

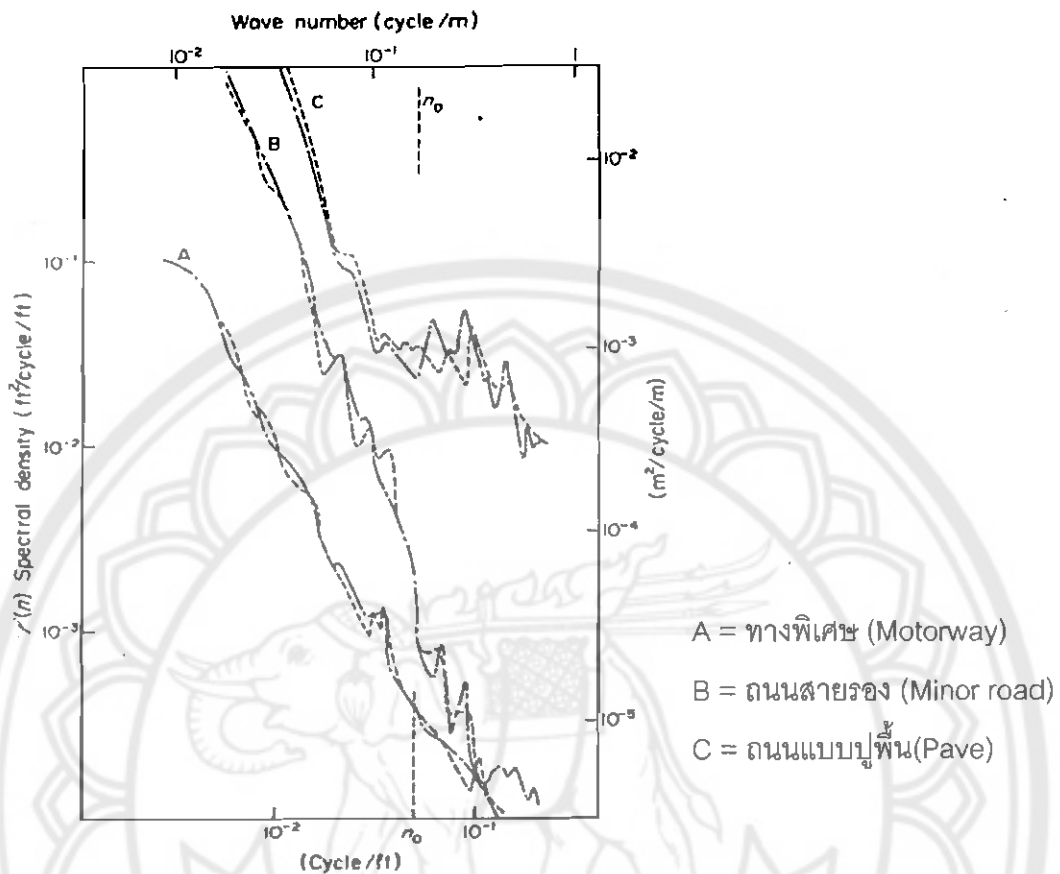
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาผลกระทบจากความขรุขระของพื้นผิวถนนต่อระบบยานพาหนะโครงสร้างจะประกอบด้วยการศึกษาความขรุขระของพื้นผิวถนนและสมการการประมาณค่าความขรุขระ การศึกษาแบบจำลองยานพาหนะและแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐานหรือโครงสร้างสะพาน การศึกษาวิธีวิเคราะห์โหมดอล (Modal Analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

การศึกษาความขรุขระของพื้นผิวถนนและสมการการประมาณค่าความขรุขระ

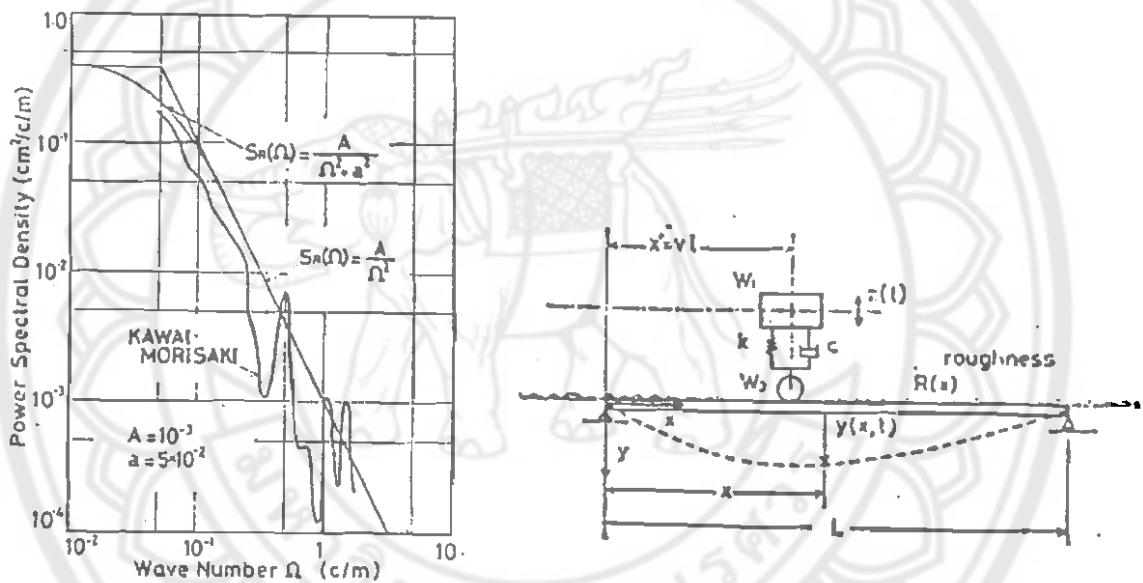
การศึกษาความขรุขระของพื้นผิวถนนนั้นตัวอย่างข้อมูลในส่วนที่ได้มาจากการเก็บตัวอย่างข้อมูลจากพื้นผิวถนนจริงโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความขรุขระโดยตรง ในงานวิจัยของ Dodds และ Robson (1973) ได้ให้คำอธิบายถึงความขรุขระของพื้นถนนแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างของพื้นผิวถนนที่ได้การศึกษานั้นอาจพิจารณาได้ว่าพื้นผิวถนนโดยทั่วไปจะมีลักษณะกรรมวิธีการผสมแบบเกาส์เซียนซึ่งได้ทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์โดยใช้อุปกรณ์วัดระดับ ซึ่งได้ความหนาแน่นสเปคตรัลดังแสดงในภาพ 5



ภาพ 5 แสดงความหนาแน่นสเปคตรัล (Spectral Densities) ที่ใช้ในงานวิจัยของ Dodds และ Robson (1973)

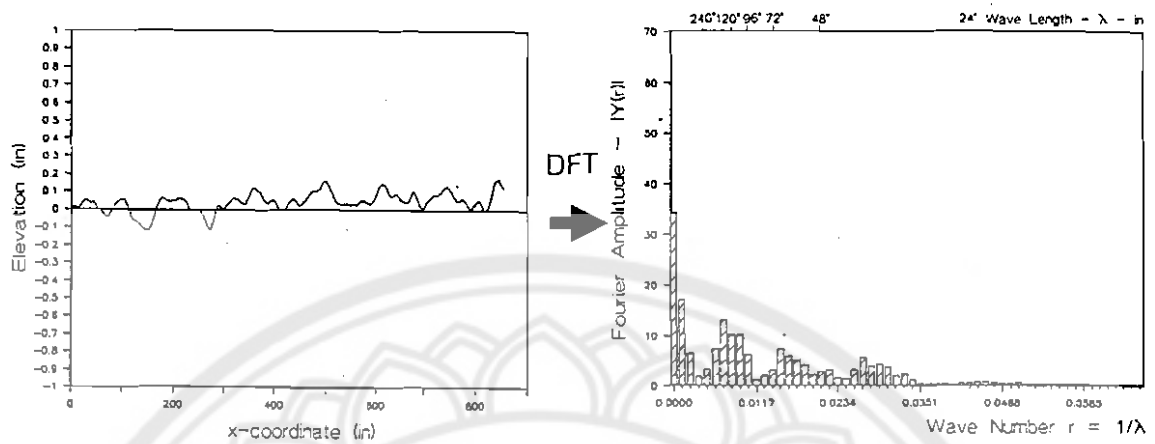
ในส่วนตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองของความขรุขระ ในงานวิจัยของ Hullender (1975) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับความขรุขระโดยได้ทำการพิสูจน์และวิเคราะห์สมการของความขรุขระในรูปของความหนาแน่นสเปคตรัล (Spectral Density) เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการออกแบบและก่อสร้าง ซึ่งรูปแสดงสเปคตรัลความหนาแน่นที่แสดงไว้สอดคล้องกับการศึกษาสมการการประมาณค่าข้อมูลความขรุขระจากที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันในโดเมนเวลา หรือระยะทางให้อยู่ในรูปฟังก์ชันในโดเมนความถี่หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากำลังสเปคตรัลของความหนาแน่น (Power Spectral Density; PSD.) โดยใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform)

ในงานวิจัยของ Okabayashi, T. (1981) ได้การศึกษาความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์โครงสร้างบนพื้นฐานของสมการค่าความขรุขระอนุพันธ์แบบสุ่ม ซึ่งความขรุขระของพื้นถนนจะแสดงโดยกรรมวิธีการสุ่มแบบเกาส์เซียนโดยจะได้ค่ากำลังของฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล โดย $S(\Omega) = A/\Omega^2$ ดังแสดงในภาพ 6 ทำการวิเคราะห์โดยยานพาหนะมีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) เคลื่อนที่ผ่านสะพานที่มีค่าความขรุขระจากสมการอนุพันธ์แบบสุ่ม โดยได้วิเคราะห์ถึงพฤติกรรมพลวัตของสะพานภายใต้การเคลื่อนตัวของยานพาหนะที่ถูกกระตุ้นโดยความขรุขระของพื้นผิวสัญจร



ภาพ 6 แสดงค่าฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัลของความขรุขระของพื้นถนนและแบบจำลองระบบที่ใช้ในงานวิจัยของ Okabayashi, T. (1981)

งานวิจัยของ Gasparini, Petrou และ Ozer (1990) ได้ทำการศึกษารายละเอียดความยาวคลื่นของพื้นคอนกรีตโดยใช้วิธีแปลงรูปฟูเรียร์แบบแยกส่วน (Discrete Fourier Transform; DFT) โดยได้แสดง DFTs ของรายละเอียดความแตกต่างของระดับพื้นคอนกรีตจริง และยังได้ทำการคำนวณหาพลวัตตอบสนองของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ผ่านบนพื้นคอนกรีตนั้นด้วย โดยผลที่ได้นั้นจะอาจแสดงถึงขีดจำกัดผลตอบสนองของยานพาหนะในระดับที่ยอมรับได้ ดังแสดงข้อมูลตัวอย่างในภาพ 7



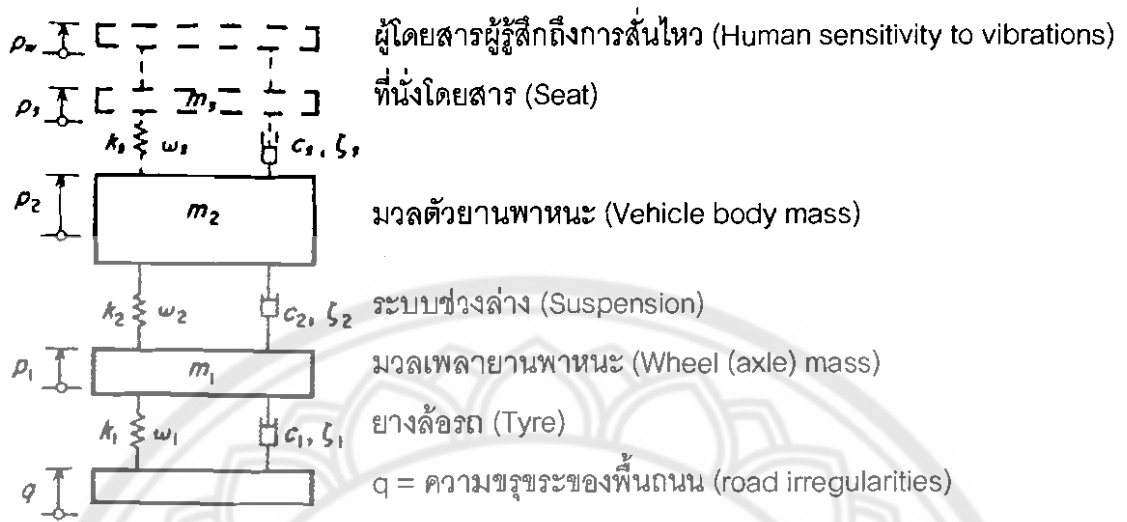
ภาพ 7 แสดงตัวอย่างการแปลงค่าความขรุขระของพื้นคอนกรีตจากที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันในโดเมนระยะทางให้อยู่ในรูปฟังก์ชันในโดเมนความถี่โดยใช้วิธีแปลงรูปฟูเรียร์แบบแยกส่วน (Discrete Fourier Transform; DFT) ในงานวิจัยของ Gasparini, Petrou และ Ozer (1990)

ในงานวิจัยของ Ahlin, K. และ Granlund, J. (2001) ได้ทำการศึกษาดัชนีชี้วัดความขรุขระของพื้นผิวทาง IRI และ ศึกษามาตรฐาน ISO 2631 ซึ่งเป็นค่ากำหนดวัดการสั่นสะเทือนของยานพาหนะ ที่มีผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายของผู้สัญจร จากผลการศึกษาพบว่า IRI และ ISO 2631 สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดคุณภาพของพื้นผิวทาง การบำรุงรักษาพื้นผิวทาง และลดผลกระทบต่อผู้ใช้ยานพาหนะ

การศึกษาแบบจำลองยานพาหนะและแบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน

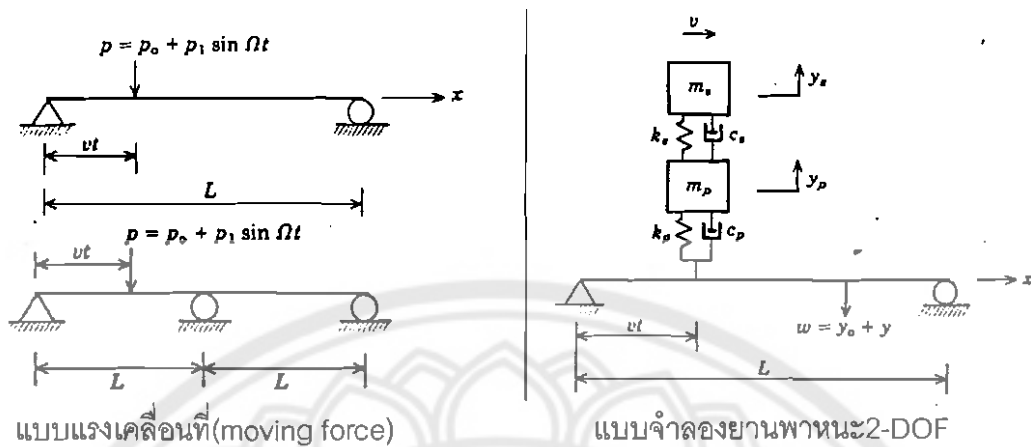
การศึกษาในส่วนของยานพาหนะกับโครงสร้างพื้นฐานนั้นจะใช้วิธีการสร้างแบบจำลองของระบบซึ่งระบบของยานพาหนะนั้นจะเชื่อมต่อกับระบบโครงสร้างสะพาน ในงานวิจัยของฐาวรัตน์ จังชัยศิริวัฒนา (2545) ได้ทำการศึกษามลกระทบเนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวทางแบ่งเป็นผิวทางใหม่ ผิวทางเก่า และผิวทางที่มีความเสียหาย ในรูปของ IRI แสดงในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ โดยกำหนดน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุกที่ 20-40 ตัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 20-160 กม./ชม. แสดงผลตอบสนองในรูป DAF (Dynamic Amplification Factor) จากผลการศึกษาพบว่าค่าความเร็ววิกฤตอยู่ช่วงประมาณ 100-140 กม./ชม. และยังพบว่า การตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของรถบรรทุกมีแนวโน้มลดลงต่ำลงเมื่อเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่หากพิจารณาถึงการตอบสนองโดยรวมเทียบกับการตอบสนองเชิงสถิติพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยของ Dahlberg (1978) ได้ทำการศึกษาถึงความสะดวกสบายและการยึดหยุ่นของยานพาหนะบนพื้นผิวถนนแบบสุ่ม ซึ่งได้ใช้วิธีการสร้างแบบจำลองของยานพาหนะมีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับสอง (2-DOF) บนความขรุขระของพื้นถนนดังภาพ 8 โดยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับพื้นผิวสัญญาณจะแปรผันตรงโดยฟังก์ชันโยกย้าย (transfer function; $H(\omega)$) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แสดงกราฟค่าความถี่ธรรมชาติและค่าความหน่วงของระบบรองรับห้องโดยสารที่เหมาะสมโดยพิจารณาถึงการรับรู้ถึงการสั่นไหวของผู้โดยสารจากมาตรฐาน ISO 2631 เพื่อใช้ประกอบการออกแบบระบบรองรับห้องโดยสารของยานพาหนะ



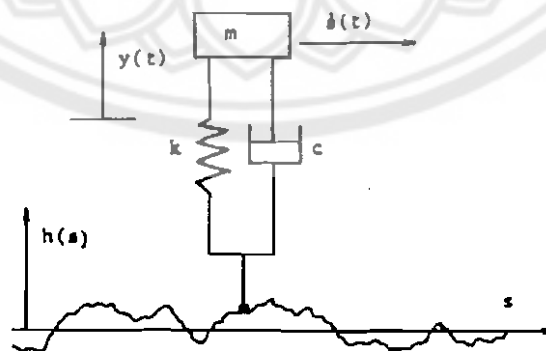
ภาพ 8 แสดงแบบจำลองของยานพาหนะมีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับสอง (2-DOF) บนความขรุขระของพื้นถนน (road irregularities) ในงานวิจัยของ Dahlberg (1978)

ในงานวิจัยของ Cai. et al. (1994) ได้ทำการศึกษาผลกระทบทางพลวัตระหว่างยานพาหนะความเร็วสูงกับผิวทางจราจรโดยอ้างอิงพื้นฐานสำหรับรถไฟฟ้ามะเหล็กความเร็วสูง (magnetically levitated; maglev.) โดยในงานวิจัยได้แสดงแบบจำลองยานพาหนะเป็น 2 แบบคือ กรณีเป็นแรงเคลื่อนที่ (moving force) ผ่านแบบจำลองพื้นทางเป็นคานช่วงเดียวและคานสองช่วงด้วยความเร็วคงที่ โดยได้แสดงผลค่าอัตราส่วนการโก่งตัวของคาน (displacement ratio) และค่าการโก่งตัวของคานสูงสุด (maximum displacement) ของแต่ละช่วงความเร็ว กับกรณีแบบจำลองยานพาหนะมีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับสอง (2-DOF) เคลื่อนที่ผ่านคานช่วงเดียวด้วยความเร็วคงที่ โดยใช้วิธีวิเคราะห์หิมอดอล ในกรณีนี้ได้แสดงค่าอัตราส่วนการโก่งตัวของสะพานและยังได้แสดงค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของอัตราส่วนความเร่งสูงสุดทางแนวตั้งของยานพาหนะด้วย



ภาพ 9 แสดงแบบจำลองของระบบยานพาหนะโครงสร้างรูปแบบต่างๆที่ทำการศึกษา
ในงานวิจัยของ Y Cai. et al. (1994)

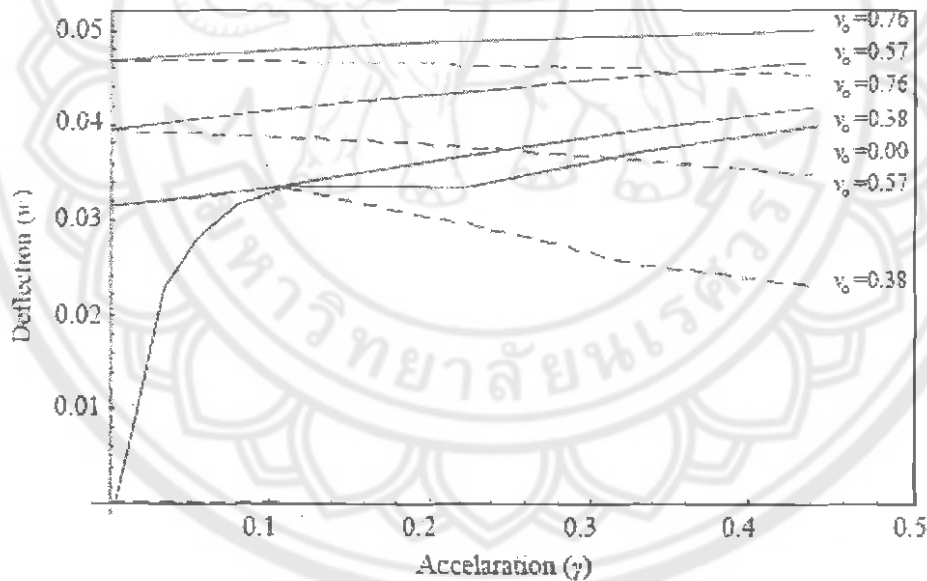
ในการศึกษาเกี่ยวกับความเร็วของยานพาหนะ (velocity of vehicle) ที่เคลื่อนที่ผ่านระบบ
โครงสร้างสะพานนั้นจะทำการศึกษาทั้งระบบยานพาหนะความเร็วคงที่และมีการเปลี่ยนแปลง
ความเร็วโดยค่าความเร่งหรือความหน่วงมีค่าคงที่ (acceleration or deceleration is constant)
ในงานวิจัยของ Hammond และ Harrison (1981) ได้ทำการศึกษาถึงผลตอบสนองที่ไม่คงที่ของ
ยานพาหนะมีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับหนึ่ง (1-DOF) ที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวขรุขระในกรณี
ความเร็วคงที่และกรณีความเร็วไม่คงที่โดยมีที่ความเร่งคงที่ $v = at$ และความเร่งเป็นรูปไซน์เพื่อ
แสดงการเปลี่ยนแปลงตอบสนองโดยปกติที่ค่าอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio ; ζ)
แตกต่างกันไป



ภาพ 10 แสดงแบบจำลองของยานพาหนะมีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับหนึ่งในงานวิจัยของ
Hammond และ Harrison (1981)

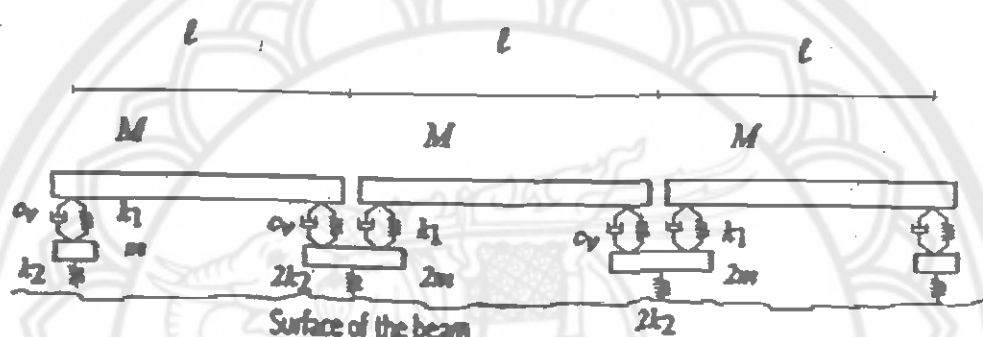
การศึกษาวิธีวิเคราะห์โหมดอล (Modal Analysis)

การศึกษาวิธีการวิเคราะห์โหมดอลนี้เนื่องจากในโหมดลำดับที่สูงขึ้นค่าที่เกิดจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างน้อยลงจึงพิจารณารูปร่างโหมดของสะพานใน 10 โหมดแรกเท่านั้น ในงานวิจัยของ Michaltsos (2002) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตของคานช่วงเดียวภายใต้การเคลื่อนที่ของแรงกระทำที่ความเร็วแตกต่างกัน แบบจำลองของยานพาหนะที่ใช้ในการวิจัยนี้มี 3 แบบคือ แรงกระทำจุดเดียว แรงกระทำ 2 จุด และ แรงกระทำ 2 จุดแบบมีตัวหน่วง ซึ่งสรุปได้ว่าแรงกระทำ 2 จุด ให้ความแม่นยำกว่าแรงกระทำจุดเดียว ค่าตัวหน่วง (Damping) ของยานพาหนะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการโก่งตัวของคานน้อยมาก และ ค่าความเร็ว-ความเร่งมีความสำคัญต่อค่าการโก่งตัวของสะพานดังได้แสดงค่าการโก่งสูงสุดที่ความเร็วต้นและความเร่งแตกต่างกันดังแสดงในภาพ 11



ภาพ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานกับค่าความเร่งที่ความเร็วต้นแตกต่างกัน ในงานวิจัยของ Michaltsos (2002)

ในงานวิจัยของ Seetapan และ Gasparini (2002) ได้ทำการศึกษาผลกระทบทางพลวัตของสะพานเนื่องจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ของยานพาหนะความเร็วสูง โดยแบบจำลองของยานพาหนะจำนวน 3 คันมีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับสิบ (10-DOF) ดังแสดงในภาพ 12 ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์โมดอลเพื่อหาค่าความคาดหวังและค่าความแปรปรวน (expected and covariance value) ที่เป็นผลตอบสนองต่างๆของสะพานเพื่อเป็นข้อมูลในการหาความน่าจะเป็นที่ผลตอบสนองมากกว่าค่า DAF (Dynamic Amplification Factor)

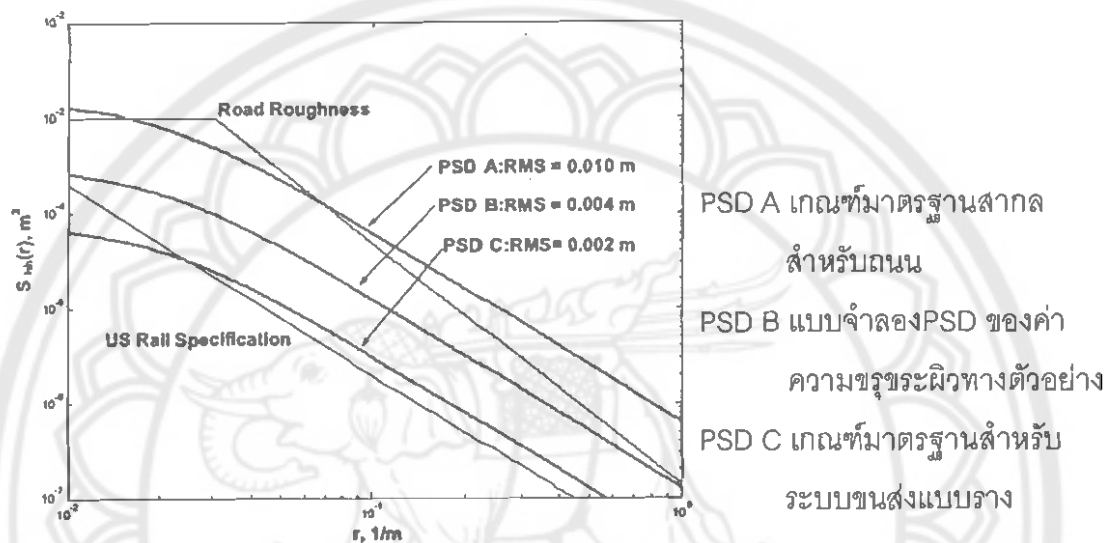


ภาพ 12 แสดงแบบจำลองของยานพาหนะมีลำดับชั้นอิสระเท่ากับสิบ (10-DOF) ในงานวิจัยของ Seetapan และ Gasparini (2002)

ในงานวิจัยของ ปทุษทัตว์ ศีตะบันย์ เอกสิทธิ์ ไม้วัฒนา และ สมชาย ชูชีพสกุล.(2548) ได้ศึกษาความขรุขระพื้นผิว ระบบยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐานด้วยวิธีวิเคราะห์โมดอล โดยใช้แบบจำลองยานพาหนะมีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับสอง (2-DOF) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ผ่านสะพานช่วงเดียวที่มีค่าความขรุขระแตกต่างกัน 3 ค่า ซึ่งค่าความขรุขระได้จากการเก็บข้อมูลความขรุขระพื้นผิวถนนโดยเครื่องบีมอินทิเกรเตอร์ในเทอมของ IRI (International Roughness Index) นำมาแปลงรูปฟูเรียร์ จากฟังก์ชันในโดเมนเวลาหรือระยะทางให้อยู่ในรูปฟังก์ชันในโดเมนความถี่หรือที่เรียกว่าฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังสเปกตรัล (Power Spectra Density Function) ดังที่แสดงในสมการ 2.1

$$Y(r) = \int_{-\infty}^{\infty} y(x)e^{-2\pi irx} dx \quad (2.1)$$

จากนั้นนำผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะทั้งค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนที่ได้มา คำนวณหาค่าเฉลี่ย Root mean square, *RMS* นำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ISO 2631 เพื่อบ่งบอกความรู้สึกของผู้สัญจร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลอง PSD ของค่าความขรุขระผิวทางตัวอย่างดังแสดงในภาพ 13 ซึ่งนำค่าความขรุขระนี้มาใช้ในการวิจัยต่อไป



ภาพ 13 แสดง PSD ของแบบจำลองโปรไฟล์ความขรุขระแบบต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยของ ปฤษัทศร์ คีตะปันย์ เอกสิทธิ์ ไม้วัฒนา และ สมชาย ชูชีพสกุล. (2548)

ในงานวิจัยของ Seetapan, P., Maiwattana, A. และ Chucheepsakul, S. (2005) ได้ ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ 2 เพลา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่บนโครงสร้าง พื้นฐานสะพาน 2 ช่วง ที่ค่าความขรุขระมาตรฐานสำหรับถนนและระบบราง จัดรูปสมการ เคลื่อนที่ ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย (dimensionless parameter) โดยคำนวณค่าการโก่ง โมเมนต์ แรงเฉือน และค่าความถี่ของสะพาน ในรูปแบบค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวน ผลการศึกษาพบว่าอัตราความมาถึงของล้อ มีค่าเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติลำดับที่ 1 และ 2 เมื่อค่า ระยะห่างระหว่างเพลาคือความยาวของคานสอดคล้องกับค่าความเร็วของยานพาหนะ จะส่งผลให้ ค่าแฟคเตอร์กำลังขยายเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Amplification Factor, DAF) สูง และ ค่าความ แปรปรวนขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง สำหรับการเพิ่มจำนวนเพลายานพาหนะสามารถลดค่า ความถี่ของสะพานที่จุดกึ่งกลาง และค่าความแปรปรวนของสะพานได้