

บทที่ 3 หลักการออกแบบโค้งแนวตั้งบริเวณเชิงลาดสะพาน

3.1 บทนำ

แนวทางแก้ปัญหาการทศตวรรษที่แตกต่างมากบริเวณเชิงลาดสะพานซึ่งก่อสร้างบนดินฐานรากอ่อนนั้น วิศวกรจำเป็นต้องคำนึงถึงช่วงปรับระดับการทศตวรรษ (Transition Zone) ที่แตกต่างระหว่างสะพานและถนนอย่างเหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 3.1 การกำหนดความยาวของช่วงปรับระดับการทศตวรรษ (Transition Length, L_t) บริเวณคอสะพาน ควรคำนึงถึงตัวแปรสำคัญ 3 ประการ (วิชาญ, 2546) คือ

1) ความปลอดภัยในการขับขี่ ตามเกณฑ์การออกแบบความโค้งทางด้านเรขาคณิต (เช่น Vertical Curve, Stopping Sight Distance) ช่วงปรับระดับการทศตวรรษควรมีความยาวมากกว่าเกณฑ์ระยะหยุดปลอดภัยบนทาง ขึ้น-ลง เนิน (Stopping Sight Distance) และค่าความชันสูงสุด (Maximum Gradient) ต้องไม่เกิน 15%

2) ความสะดวกสบายในการขับขี่ ช่วงปรับระดับการทศตวรรษควรมีความยาวเหมาะสม เพื่อไม่ส่งผลให้ผู้ขับขี่ทางต้องชะลอความเร็ว เกิดการขาดตอนและไม่สะดวกสบายขณะขึ้น-ลงสะพาน

3) งบประมาณการก่อสร้าง

3.2 การวิเคราะห์ระยะหยุดปลอดภัยบนทาง ขึ้น-ลง เนิน (Stopping Sight Distance)

ระยะหยุดโดยปลอดภัย (Stopping Sight Distance) คือระยะทางที่สั้นที่สุดซึ่งผู้ขับขี่สามารถมองเห็นวัตถุบนพื้นทางขณะขึ้น-ลง สะพาน โดยที่ผู้ขับขี่สามารถหยุดรถได้อย่างกะทันหัน และปลอดภัย ปัจจัยสำคัญที่กำหนดระยะหยุดโดยปลอดภัย คือ เวลาตอบสนองของผู้ขับ, ระดับความสูงจากตาผู้ขับ, ความสูงของวัตถุบนถนน, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานผิวถนน, อัตราการลดความเร็วของรถยนต์, และมุมลาดเอียงของถนน ตารางที่ 3.1 แสดงระยะหยุดโดยปลอดภัย สำหรับความเร็วต่างๆ ตามมาตรฐาน AASHTO (1990, 1994)

ความลาดชันของถนนส่งผลกระทบต่อระยะหยุดโดยปลอดภัย เช่น ทางขึ้น ความลาดชันลดลงและทางลง ความลาดชันเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ระยะมองเห็นของผู้ขับขี่ขณะทางลงจะมีค่ามากกว่าขณะทางขึ้น ซึ่งจะชดเชยกับระยะการเบรกของรถยนต์ และในกรณีโค้งสมมาตร ระยะหยุดโดยปลอดภัยจะใช้ค่าเดียวกันทั้งทางขึ้นและลงเนิน ยกเว้นเนินที่มีความลาดชันไม่สมมาตร (ค่าความลาดชันทางขึ้นไม่เท่ากับค่าความลาดชันทางลง) ค่าระยะหยุดโดยปลอดภัยแนะนำให้ใช้ตามตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความยาวของทางโค้งแนวตั้ง (Vertical Curve) สำหรับความเร็วรถค่าต่างๆ หาได้จากภาพที่ 3.2

โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการทรดตัวบริเวณคอสะพาน (โครงการวิจัยต่อเนื่อง)

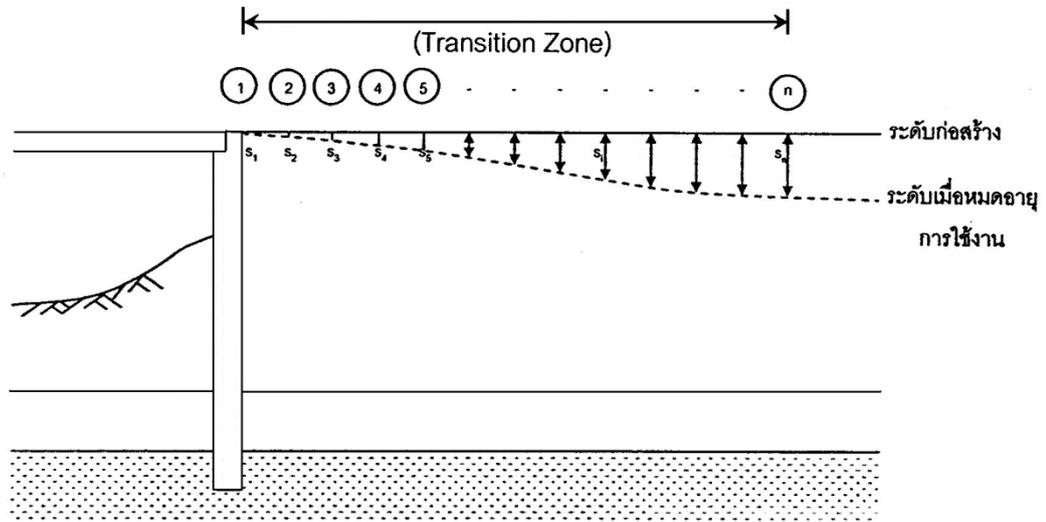
สำหรับการก่อสร้างโครงสร้างปรับการทรดตัวของสะพานทางหลวงในประเทศไทยนั้น เมื่อพิจารณาเงื่อนไขเกณฑ์ระยะหยุดปลอดภัยบนทาง ขึ้น-ลง เนิน ทำให้ช่วงปรับระดับการทรดตัวมีความยาวเกินกว่างบประมาณที่ได้รับ ประกอบกับราคาก่อสร้างโครงสร้างปรับการทรดตัว เช่น Bearing Unit การใช้วัสดุมวลเบา และ เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนฐานรากมีราคาต่อหน่วยสูง จึงมักไม่สามารถก่อสร้างช่วงปรับระดับการทรดตัวตามเกณฑ์ระยะหยุดปลอดภัยบนทาง ขึ้น-ลง เนินได้ (วิชาญ, 2546)

ตารางที่ 3.1 ระยะหยุดโดยปลอดภัยกรณีลาดชันทางขึ้นและลงเท่ากัน (AASHTO, 1990, 1994)

ความเร็วในการออกแบบ (km/hr)	ระยะหยุดโดยปลอดภัย (m)
30	35
40	50
50	65
60	85
70	105
80	130
90	160
100	185
110	220
120	250

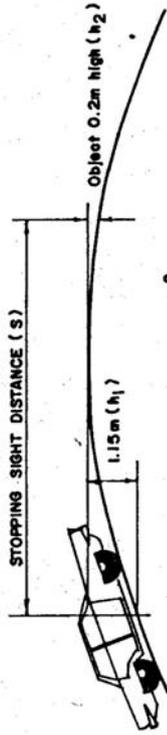
ตารางที่ 3.2 ระยะหยุดโดยปลอดภัยกรณีลาดชันทางขึ้นและลงไม่เท่ากัน (AASHTO, 1990, 1994)

ความเร็วในการออกแบบ (km/hr)	ระยะหยุดโดยปลอดภัย (m)					
	ทางลง			ทางขึ้น		
	3%	6%	9%	3%	6%	9%
50	70	70	75	65	60	60
60	90	95	100	80	80	75
70	110	120	125	100	100	95
80	140	145	155	125	120	115
90	165	175	190	150	145	140
100	195	210	225	175	170	160
110	230	245	265	205	195	190



ภาพที่ 3.1 การทรุดตัวบริเวณ Transition Zone ซึ่งต้องคำนึงถึงในการออกแบบ (วิชาญ, 2546)

STOPPING SIGHT DISTANCE 115 m. to 0.2m.



PART OF TABLE 236

Design Speed (Km/h)	Stopping Sight Distance (metres)
40	40
50	60
60	80
70	100
80	120
90	150
100	180
110	210
120	250

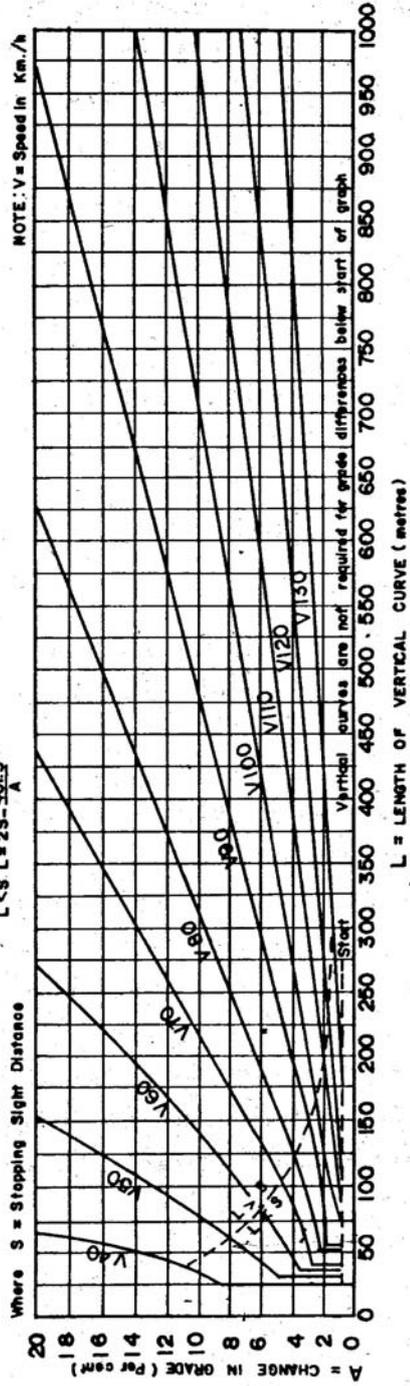
For $L > S$ $L = \frac{S^2 A}{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}$

$L < S$ $L = 2S - \frac{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A}$

Where $h_1 = 1.15m$ & $h_2 = 0.2m$

& For $L > S$ $L = \frac{S^2 A}{461.5} = KA$ where $K = \frac{S^2}{461.5 A}$

$L < S$ $L = 2S - \frac{461.5}{A}$



ภาพที่ 3.2 ระยะหยุด โดยปลอดภัยบนทางขึ้นเนิน เมื่อ $h_1 = 1.15$ m, $h_2 = 0.20$ m (จิรพัฒน์, 2529)

3.3 ความสะดวกสบายในการขับขี่ขณะขึ้น-ลงสะพาน

หลักการตรวจสอบคุณภาพหรือเกณฑ์การให้คะแนนความสะดวกสบายในการขับขี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ (1) การวิเคราะห์จากค่าระดับผิวทาง และ (2) การวิเคราะห์จาก Response-Type Road Roughness Measuring System (RTRRMS)

3.3.1 การวิเคราะห์จากค่าระดับผิวทาง

การวิเคราะห์จากค่าระดับผิวทาง เป็นการวิเคราะห์ความสะดวกสบายในการขับขี่จากข้อมูลระดับของผิวทาง (Road Profile) โดยที่ไม่จำเป็นต้องตรวจสอบโดยการนั่งบนรถจริงๆ และตรวจวัดการตอบสนองของผู้ขับขี่และรถยนต์ขณะวิ่งบนถนน

International Roughness Index (IRI)

ค่า IRI เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลสถิติของระดับผิวทาง ซึ่งบ่งชี้ถึงการตอบสนองหรือการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของรถยนต์ ซึ่งสัมพันธ์กับความสะดวกสบายของผู้ขับขี่ ข้อมูลระดับผิวทางถูกนำมาวิเคราะห์โดยโมเดลทางกลศาสตร์ ซึ่งจำลองพฤติกรรมของการตอบสนองของรถยนต์ ค่า IRI ได้เริ่มพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1979 โดย The National Cooperative Highway Research Program ได้เสนอแบบจำลอง “The Quarter-Car Model” ดังภาพที่ 3.3 และ ในปี ค.ศ. 1982 World Bank ได้สนับสนุนการศึกษา International Road Roughness Experiment และพัฒนาพารามิเตอร์ International Roughness Index (IRI) เพื่อใช้ตรวจสอบและจำแนกความขรุขระของผิวทาง IRI มีค่าตั้งแต่ 0 m/km ถึง 20m/km ซึ่งแสดงถึงผิวทางเรียบ และ ขรุขระมาก ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ในปี ค.ศ. 1999 Das et al. (1999) ร่วมกับ Louisiana Transportation and Research Center ได้นำค่า IRI มาใช้ในการกำหนดระดับความไม่ราบเรียบบริเวณเชิงลาดสะพาน โดยใช้รถบรรทุกหนัก 30,000 lbs ขับด้วยความเร็ว 65 ถึง 68 mile/hr ขึ้น-ลงสะพานจำนวน 65 สะพาน และจัดระดับความรู้สึกของผู้ขับขี่เทียบกับค่า IRI และกำหนดเกณฑ์ความสะดวกสบายในการขับขี่ขณะขึ้น-ลงสะพาน ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ IRI บริเวณเชิงลาดสะพานแสดงในภาพที่ 3.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า บริเวณ Approach Slab นั้น มีค่า IRI สูง และค่า IRI เพิ่มขึ้นเมื่อเวลายาวนานขึ้น

ข้อจำกัดของ IRI ในการประเมินความสะดวกสบายขณะขึ้นลงสะพาน

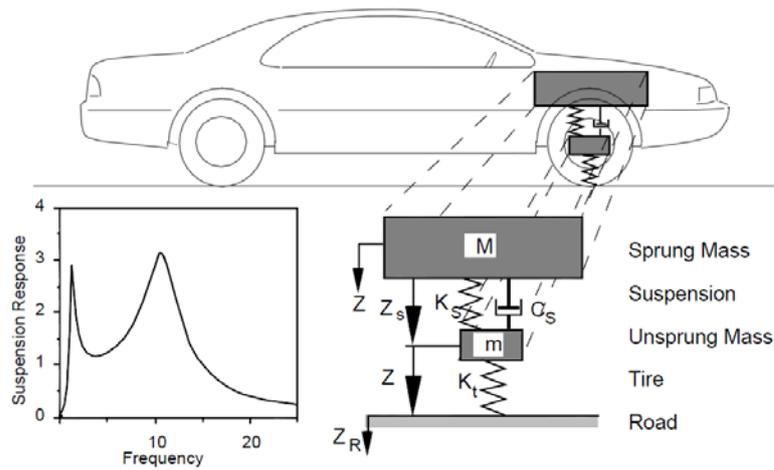
การวิเคราะห์หาค่า IRI นั้น ดำเนินใน Frequency Domain ซึ่งแปลงจาก Time Domain ที่ได้จากการสำรวจระดับผิวทางขณะรถยนต์แล่นผ่านในช่วงระยะทางหนึ่ง และสมมุติให้ความขรุขระของผิว

ทางเกิดขึ้นเหมือนกันซ้ำๆกัน โดยช่วงความยาวที่ใช้ในการคำนวณค่า IRI เท่ากับ 91.4 m (300 feet) นอกจากนี้การวิเคราะห์ที่ได้กรองค่าความถี่บางช่วงใน Frequency Domain ออก โดยกำหนดพิจารณาเฉพาะ ความถี่ซึ่งมีความยาวคลื่นระหว่าง 1.2 m ถึง 30 m เพื่อตัด Profile ถนนที่มีความถี่สูงจาก Micro Texture ของผิวทาง และความถี่ต่ำจากการทางขึ้น-ลงเนินหรือ ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้ใช้ทางดังแสดงในภาพที่ 3.6

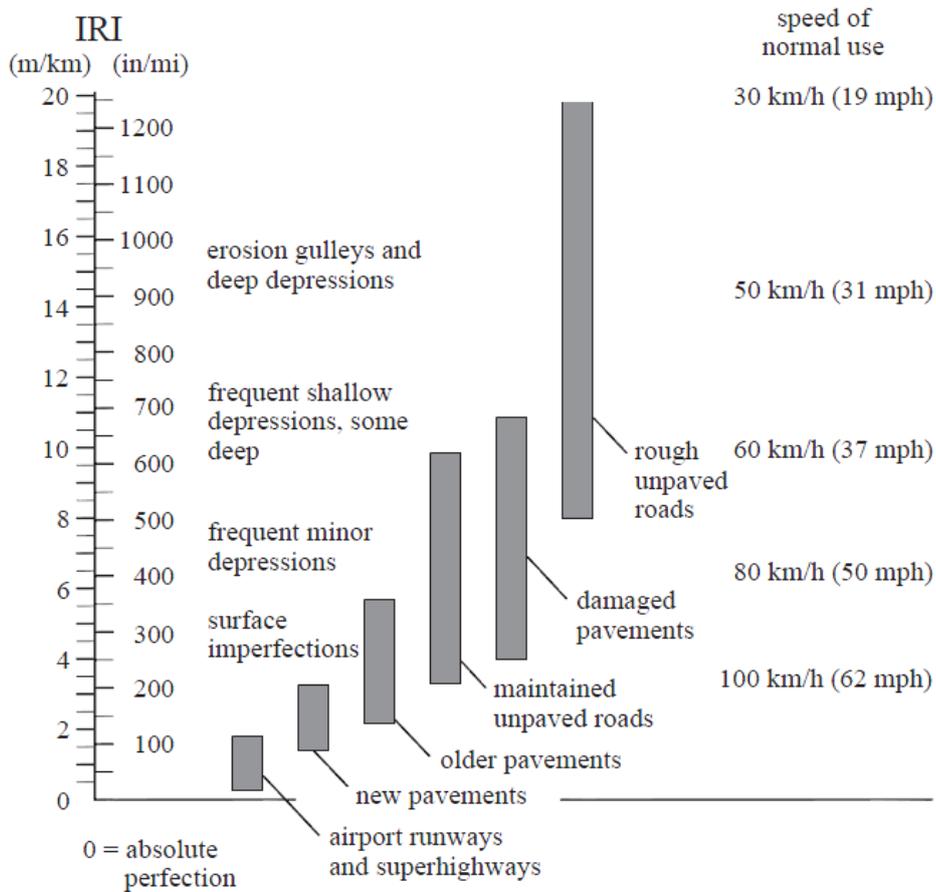
Martinez (2009) กล่าวว่า IRI เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมในการกำหนดความขรุขระขณะขึ้น-ลงสะพาน เนื่องจากช่วงที่พบความไม่ราบเรียบเกิดขึ้นในระยะสั้นๆ ซึ่งส่วนใหญ่น้อยกว่าความยาว 1.2 m และไม่ได้ถูกใช้ในการคำนวณ IRI นอกจากนี้ค่า Profile Grade ซึ่งแสดงความขรุขระบริเวณเชิงลาดสะพานเป็นแบบ Non-Steady-State หรือเกิดขึ้นเฉพาะที่เท่านั้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับสมมุติฐานว่าเกิดขึ้นซ้ำๆ หรือ Steady-State ซึ่งทำให้ผลที่ได้จากการแปลงข้อมูลจาก Time Domain เป็น Frequency Domain ไม่สามารถระบุปัญหาความขรุขระที่เกิดขึ้นเฉพาะที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ลักษณะความขรุขระบริเวณเชิงลาดสะพานซึ่งคล้าย Step Function นั้น เมื่อแปลผลใน Frequency Domain ยากต่อการแปลผล เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะความขรุขระที่คล้ายกับ Sinusoidal Function ตัวอย่างผลการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัด Profile Grade บริเวณเชิงลาดสะพานที่มีปัญหาแสดงในภาพที่ 3.8

ตารางที่ 3.3 Approach Slab Rating System พัฒนาโดย LTRC (Das et al., 1999)

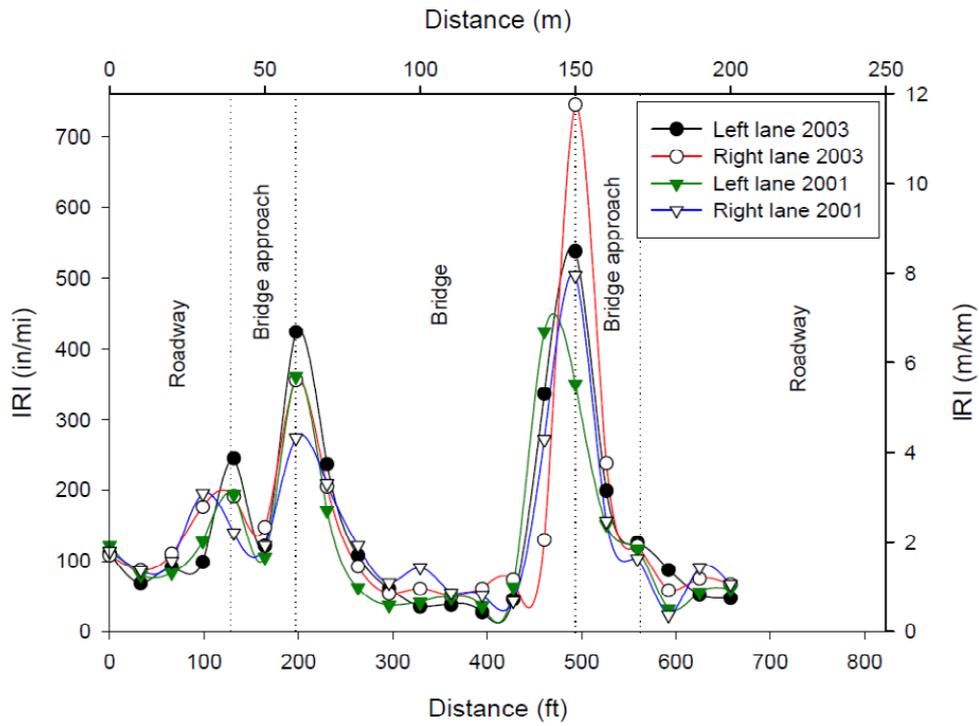
ค่า IRI (m/km)	ระดับความรู้สึกในการขับขี่ขณะขึ้น-ลงสะพาน
0 - 3.9	ดีมาก
4.0 - 7.9	ดี
8.0 - 9.9	ปานกลาง
10.0 - 11.9	แย่
มากกว่า 12	แย่มาก



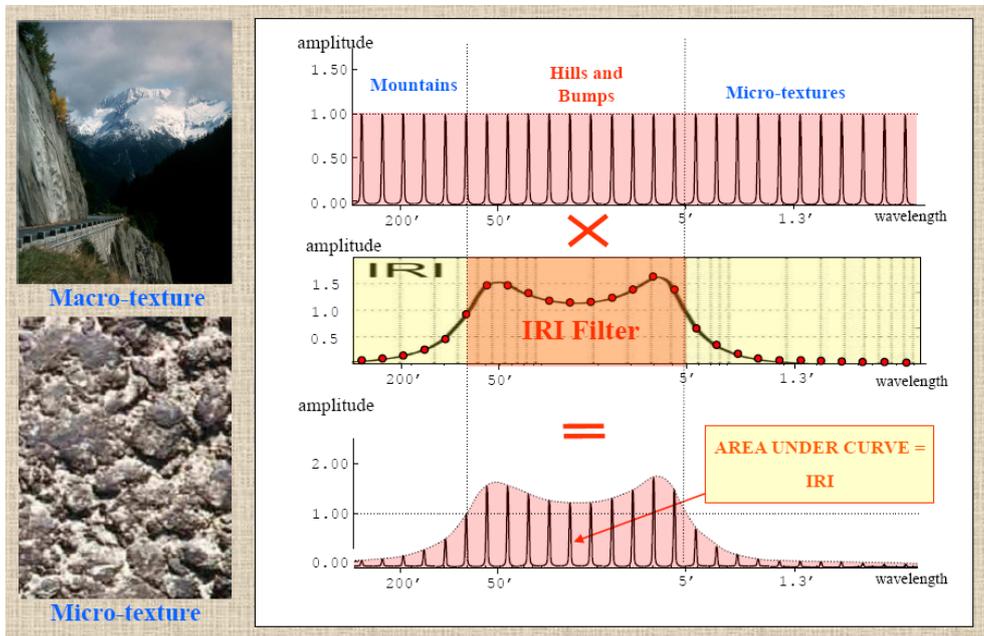
ภาพที่ 3.3 แบบจำลอง “The Quarter-Car-Model” (Gillespie, 1992)



ภาพที่ 3.4 การเปรียบเทียบค่า IRI และความสะดกสบายของผู้ขับขี่ (Sayer et al., 1986)

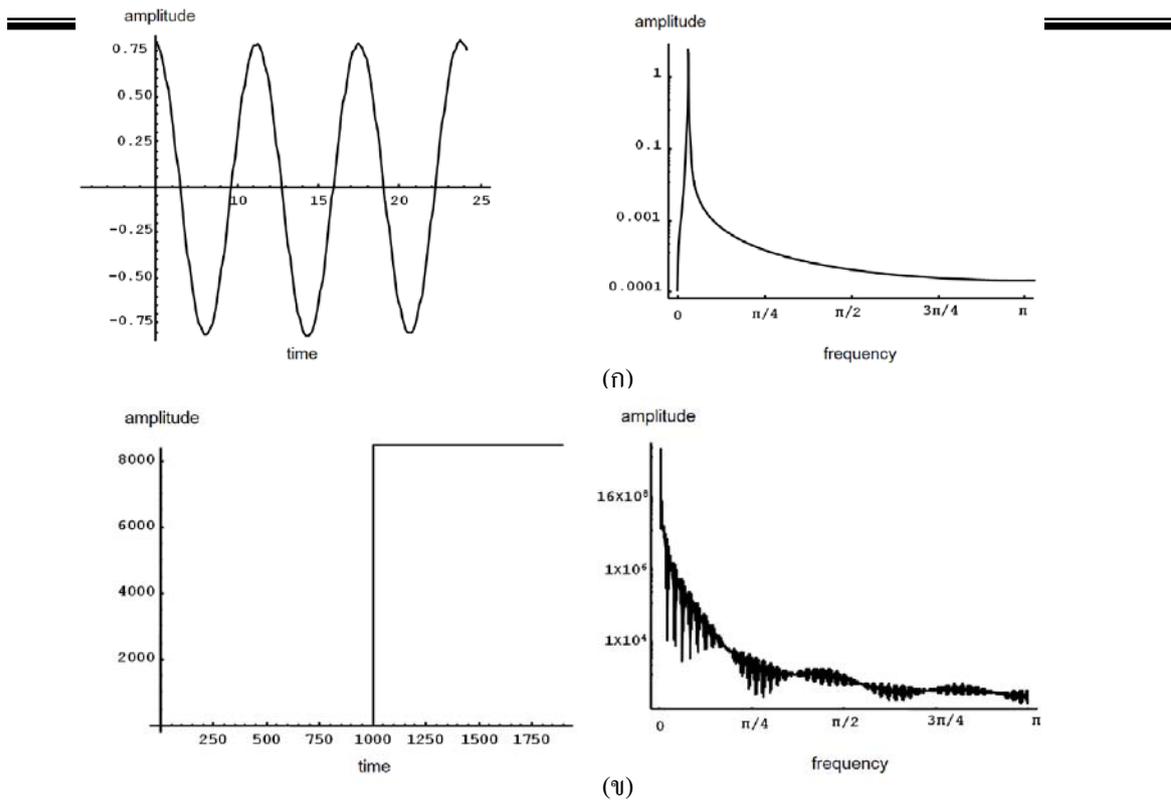


ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์หาค่า IRI ของสะพาน, เชิงลาดสะพาน, และถนน (White et al., 2005)



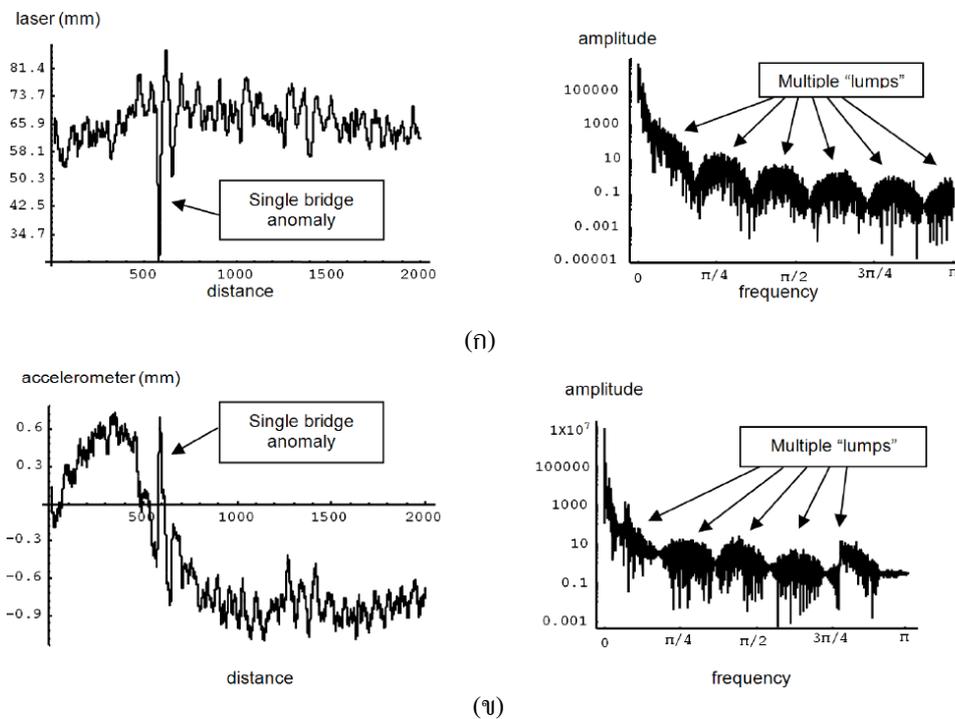
ภาพที่ 3.6 หลักการกรองค่าความถี่เพื่อวิเคราะห์ค่า IRI (Sayers et al., 1986)

โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการ ترددตัวบริเวณคอสะพาน (โครงการวิจัยต่อเนื่อง)



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงข้อมูลจาก Time Domain ไปเป็น Frequency Domain (ก)

Sinusoidal Curve (ข) Step Function (Martinez, 2009)

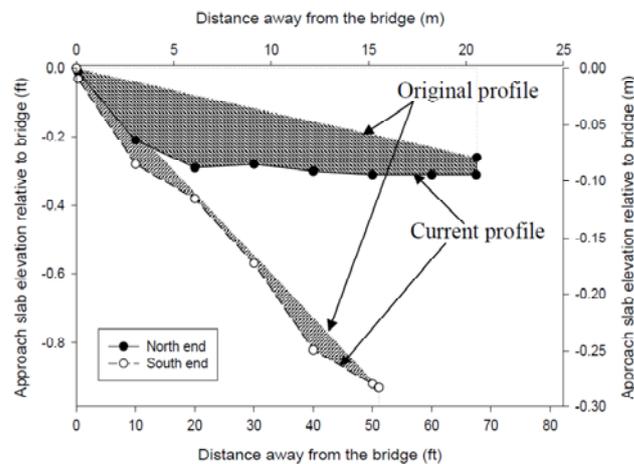


ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ Frequency Domain จากผลตรวจวัด (ก) Profile Grade และ (ข)

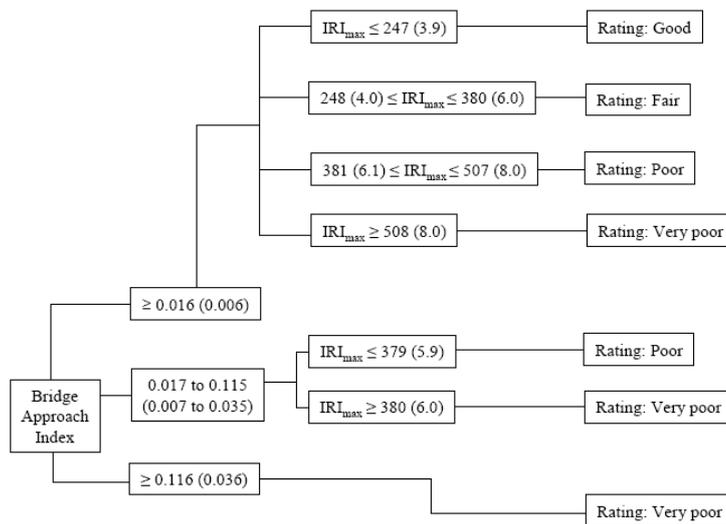
ความเร่งในแนวดิ่งบริเวณเชิงลาดสะพาน (Martinez, 2009)

Bridge Approach Index (BI)

Bridge Approach Index (BI) คือ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ Profile Grade ระหว่างผิวทางตามแบบก่อสร้าง (As-Built Drawing) และ Profile Grade ณ ปัจจุบัน ทหารด้วยความยาวของ Approach Slab (White et al., 2005) ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ค่า BI สูงแสดงว่ามีความขรุขระมากบริเวณเชิงลาดสะพาน White et al. (2005) วิเคราะห์ข้อมูล IRI, ความรู้สึกของผู้ขับขี่ (Ride Quality Rating) และค่า BI ของสะพานในรัฐไอโอวา และเสนอเกณฑ์การให้คะแนน (Rating Criteria) ความสะดวกสบายขณะขึ้น-ลงสะพาน โดยใช้ค่า BI ร่วมกับ IRI ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างการวิเคราะห์ Bridge Approach Index, BI (White et al., 2005)



*Bridge Approach Index, ft (m)
*IRI, in/mi (m/km)

ภาพที่ 3.10 เกณฑ์การให้คะแนนความรู้สึกในการขับขี่ขณะขึ้น-ลงสะพานโดยใช้ค่า IRI และ BI (White et al., 2005)

ปริมาณการทรุดตัวที่แตกต่างและความลาดชัน (Profile Slope)

นักวิจัยหลายท่านได้เสนอค่าการทรุดตัวที่แตกต่างระหว่างสะพานและคันทาง และค่าความลาดชันบริเวณเชิงลาดสะพาน ซึ่งส่งผลต่อความไม่สะดวกสบายของผู้ขับขี่ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ เกณฑ์ค่าการทรุดตัวที่ส่งผลความไม่สะดวกสบายของผู้ขับขี่ ขณะขึ้น-ลง สะพาน อยู่ในช่วง 5.1 cm ถึง 9.9 cm (Walkinshaw, 1978; Bozozuk, 1978; Hearn, 1995) Soe (2003) เสนอเกณฑ์ในการให้คะแนนความไม่สะดวกสบายของผู้ขับขี่ ขณะขึ้น-ลง สะพานจากปริมาณการทรุดตัวที่แตกต่างดังแสดงในตารางที่ 3.6 และค่าความลาดชันบริเวณเชิงลาดสะพาน ที่ส่งผลความไม่สะดวกสบายของผู้ขับขี่มีค่าอยู่ในช่วง 1/250 ถึง 1/200 (Moulton et al., 1985; Wahls, 1990; Stark et al., 1995; Long et al., 1998) นอกจากนี้ Hearn (1995) เสนอค่า $S_d/S_m > 1/3$ โดยที่ S_d คือ ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างของสะพานและถนน และ S_m คือ ค่าเฉลี่ยการทรุดตัวของบริเวณเชิงลาดสะพาน

Briaud et al.(1997) ได้เสนอการออกแบบความยาวของ Approach Slab โดยใช้เกณฑ์ค่าความลาดชันบริเวณเชิงลาดสะพาน 1/200 โดยกำหนดให้

$$L \geq 200 (s_f - s_a) \tag{3.1}$$

โดยที่ L คือ ความยาวของ Approach Slab, s_f คือ ค่าการทรุดตัวของคันทาง, s_a คือ ค่าการทรุดตัวของฐานรากสะพาน

ตารางที่ 3.4 ค่าการทรุดตัวที่ส่งผลกระทบต่อผู้ขับขี่ ขณะขึ้น-ลง สะพาน

นักวิจัย	ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างซึ่งส่งผลกระทบต่อขณะขึ้น-ลงสะพาน
Walkinshaw (1978)	6.35 cm (2.5")
Bozozuk (1978)	9.9 cm (3.9") ในแนวตั้ง 5.1 cm (2") ในแนวราบ
Hearn (1995)	$S_d/S_m > 1/3$ S_d = ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างของสะพานและถนน S_m = ค่าเฉลี่ยการทรุดตัวของบริเวณเชิงลาดสะพาน

ตารางที่ 3.5 ค่าความลาดชันที่ส่งผลกระทบต่อผู้ขับขี่ ขณะขึ้น-ลง สะพาน

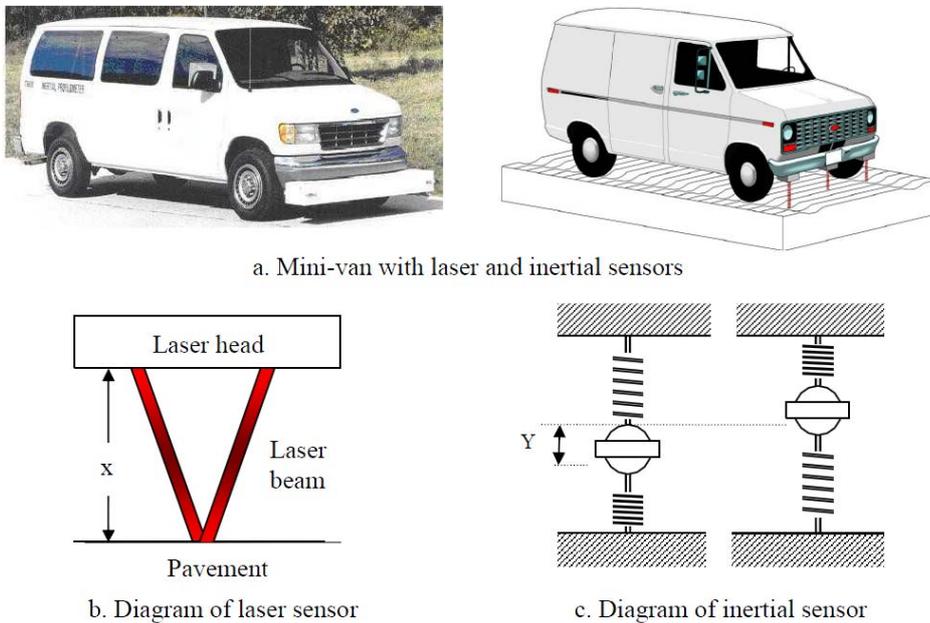
นักวิจัย	ค่าความลาดชันซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ขับขี่ ขณะขึ้น-ลง สะพาน
Moulton et al. (1985)	1/250 (Continuous-Span Bridge) 1/200 (Simply-Support Bridge)
Wahls (1990)	1/200
Stark et al. (1995)	1/200
Long et al. (1998)	1/200

ตารางที่ 3.6 ค่าการทรุดตัวที่แตกต่างกันที่ส่งผลกระทบต่อผู้ขับขี่ ขณะขึ้น-ลง สะพาน (Soe, 2003)

ระดับ	คำอธิบาย	ค่าการทรุดตัวที่แตกต่าง (cm)
1	ไม่รู้สึกรการกระแทก	0.0
2	รู้สึกเล็กน้อย	2.5
3	รู้สึกปานกลาง	5.0
4	รู้สึกมาก (ต้องซ่อมบำรุงเชิงลาด)	7.5
5	รู้สึกไม่ปลอดภัย	> 7.5

3.3.2 การวิเคราะห์จาก Response-Type Road Roughness Measuring System (RTRRMS)

การประเมินความขรุขระและความไม่สะดวกสบายในการขับขี่ สามารถตรวจสอบจากความรู้สึกรถของผู้ขับขี่ หรือจากระบบตรวจวัดที่เรียกว่า Response-Type Road Roughness Measuring Systems (RTRRMS) ในปัจจุบัน High Speed Inertial Profilometer ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์ Laser วัดระยะระหว่างรถยนต์และผิวทาง และ Accelerometer เป็นที่นิยมในการตรวจสอบผิวทางตามระบบ Response-Type Road Roughness Measuring Systems (RTRRMS) ดังแสดงในภาพที่ 3.11 ปัญหาหลักของ RTRRMS คือ ผลการตรวจวัดขึ้นกับระบบช่วงล่างของรถยนต์ที่ใช้ทดสอบ พารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดย RTRRMS มีดังนี้



ภาพที่ 3.11 High Speed Inertial Profilometer (Martinez, 2009)

Present Serviceability Rating (PSR) และ Present Serviceability Index (PSI)

การประเมินจากความรู้สึกรถของผู้ขับขี่ใช้วิธีการสำรวจจากกลุ่มตัวอย่าง และนำผลมาวิเคราะห์หาค่า Present Serviceability Rating (PSR) Carey and Irick (1960) เสนอการประมาณค่า PSR จากข้อมูลทางกายภาพของผิวทาง โดยเรียกพารามิเตอร์นี้ว่า Present Serviceability Index (PSI) ดังสมการ 3.2 และ 3.3 สำหรับ Flexible Pavement และ Rigid Pavement, ตามลำดับ

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 1.38 \overline{RD}^2 - 0.01 \sqrt{C + P} \quad (3.2)$$

$$PSI = 5.41 - 1.78 \log(1 + \overline{SV}) - 0.09\sqrt{C + P} \quad (3.3)$$

โดยที่

\overline{SV} = Slope Variance of Road Profile

\overline{RD} = Mean Rut Depth

C = Crack Index

P = Patching Index

Local Roughness Index (LRI) และ Post-Speed Local Roughness Index (LRI_{ps})

Martinez (2009) ได้พัฒนา ค่า Local Roughness Index (LRI) ในการประเมินความไม่ราบเรียบขณะขึ้น-ลงสะพาน LRI เป็นค่าความแปรปรวนของสัญญาณที่ได้จาก Accelerometer ยกกำลังสองในระยะ 1.52 m (5 ft) ค่า LRI สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงหรือความแปรปรวนของความเร่งของรถยนต์ ซึ่งสามารถระบุความไม่ราบเรียบขณะขึ้น-ลงสะพานได้ ณ ขับด้วยความเร็วใดๆ ได้ ดังแสดงในภาพที่ 3.12 Martinez (2009) ได้ตรวจวัดบริเวณเชิงลาดสะพาน 3 สายทาง และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LRI และความไม่ราบเรียบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วรถยนต์ ในตารางที่ 3.7

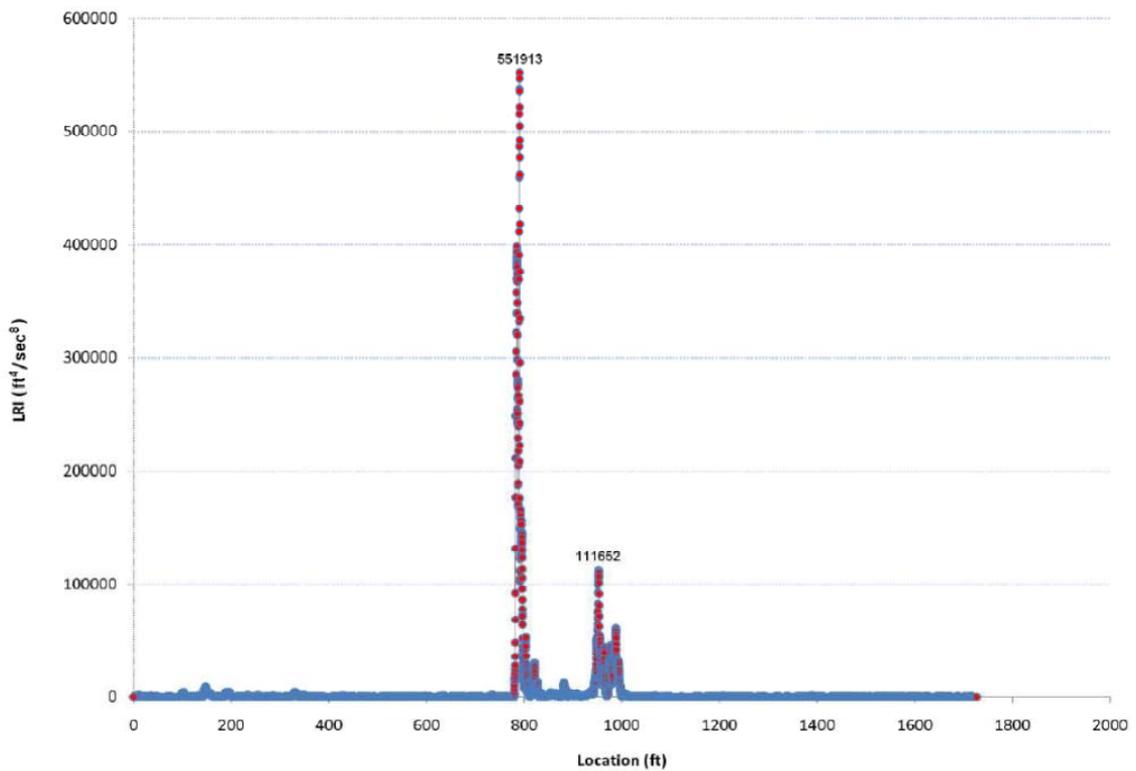
เนื่องจากความรู้สึกลูกของผู้ขับขี่ ขึ้นกับค่า LRI และความเร็วรถยนต์ดังแสดงในภาพที่ 3.13 ดังนั้น Martinez (2009) จึงได้เสนอ Post Speed Local Roughness Index (LRI_{ps}) ซึ่งเป็นการหาค่า LRI ตามความเร็วที่กำหนดของแต่ละสะพาน จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรถยนต์และ LRI ดังแสดงในภาพที่ 3.13 และเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง LRI_{ps} และความไม่ราบเรียบดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง LRI ความเร็ว และความรู้สึกลูกผู้ขับขี่

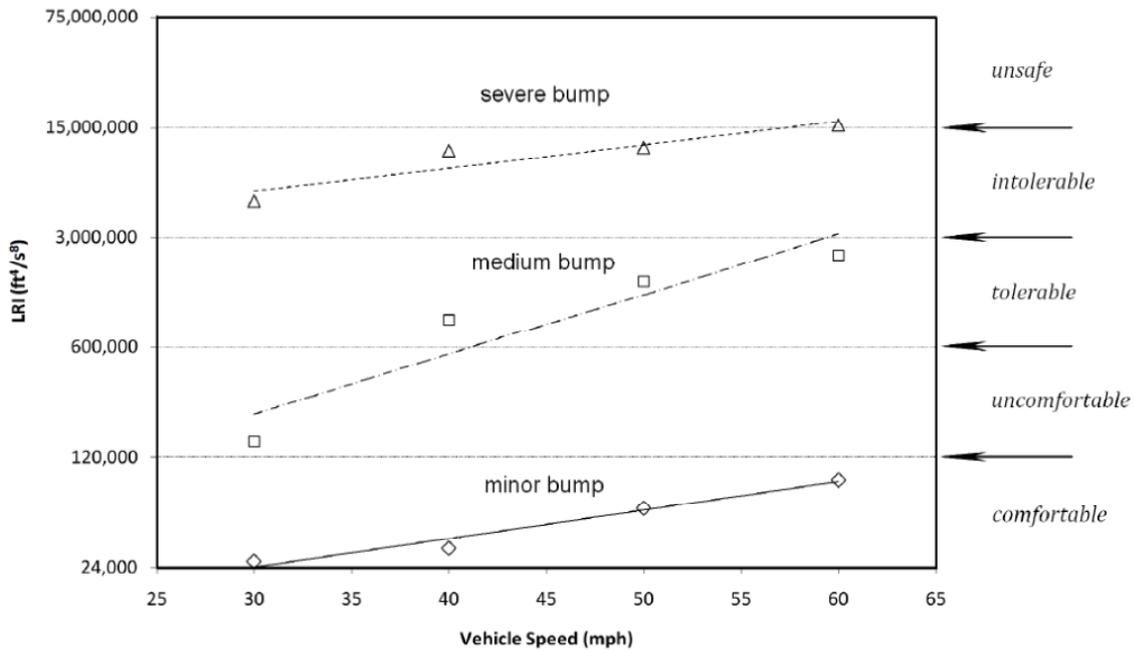
ความเร็ว (mph)	LRI (ft ⁴ /sec ⁸)		
	กระเทือนเล็กน้อย	กระเทือนปานกลาง	กระเทือนสูง
60	85,324	2,322,154	15,385,783
50	56,855	1,590,398	11,135,218
40	31,741	899,070	10,646,764
30	26,329	149,445	5,044,707

ตารางที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง LRI_{ps} และความรู้สึกผู้ขับขี่

สภาพเชิงลาดสะพาน		LRI_{ps} (ft ⁴ /sec ⁸ /100,000)
ไม่ปลอดภัย	(unsafe)	> 150
กระเทือนมาก	(intolerable)	30.0 - 150
กระเทือนพอประมาณ	(tolerable)	6.00 - 30.0
รู้สึกไม่สบาย	(uncomfortable)	1.2 - 6.00
ราบเรียบ	(comfortable)	< 1.20



ภาพที่ 3.12 ตัวอย่างค่า LRI ขณะ ขึ้น-ลง สะพาน ด้วยความเร็ว 60 miles/hr (Martinez, 2009)



ภาพที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง LRI และความเร็ว (Martinez, 2009)

Jolt หรือ Jerk

Jolt หรือ Jerk คือ เวกเตอร์อนุพันธ์ (Derivative) ของความเร่ง ณ เวลาหนึ่งๆ หรือ หมายถึงอนุพันธ์อันดับที่ 3 ของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง Yu et al.(2006) เสนอว่าค่า Jolt สามารถใช้เป็นเกณฑ์ความรู้สึกของผู้ขับขี่ได้ โดยเฉพาะถนนในส่วนท้องถิ่นที่ใช้ความเร็วต่ำ และค่า IRI อาจไม่เหมาะสมในการประเมินความไม่ราบเรียบของทาง Jolt สามารถหาได้จากสมการ

$$Jolt_i = \frac{z_{s(i+3)} - 3z_{s(i+2)} + 3z_{s(i+1)} - z_{si}}{\Delta t^3} \tag{3.4}$$

$$Jolt_{average} = \frac{\sum |Jolt_i|}{n} \tag{3.5}$$

โดยที่ $Jolt_i$ คือ ค่า Jolt ที่ตำแหน่ง i , $Jolt_{average}$ คือค่าเฉลี่ยของ Jolt จากข้อมูล n ตำแหน่ง, z_s คือ ปริมาณการเคลื่อนที่แนวราบของรถยนต์ และ Δt คือ ช่วงเวลาที่ตรวจวัดขณะรถยนต์วิ่ง Yu et al.(2006) เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง Jolt และ IRI และ ความรู้สึกไม่ราบเรียบของผิวทางในตารางที่ 3.9

โครงการปรับปรุงการออกแบบและมาตรฐานโครงสร้างปรับการ ترددตัวบริเวณคอสะพาน (โครงการวิจัยต่อเนื่อง)

ตารางที่ 3.9 การระบุความไม่ราบเรียบของผิวทางโดยค่า Jolt และ IRI (Yu et al., 2006)

		IRI Threshold at Different Speeds (units: m/km)				
Ride Quality	Jolt (m/s ³)	120 km/h	100 km/h	80 km/h	70 km/h	60 km/h
Very good	<6.5	<0.95	<1.14	<1.43	<1.63	<1.90
Good	10.2	0.95–1.49	1.14–1.79	1.43–2.24	1.63–2.57	1.90–2.99
Fair	12.9	1.50–1.89	1.80–2.27	2.25–2.84	2.58–3.25	3.00–3.79
Mediocre	18.4	1.90–2.70	2.28–3.24	2.85–4.05	3.26–4.63	3.80–5.40
Poor	>18.4	>2.70	>3.24	>4.05	>4.63	>5.40
		50 km/h	40 km/h	30 km/h	20 km/h	10 km/h
Very good	<6.5	<2.28	<2.86	<3.80	<5.72	<11.44
Good	10.2	2.28–3.59	2.86–4.49	3.80–5.99	5.72–8.99	11.44–17.99
Fair	12.9	3.60–4.54	4.50–5.69	6.00–7.59	9.00–11.39	18.00–22.79
Mediocre	18.4	4.55–6.25	5.70–8.08	7.60–10.80	11.40–16.16	22.80–32.32
Poor	>18.4	>6.25	>8.08	>10.80	>16.16	>32.32
		IRI Threshold at Different Speeds (units: in./mi)				
Ride Quality	Jolt (ft/s ³)	75 mph	65 mph	55 mph	50 mph	45 mph
Very good	<21.3	<60	<69	<82	<90	<100
Good	33.5	60–94	69–109	82–129	90–142	100–157
Fair	42.3	95–119	110–138	130–163	143–179	158–199
Mediocre	60.4	120–170	139–196	164–232	180–254	200–283
Poor	>60.4	>170	>196	>232	>255	>283
		40 mph	35 mph	30 mph	25 mph	15 mph
Very good	<21.3	<113	<129	<150	<180	<300
Good	33.5	113–177	129–203	150–237	180–284	300–474
Fair	42.3	178–224	204–256	238–299	285–359	475–599
Mediocre	60.4	225–318	257–364	300–425	360–510	600–850
Poor	>60.4	>319	>364	>425	>510	>850

3.4 เอกสารอ้างอิง

- วิชาญ ภูพัฒน์. 2546. เอกสารประกอบการสอนวิชา **Foundation on Soft and Unstable Soils**. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิรพัฒน์ โชติโกกร. 2529. **การออกแบบทาง**. สำนักพิมพ์เกษตรศาสตร์.
- Bozozuk, M. 1978. Bridge Foundation Move. **Transportation Research Record: Jour of Transportation Research Board 678**. Washington D.C., USA.
- Briaud, J.L., R.W. James and S.B. Hoffman. 1997. Settlement of Bridge Approaches (The Bump at the End of the Bridge). **Transportation Research Board, NCHRP Synthesis 234**. National Research Council. Washington D.C., USA.
- Carey, W.N.Jr. and P.E. Irick. 1960. The Pavement Serviceability-Performance Concept. **HRB Bulletin 250**: 40-58.
- Das, S., C. Bakeer, R. Zhong and M. Schutt. 1999. **Assessment of Mitigation Embankment Settlement with Pile Supported Approach Slabs**. Louisiana Transportation and Research Center. USA.
- Gillespie, T.D. 1992. **Fundamental of Vehicle Dynamics**. Society of Automotive Engineers.
- Hearn, G. 1995. **Faulted Pavements and Bridge Abutments**. Colorado Transportation Institute Synthesis. University of Colorado at Boulder, Colorado, USA.
- Long, J.H., Olson, S.M. and Stark, T.D. 1998. Differential Movement at Embankment/Bridge Structure Interface in Illinois. **Transportation Research Record: Jour of Transportation Research Board 1633**. Washington D.C., USA.
- Martinez, M. 2009. The Rideability of a Deflected Bridge Approach Slab. **Final Report**. Louisiana Transportation Research Center.
- Moulton, L.K., H.V.S. Gangarao and G.T. Halvorsen. 1985. Tolerable Movement Criteria for Highway Bridges. Federal Highway Administration. **Report No. FHWA/RD-85/107**. Washington D.C., USA.
- Sayers, M.W., T.D. Gillespie and W.D.O Paterson. 1986. Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. **World Bank Technical 46**. Washington D.C., USA.
-
-

- Soe, J. 2003. **The Bump at the End of the Bridge: An Investigation.** Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of the Doctor of Philosophy, Texas A&M University. College Station, Texas, USA.
- Stark, T.D., S.M. Olson and J.H. Long. 1995. Differential Movement at the Embankment/Structure Interface-Mitigation and Rehabilitation. **Report No. IAB-H1, FY 93.** Illinois Department of Transportation. Springfield, Illinois., USA.
- Yu, J., E.Y.J. Chou and J.T. Yao. 2006. Development of Speed-Related Ride Quality Thresholds Using International Roughness Index. **Transportation Research Record: Jour of Transportation Research Board** 1974: 47-53, Washington D.C., USA.
- Wahls, H. E. 1990. Design and Construction of Bridge Approaches. **Transportation Research Record: Jour of Transportation Research Board, NCHRP Synthesis 159.** National Research Council. Washington D.C., USA.
- Walkinshaw, J.L. 1978. Survey of Bridge Movements in the Western United States. **Transportation Research Record: Jour of Transportation Research Board** 678, Washington, D.C., USA.
- White, D.J., S. Sritharan, M. Suleiman, M. Mekkawy and S. Chetler 2005. Identification of the Best Practices for Design, Construction and Repair of Bridge Approaches. **Final Report.** Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, USA.
-
-