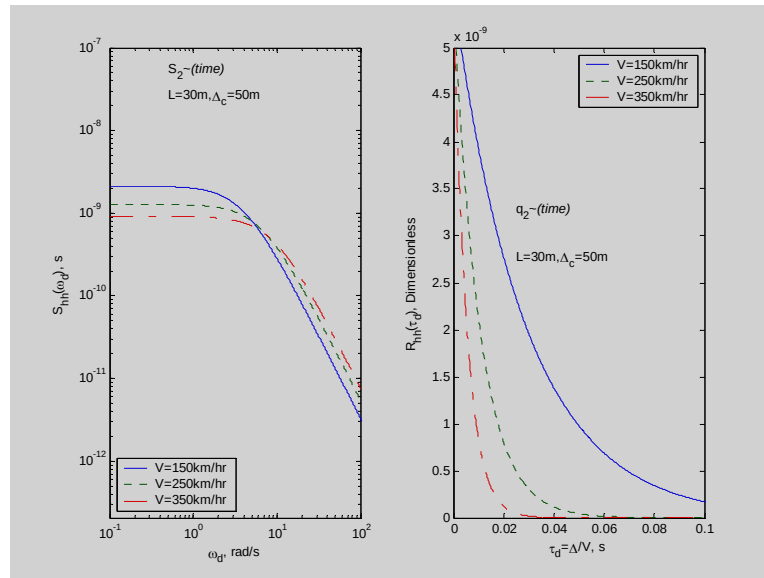
จะได้ ค่าความแปรปรวนร่วม ค่าความแปรปรวน และ ฟังก์ชันสหสัมพันธ์

ดังสมการ 24, 25 และ 26 ตามลำดับ และ ภาพ 28

$$COV[h(t_d)h(t_d + \Delta_d)] = \frac{q_2}{2(\Delta_c/V)} \exp\left[-\frac{|\tau_d|}{(\Delta_c/V)}\right] \quad (24)$$

$$VAR[h(t_d)] = \frac{q_2}{2(\Delta_c/V)} = \frac{q_0}{2VL^2} \frac{V}{\Delta_c} = \frac{q_0}{2\Delta_c L^2} \quad (25)$$

$$\rho_{hh}(\tau_d) = \exp\left[-\frac{|\tau_d|}{\Delta_c/V}\right] \quad (26)$$



ภาพ 28 แสดงค่า PSD และ ค่าความแปรปรวนร่วมของตัวแปรไร้หน่วย $h(t_d)$

จากการปรับเปลี่ยนเป็น ตัวแปรไร้หน่วย แสดงว่า ค่าตัวแปรยังคงติดอยู่ในรูปของ t_d ดังนั้นทำการจัดรูปตัวแปรไร้หน่วยเวลา ให้อยู่ในรูปของตัวแปร t ดังสมการตัวกรองไวท์นอยส์

$$\frac{\Delta_c}{L} \dot{h}(t) + h(t) = W(t) \quad (27)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } t = \frac{t_d}{L/V} = \frac{V}{L} t_d$$

$$\text{และ ค่า } \tau = \frac{V}{L} \tau_d$$

ทำการกำหนดค่าความเข้ม และ ความเค้นของไวท์นอยส์ ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วยเวลา

ค่า $S_3 = S_0/L^3$ และ $q_3 = q_0/L^3$ จะได้ ค่าความแปรปรวนร่วม ค่าความแปรปรวน และ

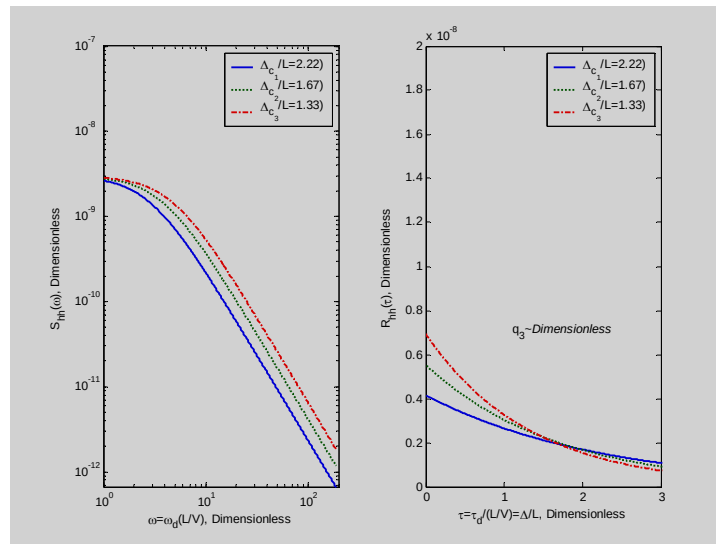
ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ ดังสมการ 28, 29 และ 30 ตามลำดับ

$$COV[h(t)h(t+\tau)] = \frac{q_3}{2(\Delta_c/L)} \exp\left[-\frac{|\tau|}{(\Delta_c/L)}\right] \quad (28)$$

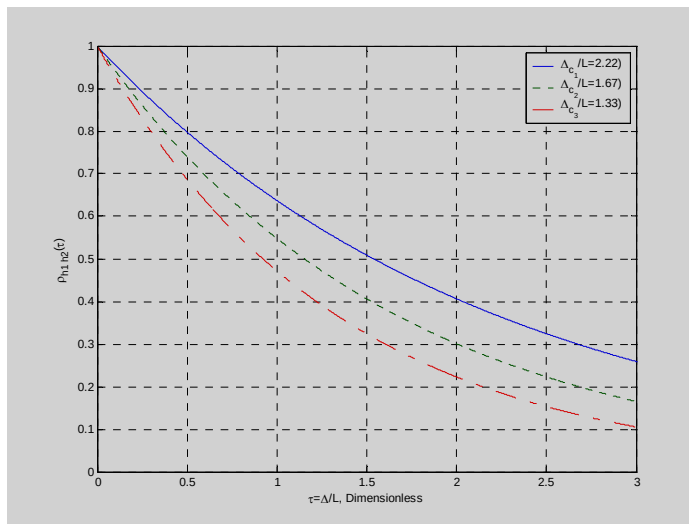
$$VAR[h(t)] = \frac{q_3}{2(\Delta_c/L)} = \frac{q_0}{2\Delta_c L^2} = \frac{(q_0/L^3)}{2(\Delta_c/L)} \quad (29)$$

$$\rho_{hh}(\tau) = \exp\left[-\frac{|\tau|}{\Delta_c/L}\right] \quad (30)$$

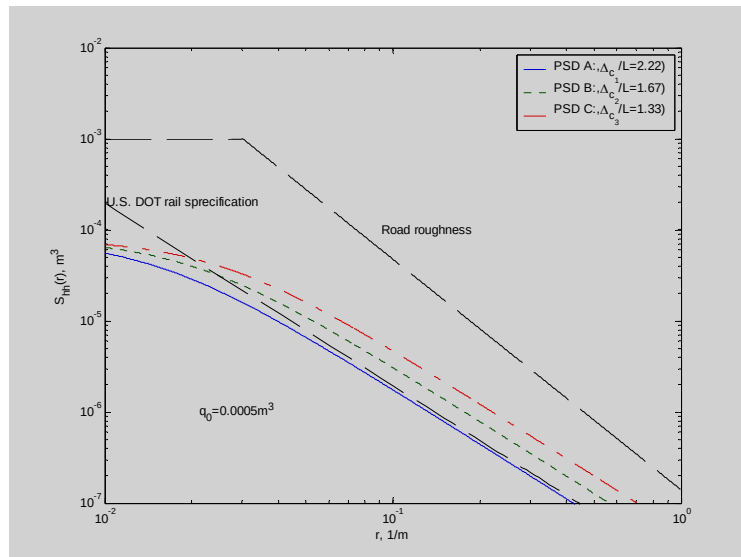
จากภาพ 29 และ 30 แสดงว่า ค่า q_0/L^3 และ $\frac{\Delta_c}{L}$ สามารถนำไปใช้ในการปรับค่าแบบจำลองความขรุขระของพื้นผิวเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ค่าความขรุขระที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นทำการกำหนดค่า $q_0 = 0.0005m^3$ และ $\frac{\Delta_c}{L} = 2.22, 1.67$ และ 1.33 ที่ความยาวคลื่น 30 m และ ทำการคำนวณค่า PSD เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานระบบรางของสหรัฐอเมริกา (U.S. DOT rail specification) ดังภาพ 31



ภาพ 29 แสดงค่า PSD และ ค่าความแปรปรวนร่วมของตัวแปรไร้หน่วยเวลา $h(t)$



ภาพ 30 แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของตัวแปรไร้หน่วยเวลา $h(t)$

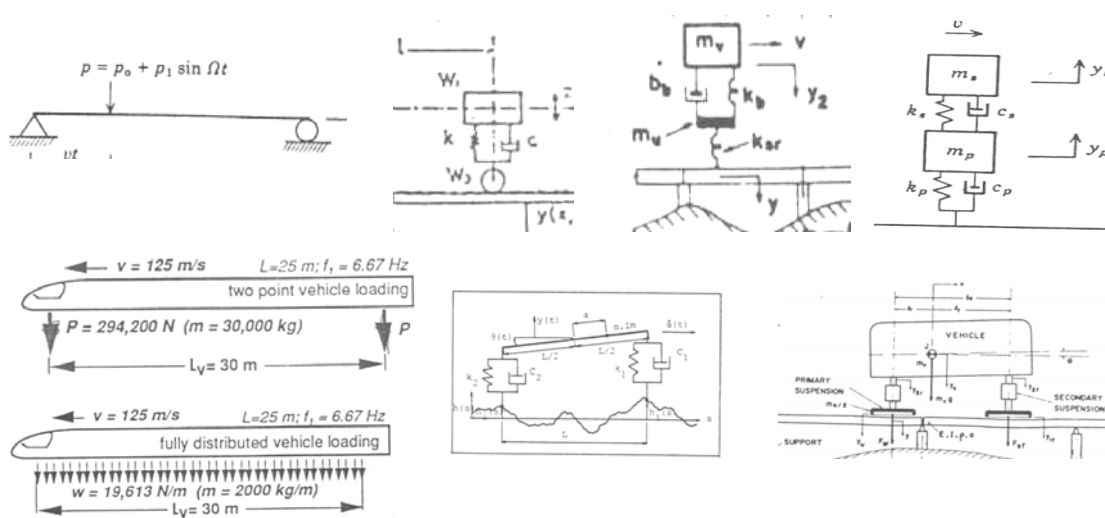


ภาพ 31 แสดงค่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล ของพื้นผิวระบบรางที่ระดับความขรุขระต่างๆ
เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานระบบรางของสหรัฐอเมริกา

จากภาพ 31 แสดงว่า ค่า PSD A, B และ C อยู่ในช่วงของเกณฑ์มาตรฐานระบบรางของสหรัฐอเมริกา ดังนั้นสามารถกำหนดค่า $q_0 = 0.0005 m^3$ และ $\frac{\Delta_c}{L} = 2.22, 1.67$ และ 1.33 เป็นค่าตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสัมพันธ์ (Δ_c / L) และ ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยส์ (q_0 / L^3) เพื่อใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนพื้นผิว ระบบรางความเร็วสูงต่อไป

แบบจำลองยานพาหนะ (Vehicle Model)

ยานพาหนะทางบกมีความสำคัญต่อการขนส่งผู้โดยสาร และ สินค้าไปยังจุดหมายปลายทาง โดยยานพาหนะแต่ละรูปแบบ ขนาด และ น้ำหนัก ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน เฉพาะด้าน และ ก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด สำหรับการจำแนกประเภทยานพาหนะนั้น แบ่งตามจำนวนเพลายานพาหนะดังภาพ 32 ตั้งแต่ประเภทเพลาดียว จนถึง ประเภทหลายเพลาคือเคลื่อนที่บนพื้นผิวระบบราง หรือพื้นผิวดถนน



ภาพ 32 แสดงยานพาหนะประเภทต่างๆ

ประวัติการศึกษายานพาหนะ เริ่มจากการออกแบบยานพาหนะประเภทเพลาดียว เพื่อใช้ในการเดินทางเท่านั้น ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร และ สินค้า ปัจจุบันยานพาหนะประเภทเพลาดียว นิยมใช้ในการแสดงตลก ละครสัตว์ และ ความเพลิดเพลินต่างๆ

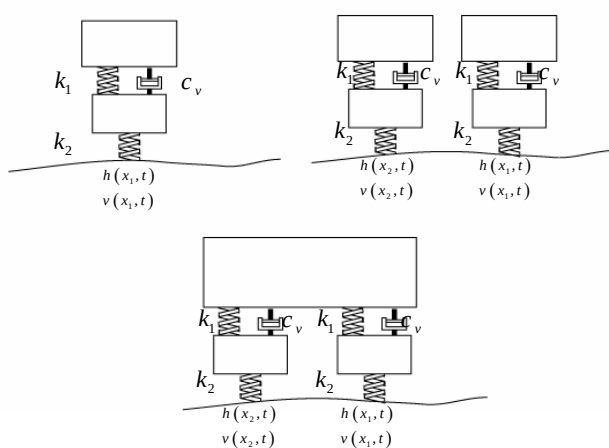
ต่อมาได้มีการพัฒนายานพาหนะประเภทสองเพล่า เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั่วโลก ยกตัวอย่าง รถจักรยาน และ รถจักรยานยนต์ แต่ยานพาหนะประเภทสองเพล่าใช้งานค่อนข้างยาก เพราะจำเป็นต้องมีทักษะในการทรงตัวอยู่บนเพล่าเพียงสองเพล่า ทำให้เกิดอุบัติเหตุจากการใช้ยานพาหนะ ทำให้มีการพัฒนายานพาหนะประเภทสามเพล่าในเวลาต่อมา เพื่อลดข้อจำกัดด้านการทรงตัว และ ช่วยเพิ่มปริมาณในการขนส่งสินค้า ยานพาหนะประเภทสามเพล่า ยกตัวอย่าง รถตุ๊กตุ๊ก และ รถสามล้อเครื่อง โดยถูกออกแบบมาเพื่อนำไปใช้ในการขนถ่ายสินค้า ระยะสั้น ทำให้ไม่เป็นที่นิยมสำหรับบุคคลทั่วไป ที่ต้องการยานพาหนะประเภทสี่เพล่า ยกตัวอย่าง รถยนต์นั่งส่วนบุคคล เพราะ ให้ความสะดวกสบาย สบาย และปลอดภัยในการเดินทาง สำหรับด้านพาณิชย์ และ อุตสาหกรรม บริษัทรถยนต์ได้ออกแบบรถยนต์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะเพื่อการขนส่งสินค้า

แต่เนื่องด้วยความต้องการสินค้าเป็นจำนวนมาก ยานพาหนะประเภทสี่เพล่า มีข้อจำกัดทางด้านขนาด และ ปริมาณการขนส่ง ทำให้มีการออกแบบยานพาหนะประเภทหลายเพล่า ยกตัวอย่าง รถบรรทุก 6 ล้อ และ รถบรรทุก 10 ล้อ ซึ่งเป็นที่นิยมในการขนส่งสินค้า และการโดยสารไปยังจุดหมายปลายทางได้อย่างสะดวกรวดเร็ว

จากความต้องการยานพาหนะประเภทต่างๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในแต่ละด้าน ส่งผลกระทบต่อปริมาณการจราจรที่หนาแน่น และ ติดขัดเป็นจำนวนมาก ยานพาหนะหลายเพล่าเคลื่อนที่บนพื้นผิวระบบราง เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการเดินทาง และ ขนส่งสินค้าเป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่าง รถไฟ สำหรับในประเทศไทย การขนส่งทางรถไฟไม่ค่อยเป็นที่นิยม เนื่องจากข้อจำกัดของระบบรางเดียว ที่ออกแบบสำหรับรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 90 กม./ชม. ส่งผลทำให้ค่าความเร็วเฉลี่ย 50-60 กม./ชม. (ต่อเที่ยว) และ สถานีรถไฟไม่ครอบคลุมทุกจังหวัด

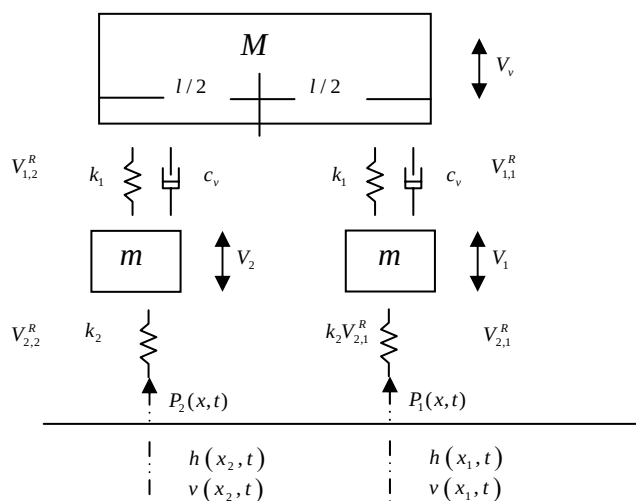
จากปัญหาระบบขนส่งดังกล่าว คณะรัฐมนตรีมีมติให้กำหนดแผนแม่บทรถไฟความเร็วสูงในประเทศไทย (ระหว่างปี 2535 - 2537) โดยก่อสร้างรถไฟความเร็วสูง สายชายฝั่งทะเลตะวันออก (กรุงเทพฯ – สนามบินหนองงูเห่า – ระยอง) เป็นสายแรก ช่วยพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และ สภาพแวดล้อมพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออกให้เจริญก้าวหน้าเพื่อการเดินทางไปทำงาน และ พักอาศัย โดยไม่ต้องเผชิญกับสภาพความแออัดในกรุงเทพมหานคร

เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาล ทำการศึกษาแบบจำลองยานพาหนะ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถออกแบบยานพาหนะ มีทั้งแบบยืดหยุ่น (Rigid) หรือแบบยืดหยุ่น (Flexible) โดยมีวัสดุเชื่อมต่อ มีทั้งแบบสปริง (Springs) ตัวหน่วง (Dampers) ลิงค์ (Links) จัอยส์ (Joints) และจุดสัมผัสระหว่างเพลลา และ พื้นผิวระบราง (Wheel-rail contact) ดังภาพ 33 แสดงแบบจำลองยานพาหนะเพลลาเดี่ยว สองเพลลาหนึ่งคัน และ สองเพลลาสองคัน



ภาพ 33 แสดงแบบจำลองยานพาหนะแบบต่าง ๆ

และ สำหรับการสร้างแบบจำลองยานพาหนะนั้น ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แทนการสร้างแบบจำลองจริงภาคสนาม เนื่องจากการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีต้นทุนในการทดสอบต่ำกว่าแบบจำลองจริงภาคสนามมาก และ การสร้างแบบจำลองยานพาหนะ ทำให้ประหยัดค่าทดสอบภาคสนาม ค่าต้นแบบแบบจำลองจริง ค่าเสียเวลา ค่าแรงงาน และ เมื่อต้องการปรับเปลี่ยนรูปแบบจำลองสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และ ถูกต้องแม่นยำ โดยทำการกำหนดคุณสมบัติแบบจำลองที่สอดคล้องกับรูปแบบยานพาหนะที่ใช้จริง ดังภาพ 34



ภาพ 34 แสดงแบบจำลองยานพาหนะสองเพลานึ่งคัน ลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 4

จากภาพ 34 รูปแบบจำลองยานพาหนะประกอบด้วย ยานพาหนะหนึ่งคัน สองเพล

ลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 4 (4 Degree Of Freedom, 4DOF)

โดยกำหนดให้

ค่า M คือ มวลตัวรถไฟ

ค่า k_1 คือ ระบบกันสะเทือนตัวรถไฟ

ค่า c_1 คือ ระบบโช้คอัพตัวรถไฟ

ค่า m คือ มวลระบบเพล 2 เพล

และ ค่า k_2 คือ ระบบยึดหยุ่นของเพล

สำหรับวิธีการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะนั้น ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์

สมการการเคลื่อนที่ (Equations of motion) และ กำหนดพารามิเตอร์เกี่ยวเนื่อง ด้วย

โปรแกรม MATLAB (Matrix Laboratory) เพราะ เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการคำนวณ

ทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง มีความสะดวกในการทำงาน มีความเที่ยงตรง มีเสถียรภาพสูง และ

มีฟังก์ชันภายใน (Built-in) เพื่อแก้ปัญหาเชิงวิทยาศาสตร์ และ วิศวกรรม ยกตัวอย่าง สมการอนุพันธ์ (Partial differential equation) ขบวนการสัญญาณรบกวน (Signal processing) และ ระบบควบคุม (Control system) รวมทั้งโปรแกรม MATLAB มีประสิทธิภาพสูงในการนำเสนอ การประมวลผลเชิงรูปภาพ ทั้งในลักษณะ 2 มิติ และ 3 มิติ

จากการศึกษาการสั่นสะเทือนของพื้นผิว แสดงว่า โดยทั่วไปการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นตลอดเวลา เพียงแต่ การสั่นสะเทือนนั้นมนุษย์รู้สึกยอมรับได้ แต่สำหรับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบน โครงสร้างพื้นฐานนั้น บางกรณี ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มากเกินไปกว่าผู้ใช้นยานพาหนะ จะยอมรับได้ สังเกตได้จากการที่มี ผู้ใช้นยานพาหนะบางคนเกิดอาการอ่อนเพลีย วิงเวียนศีรษะ และ เจ็บป่วยร่างกายขณะใช้นยานพาหนะ ด้วยเหตุนี้ องค์การกำหนดมาตรฐานระหว่างประเทศ (International Organization for Standardization, ISO) ได้กำหนดมาตรฐาน ISO 2631 มาใช้ในการวัดค่าการสั่นสะเทือนต่อผู้ใช้นยานพาหนะ (Whole Body Vibration, WBV) ในรูปแบบค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square, RMS) ของค่าความเร่งห้องผู้โดยสารสะสม ในช่วงความถี่ 0.5 ถึง 80 Hz. ดังตาราง 2

ตาราง 2 แสดงค่าอัตราเร่งสูงสุดที่มีผลต่อความรู้สึกของผู้ใช้นยานพาหนะ
ตามมาตรฐาน ISO 2631

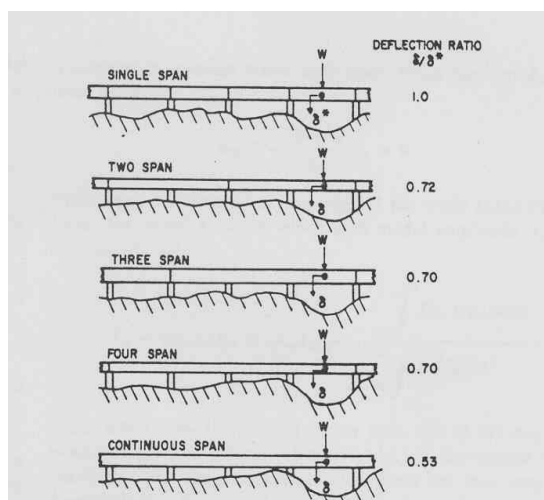
อัตราเร่งสูงสุด	ความรู้สึกของผู้ใช้นยานพาหนะ
< 0.032 g	สะดวกสบาย
0.032 g to 0.064 g	สะดวกสบายบ้าง เล็กน้อย
0.051 g to 0.102 g	เกือบจะไม่สะดวกสบาย
0.082 g to 0.160 g	ไม่สะดวกสบาย
0.127 g to 0.255 g	ไม่สะดวกสบาย มาก
> 0.200 g	ไม่สะดวกสบาย มากที่สุด

จากตาราง 2 ยกตัวอย่าง ค่าความเร่งของรถยนต์ทั่วไป 0.075 g แสดงว่า ความรู้สึกของผู้ใช้ยานพาหนะเกือบจะไม่สะดวกสบาย และ ค่าความเร่งของรถแท็กซี่ 0.039 g แสดงว่า ความรู้สึกของผู้ใช้ยานพาหนะสะดวกสบายบ้าง เล็กน้อย และ ค่าความเร่งของรถไถนา 0.172 g แสดงว่า ความรู้สึกของผู้ใช้ยานพาหนะไม่สะดวกสบายมาก จากนั้นทำการเปรียบเทียบยานพาหนะทั้ง 3 ประเภท แสดงว่า ค่าความเร่งของรถไถนา สูงสุด และ ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกไม่สะดวกสบายต่อผู้ใช้ยานพาหนะมากที่สุด ในขณะที่รถยนต์ทั่วไป และ รถแท็กซี่ มีค่าความเร่งห้องโดยสารอยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ใช้ยานพาหนะยอมรับได้

จากการศึกษาแบบจำลองยานพาหนะ นำไปใช้ในการคำนวณค่าผลตอบสนองต่อยานพาหนะ และ ต่อโครงสร้างพื้นฐาน ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะรถไฟความเร็ว บนโครงสร้างพื้นฐานสะพานช่วงเดียว ที่มีพื้นผิวระบอบวางไม่สม่ำเสมอ สำหรับผลตอบสนองต่อยานพาหนะนั้นพิจารณาในรูปของ ค่าความเร่งที่เกิดขึ้นในห้องผู้โดยสาร และ ใช้มาตรฐานค่า ISO 2631 ในการวัดค่าความรู้สึกของผู้ใช้ยานพาหนะ

แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน (Structure system)

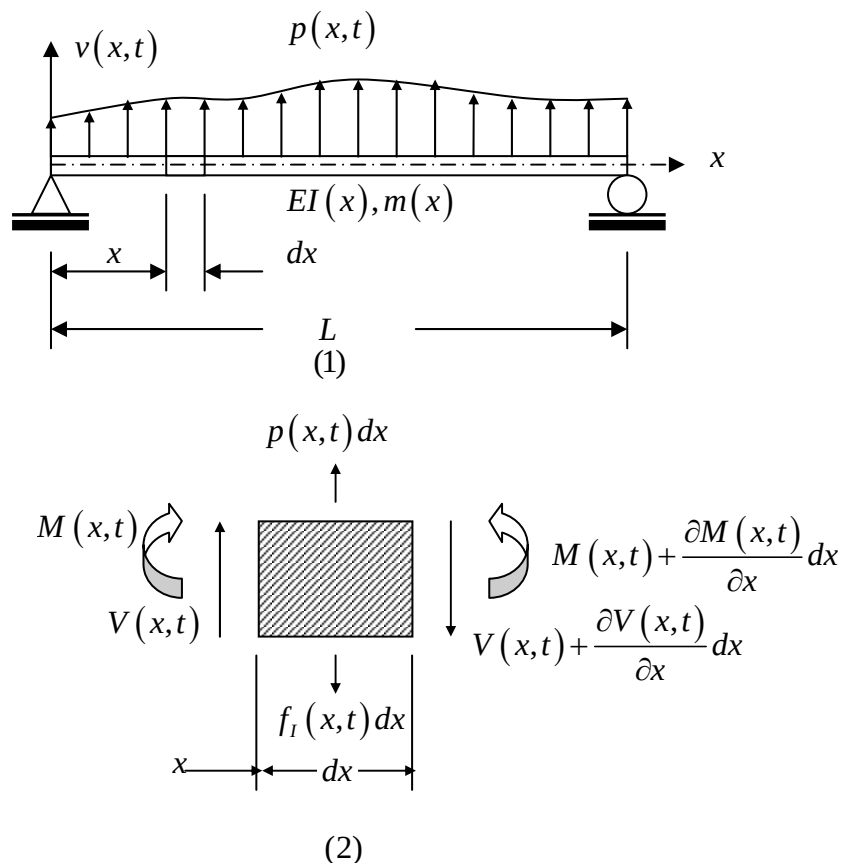
ประเภทของโครงสร้างพื้นฐานระบบราง แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ โครงสร้างพื้นฐานระบบรางที่วางบนพื้นดิน โดยในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ จะก่อให้เกิดแรงกระทำข้ามบนโครงสร้างระบบราง และ แรงกระทำจะกระจายลงสู่พื้นดินอย่างรวดเร็ว ตามระยะทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างพื้นฐานระบบรางที่วางบนพื้นดินทำให้เกิดความเสียหายจากการเสียรูปของโครงสร้างน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับประเภทโครงสร้างพื้นฐานที่อยู่เหนือพื้นดินแบบยกระดับ ในรูปแบบของสะพาน ที่มีทั้งแบบคานช่วงเดียว คานสองช่วง คานสามช่วง และ คานต่อเนื่อง ดังภาพ 35



ภาพ 35 แสดงค่าระยะโก่งตัวของโครงสร้างพื้นฐานยกกระดืบแบ่งตามช่วงความยาวคาน

การพิจารณาเลือกช่วงของคานนั้น ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมบริเวณที่ทำการก่อสร้าง และคุณสมบัติในการใช้รูปแบบโครงสร้างพื้นฐาน แต่เมื่อวิเคราะห์ถึง ค่าระยะโก่งตัวของโครงสร้างพื้นฐาน แสดงว่า ค่าระยะโก่งตัวของโครงสร้างพื้นฐาน ประเภทคานช่วงเดียว มีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ ค่าระยะโก่งตัวของโครงสร้างพื้นฐานคานสองช่วง สามช่วง และคานแบบต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความเร่งของโครงสร้างพื้นฐาน และ ค่าความเร่งของยานพาหนะสูง ทำให้ผู้ใช้ยานพาหนะอาจจะรู้สึกไม่สะดวกสบายจากการใช้ยานพาหนะในบริเวณดังกล่าว

ดังนั้นทำการคำนวณรูปแบบการสั่นสะเทือนของคาน แบบช่วงเดียว ดังภาพ 36 แสดงรูปแบบของคานช่วงเดียว ที่รับแรงกระทำแนวตั้งจาก $p(x,t)$ ในแต่ละตำแหน่ง และ ช่วงเวลา



ภาพ 36 แสดงผลของแรงกระทำเคลื่อนที่ต่อคาน รูป (1) แสดงส่วนประกอบ และตำแหน่งของคาน รูป (2) แสดงแรงกระทำต่อชิ้นส่วนคาน

จากภาพ 36 กำหนดคุณสมบัติของคาน ดังนี้

ค่า EI คือ สติฟเนสยืดหยุ่น

ค่า $m(x)$ คือ มวลต่อความยาว ของตำแหน่งที่ x ตลอดช่วงความยาว L

และ ค่า $v(x,t)$ คือ ค่าการเคลื่อนที่แนวดิ่ง

จากนั้นทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่ โดยอาศัยหลักการสมดุลภาพของแรง ที่แบ่งคานออกเป็น ส่วนย่อย เพื่อใช้ในการพิจารณา และ สร้างสมการ ระบบ Discrete-parameter system ของการเคลื่อนที่แนวดิ่ง ดังสมการ

$$v(x,t) + p(x,t)dx - \left[V(x,t) + \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} dx \right] - f_I(x,t)dx = 0 \quad (31)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $V(x,t)$ คือ แรงกระทำในแนวดิ่งของขนาดรูปตัด

และ ค่า $f_I(x,t)dx$ คือ แรงกระทำภายใน มีค่าเท่ากับ มวลคูณความเร่ง ดังสมการ

$$f_I(x,t)dx = m(x)dx \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} \quad (32)$$

แทนค่าสมการ 32 ด้วยสมการ 31 และ หาร dx ตลอดแนว

จะได้สมการค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน และ แรงกระทำแนวดิ่ง

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = p(x,t) - m(x) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} \quad (33)$$

และ เมื่อพิจารณา โมเมนต์ที่จุด A ดังสมการ 34

$$M(x,t) + V(x,t)dx - \left[M(x,t) + \frac{\partial M(x,t)}{\partial x} dx \right] = 0 \quad (34)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $\frac{\partial M(x,t)}{\partial x} = V(x,t)$ ทำการสร้างสมการอนุพันธ์

$$\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x} + m(x) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = p(x,t) \quad (35)$$

แทนค่า หลักการของโมเมนต์ $M = EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ ดังสมการ

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right] + m(x) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = p(x,t) \quad (36)$$

และ ทำการแก้ปัญหามสมการการเคลื่อนที่ (Partial Differential Equation) ของคานแบบยึดหยุน

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (37)$$

จัดรูปสมการ 37 ดังสมการ

$$v^{iv}(x,t) + \frac{\bar{m}}{EI} \ddot{v}(x,t) = 0 \quad (38)$$

และ จัดรูปสมการ 38 ดังสมการ

$$\phi^{iv}(x)Y(t) + \frac{\bar{m}}{EI} \phi(x)\ddot{Y}(t) = 0 \quad (39)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $\frac{\bar{m}}{EI}$ คือ ค่าคงที่

ค่า $v(x,t) = \phi(x)Y(t)$ คือ ค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

และ ค่า $\phi(x)$ คือ โหมดการสั่นสะเทือนอิสระภายใต้ช่วงเวลา $Y(t)$

จากนั้นทำการคูณ $\frac{1}{\phi(x)Y(t)}$ ตลอดสมการ 39 ดังสมการ

$$\frac{\phi^{iv}(x)}{\phi(x)} + \frac{\bar{m}}{EI} \frac{\ddot{Y}(t)}{Y(t)} = 0 \quad (40)$$

จัดรูปแบบสมการสัมพันธ์กับฟังก์ชัน x, t ดังสมการ

$$\frac{\phi^{iv}(x)}{\phi(x)} = -\frac{\bar{m}}{EI} \frac{\ddot{Y}(t)}{Y(t)} = a^4 \quad (41)$$

โดยกำหนดให้

ค่า a^4 คือ ค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์ ใช้ในการออกแบบสมการอนุพันธ์ลำดับที่ 2 ดังสมการ

$$\ddot{Y}(t) + \omega^2 Y(t) = 0 \quad (42)$$

โดยกำหนดให้

ค่าการเคลื่อนที่ $Y(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t$

และ ทำการสร้างสมการแปลงรูปออยเลอร์ของระบบตัวแปรอิสระตัวแปรเดียว

โดยไม่คิดค่าความหน่วง ดังสมการ

$$\phi^{iv}(x) - a^4 \phi(x) = 0 \quad (43)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } \omega^2 = \frac{a^4 EI}{\bar{m}}$$

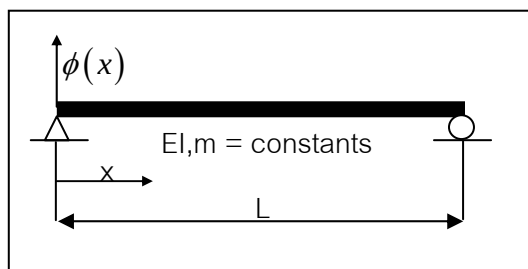
และ จัดรูปค่า $\phi(x)$ ดังสมการ

$$\phi(x) = A_1 \cos ax + A_2 \sin ax + A_3 \cosh ax + A_4 \sinh ax \quad (44)$$

โดยกำหนดให้

ค่า A_1, A_2, A_3, A_4 คือ ค่าคงที่ที่แท้จริง

จากนั้นทำการคำนวณค่าการสั่นสะเทือน พิจารณาที่จุดรองรับที่ขอบคานทั้งสองด้าน ดังภาพ 37 แสดงองค์ประกอบของคานช่วงเดียว



ภาพ 37 แสดงองค์ประกอบของคานช่วงเดียว

ที่ ระยะขอบ $x = 0$

$$\text{ค่า } \phi(0) = 0$$

$$\text{ค่า } M(0) = EI\phi''(0) = 0$$

แทนค่าในสมการ 44 และ คำนวณสมการอนุพันธ์ลำดับที่ 2

$$\phi(0) = A_1 \cos 0 + A_2 \sin 0 + A_3 \cosh 0 + A_4 \sinh 0 = 0$$

$$\phi''(0) = a^2 (-A_1 \cos 0 - A_2 \sin 0 + A_3 \cosh 0 + A_4 \sinh 0) = 0 \quad (45)$$

ที่ระยะขอบ $x = L$ จัดรูปสมการ

$$\phi(L) = A_2 \sin aL + A_4 \sinh aL = 0$$

$$\phi''(L) = a^2 (-A_2 \sin aL + A_4 \sinh aL) = 0 \quad (46)$$

รวมสมการ 45 และ 46 ของระยะขอบ $x = 0$ และ $x = L$ ดังสมการ

$$\phi(x) = A_2 \sin ax \quad (47)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $a = \frac{n\pi}{L}$ คือ ความถี่ของระบบ ; $n = 0, 1, 2, \dots$

แทนค่าในสมการ $\omega^2 = \frac{a^4 EI}{m}$ และ คูณรากที่สองทั้งสองข้างของสมการ
เพื่อคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ ดังสมการ

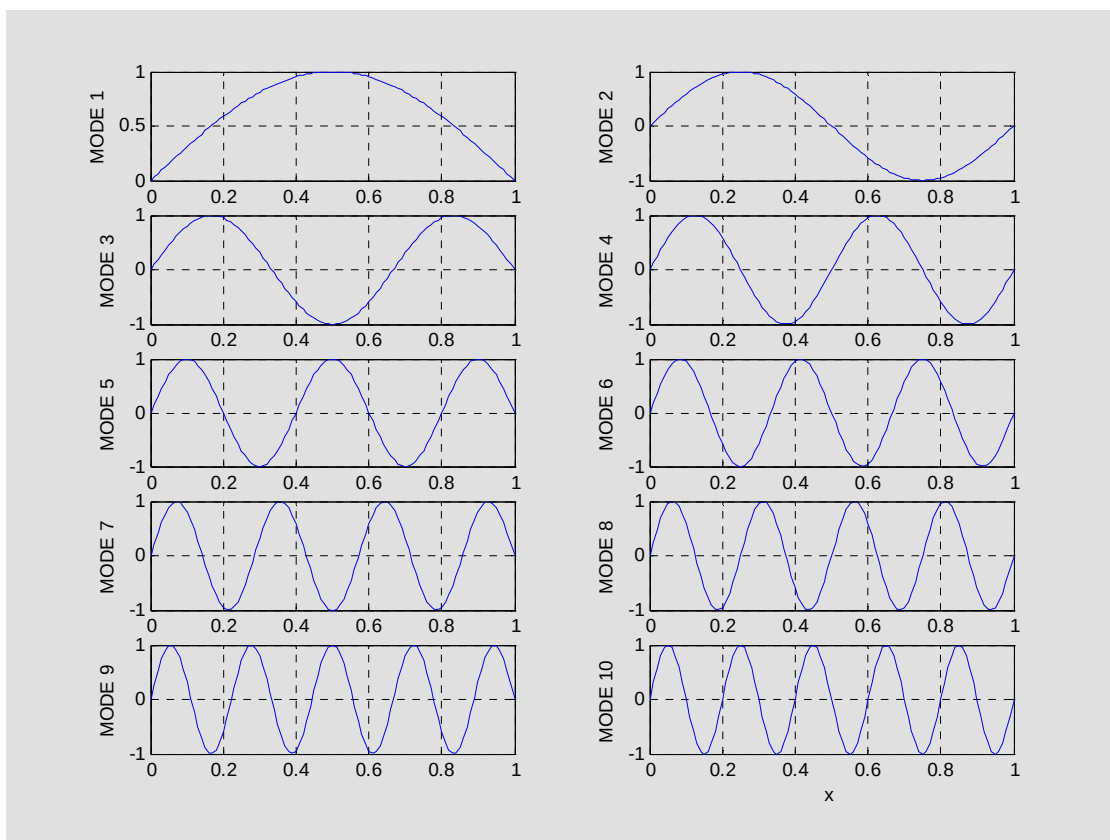
$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (48)$$

แทนค่ารูปแบบการสั่นสะเทือนแต่ละโหมดด้วยสมการค่าความถี่ของระบบ และ
ทำการจัดรูปสมการคลื่นสัญญาณไซน์ (sine) จะได้รูปแบบการสั่นสะเทือนของคานช่วงเดียว
ดังสมการ

$$\phi_n(x) = A_2 \sin \frac{n\pi}{L} x \quad n = 1, 2, \dots \quad (49)$$

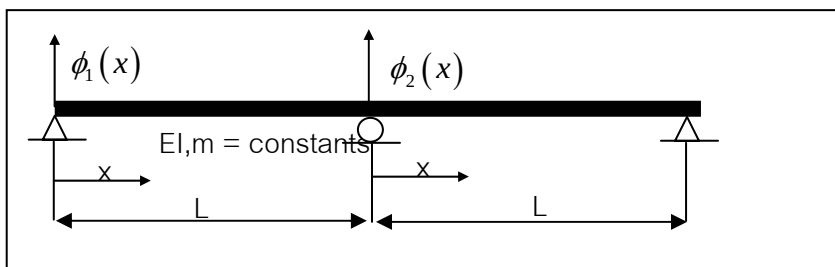
จากสมการ 48 และ 49 ค่า ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ

และ ค่า $\phi_n(x)$ คือ รูปแบบการสั่นสะเทือนของคานช่วงเดียว ดังภาพ 38



ภาพ 38 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนจำนวน 10 โหมดของคานช่วงเดียว

และ ทำการวิเคราะห์รูปแบบการสั่นสะเทือนของคานสองช่วง ดังภาพ 39 แสดงองค์ประกอบของคานสองช่วง



ภาพ 39 แสดงองค์ประกอบของคานสองช่วง

จากสมการ 43 แทนค่าใน สมการเอ็กโพเนนเชียล ในเทอมของตรีโกณมิติ (Trigonometric) และ ไฮเพอร์บอริก (hyperbolic) ดังสมการ

$$\begin{aligned}\phi(x) &= A_1 \sin ax + A_2 \cos ax + A_3 \sinh ax + A_4 \cosh ax \\ \phi_1(x) &= A_1 \sin ax + A_2 \cos ax + A_3 \sinh ax + A_4 \cosh ax \\ \phi_2(x) &= A'_1 \sin ax + A'_2 \cos ax + A'_3 \sinh ax + A'_4 \cosh ax\end{aligned}\quad (50)$$

จัดรูปสมการ เพื่อหาค่า A_1, A_2, A_3, A_4 และ A'_1, A'_2, A'_3, A'_4 ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} \sin aL & 0 & -1 \\ 0 & \sin aL & \cos aL \\ \cos aL - \sin aL \coth aL & -1 & -\coth aL \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A'_1 \\ A'_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (51)$$

และ

$$\sin aL (\cos aL - \sin aL \coth aL) = 0 \quad (52)$$

ค่ากำลังสองของ (aL) พิจารณาได้ 2 โหมด ดังนี้

กรณีโหมดสมมาตร $aL = n\pi$

และ กรณีโหมดไม่สมมาตร $aL = \left(n + \frac{1}{4}\right)\pi$

ดังนั้นค่าความถี่ธรรมชาติของคานาสองช่วง ดังสมการ

$$\omega_n = (aL_n)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (53)$$

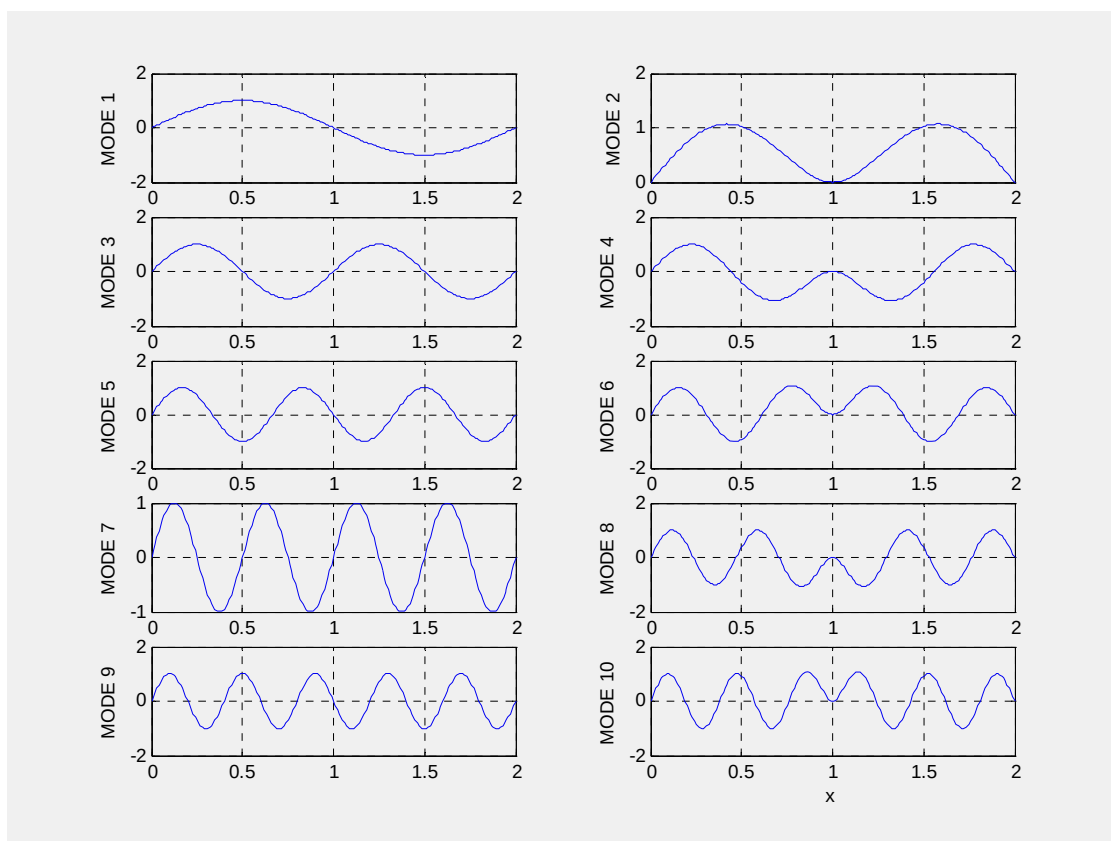
และ รูปแบบการสั่นสะเทือนของคานาสองช่วง ดังสมการ

$$\phi_1(x) = A_1 \sin ax + A_3 \sinh ax$$

$$\phi_1(x) = A_1 \left(\sin ax - \frac{\sin aL}{\sinh aL} \sinh ax \right) \quad (54)$$

$$\phi_2(x) = A'_1 \sin ax + A'_2 \cos ax + A'_3 \sinh ax + A'_4 \cosh ax$$

จากสมการ 53 และ 54 ค่า ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ และ ค่า $\phi_n(x)$ คือ รูปแบบการสั่นสะเทือนของคานาสองช่วง ดังภาพ 40



ภาพ 40 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนจำนวน 10 โหมดของคานาสองช่วง

รูปแบบการสั่นสะเทือนของคานช่วงเดียว คานสอง คานสามช่วง และ คานต่อเนื่อง สามารถนำไปใช้ในการคำนวณ ค่าทางสถิต และ ค่าทางพลวัต ของยานพาหนะบน โครงสร้างพื้นฐาน จากการศึกษาเกี่ยวกับค่าความขรุขระของพื้นผิว แบบจำลองยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน ทำการสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบ สมการการเคลื่อนที่ ที่จะอธิบาย ในหัวข้อถัดไป

ความสัมพันธ์พื้นผิวทาง ยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน (Interface Models)

แบบจำลองความสัมพันธ์ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน หรือเรียกว่า แบบจำลองสัมพันธ์ (Interface Models) สามารถพิจารณาได้ทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และ แบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) โดยทั่วไปแบบจำลองไม่เชิงเส้น ใช้วิธีการวิเคราะห์ แบบไร้จุดสัมผัส หรือ แบบสปริง ยืดหยุ่น การศึกษาแบบจำลองความสัมพันธ์ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน เน้นการสร้าง แบบจำลองสัมพันธ์เชิงเส้น โดยมีองค์ประกอบของจุดสัมผัสส่วนใหญ่ ที่มีทั้ง จุดสัมผัสแบบสปริง แบบสปริงต่อเนื่อง แบบระบบกันสะเทือน และ แบบมวลแข็งแกว่ง เชื่อมต่อกับสปริง หรือระบบกัน สะเทือน และ อาศัยหลักการคู่ควบกับแบบจำลองความขรุขระของพื้นผิว ในรูปแบบสมการ การเคลื่อนที่ ดังสมการ

$$v_d^t(x_d, t_d) = v_d(x_d, t_d) + h_d(x_d) \quad (55)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $v_d^t(x_d, t_d)$ คือ ค่าการเคลื่อนที่ที่จุดสัมผัส x_d โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลรวมของค่าการเคลื่อนที่ แนวตั้งของคาน $v_d(x_d, t_d)$ และ ค่าความไม่สม่ำเสมอของแนวทาง $h_d(x_d)$

เมื่อพิจารณาค่าการเคลื่อนที่แนวตั้งในเทอมของพิกัดโมดอล (Modal coordinates) และ รูปร่างโหมดการสั่นสะเทือน ดังสมการ

$$v_d(x_d, t_d) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x_d) y_i(t_d) \quad (56)$$

จากสมการ 55 จัดรูปสมการอนุพันธ์ลำดับที่ 1 และ 2 ของการเคลื่อนที่ของจุดสัมผัส ดังสมการ

$$\dot{v}_d^t(x_d, t_d) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x_d) \dot{y}_i(t_d) + \dot{x}_d \sum_{i=1}^n \phi_i'(x_d) y_i(t_d) + \dot{x}_d h_d'(x_d) \quad (57)$$

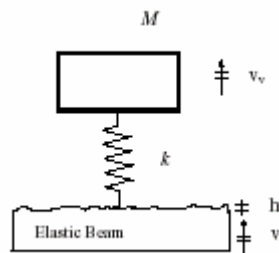
$$\begin{aligned} \ddot{v}_d^t(x_d, t_d) = & \sum_{i=1}^n \phi_i(x_d) \ddot{y}_i(t_d) + 2\dot{x}_d \sum_{i=1}^n \phi_i'(x_d) \dot{y}_i(t_d) + \dot{x}_d^2 \sum_{i=1}^n \phi_i''(x_d) y_i(t_d) \\ & + \ddot{x}_d \sum_{i=1}^n \phi_i'(x_d) y_i(t_d) + \dot{x}_d^2 h_d''(x_d) + \ddot{x}_d h_d'(x_d) \end{aligned} \quad (58)$$

โดยกำหนดให้ ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

ดังนั้น ค่า $\dot{x}_d = V$ และ $\ddot{x}_d = 0$

เมื่อได้รูปแบบของสมการการเคลื่อนที่ สามารถวิเคราะห์จุดสัมผัสของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ดังนี้

วิเคราะห์จุดสัมผัสยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) แบบสปริงเชิงเส้นบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น ดังภาพ 41



ภาพ 41 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) แบบสปริงเชิงเส้นบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น

โดยกำหนดให้

ค่า v_{dv} คือ ค่าการเคลื่อนที่แนวตั้งของยานพาหนะ

ทำการจัดรูปแบบสมการสมดุลของยานพาหนะ และ สมการโมดอลของคาน ดังสมการ

$$M\ddot{v}_{d_v}(t_d) + k(v_{d_v}(t_d) - v_{d_v}^t(x_d, t_d)) = 0 \quad (59)$$

$$\ddot{y}_i(t_d) + 2\xi\omega_i\dot{y}_i(t_d) + \omega_i^2 y_i(t_d) = P_1(x_d, t_d)\phi(Vt_d) \quad (60)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } P_1(x_d, t_d) = k(v_{d_v}(t_d) - v_{d_v}^t(x_d, t_d)) - Mg$$

จากสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนในรูปแบบเมตริกซ์ (Matrix) ได้ ดังสมการ

$$M\ddot{x}(t_d) + C\dot{x}(t_d) + K(t_d)x(t_d) = F(t_d) \quad (61)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } x(t_d) = [v_{d_v} \quad y_1 \quad \dots \quad y_n]^T$$

$$\text{ค่า } M = \begin{bmatrix} M & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & \ddots \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{ค่า } C = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & 2\xi\omega_1 & & & \\ & & 2\xi\omega_2 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 2\xi\omega_n \end{bmatrix}$$

$$\text{ค่า } K(t_d) = \begin{bmatrix} k & -k\phi_1(Vt_d) & -k\phi_2(Vt_d) & \dots & -k\phi_n(Vt_d) \\ -k\phi_1(Vt_d) & \omega_1^2 + k\phi_1^2(Vt_d) & k\phi_2(Vt_d)\phi_1(Vt_d) & \dots & k\phi_n(Vt_d)\phi_1(Vt_d) \\ -k\phi_2(Vt_d) & k\phi_1(Vt_d)\phi_2(Vt_d) & \omega_2^2 + k\phi_2^2(Vt_d) & \dots & k\phi_n(Vt_d)\phi_2(Vt_d) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k\phi_n(Vt_d) & k\phi_1(Vt_d)\phi_n(Vt_d) & k\phi_2(Vt_d)\phi_n(Vt_d) & \dots & \omega_n^2 + k\phi_n^2(Vt_d) \end{bmatrix}$$

$$\text{ค่า } F(t_d) = [F_1^1 \quad F_1 \quad F_2 \quad \dots \quad F_n]^T$$

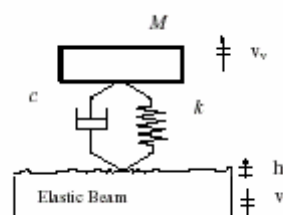
$$\text{และ ค่า } F_i = [-kh_d(Vt_d) - Mg]\phi_i(Vt_d)$$

จากองค์ประกอบของจุดสัมผัสยืดหยุ่นเชิงเส้น $K(t_d)$ ในรูปของฟังก์ชันเวลา

ผลของแรงกระทำอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $h_d(t_d)$

ดังนั้น ถ้าค่าพารามิเตอร์ k เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลต่อ ค่าผลตอบสนองของยานพาหนะ และ
ค่าผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน

สำหรับกรณีวิเคราะห์จุดสัมผัสยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) ที่มีทั้งระบบกันสะเทือน และ สปริงแบบต่อขนานบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น
ดังภาพ 42



ภาพ 42 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) ที่มีทั้งระบบกันสะเทือน และ สปริงแบบต่อขนานบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น

จัดรูปแบบสมการสมดุลของยานพาหนะ และ สมการโมดอลของคาน ดังสมการ

$$M\ddot{v}_{d_v}(t_d) + c(\dot{v}_{d_v}(t_d) - \dot{v}_d^t(x_d, t_d)) + k(v_{d_v}(t_d) - v_d^t(x_d, t_d)) = 0 \quad (62)$$

$$\ddot{y}_i(t_d) + 2\xi\omega_i\dot{y}_i(t_d) + \omega_i^2 y_i(t_d) = P_2(x_d, t_d)\phi(Vt_d) \quad (63)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } P_2(x_d, t_d) = c(\dot{v}_{d_v}(t_d) - \dot{v}_d^t(x_d, t_d)) + k(v_{d_v}(t_d) - v_d^t(x_d, t_d)) - Mg$$

จากสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนในรูปแบบเมตริกซ์ (Matrix) ได้ ดังสมการ

$$M\ddot{x}(t_d) + C(t_d)\dot{x}(t_d) + K(t_d)x(t_d) = F(t_d) \quad (64)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } M = \begin{bmatrix} M & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{ค่า } C(t_d) = \begin{bmatrix} c & -c\phi_1(Vt_d) & -c\phi_2(Vt_d) & \dots & -c\phi_n(Vt_d) \\ -c\phi_1(Vt_d) & 2\xi\omega_1 + c\phi_1^2(Vt_d) & c\phi_2(Vt_d)\phi_1(Vt_d) & \dots & c\phi_n(Vt_d)\phi_1(Vt_d) \\ -c\phi_2(Vt_d) & c\phi_1(Vt_d)\phi_2(Vt_d) & 2\xi\omega_2 + c\phi_2^2(Vt_d) & \dots & c\phi_n(Vt_d)\phi_2(Vt_d) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c\phi_n(Vt_d) & c\phi_1(Vt_d)\phi_n(Vt_d) & c\phi_2(Vt_d)\phi_n(Vt_d) & \dots & 2\xi\omega_n + c\phi_n^2(Vt_d) \end{bmatrix}$$

$$\text{ค่า } K(t_d) = \begin{bmatrix} k & -cV\phi_1' - k\phi_1 & -cV\phi_2' - k\phi_2 & \dots & -cV\phi_n' - k\phi_n \\ -k\phi_1 & \omega_1^2 + cV\phi_1'\phi_1 + k\phi_1^2 & cV\phi_2'\phi_1 + k\phi_2\phi_1 & \dots & cV\phi_n'\phi_1 + k\phi_n\phi_1 \\ -k\phi_2 & cV\phi_1'\phi_2 + k\phi_1\phi_2 & \omega_2^2 + cV\phi_2'\phi_2 + k\phi_2^2 & \dots & cV\phi_n'\phi_2 + k\phi_n\phi_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k\phi_n & cV\phi_1'\phi_n + k\phi_1\phi_n & cV\phi_2'\phi_n + k\phi_2\phi_n & \dots & \omega_n^2 + cV\phi_n'\phi_n + k\phi_n^2 \end{bmatrix}$$

$$F(t_d) = \begin{bmatrix} F_1^1 & F_1 & F_2 & \dots & F_n \end{bmatrix}^T$$

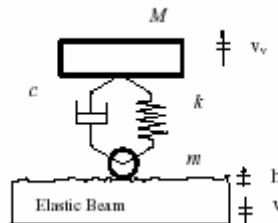
$$\text{และ ค่า } F_i = [-cVh'_d(Vt_d) - kh_d(Vt_d) - Mg] \phi_i(Vt_d)$$

จากการเพิ่มองค์ประกอบของจุดสัมผัสแบบยืดหยุ่น $K(t_d)$ และ แบบกันสะเทือน $C(t_d)$

ในรูปของฟังก์ชันเวลา

ดังนั้น ผลของแรงกระทำจะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $h_d(t_d)$ และ $h'_d(t_d)$ ของแบบจำลองความขรุขระพื้นผิว และ ค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้น จากการใช้สมการตัวกรองไวท์นอยซ์ ในรูปของอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง

สำหรับกรณีวิเคราะห์จุดสัมผัสยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) แบบสปริงเชิงเส้นบนพื้นผิวดานแบบยืดหยุ่น และ แบบที่มีทั้งระบบกันสะเทือน และ สปริงแบบต่อขนานบนพื้นผิวดานแบบยืดหยุ่น นั้น ถ้าทำการเพิ่มจุดสัมผัสแบบมวลแข็งเกร็ง และ ยังคงประกอบด้วยระบบกันสะเทือน และ สปริงแบบต่อขนานเชื่อมระหว่างมวลแข็งเกร็ง m และ มวล M ดังภาพ 43



ภาพ 43 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) ที่มีจุดสัมผัสเป็นมวลแข็งเกร็ง และ มีระบบกันสะเทือน และ สปริงต่อเชื่อมแบบขนานบนพื้นผิวดานแบบยืดหยุ่น

จัดรูปแบบสมการสมดุลของยานพาหนะ และ สมการโมดอลของคาน ดังสมการ

$$M\ddot{v}_{d_v}(t_d) + c(\dot{v}_{d_v}(t_d) - \dot{v}_d^t(x_d, t_d)) + k(v_{d_v}(t_d) - v_d^t(x_d, t_d)) = 0 \quad (65)$$

$$\ddot{y}_i(t_d) + 2\xi\omega_i\dot{y}_i(t_d) + \omega_i^2 y_i(t_d) = P_3(x_d, t_d)\phi(Vt_d) \quad (66)$$

โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} \text{ค่า } P_3(x_d, t_d) = & -m\ddot{v}_d^t(x_d, t_d) + c(\dot{v}_{d_v}(t_d) - \dot{v}_d^t(x_d, t_d)) \\ & + k(v_{d_v}(t_d) - v_{d_v}^t(x_d, t_d)) - (M + m)g \end{aligned}$$

จากสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนในรูปแบบเมตริกซ์ (Matrix) ได้ ดังสมการ

$$M\ddot{x}(t_d) + C(t_d)\dot{x}(t_d) + K(t_d)x(t_d) = F(t_d) \quad (67)$$

โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} \text{ค่า } M(t_d) = & \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m\phi_1^2(Vt_d) & m\phi_2(Vt_d)\phi_1(Vt_d) & \dots & m\phi_n(Vt_d)\phi_1(Vt_d) \\ 0 & m\phi_1(Vt_d)\phi_2(Vt_d) & m\phi_2^2(Vt_d) & \dots & m\phi_n(Vt_d)\phi_2(Vt_d) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & m\phi_1(Vt_d)\phi_n(Vt_d) & m\phi_2(Vt_d)\phi_n(Vt_d) & \dots & m\phi_n^2(Vt_d) \end{bmatrix} \\ \\ \text{ค่า } C(t_d) = & \begin{bmatrix} c & -c\phi_1 & -c\phi_2 & \dots & -c\phi_n \\ -c\phi_1 & 2\xi\omega_1 + 2mV\phi_1'\phi_1 + c\phi_1^2 & 2mV\phi_2'\phi_1 + c\phi_2\phi_1 & \dots & 2mV\phi_n'\phi_1 + c\phi_n\phi_1 \\ -c\phi_2 & 2mV\phi_1'\phi_2 + c\phi_1\phi_2 & 2\xi\omega_2 + 2mV\phi_2'\phi_2 + c\phi_2^2 & \dots & 2mV\phi_n'\phi_2 + c\phi_n\phi_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c\phi_n & 2mV\phi_1'\phi_n + c\phi_1\phi_n & 2mV\phi_2'\phi_n + c\phi_2\phi_n & \dots & 2\xi\omega_n + 2mV\phi_n'\phi_n + c\phi_n^2 \end{bmatrix} \\ \\ \text{ค่า } K(t_d) = & \begin{bmatrix} k & -cV\phi_1' - k\phi_1 & -cV\phi_2' - k\phi_2 & \dots & -cV\phi_n' - k\phi_n \\ -k\phi_1 & \alpha_1^2 + mV^2\phi_1''\phi_1 + cV\phi_1'\phi_1 + k\phi_1^2 & mV^2\phi_2''\phi_1 + cV\phi_2'\phi_1 + k\phi_2\phi_1 & \dots & mV^2\phi_n''\phi_1 + cV\phi_n'\phi_1 + k\phi_n\phi_1 \\ -k\phi_2 & mV^2\phi_1''\phi_2 + cV\phi_1'\phi_2 + k\phi_1\phi_2 & \alpha_2^2 + mV^2\phi_2''\phi_2 + cV\phi_2'\phi_2 + k\phi_2^2 & \dots & mV^2\phi_n''\phi_2 + cV\phi_n'\phi_2 + k\phi_n\phi_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k\phi_n & mV^2\phi_1''\phi_n + cV\phi_1'\phi_n + k\phi_1\phi_n & mV^2\phi_2''\phi_n + cV\phi_2'\phi_n + k\phi_2\phi_n & \dots & \alpha_n^2 + mV^2\phi_n''\phi_n + cV\phi_n'\phi_n + k\phi_n^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\text{ค่า } F(t_d) = [F_1^1 \quad F_1 \quad F_2 \quad \dots \quad F_n]^T$$

$$\text{และ ค่า } F_i = [-mV^2 h_d''(Vt_d) - cVh_d'(Vt_d) - kh_d(Vt_d) - (M + m)g] \phi_n(Vt_d)$$

จากการเพิ่มองค์ประกอบของจุดสัมผัสแบบยืดหยุ่น $K(t_d)$ แบบกันสะเทือน $C(t_d)$ และแบบมวลแข็งเกร็ง ในรูปของฟังก์ชันเวลา

ดังนั้น ผลของแรงกระทำอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $h_d(t_d)$ $h_d'(Vt_d)$ และ $h_d''(Vt_d)$ ของแบบจำลองความขรุขระพื้นผิว และ ค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้น จากการใช้สมการตัวกรองไวทน์อยซ์ ในรูปของสมการอนุพันธ์ลำดับที่ 2

จากการวิเคราะห์แบบจำลองยานพาหนะที่มีจุดสัมผัสเดียว อาจจะไม่เพียงพอเนื่องจากยานพาหนะที่ใช้ในปัจจุบันเป็นแบบจุดสัมผัสมากกว่าหนึ่งเพลลา ดังนั้นทำการศึกษาผลของระบบยานพาหนะหลายเพลลา ในรูปแบบของแบบจำลองช่วงห่าง (Modeling Lags)

ทำการพิจารณา ตัวแปรคู่สองตัวแปรของค่าความขรุขระพื้นผิว ดังนี้

ตัวแปรที่หนึ่ง คือ $h_d(Vt_d)$

และ ตัวแปรที่สอง คือ $h_d(Vt_d - l)$ หรือ $h_{d_2}(Vt_d)$

โดยตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบพารามิเตอร์ Δ_c และ ช่วงห่างของล้อ l

ทำการสร้างสมการอนุพันธ์ลำดับขั้นที่หนึ่ง ระหว่างค่าสหสัมพันธ์ร่วมของช่วงห่างสองตัวแปร ในรูปแบบของตัวกรองไวทน์อยซ์ ดังสมการ

$$\frac{\Delta_c}{V} \dot{h}_{d_1}(t_d) + h_{d_1}(t_d) = W_{d_1}(t_d) \quad (68)$$

$$\frac{\Delta_c}{V} \dot{h}_{d_2}(t_d) + h_{d_2}(t_d) = W_{d_2}(t_d) \quad (69)$$

และ ทำการจัดรูปสมการความแปรปรวนร่วมของตัวกรองไวทน์อยซ์ $W_{d_1}(t_d)$ และ $W_{d_2}(t_d)$ ดังสมการ

$$\sum_{w_{d_1} w_{d_2}} = Q \delta(\tau) \quad (70)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } Q = q_0 \begin{bmatrix} 1 & \rho_{w_{d_1} w_{d_2}} \\ \rho_{w_{d_1} w_{d_2}} & 1 \end{bmatrix}$$

ค่า q_0 คือ ค่าความเค้นของตัวกรองไวท์นอยซ์ $W_{d_1}(t_d)$ และ $W_{d_2}(t_d)$

และ ค่า $\rho_{w_{d_1} w_{d_2}}$ คือ ค่าสหสัมพันธ์ร่วมของช่วงห่างของตัวกรองไวท์นอยซ์

ทำการเขียนสมการแบบเมตริกซ์

$$\dot{h}_d(t_d) = A h_d(t_d) + B W_d(t_d) \quad (71)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } W_d(t_d) = [W_{d_1} \quad W_{d_2}]^T$$

$$\text{ค่า } A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\Delta_c/V} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\Delta_c/V} \end{bmatrix}$$

$$\text{และ ค่า } B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\Delta_c/V} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\Delta_c/V} \end{bmatrix}$$

ทำการแก้ปัญหสมการเพื่อหาค่าคาดหวังของ $h_d(t_d)$ ดังสมการ

$$E[h_d(t_d)] = \exp[At_d] E[h_d(0)] = \Phi(t_d) E[h_d(0)] \quad (72)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $\Phi(t_d)$ คือ ค่าเมตริกซ์ทรานซิชัน (Transition matrix)

$$\Phi(t_d) = \begin{bmatrix} \exp\left[-\frac{1}{\Delta_c/V}\right] & 0 \\ 0 & \exp\left[-\frac{1}{\Delta_c/V}\right] \end{bmatrix} \quad (73)$$

ทำการคำนวณค่าความแปรปรวนร่วมของช่วงห่าง h_d ดังสมการ

$$\sum_{h_d(t_d)h_d(t_d)} = \Phi(t_d) \sum_{h_d(0)h_d(0)} \Phi^T(t_d) + \int_0^t \Phi(t_d - u) B \left(\int_0^t Q \delta(u - v) B^T \Phi^T(t_d - v) dv \right) du \quad (74)$$

โดยกำหนดให้

ค่า u และ v คือ ค่าของช่วงเวลา 0 ถึง t ใดๆ

และ ค่า $\tau_d = u - v$

จากสมการ 73 ทำการอินทิเกรตคอนโวลูชัน (Double convolution integral) ดังสมการ

$$\sum_{h_d(t_d)h_d(t_d)} = \Phi(t_d) \sum_{h_d(0)h_d(0)} \Phi^T(t_d) + \int_0^t \Phi(t_d - u) B Q B^T \Phi^T(t_d - u) du \quad (75)$$

เมื่อผลตอบสนองเข้าสู่สแตชันนารี

ค่า $\Phi(t_d) \sum_{h_d(0)h_d(0)} \Phi^T(t_d)$ เท่ากับ 0 ดังนั้น

$$\sum_{h_d(t_d)h_d(t_d)} = \int_0^t \Phi(t_d - \tau_d) B Q B^T \Phi^T(t_d - \tau_d) d\tau_d \quad (76)$$

ทำการจัดสมการในรูปเมตริกซ์

$$\sum_{h_d(t_d)h_d(t_d)} = \frac{1}{4} \frac{\Delta_c}{V} q_0 \begin{bmatrix} 1 & \rho_{w_{d_1}w_{d_2}} \\ \rho_{w_{d_1}w_{d_2}} & 1 \end{bmatrix} \quad (77)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } \rho_{h_{d_1}h_{d_2}}(0) = \rho_{w_{d_1}w_{d_2}}$$

อธิบายได้ว่า ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง $h_{d_1}(t_d)$ กับ $h_{d_2}(t_d)$ เท่ากับ ค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง $w_{d_1}(t_d)$ กับ $w_{d_2}(t_d)$

จากการศึกษาแบบจำลองช่วงห่าง ในรูปแบบสมการตัวกรองไวทน์อยซ์ อนุพันธ์ลำดับชั้นที่หนึ่ง แสดงว่า ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ $\rho_{h_d(v_{t_d})h_d(v_{t_d-l})}$ ที่ช่วงห่างระยะ l ใดๆ จะเท่ากับ ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ $\rho_{w_{d_1}w_{d_2}}$

ดังนั้น ค่าความสัมพันธ์ของตัวกรองไวทน์อยซ์ สามารถนำไปวิเคราะห์จุดสัมผัสตั้งแต่สองจุดขึ้นไป และ ค่า $\rho_{h_{d_1}(v_{t_d})h_{d_2}(v_{t_d})} = \rho_{h_d(v_{t_d})h_d(v_{t_d-l})}$ จะทำให้ค่า $\rho_{w_{d_1}w_{d_2}} = \rho_{h_d(v_{t_d})h_d(v_{t_d-l})}$

เมื่อพิจารณายานพาหนะสองเพลลา ที่มีแบบจำลองดังภาพ 34 แสดงแบบจำลองยานพาหนะสองเพลลาหนึ่งคัน ลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 4 จัดรูปแบบสมการสมดุลของยานพาหนะ และ สมการโมดอลของคาน ดังสมการ

$$M\ddot{v}_{d_v}(t_d) + c(\dot{v}_{d_v}(t_d) - \dot{v}_d^t(x_d, t_d)) + k(v_{d_v}(t_d) - v_d^t(x_d, t_d)) = 0 \quad (78)$$

$$\ddot{y}_i(t_d) + 2\xi\omega_i\dot{y}_i(t_d) + \omega_i^2 y_i(t_d) = P_3(x_d, t_d)\phi(Vt_d) \quad (79)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } P_1(x_d, t_d) = k_2(v_{1d_v}(t_d) - v_{d_v}^t(x_d, t_d)) - \left(\frac{M}{2} + m\right)g$$

$$\text{และ ค่า } P_2(x_d, t_d) = k_2(v_{2d_v}(t_d) - v_{d_v}^t(x_d, t_d)) - \left(\frac{M}{2} + m\right)g$$

จากสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนในรูปแบบเมตริกซ์ (Matrix) ได้ ดังสมการ

$$M\ddot{x}(t_d) + C(t_d)\dot{x}(t_d) + K(t_d)x(t_d) = F(t_d) \quad (80)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } M(t_d) = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{ค่า } C(t_d) = \begin{bmatrix} 2c_v & 0 & -c_v & -c_v & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_v \frac{l^2}{2} & -c_v \frac{l}{2} & c_v \frac{l}{2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -c_v & -c_v \frac{l}{2} & c_v & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -c_v & c_v \frac{l}{2} & 0 & c_v & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\xi\omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\xi\omega_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 2\xi\omega_n \end{bmatrix}$$

$$K(t_d) = \begin{bmatrix} 2k_1 & 0 & -k_1 & -k_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_1 \frac{l^2}{2} & -k_1 \frac{l}{2} & k_1 \frac{l}{2} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -k_1 & -k_1 \frac{l}{2} & k_1 + k_2 & 0 & -k_2 \phi(x_1)(V_d) & -k_2 \phi(x_1)(V_d) & \cdots & -k_2 \phi(x_1)(V_d) \\ -k_1 & k_1 \frac{l}{2} & 0 & k_1 + k_2 & -k_2 \phi(x_2)(V_d) & -k_2 \phi(x_2)(V_d) & \cdots & -k_2 \phi(x_2)(V_d) \\ 0 & 0 & -k_2 \phi(x_1)(V_d) & -k_2 \phi(x_2)(V_d) & \alpha_1^2 + k_2 \phi^2(V_d) & k_2 \phi(V_d) \phi(V_d) & \cdots & k_2 \phi(V_d) \phi(V_d) \\ 0 & 0 & -k_2 \phi(x_1)(V_d) & -k_2 \phi(x_2)(V_d) & k_2 \phi(V_d) \phi(V_d) & \alpha_2^2 + k_2 \phi^2(V_d) & \cdots & k_2 \phi(V_d) \phi(V_d) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & -k_2 \phi(x_1)(V_d) & -k_2 \phi(x_2)(V_d) & k_2 \phi(V_d) \phi(V_d) & k_2 \phi(V_d) \phi(V_d) & \cdots & \alpha_n^2 + k_2 \phi^2(V_d) \end{bmatrix}$$

ค่าแรงกระทำ $F(t_d)$ ดังสมการ

$$F(t_d) = [0 \quad 0 \quad k_2 h_{d_1}(t_d) \quad k_2 h_{d_2}(t_d) \quad F_1 \quad \cdots \quad F_n]^T \quad (81)$$

$$\begin{aligned} F_i &= -k_2 [h_{d_1}(t_d) \phi_i(Vt_d) + h_{d_2}(t_d) \phi_i(Vt_d - l)] \\ \text{และ ค่า} \quad &+ [\phi_i(Vt_d) + \phi_i(Vt_d - l)] \left(\frac{M}{2} + m \right) g \end{aligned}$$

จากนั้นทำการจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ ของมวลตุ้รึงไฟ มุมองศาเอียง เพลาน้ำ เพลาลัง
โครงสร้างคานช่วงเดียว ตามลำดับดังนี้

สมการการเคลื่อนที่ของมวลตุ้รึงไฟ M ดังสมการ

$$M\ddot{v}_v + 2c_v \dot{v}_v - c_v \dot{v}_1 - c_v \dot{v}_2 + 2k_1 v_v - k_1 v_1 - k_1 v_2 = 0 \quad (82)$$

สมการการเคลื่อนที่ของมุมองศาเอียง θ ดังสมการ

$$I_m \ddot{\theta} + c_v \frac{l^2}{2} \dot{\theta} - c_v \frac{l}{2} \dot{v}_1 + c_v \frac{l}{2} \dot{v}_2 + k_1 \frac{l^2}{2} \theta - k_1 \frac{l}{2} v_1 + k_1 \frac{l}{2} v_2 = 0 \quad (83)$$

สมการการเคลื่อนที่ของเพลาหน้า m ดังสมการ

$$\begin{aligned} m\ddot{v}_1 - c_v\dot{v}_v + c_v\dot{v}_1 - c_v\dot{\theta}\frac{l}{2} - k_1v_v + k_1v_1 - k_1\theta\frac{l}{2} + k_2v_1 \\ - k_2h(x_1, t) - \sum_i^n k_2y_i(t)\phi_1(x_1) = 0 \end{aligned} \quad (84)$$

สมการการเคลื่อนที่ของเพลาหลัง m ดังสมการ

$$\begin{aligned} m\ddot{v}_2 - c_v\dot{v}_v + c_v\dot{v}_2 - c_v\dot{\theta}\frac{l}{2} - k_1v_v + k_1v_2 - k_1\theta\frac{l}{2} + k_2v_2 \\ - k_2h(x_2, t) - \sum_i^n k_2y_i(t)\phi_1(x_2) = 0 \end{aligned} \quad (85)$$

และ จากสมการการเคลื่อนที่ของคาน ดังสมการ

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = P_1(x, t)\delta(x - x_1) + P_2(x, t)\delta(x - x_2) \quad (86)$$

โดยกำหนดให้

$$\text{ค่า } P_1(x_1, t) = k_2(v_1 - h(x, t) - v(x, t)) - \left(\frac{M}{2} + m\right)g$$

$$\text{ค่า } P_2(x, t) = k_2(v_2 - h(x, t) - v(x, t)) - \left(\frac{M}{2} + m\right)g$$

$$\text{และ ค่า } v(x, t) = \sum Y_n(t)\phi_n(x)$$

ทำการจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ของคานช่วงเดียว ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 \ddot{Y}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{Y}_n + \omega_n^2 Y_n = & \frac{k_2 v_1 \phi_n(x_1)}{\bar{m} \int_D \phi_n^2(x) dx} - \frac{k_2 h(x, t) \phi_n(x_1)}{\bar{m} \int_D \phi_n^2(x) dx} - \sum_i \frac{k_2 \phi_i(x_1) \phi_n(x_1) Y_i(t)}{\bar{m} \int_D \phi_n^2(x) dx} \\
 & - \frac{\left(\frac{M}{2} + m\right) g \phi_n(x_1)}{\bar{m} \int_D \phi_n^2(x) dx} + \frac{k_2 v_2 \phi_n(x_2)}{\bar{m} \int_D \phi_n^2(x) dx} - \frac{k_2 h(x, t) \phi_n(x_2)}{\bar{m} \int_D \phi_n^2(x) dx} - \sum_i \frac{k_2 \phi_i(x_2) \phi_n(x_2) Y_i(t)}{\bar{m} \int_D \phi_n^2(x) dx} \\
 & - \frac{\left(\frac{M}{2} + m\right) g \phi_n(x_2)}{\bar{m} \int_D \phi_n^2(x) dx}
 \end{aligned} \quad (87)$$

และ จากนั้นทำการแปลงรูปตัวแปร ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย

โดยกำหนดให้

ค่า x/L คือ ตัวแปรไร้หน่วยตำแหน่งของช่วงคานที่ศึกษา

ค่า Vt/L คือ ตัวแปรไร้หน่วยช่วงของเวลา

ค่า W/L , h/L คือ ตัวแปรไร้หน่วยความขรุขระของพื้นผิว

ค่า q_0/L^3 คือ ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวทน์อยซ์

ค่า Δ_c/L คือ ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์

ค่า ℓ/L คือ ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา

ค่า $\mu = M/\bar{m}L$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยมวลตู้รถไฟ

ค่า $\eta = m/\bar{m}L$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยมวลเพลลา

ค่า $f_{k_1} = \sqrt{\frac{k_1/\bar{m}L}{\omega_1^2}}$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตู้รถไฟ

ค่า $f_{k_2} = \sqrt{\frac{k_2/\bar{m}L}{\omega_1^2}}$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหยุ่นของเพลลา

ค่า $f_c = \frac{c/\bar{m}L}{\omega_1}$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยระบบโช้คอัพรถไฟ

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

ค่า $f_v = \frac{V/L}{\omega_1}$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ

และ ค่า $f_i = \omega_i / \omega_1$ คือ ตัวแปรไร้หน่วยความถี่พื้นฐานของคานช่วงเดียว

โดยแบ่งออกเป็น 10 โหมด ดังตาราง 3

ตาราง 3 แสดงค่าตัวแปรไร้หน่วยความถี่พื้นฐานของคานช่วงเดียว จำนวน 10 โหมด

โหมดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_i	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100

และ จากสมการ 27 และ 79 – 85 จัดรูปสมการการเคลื่อนที่แบบตัวแปรไร้หน่วย

ดังสมการ 88 - 93

สมการแสดงสเตพอร์ม ของตัวกรองไวทน์นอยซ์

$$\begin{aligned} \frac{h_1'(t')}{L} &= -\left(\frac{L}{\Delta_c}\right) \frac{h_1(t')}{L} (hs) + \left(\frac{L}{\Delta_c}\right) w_1(t') (hs) \\ \frac{h_2'(t')}{L} &= -\left(\frac{L}{\Delta_c}\right) \frac{h_2(t')}{L} (hs) + \left(\frac{L}{\Delta_c}\right) w_2(t') (hs) \end{aligned} \quad (88)$$

สมการแสดงสเตพอร์ม ของตู้รถไฟ

$$\left(\frac{V_v''}{L}\right) = \frac{1}{\mu_1 f_v^2} \begin{bmatrix} -2f_{k_1}^2 \left(\frac{V_v}{L}\right) - 2f_c f_v \left(\frac{V_v'}{L}\right) + f_{k_1}^2 \left(\frac{V_1}{L}\right) + f_c f_v \left(\frac{V_1'}{L}\right) \\ + f_{k_2}^2 \left(\frac{V_2}{L}\right) + f_c f_v \left(\frac{V_2'}{L}\right) \end{bmatrix} \quad (89)$$

สมการแสดงสเตทฟอร์ม ของมุมมองเสาเข็ม

$$\theta'' = \frac{12}{\mu_1} \left(\frac{1}{l/L} \right) \left(\frac{1}{f_v^2} \right) \left[\begin{array}{l} -\frac{f_{k_1}^2}{2} \left(\frac{l}{L} \right) \theta - \frac{f_c}{2} f_v \left(\frac{l}{L} \right) \theta' + \frac{f_{k_1}^2}{2} \left(\frac{V_1}{L} \right) + \frac{f_c}{2} f_v \left(\frac{V_1'}{L} \right) \\ -\frac{f_{k_1}^2}{2} \left(\frac{V_2}{L} \right) - \frac{f_c}{2} f_v \left(\frac{V_2'}{L} \right) \end{array} \right] \quad (90)$$

สมการแสดงสเตทฟอร์ม ของระบบเพลาหน้า

$$\left(\frac{V_1''}{L} \right) = \frac{1}{\mu_2 f_v^2} \left[\begin{array}{l} f_{k_1}^2 \left(\frac{V_v}{L} \right) + f_c f_v \left(\frac{V_v'}{L} \right) + \frac{f_{k_1}^2}{2} (l/L) \theta + \frac{f_c}{2} f_v (l/L) \theta' \\ - \left(f_{k_1}^2 + f_{k_2}^2 \right) \left(\frac{V_1}{L} \right) - f_c f_v \left(\frac{V_1'}{L} \right) + f_{k_2}^2 \left(\frac{h_1}{L} \right) \\ + f_{k_2}^2 \sum_i \tilde{\phi}_i(x'_1) (d_i(t)) \end{array} \right] \quad (91)$$

สมการแสดงสเตทฟอร์ม ของระบบเพลาหลัง

$$\left(\frac{V_2''}{L} \right) = \frac{1}{\mu_2 f_v^2} \left[\begin{array}{l} f_{k_1}^2 \left(\frac{V_v}{L} \right) + f_c f_v \left(\frac{V_v'}{L} \right) - \frac{f_{k_1}^2}{2} (l/L) \theta - \frac{f_c}{2} f_v (l/L) \theta' \\ - \left(f_{k_1}^2 + f_{k_2}^2 \right) \left(\frac{V_2}{L} \right) - f_c f_v \left(\frac{V_2'}{L} \right) + f_{k_2}^2 \left(\frac{h_2}{L} \right) \\ + f_{k_2}^2 \sum_i \tilde{\phi}_i(x'_2) (d_i(t)) \end{array} \right] \quad (92)$$

สมการแสดงสเตทฟอร์ม ของโครงสร้างพื้นฐาน

$$d_n'' = \frac{1}{c_n f_v^2} \left[\begin{aligned} & f_{k_2}^2 \tilde{\phi}_n(x'_1) \frac{V_1}{L} + f_{k_2}^2 \tilde{\phi}_n(x'_2) \frac{V_2}{L} - f_{k_2}^2 \tilde{\phi}_n(x'_1) \frac{h_1}{L} - f_{k_2}^2 \tilde{\phi}_n(x'_2) \frac{h_2}{L} \\ & - \sum_{i=1}^N f_{k_2}^2 \tilde{\phi}_n(x'_1) \tilde{\phi}_i(x'_1) d_i - \sum_{i=1}^N f_{k_2}^2 \tilde{\phi}_n(x'_2) \tilde{\phi}_i(x'_2) d_i \\ & - \left(\frac{\mu_1}{2} + \mu_2 \right) f_g^2 \tilde{\phi}_n(x'_1) - \left(\frac{\mu_1}{2} + \mu_2 \right) f_g^2 \tilde{\phi}_n(x'_2) \\ & - f_n^2 c_n d_n - 2\xi_n f_v f_n c_n d_n' \end{aligned} \right] \quad (93)$$

เนื่องจากการแก้ปัญหสมการการเคลื่อนที่ อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) คือ สมการประกอบไปด้วยอนุพันธ์ของตัวแปรตามเทียบกับตัวแปรอิสระ เพียงหนึ่งตัวแปร หรือ มากกว่าหนึ่งตัวแปร

สำหรับวิธีการหาคำตอบเชิงอนุพันธ์นั้น มีหลายวิธี ได้แก่ วิธีออยเลอร์ (Euler method) วิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace transform method) และ วิธีการรุงเงคุดตา (Runge-Kutta method) เป็นต้น งานวิจัยศึกษาวิธีการรุงเงคุดตา เนื่องจากให้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง

ในกรณีที่ต้องการหาค่า $y(c)$

โดยกำหนดให้ $y' = f(x, y)$, $y(x_0) = y_0$ และ $n = \frac{(c - x_0)}{h}$ จัดรูปสมการ

$$y_{i+1} = y_i + \phi(x_i, y_i, h)h \quad (94)$$

โดยกำหนดให้

$$\phi(x_i, y_i, h) = a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots + a_n k_n$$

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f(x_i + p_1 h, y_i + q_{11} k_1 h)$$

$$\text{ค่า } k_3 = f(x_i + p_2 h, y_i + q_{21} k_1 h + q_{22} k_2 h)$$

$\vdots$

$$k_n = f(x_i + p_{n-1} h, y_i + q_{n-1,1} k_1 h + \dots + q_{n-1,n-1} k_{n-1} h)$$

และ คำนวณค่า p และ q โดยใช้วิธีการกระจายสูตร y_{i+1} ในพจน์ของอนุกรมเทเลอร์ แล้วทำการเปรียบเทียบหาค่า p และ q ที่ต้องการ

การพิจารณาค่า k_n คำนึงถึงอันดับของวิธีการรุงเงคูตา ยกตัวอย่าง ถ้าใช้ค่า $n=1$ จะเรียกว่า วิธีการรุงเงคูตา อันดับที่ 1 สำหรับการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ใช้ค่า $n=4,5$ คือ วิธีการรุงเงคูตา อันดับที่ 4 และ 5 โดยใช้ฟังก์ชัน *ODE45* ในโปรแกรม MATLAB

จากการแก้สมการการเคลื่อนที่ ด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถคำนวณค่าระยะโค้งในแนวตั้ง ของคาน ดังสมการ

$$V(x,t) = \sum_{i=1}^n Y_i(t) \phi_i(x) \quad (95)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $\phi_i(x)$ คือ โหมดการสั่นสะเทือนอิสระภายใต้ช่วงเวลาพิกัดโมดอล $Y_i(t)$

จากสมการ 95 คำนวณค่าความเร่งของคาน โดยการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสองของช่วงเวลา พิกัดโมดอล $Y_i(t)$ ดังสมการ

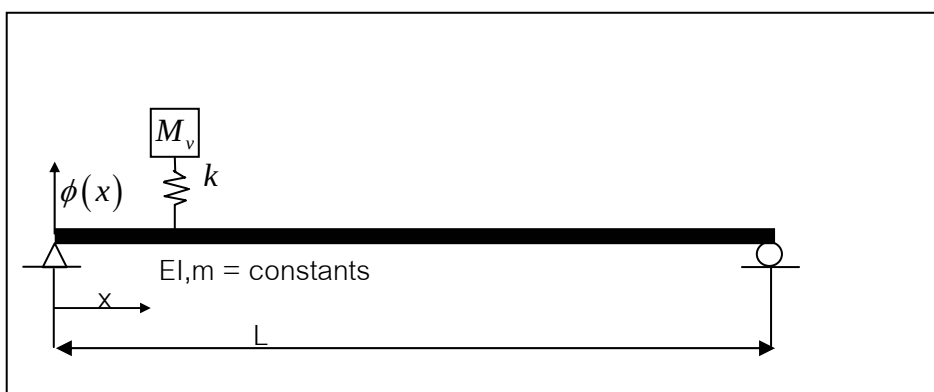
$$\ddot{V}(x,t) = \sum_{i=1}^n \ddot{Y}_i(t) \phi_i(x) \quad (96)$$

คำนวณค่าโมเมนต์ $M(x,t)$ และ ค่าแรงเฉือน $S(x,t)$ ของคาน ดังสมการ

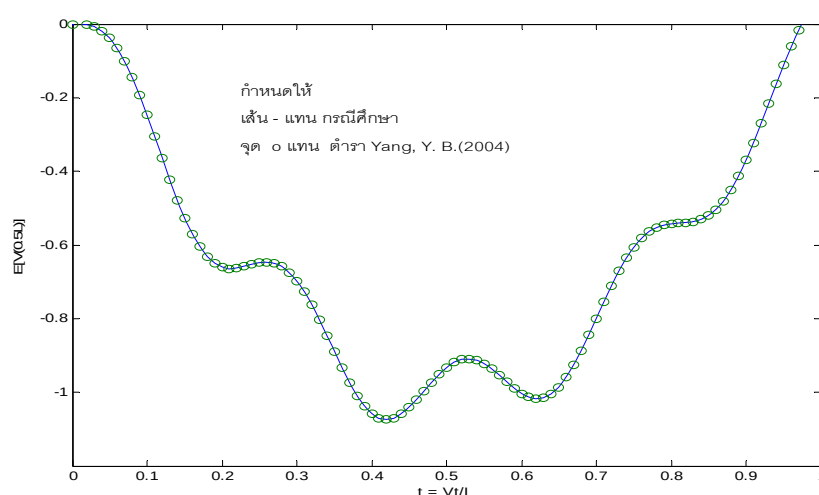
$$M(x,t) = EI \sum_{i=1}^n Y_i(t) \phi_i''(x) \quad (97)$$

$$S(x,t) = EI \sum_{i=1}^n Y_i(t) \phi_i'''(x) \quad (98)$$

ผลตอบสนองที่ได้จากการแก้ปัญหามสมการการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม MATLAB ทำการเปรียบเทียบกับตำราวิชาการเรื่อง Introduction to Structural Dynamic (Biggs, J. M., 1964) และ ตำราวิชาการเรื่อง Vehicle-Bridge Interaction Dynamics (Yang, Y. B., Yau, J. D., & Wu, Y. S., 2004) ในรูปแบบสมการการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่งแบบสปริงเชิงเส้นบนพื้นผิวคานช่วงเดียว ดังภาพ 44



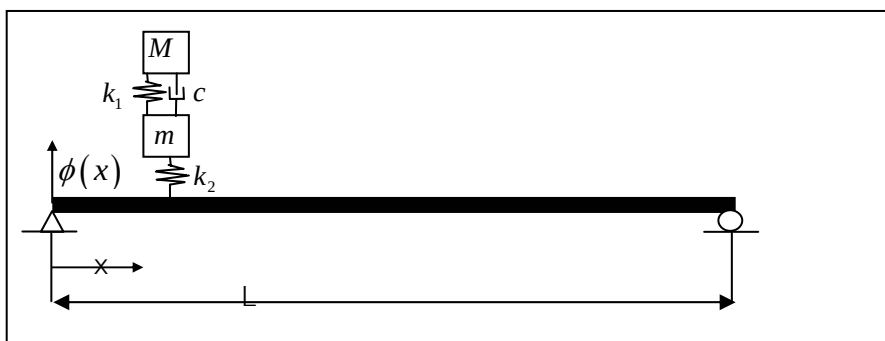
ภาพ 44 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระหนึ่ง แบบสปริงเชิงเส้นบนพื้นผิวคานช่วงเดียว



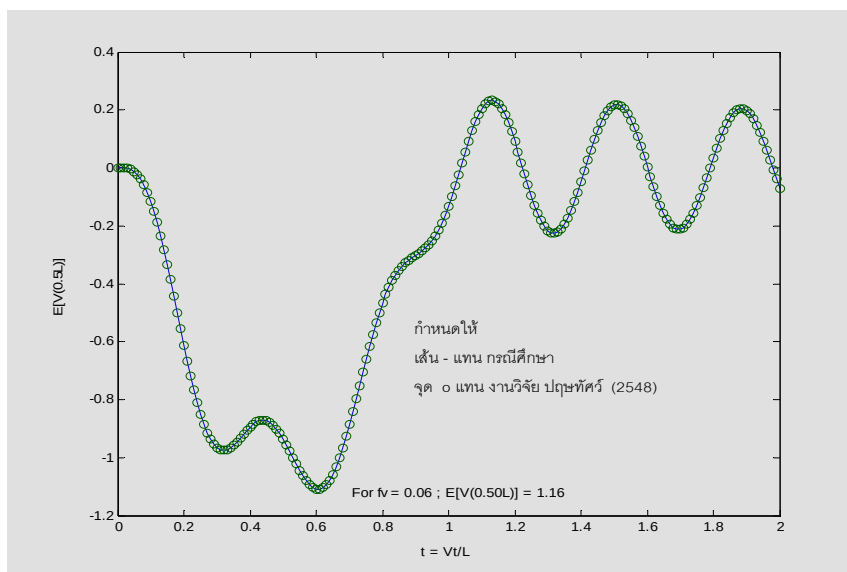
ภาพ 45 แสดงค่าเฉลี่ยของระยะโก่งกึ่งกลางคาน

ผลการคำนวณ ดังภาพ 45 แสดงว่า ค่าระยะโก่งกึ่งกลางคานใกล้เคียงกับตำราของ Biggs, J. M. และ Yang, Y. B., Yau, J. D., & Wu, Y. S. เพียงแต่มีความแตกต่างตรงที่รูปแบบของงานวิจัย จัดลำดับตัวแปรเป็นแบบไร้หน่วย

ดังนั้นทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ปฤษฎาศ ศีตะบันย์ เอกสิทธิ์ ไหมวัฒนา และ สมชาย ชูชีพสกุล เรื่อง ความสำคัญของความขรุขระพื้นผิวต่อยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน (พ.ศ. 2548) ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย ของสมการการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ลำดับชั้น ความเป็นอิสระสอง ดังภาพ 46



ภาพ 46 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับชั้นความเป็นอิสระสอง



ภาพ 47 แสดงค่าเฉลี่ยของระยะโก่งกึ่งกลางคาน เมื่อ $f_v = 0.06$

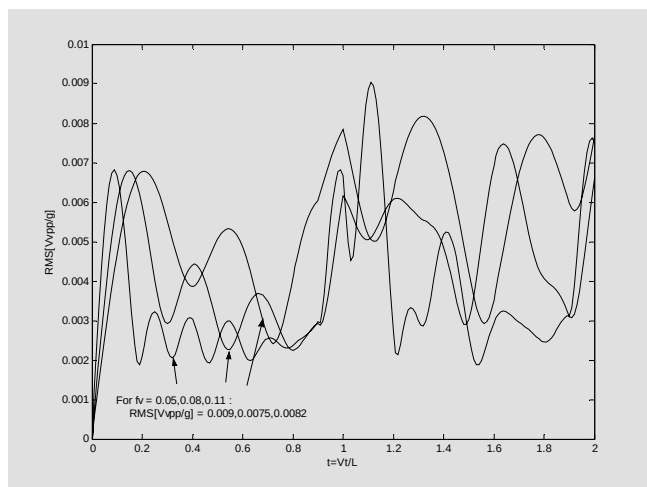
ผลการคำนวณ ดังภาพ 47 แสดงว่า ค่าระยะโก่งกึ่งกลางคานในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วยตรงกับงานวิจัยของ ปฤษทัศว์ และ คณะ (2548) ดังนั้น วิธีการหาสมการการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ด้วยโปรแกรม MATLAB ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย สามารถนำมาใช้ในการศึกษา เพื่อหาความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องของตัวแปร ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองที่จะอธิบายในหัวข้อถัดไป

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

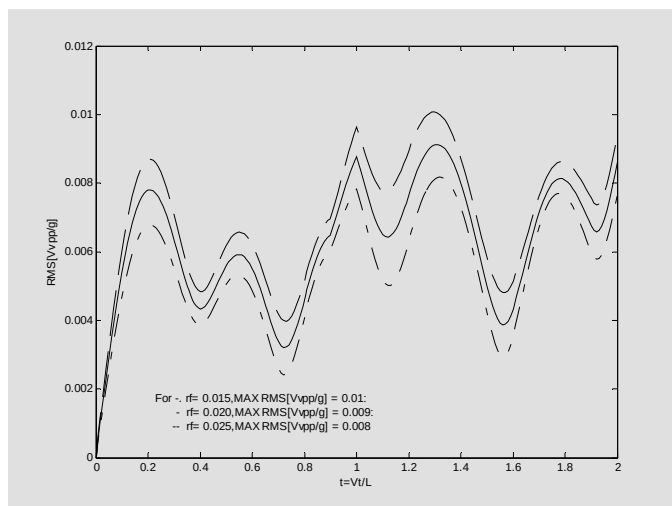
จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน แสดงว่า ค่าผลตอบสนองอยู่ในรูปของตัวแปรอิสระ (Independent variable) ที่มีความสัมพันธ์กัน ได้แก่ ตัวแปรความยาวคาน ความเร็วยานพาหนะ ความขรุขระของพื้นผิว ความเค้นของขบวนการไวก์นอยซ์ ระบบกันสะเทือนระบบใช้คัพ และ ระบบยืดหยุ่น เป็นต้น และ ส่งผลต่อตัวแปรตาม (Dependent variable) ได้แก่ ผลตอบสนองต่อค่าระยะโก่งของโครงสร้างพื้นฐาน ผลตอบสนองต่อค่าความเร่งของยานพาหนะ เป็นต้น ยกตัวอย่าง กรณีที่ค่าความขรุขระของพื้นผิว คงที่ และ ค่าความเร็วของยานพาหนะเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า RMS ระยะโก่งกึ่งกลางคาน ดังภาพ 48(1) และ ถ้ากรณีค่าความเร็วของยานพาหนะคงที่ และ ค่าความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า RMS ระยะโก่งกึ่งกลางคาน ดังภาพ 48(2)

จากการศึกษาผลตอบสนองต่อระยะโก่งกึ่งกลางของโครงสร้างพื้นฐาน กรณีค่าความขรุขระพื้นผิว และ ค่าความเร็วเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่า ค่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปร มีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรตาม

ดังนั้น การศึกษาความสัมพันธ์กันโดยเก็บรวบรวมข้อมูลทางสถิติ เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์เกี่ยวเนื่องด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)



(1)



(2)

ภาพ 48 แสดงผลตอบสนองต่อค่าระยะโค้งกึ่งกลางของโครงสร้างพื้นฐาน (1) กรณีค่าความ
ขรุขระพื้นผิวคงที่ และ ความเร็วเปลี่ยนแปลง (2) กรณีค่าความเร็วคงที่
และ ค่าความขรุขระพื้นผิวเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) หรือ วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัวหนึ่ง เรียกว่า ตัวแปรตาม หรือตัวแปรตอบสนอง (Dependent variable or response variable) เขียนแทนด้วย Y และ ตัวแปรอื่นหนึ่งตัวแปร หรือมากกว่าหนึ่งตัวแปร (Independent variable or predictor variable) เรียกว่า ตัวแปรอิสระ หรือ ตัวแปรต้น เพื่อที่จะพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม ที่เป็นค่าตัวแปรสุ่ม จากการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรอิสระ ที่เป็นค่าคงที่ที่กำหนด (Known or fixed values) โดยในกรณีที่ตัวแปรอิสระหนึ่งตัวแปร มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามหนึ่งตัวแปร แบบเชิงเส้น เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Models) ดังสมการ

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (99)$$

โดยกำหนดให้

ค่า Y_i คือ ตัวแปรตาม

ค่า X_i คือ ตัวแปรอิสระ

ค่า β_0, β_1 คือ พารามิเตอร์ของตัวแบบ

และ ค่า ε_i คือ ความคลาดเคลื่อน (Error term) ของค่าสังเกตที่ i ซึ่งเป็น ค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงที่ Y และ ค่า Y บนเส้นถดถอย

เมื่อพิจารณาค่า β_1 เป็นค่าความชันของเส้นถดถอย ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ ตัวแปรตาม Y เมื่อตัวแปรอิสระ X เปลี่ยนไป 1 หน่วย และ ค่า β_0 คือ ค่าที่แสดงระยะตัดแกน Y (Y -intercept) เมื่อ $X = 0$ โดยเก็บรวบรวมค่าจากการสังเกต หรือทดลอง ซึ่งการเก็บรวบรวม จะเก็บแบบตัวแปรคู่ (Bivariate) แล้วทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยกำหนดให้ b_0 และ b_1 คือ ตัวประมาณของ β_0 และ β_1 ตามลำดับ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square method) และ ทฤษฎีของเกาส์-มาร์คอฟ (Gauss-Markov theorem) กล่าวคือ ตัวประมาณ b_0 และ b_1 ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเป็นตัวประมาณที่ไม่เอนเอียง และ มีความแปรปรวนต่ำที่สุด และ เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของค่าสังเกต Y_i ทำให้ตัวประมาณมีคุณสมบัติเป็น BLUE (Best Linear Unbiased Estimators) จากนั้นทำการสร้างช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % และ ทดสอบสมมติฐาน เพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระ X

มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y หรือไม่

ทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

โดยใช้สถิติทดสอบ $t = \frac{b_1 - \beta_1}{\left(\frac{MSE}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \right)}$

และ ค่า MSE คือ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง

จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ $t > t_{1-\frac{\alpha}{2}(n-2)}$ หรือ $t < t_{\frac{\alpha}{2}(n-2)}$

และ ยอมรับ H_0 เมื่อตัวแปรอิสระ X ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกันกับตัวแปรตาม Y
 ในลักษณะเชิงเส้น สำหรับการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ β_1 นั้นจะใช้ วิธีการสร้างตาราง
 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ดังตาราง 4

ตาราง 4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

Source Of Variation (S.O.V.)	df	SS	MS	F-ratio
Regression	1	SSR	MSR=SSR/1	$\frac{MSR}{MSE}$
Error	n-2	SSE	MSE=SSE/n-2	
Total	n-1	SST		

โดยกำหนดให้

ค่า df คือ ลำดับขั้นความเป็นอิสระ (Degree of freedom)

ค่า SSR คือ ค่าความผันแปรในตัวแปร Y อันเนื่องมาจากเส้นถดถอย (Sum of squares for regression)

ค่า SSE คือ ค่าความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ X (Sum of squares for error)

ค่า SST คือ ผลรวมของความผันแปรทั้งหมด (Total sum of squares)

ค่า MSR คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของ SSR หาด้วยลำดับชั้นความเป็นอิสระที่ หนึ่ง

ค่า MSE คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของ SSE หาด้วยลำดับชั้นความเป็นอิสระที่ $n-1$

และ ค่า F-ratio คือ สถิติทดสอบเอฟ เป็นอัตราส่วนของค่า MSR ต่อค่า MSE โดยมีค่าเข้าสู่การแจกแจงเอฟ (F-distribution) เมื่อ $\beta_1 = 0$ และ จะเข้าสู่การแจกแจงเอฟไร้ศูนย์กลาง (Non-central F distribution) เมื่อ $F > F_{\alpha, (1, n-2)}$ แสดงว่า $\beta_1 \neq 0$ หรือ อาจกล่าวได้ว่า X กับ Y มีความสัมพันธ์กันในรูปแบบเชิงเส้น

จากการวิเคราะห์การถดถอยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น การจะตัดสินใจว่า สมการถดถอยที่ได้ นั้นเหมาะสม หรือไม่ ค่าการทดสอบสมมติฐานเพียงค่าเดียว อาจจะไม่เพียงพอ ดังนั้น ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination) r^2 ดังสมการ

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (100)$$

โดยกำหนดให้

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination) r^2 คือ ระดับความสามารถของตัวแปรอิสระ X ที่ใช้อธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นในตัวแปรตาม Y

โดยค่า r^2 อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ และ เมื่อทำการถอดรากที่สองของ ค่า r^2 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation) r ดังสมการ

$$r = \pm\sqrt{r^2} \quad (101)$$

โดยกำหนดให้

ค่า r อยู่ระหว่าง $-1 \leq r \leq 1$ แสดงว่า ถ้าค่า r เป็นลบ ตัวแปรอิสระ X และ ตัวแปรตาม Y มีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงข้าม หรือมีความสัมพันธ์กันในเชิงลบ และ ถ้าค่า r เป็นบวก แสดงว่า ตัวแปรอิสระ X และ ตัวแปรตาม Y มีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน หรือมีความสัมพันธ์กันในเชิงบวก

แม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r จะให้ค่าความสัมพันธ์สูง ทั้งทางบวก และ ทางลบ ซึ่งอาจจะเกิดจากกลุ่มของประชากรเพียงบางกลุ่ม ดังนั้น เมื่อทำการพิจารณาตัวแปรทั้งระบบ จะทำให้ค่าตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กันเลยก็เป็นได้ ด้วยเหตุนี้ ทำการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซ้ำอีกครั้ง โดยอาศัยแนวคิดเกี่ยวกับการอนุมานเชิงสถิติ คือ การสร้างความเชื่อมั่น และ ทดสอบสมมติฐานในรูปของค่า ρ ดังนี้

ทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \rho = 0$$

$$H_1 : \rho \neq 0$$

โดยใช้สถิติทดสอบ $t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}}$

จะยอมรับ ρ แสดงว่า กลุ่มตัวอย่างมีความสัมพันธ์กันสูงเพียงบางกลุ่มเท่านั้น

และ ปฏิเสธ ρ เมื่อ $t > t_{1-\frac{\alpha}{2}(n-2)}$ หรือ $t < t_{\frac{\alpha}{2}(n-2)}$

ลักษณะความสัมพันธ์กันทางสถิติ ถ้าค่า $\rho > 0$ แสดงว่า ไค้งการแจกแจงมีลักษณะเบ้ซ้าย และ ถ้า $\rho < 0$ แสดงว่า ไค้งการแจกแจงมีลักษณะเบ้ขวา

ยกตัวอย่างการวิเคราะห์สมการถดถอยอย่างง่าย จากตัวแปรอิสระ คือ ตัวแปรไร้หน่วยระยะทาง
สหสัมพันธ์ $\frac{\Delta_c}{L}$ และ ตัวแปรตาม คือ ค่า *RMS* ระยะโค้งกึ่งกลางสะพาน $RMS[V(0.50L)]$
ดังตาราง 5

ตาราง 5 ความสัมพันธ์ของค่า *RMS* ระยะโค้งกึ่งกลางสะพาน และ ตัวแปรไร้หน่วย

ระยะทางสหสัมพันธ์ $\frac{\Delta_c}{L}$ จำนวนตัวอย่างทดสอบ 10 ครั้ง

$RMS[V(0.50L)]$	$\frac{\Delta_c}{L}$
1.5934	5.00
1.5937	4.17
1.5940	3.57
1.5944	3.13
1.5947	2.78
1.5951	2.50
1.5955	2.27
1.5958	2.08
1.5962	1.92
1.5966	1.79

โดยกำหนดให้

ค่า $q_0 / L^3 = 5.63 \times 10^{-8}$, $\ell / L = 0.90$, $\mu = 0.083$, $\eta = 0.014$,

$f_{k_1} = 0.03$, $f_{k_2} = 0.11$, $f_c = 0.003$, $f_g = 0.016$ และ $f_v = 0.05$

และ ทำการสร้างสมการถดถอย โดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังสมการ

$$RMS[V(0.50L)] = 1.5981 - 0.0010612 \left(\frac{\Delta_c}{L} \right) \quad (102)$$

และ ทดสอบสมมติฐาน โดยใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตาราง 6

ตาราง 6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

Source of variation (S.O.V.)	df	SS	MS	F-ratio
Regression	1	1.2816e-005	1.2816e-005	71.82
Error	8	1.4275e-006	1.7844e-007	
Total	9	1.4244e-005		

ทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

เนื่องจาก $F\text{-ratio} > F_{0.05(1,8)}$ ดังนั้น ปฏิเสธ H_0 นั่นคือที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า

$\beta_1 \neq 0$ หรือ ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ $\frac{\Delta_c}{L}$ มีความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นกับ
ผลตอบสนองต่อค่า RMS ระยะโก่งกึ่งกลางสะพาน

ค่า $r^2 \approx 0.88864$ อธิบายได้ว่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ $\frac{\Delta_c}{L}$ มีความผันแปรที่เกิด
ขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ เท่ากับ 88.864 % และ เนื่องจากค่าความชันของสมการ
ถดถอยเป็นลบ ดังนั้น $r \approx -0.94267$ อธิบายได้ว่า ระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ $\frac{\Delta_c}{L}$
และ ตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ มีค่าสูง และ ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงลบ

ทดสอบสมมติฐานความสัมพันธ์ในรูปของ ρ

$$H_0 : \rho = 0$$

$$H_1 : \rho \neq 0$$

ที่เขตวิกฤต คือ $t_{0.975(8)} = 2.306$ หรือ $t_{0.025(8)} = -2.306$

ค่า $t = -7.989$ อธิบายได้ว่า เนื่องจากค่า t ที่คำนวณได้อยู่ในอาณาเขตวิกฤต ดังนั้น ปฏิเสธ H_0 นั่นคือ ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ $\frac{\Delta_c}{L}$ มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองต่อค่า RMS ระยะโค้งกึ่งกลางสะพาน

สรุปได้ว่า ถ้าค่าความขรุขระเพิ่มขึ้น r_f ส่งผลทำให้ค่า $RMS[V(0.50L)]$ เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ในรูปแบบของสมการถดถอย

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน แสดงว่า มีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรความยาวคัน ตัวแปรความเร็วยานพาหนะ ตัวแปรความเค้นของขบวนการไถทึนอยซ์ ตัวแปรระบบกันสะเทือน ตัวแปรระบบโช้คอัพ และ ตัวแปรระบบยึดหยุ่น เป็นต้น ซึ่งตัวแปรดังกล่าวอาจจะมีผลสำคัญต่อค่าตัวแปรตาม คือ ค่าผลตอบสนองต่อระยะโค้งกึ่งกลางของโครงสร้างพื้นฐาน ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยอย่างง่าย ไม่เพียงพอในการแก้ปัญหาดังกล่าว และ วิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression model) เป็นวิธีการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาในกรณีที่มี ตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวแปร ดังสมการ

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (103)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ คือ พารามิเตอร์ของตัวแบบที่ทำการศึกษา

และ ค่า $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}$ คือ ค่าสังเกตของตัวแปรอิสระ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$

ยกตัวอย่าง การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ จากตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ
 ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา (ℓ/L) ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ (Δ_c/L)
 และ ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มข้นของไวท์นอยซ์ (q_0/L^3) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม
 ค่า *RMS* ระยะโค้งกึ่งกลางสะพาน $RMS[V(0.50L)]$ ดังตาราง 7

ตาราง 7 ความสัมพันธ์ของค่า *RMS* ระยะโค้งกึ่งกลางสะพาน ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่าง
 ระหว่างเพลลา (ℓ/L) ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ (Δ_c/L) และ
 ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มข้นของไวท์นอยซ์ (q_0/L^3) จำนวนตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้ง

$RMS[V(0.50L)]$	ℓ/L	Δ_c/L	q_0/L^3
1.16230	0.90	3.33335	5.63E-08
1.16300	0.90	3.33335	6.25E-08
1.16370	0.90	3.33335	6.88E-08
1.16430	0.90	2.50000	5.63E-08
1.16520	0.90	2.50000	6.25E-08
1.16610	0.90	2.50000	6.88E-08
1.16630	0.90	2.00000	5.63E-08
1.16750	0.90	2.00000	6.25E-08
1.16860	0.90	2.00000	6.88E-08
1.20340	0.72	2.66668	2.88E-08
1.20400	0.72	2.66668	3.20E-08
1.20460	0.72	2.66668	3.52E-08
1.20540	0.72	2.00000	2.88E-08
1.20620	0.72	2.00000	3.20E-08
1.20700	0.72	2.00000	3.52E-08
1.20740	0.72	1.60000	2.88E-08
1.20850	0.72	1.60000	3.20E-08

$RMS[V(0.50L)]$	ℓ / L	Δ_c / L	q_0 / L^3
1.20950	0.72	1.60000	3.52E-08
1.12840	0.60	2.22223	1.67E-08
1.12870	0.60	2.22223	1.85E-08
1.12900	0.60	2.22223	2.04E-08
1.12980	0.60	1.66667	1.67E-08
1.13020	0.60	1.66667	1.85E-08
1.13070	0.60	1.66667	2.04E-08
1.13130	0.60	1.33333	1.67E-08
1.13200	0.60	1.33333	1.85E-08
1.13270	0.60	1.33333	2.04E-08

โดยกำหนดให้

ค่า $\mu = 0.056 - 0.083$, $\eta = 0.009 - 0.014$, $f_{k_1} = 0.03 - 0.08$,

$f_{k_2} = 0.09 - 0.24$, $f_c = 0.002 - 0.032$, $f_g = 0.013 - 0.016$ และ $f_v = 0.03 - 0.11$

และ ทำการสร้างสมการถดถอย โดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังสมการ

$$RMS[V(0.50L)] = 0.84871 + 0.61909(\ell / L) - 0.0036011(\Delta_c / L) \dots - 3.4984e+006(q_0 / L^3) \quad (104)$$

และ ทดสอบสมมติฐาน โดยใช้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตาราง 8

ตาราง 8 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

Source Of Variation (S.O.V.)	df	SS	MS	F-ratio
Regression	3	0.0084489	0.0028163	3.6752
Error	23	0.01762513	0.00076631	
Total	26	0.02607403		

ทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$

เนื่องจาก $F - ratio \geq 2.99 (F_{0.05, (3, 25)})$ ดังนั้น ปฏิเสธ H_0 นั่นคือที่ระดับนัยสำคัญ 5%

กล่าวได้ว่า $\beta_k \neq 0$ หรือ ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา (ℓ / L) ตัวแปรไร้หน่วยระยะทาง
สหสัมพันธ์ (Δ_c / L) และ ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มข้นของไวท์นอยส์ (q_0 / L^3)

มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าผลตอบสนองต่อค่าระยะโก่งกึ่งกลางสะพาน $RMS[V(0.50L)]$

และ เนื่องจากค่า $r^2 = 0.324$ แสดงว่า ตัวแปรอิสระ สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับ

ตัวแปรตาม เท่ากับ 32.4 % ดังนั้นการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ อาจจะไม่เพียงพอ

ในการพยากรณ์ตัวแปรตามได้ หรือสมการถดถอยอยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้น และ วิธีการที่เหมาะสม

ในการแปลงฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้มีลักษณะเชิงเส้น (Intrinsically or transformably linear)

ได้แก่ ฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential function) ฟังก์ชันกำลัง (Power function) และ

ฟังก์ชันโพลิโนเมียล (Polynomial function) โดยขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระที่ศึกษา สำหรับตัวแปรอิสระ

ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามในรูปแบบเส้นโค้งนั้น ฟังก์ชันโพลิโนเมียล มีความเหมาะสม

ในการใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์การถดถอย ดังสมการ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 \dots + \beta_k X^k + \varepsilon \quad (105)$$

โดยกำหนดให้

ค่า $k = 1$ แทนค่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

ค่า $k = 2$ แทนค่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งหนึ่งจุดกลับ หรือ เรียกว่า กำลังสอง (Quadratic)

และ ค่า $k = 3$ แทนค่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งสองจุดกลับ หรือ เรียกว่า กำลังสาม (Cubic)

การศึกษารูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลนั้น พิจารณาถึงความเหมาะสมของลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ และ ตัวแปรตาม ในแผนภาพการกระจาย โดยลำดับที่เหมาะสมที่สุด ต้องเป็นลำดับที่ต่ำสุด ที่สามารถอธิบายลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ และ ตัวแปรตาม ได้ดีที่สุด ในการเลือกลำดับที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่า R^2 และการทดสอบสมมติฐาน ดังตาราง 9

ตาราง 9 แสดงสมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต และ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ สำหรับรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 ถึง 3

ลำดับที่	สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2
1	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	$\frac{MSR(x_i)}{MSE(x_i)}$	$F \geq F_{\alpha,(i,n-2)}$	$\frac{SSR(x_i)}{SST}$
2	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	$\frac{MSR(x_i, x_i^2)}{MSE(x_i, x_i^2)}$	$F \geq F_{\alpha,(i,n-3)}$	$\frac{SSR(x_i, x_i^2)}{SST}$
3	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	$\frac{MSR(x_i, x_i^2, x_i^3)}{MSE(x_i, x_i^2, x_i^3)}$	$F \geq F_{\alpha,(i,n-4)}$	$\frac{SSR(x_i, x_i^2, x_i^3)}{SST}$

จากตัวอย่าง การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ของตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ
 ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา (ℓ/L) ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ (Δ_c/L) และ
 ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยซ์ (q_0/L^3) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม
 ค่าผลตอบสนองต่อค่าระยะโก่งกึ่งกลางสะพาน $RMS[V(0.50L)]$ นั้น แสดงผลดังตาราง 10

ตาราง 10 แสดงสมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value
 สำหรับรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 ถึง 3 ของตัวแปรอิสระ (ℓ/L)
 (Δ_c/L) และ (q_0/L^3) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$
 จำนวนตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้ง

ลำดับที่	สมมติฐาน	F-ratio	ช่วงวิกฤต	r^2	p-value
1	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	3.6752	$F_{0.05,(3,25)} = 2.99$	0.32404	0.02683
2	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	4.6578e+004	$F_{0.05,(3,24)} = 3.01$	0.99996	0
3	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	11,635	$F_{0.05,(3,23)} = 3.03$	1.0	0.026075

ทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$

รูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียล ลำดับที่ 1 ทดสอบ $H_0 : \beta_k = 0, H_1 : \beta_k \neq 0$ ค่า $F \geq 2.99$ และ
 ค่า p-value=0.026 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะปฏิเสธ H_0 แสดงว่า รูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียล
 ลำดับที่ 1 มีความเหมาะสม และ รูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ทดสอบ

$$H_0 : \beta_k = 0, H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ ค่า } F \geq 3.01 \text{ และ ค่า p-value}=0.00 \text{ ที่ระดับนัยสำคัญ } 0.05$$

จะปฏิเสธ H_0 แสดงว่า รูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 มีความเหมาะสม

และ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 รูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 ต่ำกว่า
ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 รูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 มาก แต่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
ระหว่างรูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 และ รูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน
ดังนั้น การวิเคราะห์รูปแบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 เหมาะสม สำหรับความสัมพันธ์ของ
ตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา (ℓ/L)

ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ (Δ_c/L) และ ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยซ์
(q_0/L^3) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม ค่าผลตอบแทนต่อค่าระยะโค้งกึ่งกลางสะพาน

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

และ ทำการจัดรูปสมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ดังสมการ

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

$$+ \beta_8 X_2 X_3 + \beta_9 X_3^2 \quad (106)$$

กำหนดให้

ค่า X_1 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา (ℓ/L)

ค่า X_2 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ (Δ_c/L)

ค่า X_3 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยซ์ (q_0/L^3)

และ ค่า $\beta_0 - \beta_9$ แทนค่า พารามิเตอร์ของตัวแบบ ดังตาราง 11

ตาราง 11 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยพหุนามลำดับที่ 2

ของความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร (ℓ/L) (Δ_c/L) และ (q_0/L^3)

ที่ส่งผลกระทบต่อ $RMS[V_{pp}/g]$

พารามิเตอร์ของตัวแบบ	$RMS[V_{pp}/g]$
β_0	-0.48545
β_1	4.442
β_2	-0.0073417
β_3	2.3303e+005
β_4	-2.8995
β_5	-0.0042851
β_6	3.0255e+005
β_7	0.0018003
β_8	-30218
β_9	-2.2277e+012

สรุปว่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา (ℓ/L) ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ (Δ_c/L) และ ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยส์ (q_0/L^3) มีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรตาม ค่าผลตอบแทนต่อค่าระยะโค้งกึ่งกลางสะพาน $RMS[V(0.50L)]$ ในรูปแบบสมการถดถอยพหุนามลำดับที่ 2

ดังนั้น สมการถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ของตัวแปรเกี่ยวเนื่อง ในระบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ได้

บทที่ 4

ผลการวิจัย และ การอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน เริ่มจากการศึกษาความขรุขระพื้นผิว รูปแบบยานพาหนะ และ รูปแบบโครงสร้างพื้นฐาน จากนั้นสร้างสมการการเคลื่อนที่ ในรูปแบบ ตัวแปรไร้หน่วย และ กำหนดค่าตัวแปรไร้หน่วย ดังนี้

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

จากนั้นทำการแก้ปัญหาสสมการอนุพันธ์ด้วยโปรแกรม 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

ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตุ้รุดไฟ f_{k_1} ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหยุ่นของเพลลา f_{k_2} และ

ตัวแปรไร้หน่วยระบบโช้คอัพรุดไฟ f_c

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

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

ผลตอบสนองของยานพาหนะ

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 $V = 140(m/s) = 540(km/hr)$ จะก่อให้เกิดการสิ้นเปลือง ที่ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของคานช่วงเดียว ลำดับที่หนึ่ง ในขณะที่ โดยรถไฟความเร็วสูงส่วนใหญ่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เกิน 400 km./hr. ดังนั้นโอกาสที่ยานพาหนะจะเข้าใกล้ค่าความถี่ธรรมชาติของคานช่วงเดียวเป็นไปได้น้อยมาก

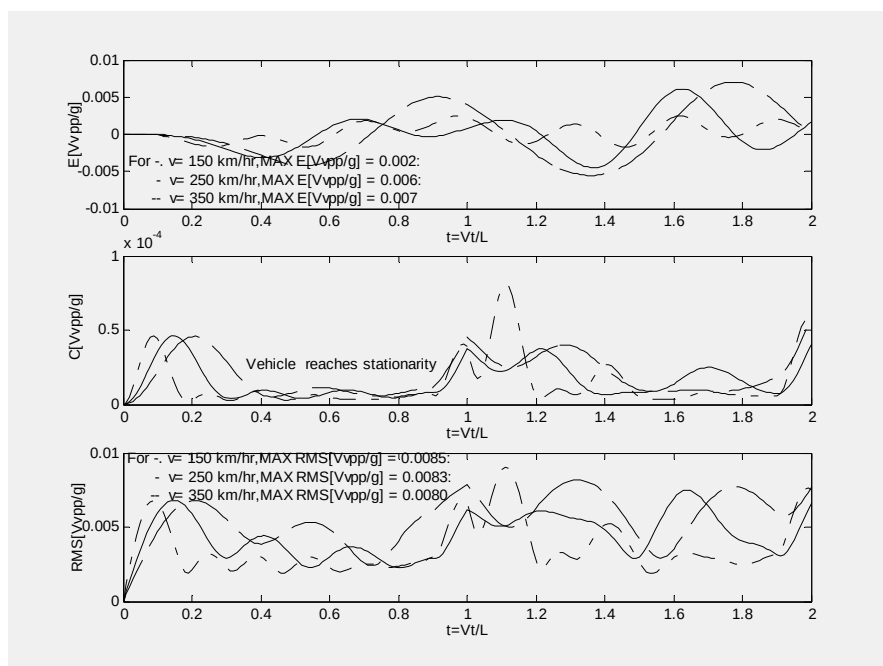
และ ถ้าพิจารณาอัตราการมาถึงของเพลลา (Effect of axle arrival rate, f_a) คือ ค่าอัตราส่วน ความเร็วยานพาหนะต่อความยาวช่วงเพลลา $\frac{V}{l}$ ทารด้วย ค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานลำดับที่หนึ่ง และ กำหนดให้ค่าความยาวช่วงคาน 20 25 และ 30 เมตร ดังตาราง 12

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 ไม่ส่งผลต่อ ค่าอัตราการมาถึงของเพลลา เนื่องจาก สูตรการคำนวณ ค่าอัตราการมาถึงของเพลลา ขึ้นอยู่กับ ค่าระยะห่างช่วงเพลลา l โดยกำหนดให้ $l = 18m$ และ ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป

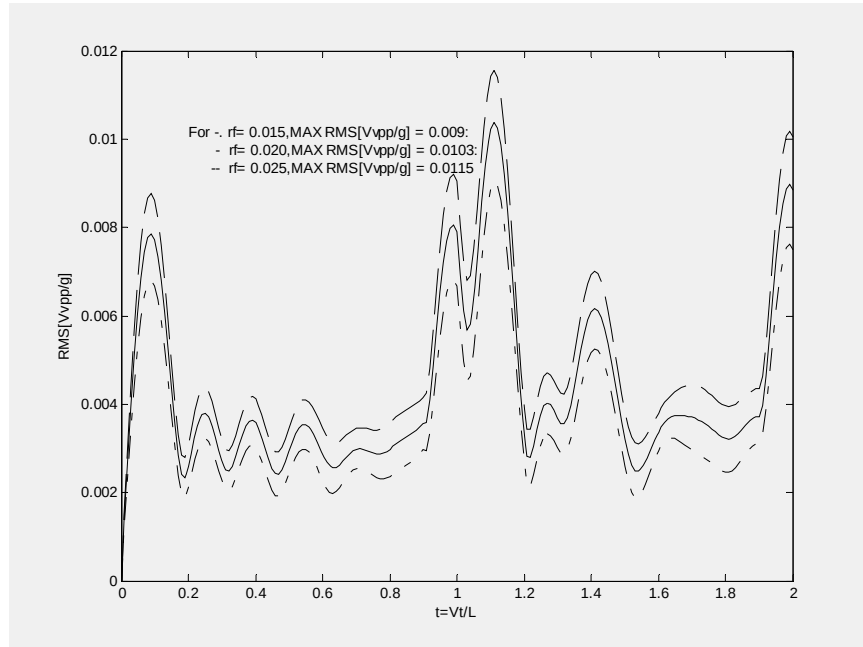
ดังนั้น ถ้ายานพาหนะเคลื่อนด้วยความเร็วตั้งแต่ 150 - 350 km./hr. จะไม่ก่อให้เกิดการสั่นพ้อง เนื่องจากค่าความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ธรรมชาติลำดับที่ 1 จากนั้นทำการคำนวณผลตอบสนอง ยานพาหนะ ดังภาพ 49 – 51



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

และ จากภาพ 49 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร อยู่ในช่วง 0.002g – 0.007g เป็นช่วงที่ผู้ใช้นยานพาหนะรู้สึกสะดวกสบาย แต่เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวน ยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะเข้าสู่ สเตชันนารี (Stationary) ได้ช้ากว่า ยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ

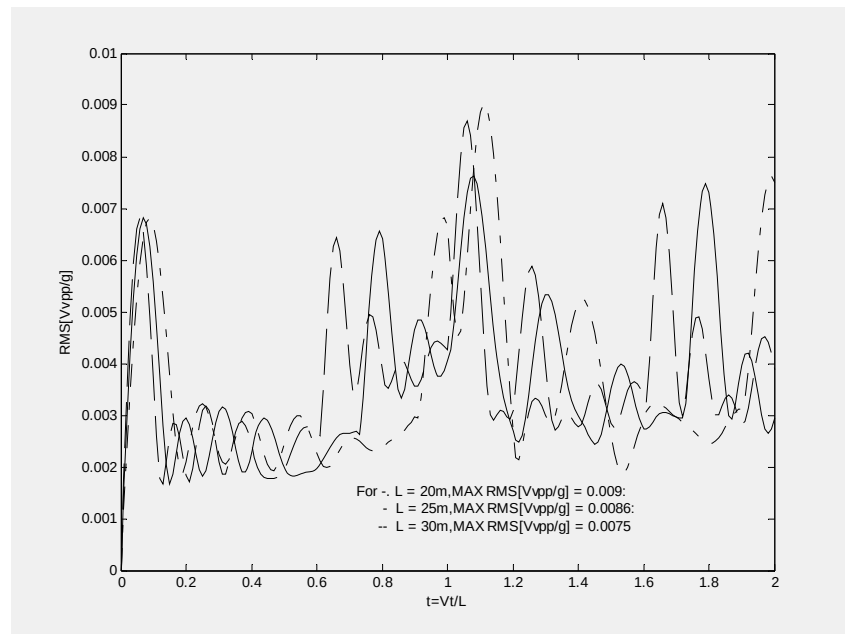
และ เมื่อทำการรวมค่าความแปรปรวนเข้ามามีใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ยรากที่สอง (RMS) ดังภาพ 49 พบว่า ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 0.0080g – 0.0085g ผู้ใช้นยานพาหนะยังคงรู้สึกสะดวกสบาย เนื่องจากค่าความขรุขระ อยู่ในช่วงมาตรฐานระบบรางรถไฟของสหรัฐอเมริกา (America railway standard)



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

จากภาพ 50 ในขณะที่ ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 350 km./hr. ถ้าทำการเพิ่มค่าความขรุขระ $r_f = 0.015 - 0.025 m^{-1}$ จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า RMS ความเร่งแฉวงของห้องผู้โดยสาร อยู่ในช่วง 0.009g – 0.0115g และ เป็นช่วงที่ผู้โดยสารยัง คงยอมรับได้

และ จากภาพ 51 แสดงว่า ค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่า RMS ความเร่งแฉวงของห้องผู้โดยสารลดลงเล็กน้อย โดยค่า RMS ความเร่งแฉวงของห้องผู้โดยสาร อยู่ในช่วง 0.0075g – 0.009g และ เป็นช่วงที่ผู้โดยสารรู้สึกสะดวกสบาย



ภาพ 51 แสดงค่า RMS ความเร่งแฉกของห้องผู้โดยสาร ช่วงความยาวคัน

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

จากการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนองของยานพาหนะ สรุปได้ว่า อัตราการมาถึงในช่วงคัน และ ค่าอัตราการมาถึงของเพลลา ไม่เข้าสู่ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานลำดับที่หนึ่ง ทำให้ไม่เกิดการสั่นพ้องขึ้น และ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความเร่งแฉกของห้องผู้โดยสาร พบว่า อยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ใช้งานพาหนะรู้สึกสะดวกสบาย เนื่องจาก ได้กำหนดคุณสมบัติของระบบรางตามมาตรฐานระบบรางรถไฟของสหรัฐอเมริกา (America railway standard) และ กำหนดคุณสมบัติของแบบจำลองยานพาหนะ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างเพลลา มวลตู้รถไฟ มวลเพลลา ระบบกันสะเทือนตู้รถไฟ ระบบยึดหยุ่นของเพลลา ระบบใช้คัพรถไฟ และ ความเร็วรถไฟ ตามตำรา Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: With application to High-Speed Railways ของผู้แต่ง Yang, Y. B., Yau, J. D., & Wu, Y. S. ของแบบจำลองยานพาหนะ รุ่น T18

สำหรับค่าความแปรปรวน เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่มีความขรุขระ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ค่าความแปรปรวนจะคงที่ หรือผลตอบสนองของยานพาหนะเข้าสู่สภาวะนิ่ง โดยยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะเข้าสู่สภาวะนิ่งได้เร็วกว่า ยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำกว่า

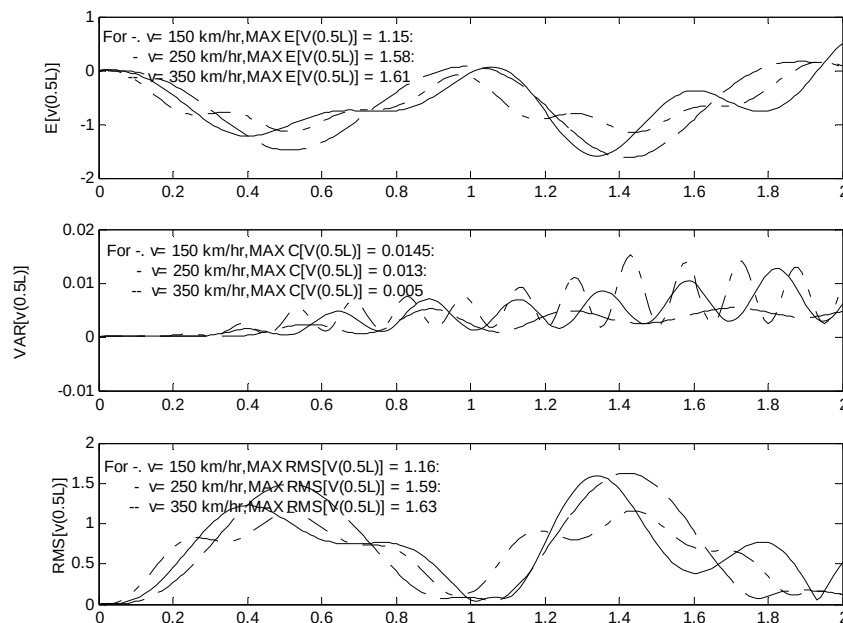
และ เมื่อทำการรวมค่าความแปรปรวน เพื่อคำนวณค่า RMS พบว่า ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร เพิ่มขึ้น และ ในกรณีที่ ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร สูงเกินมาตรฐานที่ผู้ใช้งานพาหนะจะยอมรับ ควรจะทำการลดค่าความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแปรปรวนที่ลดลง และ ทำให้ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร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

ผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน

การพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานนั้น สร้างแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานประเภทคันช่วงเดียวที่มีรูปแบบการสั่นสะเทือน จำนวน 10 โหมด และ ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองต่อโครงสร้างในรูปของแฟกเตอร์กำลังขยายเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Amplification Factor, DAF) โดยคำนึงถึงผลรวมของการสั่นสะเทือนของโครงสร้างแบบพลวัต (Dynamic Load) กับ พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต (Static Load) ทารด้วย พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต

และ เนื่องจากพื้นผิวของโครงสร้างพื้นฐานระบบราง มีความไม่สม่ำเสมอ หรือพื้นผิวมีความขรุขระ แต่ผลของค่าความขรุขระไม่ได้แสดงในรูปแบบ ค่าเฉลี่ย ผลตอบสนองต่อโครงสร้าง เนื่องจากไวทน์อยช์ เป็นโพเรสที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังนั้น ทำการคำนวณค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้น โดยพื้นผิวที่มีความขรุขระมาก จะทำให้ได้ค่าความแปรปรวนสูง

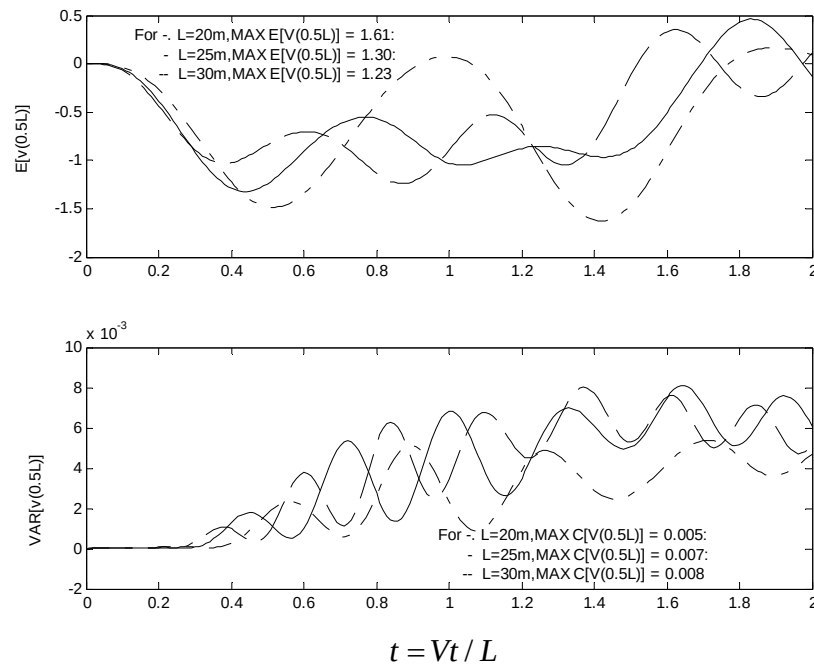
จากค่าความแปรปรวนที่ได้นำไปรวมกับค่าเฉลี่ย เพื่อคำนวณค่าผลตอบสนองต่อโครงสร้างพื้นฐานที่แท้จริง ในรูปของค่า RMS (Root Mean Square) และ ทำการแสดงผลตอบสนองที่เกิดขึ้น เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรความเร็วยานพาหนะ และ ตัวแปรความยาวคัน เนื่องจากตัวแปรทั้งสอง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคาดหวัง DAF ของโครงสร้างพื้นฐาน อย่างเห็นได้ชัด รายละเอียด ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐาน แสดงตามลำดับ ต่อไป



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

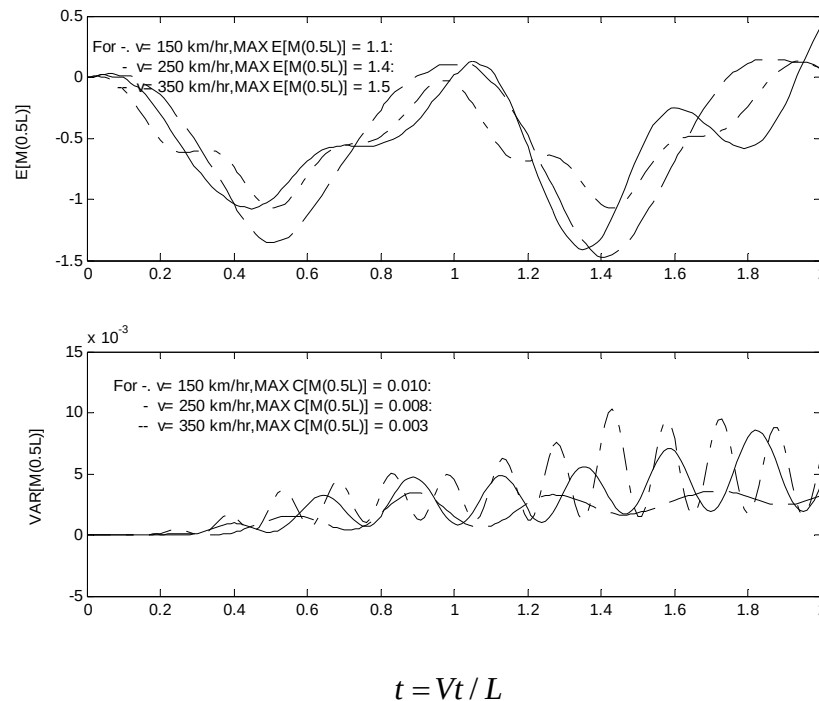
และ เมื่อทำการพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่าในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 km./hr. จะทำให้มีค่าความแปรปรวนสูงที่สุด และมีลักษณะขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง (Strongly fluctuated) รวมทั้งค่าความแปรปรวนจะค่อยๆ ลดลง เมื่อความเร็วยานพาหนะเพิ่มขึ้น และ สังเกตได้ว่า ค่าความแปรปรวนของโครงสร้าง เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา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



ภาพ 53 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของระยะโค้งกึ่งกลางคัน

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

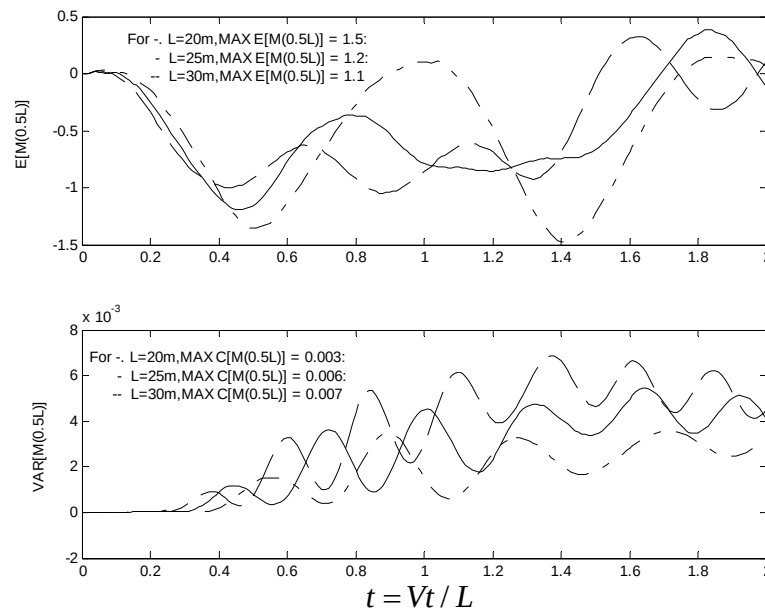
จากภาพ 53 แสดงว่า ที่ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. ค่าความยาวคันที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ ค่าเฉลี่ย DAF ระยะโค้งกึ่งกลางคัน ลดลง โดยที่ค่าความยาวคัน 30 เมตร ค่าเฉลี่ย DAF ระยะโค้งกึ่งกลางคัน เท่ากับ 1.23 และ มีค่าต่ำกว่า ค่าเฉลี่ย DAF ระยะโค้งกึ่งกลางคัน ของมาตรฐาน AASHTO และ เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวน 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

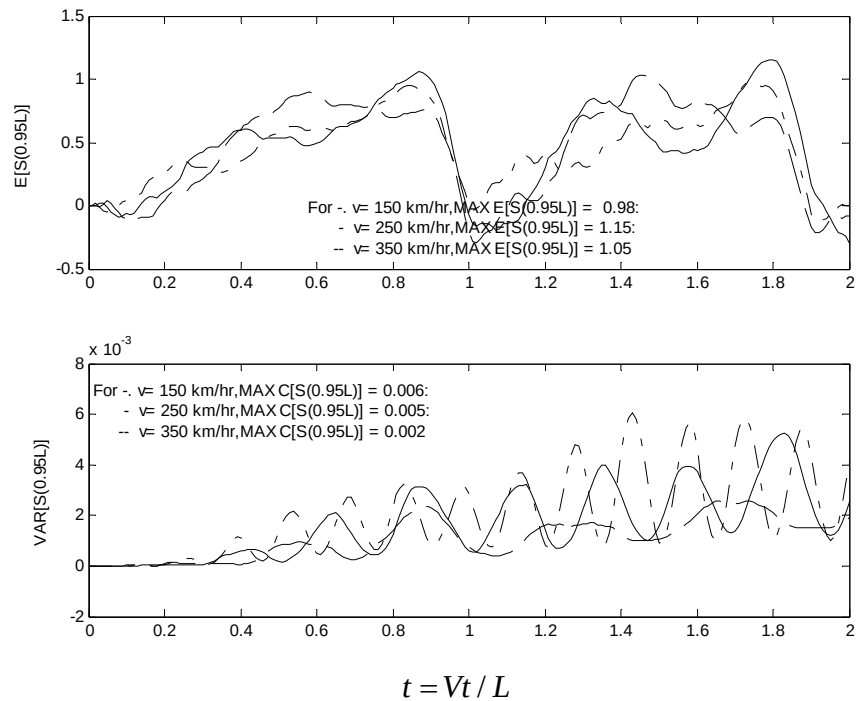


ภาพ 55 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของโมเมนต์กึ่งกลางคาน

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

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

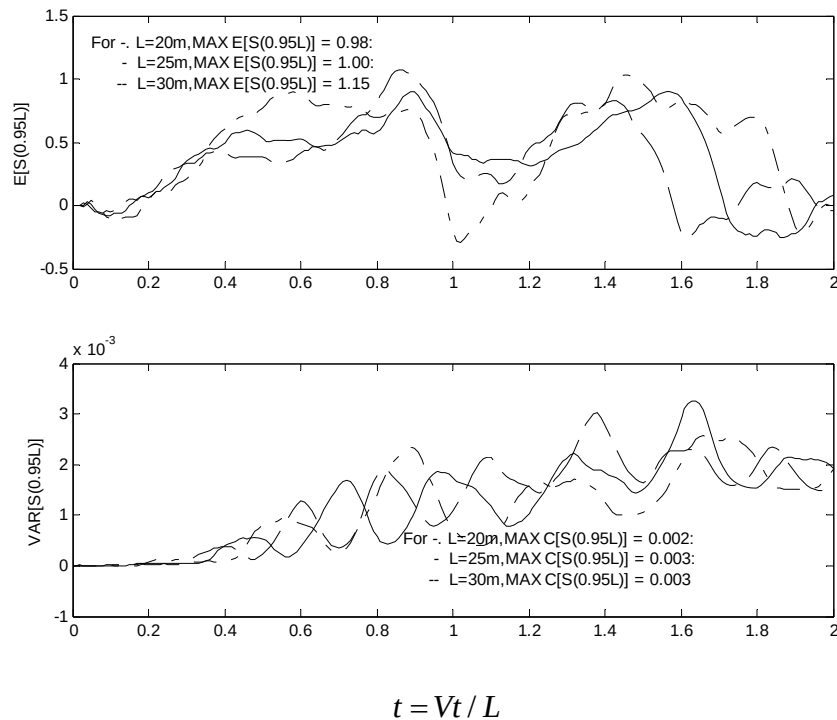
และ ถ้าค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ ค่าเฉลี่ย DAF โมเมนต์กึ่งกลางคาน ลดลง โดยที่ค่าความยาวคาน 30 เมตร จะได้ค่าเฉลี่ย DAF โมเมนต์กึ่งกลางคาน เท่ากับ 1.1 และ เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่า ค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ ค่าความแปรปรวนสูงขึ้น



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



ภาพ 57 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของแรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ ช่วงความยาวคาน

$L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr.

และ $r_f = 0.015m^{-1}$

จากภาพ 57 แสดงรูปร่างของ ค่าเฉลี่ย DAF แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ โดยช่วงแรก ค่าแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่น้ำหนักเพลาน้ำของยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าสู่คาน และค่าแรงเฉือนสูงสุด เมื่อเข้าใกล้ฐานรองรับอีกด้านหนึ่ง หรือที่ขอบคาน ตำแหน่ง $0.95L$ จากนั้นค่าแรงเฉือน จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง จากผลของน้ำหนักเพลาลังเคลื่อนที่เข้าสู่คานจากจุดเริ่มต้น และ มีค่าแรงเฉือนสูงสุด เมื่อเข้าใกล้ฐานรองรับอีกด้านหนึ่ง หรือที่ขอบคาน ตำแหน่ง $0.95L$ เช่นกัน

และ ถ้าค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ ค่าเฉลี่ย DAF แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความยาวคาน 30 เมตร จะได้ค่าเฉลี่ย DAF แรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ เท่ากับ 1.15 และเมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวน พบว่า ค่าความยาวคานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ ค่าความแปรปรวนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย .

จากการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน สรุปได้ว่า การเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ก่อให้เกิดการสั่นไหวภายในโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และทำให้ ค่าผลตอบสนองต่อโครงสร้างสูงกว่า พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิต โดยเฉพาะถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่า 350 km./hr. จะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของ DAF ของระยะโก่งกึ่งกลางคาน สูงถึง 1.61 มากกว่ามาตรฐาน AASHTO และ ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 350 km./hr. การเพิ่มขึ้นของค่าความยาวคาน จากเดิม 20 เมตร เป็น ความยาวคาน 30 เมตร จะช่วยลด ค่าเฉลี่ยของ DAF ของระยะโก่งกึ่งกลางคาน ลงเหลือ 1.23 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน AASHTO กำหนด ดังนั้น ตัวแปรความเร็วยานพาหนะ และ ตัวแปรความยาวคาน มีความสำคัญต่อผลตอบสนองที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างพื้นฐาน

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

การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน พบว่าเกี่ยวเนื่องกับพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 ระบบ ได้แก่ พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน และพารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ โดยแต่ละพารามิเตอร์เชื่อมโยงถึงตัวแปรอิสระ ที่มีผลกระทบต่อผลตอบแทนของยานพาหนะและ โครงสร้างพื้นฐาน แต่การที่จะแสดงผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในรูปแบบกราฟ มีข้อจำกัด ด้านการแสดงผลข้อมูลเพียง 2 ตัวแปร คือ ตัวแปรอิสระที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตาม ภายในช่วงที่กำหนด ข้อมูลไม่สามารถครอบคลุมเชิงมิติ เช่นเดียวกับ วิธีทางสถิติขั้นสูง คือ วิธีการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ในรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียล ลำดับที่ 2 เป็นวิธีการที่สามารถสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีมากกว่า 1 ตัวแปร ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง และ ทำการเลือกสรร ตัวแปรอิสระ 7 ตัวแปร นำมาจัดเรียงข้อมูลทางสถิติ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 กลุ่ม เพื่อให้ครอบคลุมพารามิเตอร์เกี่ยวเนื่อง และ ภาพรวมของระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ดังรายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูล ตามลำดับ

กลุ่มที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว

กำหนดตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ได้แก่

ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสัมผัส Δ_c / L

ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวนอยซ์ q_0 / L^3

และ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้งของตัวแปรอิสระที่แปรเปลี่ยนไป ที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตาม คือ

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

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

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

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
$RMS[V_{pp}/g]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	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 $F - ratio \geq F_{0.05,(3,24)}$ และ $p - value \leq 0.05$ 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 มีความสัมพันธ์แบบพหุคูณเมียร์ลำดับที่ 2

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 แสดงว่า ตัวแปรอิสระ Δ_c / L q_0 / L^3 และ f_v สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V_{pp}/g]$ 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%)

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยพหุนามลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว Y ดังสมการ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_1 X_2 + \beta_6 X_1 X_3 + \beta_7 X_2^2 \dots + \beta_8 X_2 X_3 + \beta_9 X_3^2 \quad (108)$$

โดยกำหนดให้

X_1 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ Δ_c / L

X_2 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวก์นอยส์ q_0 / L^3

X_3 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

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

ตาราง 14 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยพหุนามลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว 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

ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา ℓ / L

และ ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทดสอบ 9 ครั้งของตัวแปรอิสระที่แปรเปลี่ยนไป

ที่ส่งผลต่อค่าตัวแปรตาม คือ

ค่า $RMS[V_v pp / g]$ ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร

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 สมบัติการตัดสินใจ 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 $\beta_k = 0$ หรือจำนวนตัวอย่างทดสอบอาจจะไม่เพียงพอในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ดังนั้นทำการเพิ่ม จำนวนตัวอย่างทดสอบเป็น 121 ครั้ง ดังตาราง 16

ตาราง 16 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สมประสิทธิ์การตัดสินใจ 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 มีความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 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 ($\approx 30\%$)

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 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 ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา ℓ/L

X_2 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

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

ตาราง 17 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 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 $F - ratio < F_{0.05,(2,118)}$ ของตัวแปรตาม $RMS[V_v pp / g]$ แสดงว่า ยอมรับ H_0 นั่นคือ ที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า $\beta_k = 0$ หรือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบพหุคูณเมียดลำดับที่ 2 อาจจะไม่เพียงพอในการอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้น

ดังนั้นทำการวิเคราะห์รูปแบบพหุคูณเมียดลำดับที่ 1 ถึง 4 เพื่อคำนวณหา ลำดับของฟังก์ชันพหุคูณเมียด ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ สมการถดถอยของระบบโครงสร้างพื้นฐานของ $RMS[V_v pp / g]$ ดังตาราง 18

ตาราง 18 แสดงพหุคูณเมียดลำดับที่ 1 ถึง 4 สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สมประสิทธิ์การตัดสินใจ 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 $F - ratio > F_{0.05,(2,117)}$ และ $p - value \leq 0.05$ ของฟังก์ชันพหุคูณเมียดลำดับที่ 3 แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 5% กล่าวได้ว่า $\beta_k \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระ ℓ / L และ f_v กับตัวแปรตาม $RMS[V_v pp / g]$ มีความสัมพันธ์แบบพหุคูณเมียดลำดับที่ 3

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 แสดงว่า ค่า r^2 ของโพลิโนเมียลลำดับที่ 3 สูงกว่า ค่า r^2 ของโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 และ สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V_v pp / g]$ ในระดับปานกลาง ($\approx 50\%$)

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

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 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 ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

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

ตาราง 19 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยพหุนามลำดับที่ 3
ของพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_{vpp}/g]$

พารามิเตอร์ของตัวแบบ	$RMS[V_{vpp}/g]$
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 ตัวแปรไร้หน่วยระบบใช้คัพรถไฟ f_c

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทดสอบ 81 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 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
$RMS[V_{pp}/g]$	$H_0 : \beta_k = 0$ $H_1 : \beta_k \neq 0$	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 มีความสัมพันธ์แบบพหุคูณเมียร์ลำดับที่ 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%)

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยพหุคูณเมื่อยล้าลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ Y ดังสมการ

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

โดยกำหนดให้

X_1 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

X_2 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตัวรถไฟ f_{k_1}

X_3 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระบบยืดหยุ่นของเพลลา f_{k_2}

X_4 แทนค่า ตัวแปรไร้หน่วยระบบใช้คัพพอร์ทไฟ f_c

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

ตาราง 21 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์

ของระบบยานพาหนะ ของค่า $RMS[V_{pp}/g]$ $RMS[V(0.50L)]$

$RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$

พารามิเตอร์ ของตัวแบบ	$RMS[V_{pp}/g]$	$RMS[V(0.50L)]$	$RMS[M(0.50L)]$	$RMS[S(0.95L)]$
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

ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสัมผัสพันธ์ Δ_c / L

ตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยซ์ q_0 / L^3

ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วยานพาหนะ f_v

ตัวแปรไร้หน่วยระยะห่างระหว่างเพลลา ℓ / L

ตัวแปรไร้หน่วยระบบกันสะเทือนตัวรถไฟ f_{k_1}

ตัวแปรไร้หน่วยระบบยึดหยุ่นของเพลลา f_{k_2}

และ ตัวแปรไร้หน่วยระบบใช้คัพรถไฟ f_c

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างทดสอบ 2,187 ครั้งของตัวแปรอิสระที่แปรเปลี่ยนไป
ที่ส่งผลต่อค่าตัวแปรตาม คือ

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

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

ดังนั้นทำการสร้างสมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 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 ตัวแปรไร้หน่วยระบบใช้คัพรถไฟ f_c

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

ตาราง 23 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์
ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_{pp}/g]$
 $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$

พารามิเตอร์ ของตัวแบบ	$RMS[V_{pp}/g]$	$RMS[V(0.50L)]$	$RMS[M(0.50L)]$	$RMS[S(0.95L)]$
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 แบบพอลิโนเมียล ลำดับที่ 3 สำหรับ ค่าตัวแปรตาม $RMS[V_{pp}/g]$ ของพารามิเตอร์โครงสร้างพื้นฐาน และ สมการถดถอยพหุคูณ แบบพอลิโนเมียล ลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ทุกระบบ จากนั้น ทำการเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองต่อโครงสร้าง จากผลการทดลอง กับค่าผลตอบสนองต่อโครงสร้าง จากสมการถดถอย เพื่อทดสอบเปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน ที่เกิดขึ้น ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 – 350 km./hr. และ ตัวแปรอิสระอื่นคงที่ โดยสาเหตุที่เลือกตัวแปรอิสระ ความเร็วของยานพาหนะ เนื่องจาก ตัวแปรอิสระดังกล่าว อยู่ในการวิเคราะห์ระบบความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ 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 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน					
	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 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน					
	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 ค่าผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐานจากสมการถดถอย

ของทุกกลุ่มศึกษา มีความคลาดเคลื่อนซึ่งแสดงในรูปของ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และสามารถอธิบายผลการศึกษา แยกตามกลุ่มศึกษาดังนี้

กลุ่มที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว แสดงว่า ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ ให้ผลใกล้เคียงกับ ผลการทดลอง และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำมาก (2.57–5.63%) ในขณะที่ ค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ ให้ผลเทียบเท่าค่าจากการ ทดลอง และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเข้าใกล้ศูนย์ (0.00–0.02%) ดังนั้น สมการถดถอย แบบโพลิโนเมียล ลำดับที่ 2 เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการ วิเคราะห์พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว

กลุ่มที่ 2 พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน แสดงว่า ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ ให้ผลใกล้เคียง กับผลการทดลอง 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 ส่วนใหญ่ให้ผลใกล้เคียงกับ ผลการทดลอง และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำมาก (0.10–5.19%) ในขณะที่ค่าจากสมการถดถอยบางส่วน ที่ความเร็วยานพาหนะ 250 km./hr มีค่าเปอร์เซ็นต์ความ คลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผลของ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดลิ้นใจ r^2 ที่ตัวแปรอิสระ ℓ/L และ f_v สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ ได้ในระดับปานกลาง ($\approx 50\%$) และ อธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปร ตาม $RMS[S(0.95L)]$ ได้ในระดับต่ำถึงปานกลาง ($\approx 30\%$) แม้ว่าตัวแปรอิสระจะสามารถอธิบาย ความผันแปรของตัวแปรได้ในระดับต่ำถึงปานกลาง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ยังคงอยู่ ในระดับต่ำ ($\approx 14\%$) และ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติด้วยสมการถดถอย แบบโพลิโนเมียล ลำดับที่ 2 เพียงพอสำหรับกรณีศึกษาดังกล่าว ดังนั้น สมการถดถอย แบบโพลิโนเมียล ลำดับที่ 2 และ 3 เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการ วิเคราะห์พารามิเตอร์ระบบโครงสร้างพื้นฐาน

กลุ่มที่ 3 พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ แสดงว่า ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำมากถึงปานกลาง (1.33–36.35%) โดยเฉพาะที่ความเร็ว 150 km./hr. มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากผลของความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ของตัวแบบ $\beta_0 - \beta_{14}$ ที่คำนวณค่าเหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียว ในขณะที่ค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ จากสมการถดถอยให้ผลเทียบเท่าค่าจากผลการทดลอง และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเข้าใกล้ศูนย์ (0.01–2.48%)
 ดังนั้น สมการถดถอย แบบพหุนามลำดับที่ 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 แบบพหุนามลำดับที่ 2 ของ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

และ สำหรับสมการถดถอยแบบพหุนามลำดับที่ 2 ของ $RMS[V_{pp}/g]$ แม้ว่า จากการทดสอบสมมติฐาน แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 และ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ r^2 สูงมาก (0.97405) แต่ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ดังนั้นทำการทดสอบ พหุนามลำดับที่ 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 $RMS[V_{pp}/g]$ ที่ความเร็วยานพาหนะ 150 และ 250 km./hr. ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 จะต่ำกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ของโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 แต่ถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 350 km./hr. ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 สูงกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 ปานกลาง โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับปานกลาง ถึงสูง 53.90% ดังนั้น การเพิ่มลำดับของสมการถดถอยโพลีโนเมียล อาจจะไม่ใช่วิธีแนวทางแก้ปัญหาที่แท้จริง ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ $\beta_0 - \beta_{35}$ แสดงว่า พารามิเตอร์ของตัวแบบแต่ละตัว กำหนดในช่วงแห่งความเชื่อมั่นที่ 95 % ดังตาราง 30 ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ $\beta_0 - \beta_{35}$ ที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลต่อค่าผลตอบสนองของยานพาหนะ และ ของโครงสร้างพื้นฐาน

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

ดังนั้น สมการถดถอย แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 ของ $RMS[V_{pp}/g]$ เหมาะสมที่จะนำไปใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

ตาราง 30 แสดงพารามิเตอร์ และ ช่วงความเชื่อมั่นของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียล

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 ผลตอบสนองที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐาน เกี่ยวเนื่องกับความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว ระบบโครงสร้างพื้นฐาน และ ระบบยานพาหนะ โดยในแต่ละระบบจะมีค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบ 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 ลำดับชั้นสูงกว่า เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการถดถอย จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงว่า ค่าสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลีโนเมียล ลำดับที่ 3 เหมาะสมในการวิเคราะห์ผลตอบสนอง ค่า $RMS[V_{pp}/g]$ ระบบโครงสร้างพื้นฐาน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน นำค่าสมการถดถอยแบบโพลีโนเมียล มาคำนวณค่าผลตอบสนองเปรียบเทียบกับค่าผลตอบสนองจากผลการทดลอง พบว่า ส่วนใหญ่ ค่าผลตอบสนองจากสมการถดถอย ใกล้เคียงกับ ค่าผลตอบสนองจากผลการทดลอง และ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำ ยกเว้นบางช่วงความเร็วของยานพาหนะ พบว่า ค่าผลตอบสนองจากสมการถดถอย มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง เนื่องมาจาก การกำหนดช่วงแห่งความเชื่อมั่นที่ 95 % ทำให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ β_i ลำดับที่ i ใดๆ มีค่าอยู่ในช่วงระดับต่ำสุดถึงสูงสุด

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

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาตัวแปรในระบบรางรถไฟความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เริ่มจากการศึกษาความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว จากภาคสนาม ทำให้ทราบว่า โดยทั่วไปพื้นผิวมีความขรุขระ เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุ การรับแรงกระทำซ้ำจากน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะ และสภาพแวดล้อม ดังนั้น วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวแบบสุ่ม เป็นทางเลือกในการศึกษาข้อมูลระดับพื้นผิวในรูปของสมการอนุพันธ์สโตแคสติก ลำดับขั้นหนึ่ง ของตัวกรองไวท์นอยซ์ และ ทำการแปลงรูปจากสัญญาณโดเมนของเวลา เป็นสัญญาณโดเมนของความถี่ ด้วยฟังก์ชันแปลงรูปฟูเรียร์ เพื่อใช้คำนวณ ค่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลที่ระดับความขรุขระของพื้นผิวต่าง ๆ เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานระบบรางของสหรัฐอเมริกา และ ตัวแปรที่สำคัญของระบบพื้นผิว ได้แก่ ตัวแปรระยะทางสหัสสัมพันธ์ ตัวแปรความเข้มของไวท์นอยซ์ และ ตัวแปรความเร็วยานพาหนะ จากนั้นทำการศึกษา แบบจำลองของยานพาหนะ โดยเริ่มจากการศึกษาแบบจำลองของยานพาหนะทั้งแบบ เพลาเดี่ยว สองเพลา และ หลายเพลา ที่มีจุดสัมผัสระหว่างยานพาหนะ และพื้นผิว แบบสปริง แบบตัวหน่วง และ แบบแข็งเกร็ง ทำให้ทราบว่า แบบจำลองยานพาหนะ แบบสองเพลา ลำดับขั้นความเป็นอิสระ 4 เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟความเร็วสูง และ ตัวแปรที่สำคัญของระบบยานพาหนะ ได้แก่ ตัวแปรความเร็วยานพาหนะ ตัวแปรระบบกันสะเทือนตัวรถไฟ ตัวแปรระบบยืดหยุ่นของเพลา และ ตัวแปรระบบใช้ค้ำพรถไฟ จากนั้นทำการศึกษาแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน 2 แบบ คือ แบบวางบนพื้นผิวดิน และ แบบยกระดับ สำหรับแบบวางบนพื้นผิวดินนั้น จากคุณสมบัติของดินที่มีค่าความหน่วงสูง ทำให้กรองความถี่สูงจากแรงกระทำของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน และส่งผลให้ผลตอบสนองต่อโครงสร้างลดลง เมื่อระยะทางด้านข้างของระบบรางเพิ่มขึ้น แต่สำหรับโครงสร้างพื้นฐานแบบยกระดับ แรงกระทำจะกระจายภายในโครงสร้างคาน ที่มีทั้งแบบคานช่วงเดียว คานสองช่วง และแบบคานต่อเนื่อง และ จากการศึกษพบว่า ค่าการโก่งตัวของโครงสร้าง คานช่วงเดียว มีค่าสูงสุด

เมื่อเปรียบเทียบกับ ค่าการโก่งตัวของคานแบบสองช่วง สามช่วง หรือ แบบต่อเนื่อง ดังนั้น
ควรทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานแบบคานช่วงเดียว

ผลของการสร้างแบบจำลองพื้นผิว แบบจำลองยานพาหนะ และแบบจำลองโครงสร้าง
พื้นฐาน ทำการสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบจำลองสัมพันธ์ ของระบบสมการการเคลื่อนที่ และ
แก้ปัญหสมการเชิงอนุพันธ์ ด้วยวิธีการรุงเงคุดตา โดยใช้โปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้
คือ ผลตอบสนองของยานพาหนะ และ ผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน จากนั้นทำการ
สร้างความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องของตัวแปรกลุ่มแต่ละระบบ ด้วยวิธีการพื้นผิวดตอบสนอง โดยแสดง
ผลวิเคราะห์สรุปดังนี้

1. ผลตอบสนองของยานพาหนะ ไม่เข้าสู่ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานลำดับที่ 1 เนื่องจาก
ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วที่จุดสั่นพ้อง และ ค่าเฉลี่ย ความเร่ง
ในแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร อยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ใช้งานพาหนะรู้สึกสะดวกสบาย แต่ถ้าค่าความขรุขระ
ของพื้นผิวเพิ่มขึ้น จะแสดงผลตอบสนองของยานพาหนะ ในรูปของค่าความแปรปรวน โดยจาก
การศึกษา พบว่า ขณะที่ยานพาหนะ เคลื่อนที่ได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ค่าความแปรปรวนจะคงที่
หรือ ผลตอบสนองของยานพาหนะเข้าสู่สภาวะเสถียร จากผลของค่าความแปรปรวน ทำการคำนวณ
ค่า RMS ความเร่งในแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร และ พิจารณาตามมาตรฐาน ISO 2631 พบว่า
ผู้โดยสารยังรู้สึกสะดวกสบาย ดังนั้น ค่า RMS ความเร่งในแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร
อาจจะสูงถึงระดับที่ผู้ใช้งานพาหนะรู้สึกไม่สะดวกสบาย ด้วยอิทธิพลของค่าความขรุขระ
ระดับพื้นผิว

2. ผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน พบว่า โครงสร้างมีการสั่นสะเทือนตลอดเวลา
และ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนทางพลวัต มากกว่า
การสั่นสะเทือนทางสถิต โดยพิจารณาในรูปของค่าเฉลี่ยของ DAF ของระยะโก่งกึ่งกลางคาน และ
โมเมนต์กึ่งกลางคาน มีค่าสูงสุด เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 350 กม. ต่อ ชม. และ
สูงกว่ามาตรฐาน AASHTO และ ถ้าความยาวของคานเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ ค่าเฉลี่ยของ DAF
ของระยะโก่งกึ่งกลางคาน และ โมเมนต์กึ่งกลาง ลดลง สำหรับค่าความแปรปรวนของโครงสร้าง
พื้นฐาน พบว่า ค่าความแปรปรวนจะไม่เข้าสู่สภาวะเสถียร และ ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วย
ความเร็ว 150 กม. ต่อ ชม. ค่าความแปรปรวนมีค่าสูงสุด และ มีลักษณะการขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง

3. วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปร ระบบพื้นผิว ระบบยานพาหนะ ระบบโครงสร้างพื้นฐาน และ ระบบคู่ควมยานพาหนะต่อโครงสร้างพื้นฐาน ส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 และการเพิ่มลำดับที่ของฟังก์ชันโพลิโนเมียล จะช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเพิ่มขึ้น หรือ ตัวแปรอิสระของแต่ละระบบ สามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตามผลตอบสนอง ของยานพาหนะ และ ของโครงสร้างพื้นฐานได้มากขึ้น

4. ผลตอบสนองจากสมการถดถอย แตกต่างจากผลตอบสนองจากการทดลองเล็กน้อย โดยส่วนใหญ่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับต่ำ แต่มีบางส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง เนื่องจาก ผลของช่วงห่างค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ ในแต่ละกลุ่ม ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95%

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ส่วนใหญ่เน้นการศึกษาถึงผลตอบสนองของยานพาหนะ และ ของโครงสร้างพื้นฐานในแนวดิ่ง ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ผลตอบสนองของยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐานในแนวด้านข้าง เนื่องจาก ขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่จะก่อให้เกิดผลตอบสนองทั้งแนวดิ่ง และ แนวด้านข้าง และ เมื่อรวมผลตอบสนองที่เกิดขึ้นทั้งสองแนว จะก่อให้เกิดผลตอบสนองโดยรวม และ เพิ่มความแม่นยำในการหาผลตอบสนองที่เกิดขึ้นของยานพาหนะ และ ของโครงสร้างพื้นฐาน

2. จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ทำให้ทราบถึงความสำคัญของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นตลอดเวลา และ ควรทำการศึกษารูปแบบการสั่นสะเทือนของระบบอื่น ยกตัวอย่าง การศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลภายในโรงงาน โดยเฉพาะ ค่าความรู้สึกของผู้ใช้เครื่องจักรกล ที่ส่งผลกระทบต่อ ร่างกาย และ จิตใจ ของผู้ปฏิบัติงาน เพราะ ค่าความถี่บางค่าจะก่อให้เกิดการสั่นพ้องขึ้นต่อผู้ใช้งาน และ อาจจะนำมาซึ่งความเสียหายต่อชิ้นส่วนภายในเครื่องจักรกลโรงงานได้

3. การเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม นับว่ามีความสำคัญในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของยานพาหนะต่อโครงสร้าง แต่ในระบบรถไฟความเร็วสูง ทำการศึกษาในรูปแบบจำลอง เนื่องจาก โครงการดังกล่าวยังไม่เริ่มดำเนินการก่อสร้าง ในประเทศไทย ดังนั้น ควรทำการศึกษาแบบจำลองยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ของ หน่วยงาน การรถไฟแห่งประเทศไทย รถไฟฟ้ามหานคร และ รถไฟฟ้าบีทีเอส เพื่อเป็นข้อมูลในการ นำไปใช้ออกแบบระบบขนส่งมวลชนระบบรางต่อไป

บรรณานุกรม

- กรมทางหลวง. (2545). การสำรวจความเรียบของถนนโดยเครื่องมือ Bump Integrator. สำนัก
วิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง.
- ฐาวัตรน์ จังชัยศิริวัฒนา. (2545). ผลกระทบของความขรุขระของผิวทางที่มีต่อพลวัตของแรง
กระทำที่เพลลาของรถบรรทุก. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ทรงศิริ แต่สมบัติ. (2548). การวิเคราะห์การถดถอย (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธีระศักดิ์ อุรจนาพันธ์. (2546). ความน่าจะเป็นและสถิติประยุกต์ เล่ม 2. กรุงเทพฯ: สกายบุ๊กส์.
- ปฤษฎ์ ศีตะปิ่นย, เอกสิทธิ์ ไม้วัฒนา และ สมชาย ชูชีพสกุล. (2548). ความสำคัญของความ
ขรุขระพื้นผิวต่อยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐาน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา
แห่งชาติครั้งที่ 10, SIE, p. 40-45.
- ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ, ปิฎภูมิ จันทรมหา และ เอกลักษณ์ ประเสริฐพรศรี. (2545). การ
วิเคราะห์โครงสร้างสำหรับน้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่โดยใช้เส้นอิทธิพล. วิทยานิพนธ์
วศ.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- พิษณุ เจียวคุณ. (2548). การวิเคราะห์การถดถอย. เชียงใหม่: ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. (2543). คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์.
กรุงเทพฯ: อินโฟเพรส.
- ราโอ, สิงค์จิเรฐ เอส. (2545). การสันสะท้อนทางกล. (กนต์ธร ชำนิประศาสน์, ผู้แปล).
กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า. (ต้นฉบับพิมพ์ในปี ค.ศ. 2002).
- วิรัช พานิชวงศ์. (2549). การวิเคราะห์การถดถอย (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำรา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วีระ ตณศิริชัยยา. (2542). วิธีวิเคราะห์ปัญหาการสั่นไหวในเชิงปฏิสัมพันธ์ของระบบพาหนะและ
โครงสร้างที่รองรับ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

- 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. & Chucheeepsakul 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-ความขรุขระ

Vol. 7 pp405-410

-การศึกษาพารามิเตอร์ในระบบรางรถไฟความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Vol. 7 pp399-404