



บทที่ 4

ผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของสะพาน

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการสั่นสะเทือนจากขบวนรถบนสะพาน ที่มีต่อโครงสร้างสะพานหรือปฏิกิริยาตอบสนองของผู้ใช้ สำหรับสะพานปัญหาที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของความเสียหาย (Damage) สำหรับผู้ใช้สะพานปัญหาจะอยู่ในรูปของสภาพที่ต้องทน (Tolerance) การรบกวน (Intrusion)

M.W. Jackson ได้ให้ความเห็นถึงความเสียหายและปฏิกิริยาของคนต่อปัญหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นว่า ผู้คนสามารถทนต่อความเสียหายเล็ก ๆ น้อย ๆ ที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างได้ ถ้าความเสียหายนั้นเกิดขึ้นจากพายุหรือจากสาเหตุธรรมชาติ เช่น การทรุดตัว การขยายตัว การหดตัว เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้น คนจะมีความรู้สึกไม่กังวลและไม่รู้สึกว่าเกิดอันตราย แต่ถ้าผลกระทบนั้นเกิดขึ้นเพราะมนุษย์มีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น การสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิดในเหมืองถ่านหิน การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร หรือการสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจร ในความรู้สึกของคนจะเห็นเป็นเรื่องที่ใหญ่โต ยอมรับไม่ได้ และเป็นอันตราย (Whiffin และ Leonard, 1971)

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการระเบิด (Blasting) แม้ว่าจะมีขนาด (Amplitude) หรือความเร็วของการสั่นสะเทือน (Peak Particle Velocity) จะสูงก็ตาม แต่จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ (Transient vibrations) คนสามารถจะทนและยอมรับได้ แต่ในกรณีที่การสั่นสะเทือนเกิดอย่างสม่ำเสมอ (Steady-state vibrations) ในช่วงเวลายาวนาน (เช่น เกิดจากเครื่องจักร เป็นต้น) แม้ระดับของการสั่นสะเทือนจะต่ำกว่า คนจะเกิดความรำคาญและไม่สามารถที่จะทนหรือยอมรับได้

4.1 ผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีต่อคน

ปฏิกิริยาของคนต่อการสั่นสะเทือนจะเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนยากที่จะเข้าใจอย่างถ่องแท้ได้ ความรู้สึก (Sensitivity) ไม่สามารถที่จะกำหนดได้อย่างง่าย ๆ ในลักษณะของสรีระ (Physical) ที่มีต่อการเคลื่อนไหว (motion) ความเร็ว (velocity) หรือความเร่ง (acceleration) นอกจากนี้ยังมีความถี่ (frequency) ของการสั่นสะเทือน (ซึ่งก่อให้เกิดความรู้สึกด้วย) เป็นขอบเขตกำหนดด้วย

การสั่นสะเทือนส่งผลกระทบต่อคนได้ 2 ทาง คือ

1. ทางด้านร่างกาย (Physiological)
2. ทางด้านจิตใจ (Psychological)

The physiological effects นี้ พิจารณาจากที่ว่าร่างกายมนุษย์เป็น Dynamic system ซึ่งมีความถี่ธรรมชาติของระบบเอง ระบบนี้ประพฤติเหมือนกับว่าเป็นเครื่องมือที่ไวต่อการรับรู้มาก สามารถตรวจรับต่อระดับการสั่นสะเทือนซึ่งมีขนาดน้อย ๆ ได้ (ประมาณ 0.001 มม.) ความรู้สึกที่ไวนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาตอบสนองที่อาจจะมากกว่าที่เป็นจริงตามการประเมินค่าของแต่ละบุคคล (Leonard, 1966)

The psychological reaction จะมีอิทธิพลมาจากประสบการณ์ในอดีต และการเข้าใจที่ผิด ๆ ต่อการสั่นสะเทือนของแต่ละบุคคล สุขภาพในขณะนั้น สภาพอารมณ์และอายุ สิ่งเหล่านี้มีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อระดับการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกันในแต่ละบุคคล

ในปี ค.ศ. 1931 Reihel และ Meister ได้สร้าง Tolerance curves 6 ระดับ โดยใช้ผู้เข้าทดสอบ 25 คน การทดสอบกระทำโดยให้ผู้เข้าทดสอบ ยืน นั่ง หรือนอนบนแผ่นกระดาน ซึ่งมีการสั่นสะเทือนทั้งในแนวราบและแนวตั้งประมาณ 10 นาที และได้แบ่งระดับการรับรู้ของคนต่อการสั่นสะเทือนเป็น 6 ระดับคือ

- ระดับที่รับรู้การสั่นสะเทือนยังไม่ได้ (imperceptible)
- ระดับที่พอรู้สึกได้ (just perceptible)

- ระดับที่รู้สึกได้อย่างชัดเจน (clearly perceptible)
- ระดับที่ก่อให้เกิดความรำคาญ (annoying)
- ระดับที่รู้สึกว่าไม่สบายใจหรือถูกรบกวน (unpleasant or disturbing)
- ระดับที่รู้สึกปวดร้าว (painful)

รูป 4.1-4.2 เป็นผลการวิจัยของ Reiher และ Meister โดยที่รูป 4.1 กำหนดจากความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดกับความถี่ และรูป 4.2 กำหนดจากความสัมพันธ์ของความเร็วกับความถี่

ในปี ค.ศ. 1948 Goldman ได้ทำ Curves ขึ้นมาใหม่ โดยกำหนด Tolerance levels เป็น 3 ระดับ คือ

- ระดับที่รู้สึกได้ (perception)
- ระดับที่รู้สึกไม่พอใจ (unpleasantness)
- ระดับที่ไม่สามารถทนได้ (intolerance)

โดยพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ยของการสั่นสะเทือนทั้งในแนวตั้งและแนวราบ รวมถึงผลของการยืน, การนั่ง และนอนของคนด้วย โดยกำหนดจากความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดกับความถี่ (รูป 4.3) และกำหนดจากความสัมพันธ์ของความเร็วกับความถี่ (รูป 4.4)

ในปี ค.ศ. 1958 Dieckmann ได้กำหนด Tolerance levels เป็น 4 ระดับ คือ

- $K = 0.1$; ระดับต่ำสุดที่รับรู้ได้ (lower limit of perception)
- $K = 1$; ระดับที่ยอมรับได้ในโรงงาน (allowed in industry for any period of time)
- $K = 10$, ระดับที่ยอมรับได้แต่เป็นช่วงเวลาสั้น ๆ (allowed only for a short time)
- $K = 100$; ระดับสูงสุดที่คนปรกติจะทนได้ (upper limit of strain for the average man)

ซึ่งค่า K นี้เป็นสิ่งวัดถึงระดับของความเครียด (Degree of strain) ของคนทั้งนั่งและนอน

บนแผ่นกระดาน โดยที่รูป 4.5 กำหนดในความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดกับความถี่ และรูป 4.6 กำหนดในความสัมพันธ์ของความเร็วกับความถี่

Janeway ได้กำหนด Tolerance levels โดยพิจารณาจากสภาพที่รู้สึกสะดวกสบาย (comfort) กับสภาพที่รู้สึกไม่สะดวกสบาย (discomfort) สำหรับผู้โดยสารในรถยนต์ แสดงไว้ในรูป 4.7 โดยกำหนดเส้นขอบเขตจาก

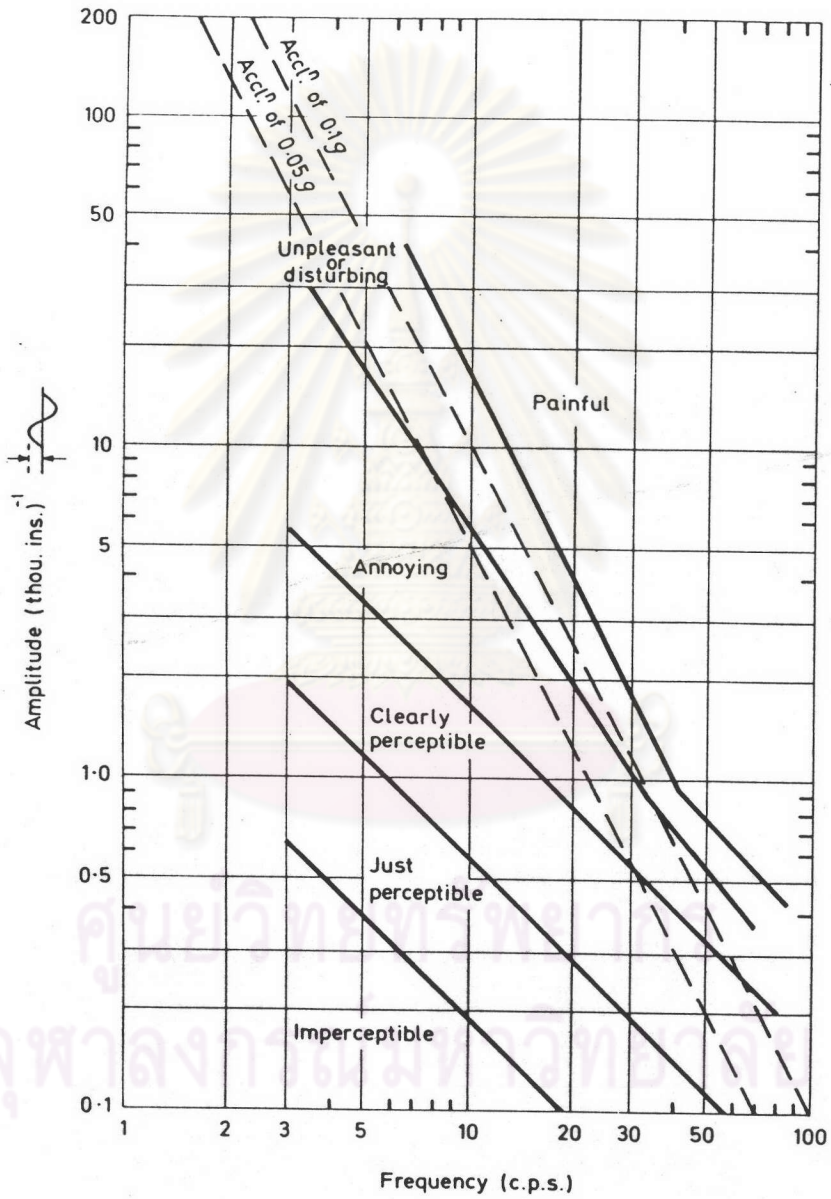
$$\begin{aligned} af^3 &= 2 && \text{สำหรับความถี่} && 1-6 \text{ Hz} \\ af^3 &= 1/3 && \text{สำหรับความถี่} && 6-20 \text{ Hz} \\ af^3 &= 1/60 && \text{สำหรับความถี่} && \text{มากกว่า } 20 \text{ Hz} \end{aligned}$$

โดยที่ a เป็นแอมพลิจูด (นิ้ว) f เป็นความถี่ (Hz)

ในปี ค.ศ. 1965 Road Research Laboratory ของอังกฤษได้ทำข้อจำกัด Tolerance ของคนเดินเท้าบนสะพานในการเดิน, ยืนบนสะพาน โดยใช้ผู้เข้าทดสอบ 40 คน มีอายุอยู่ในช่วง 20-72 ปี ยืนบนสะพานในช่วงเวลาสั้น ๆ จนถึง 1 นาที โดยกำหนดเงื่อนไขของ Tolerance levels เป็นระดับของการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ (acceptable) และยอมรับไม่ได้ (non-acceptable) สำหรับการเดินและยืนบนสะพาน รูป 4.8 กำหนดในความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดกับความถี่ รูป 4.9 กำหนดในความสัมพันธ์ของความเร็วกับความถี่ และรูป 4.10 กำหนดในความสัมพันธ์ของความเร่งกับความถี่

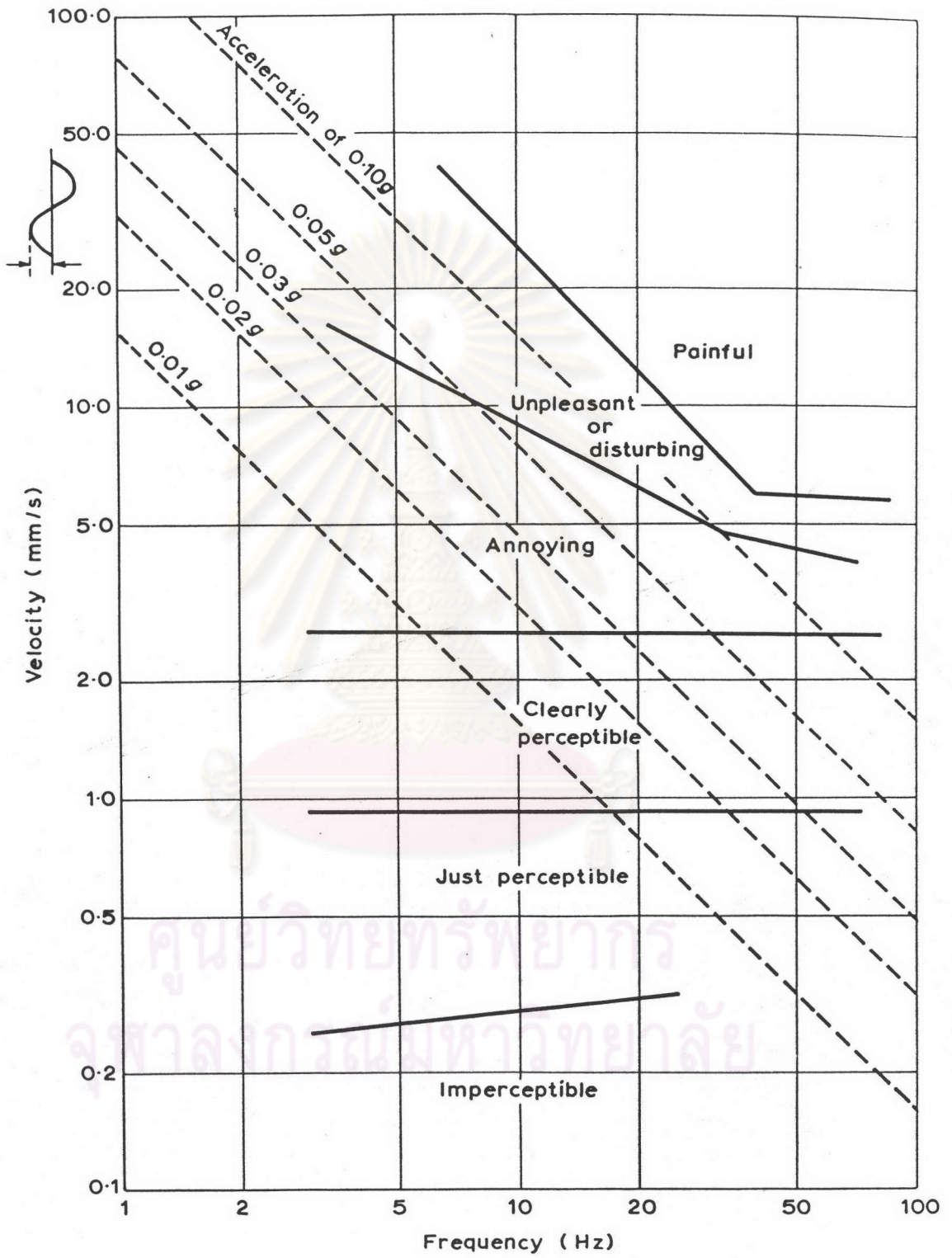
จากผลการทดสอบพบว่า Tolerance levels ลดลงถ้าคนเดินเท่านั้น เดินแทนที่จะยืนอยู่กับที่ เพราะว่าเมื่อเดินจะทำให้เข่างอทำให้เกิด hinge effect ซึ่งจะช่วยลดระดับของการสั่นสะเทือนที่จะส่งถึงร่างกาย และการก้าวยาว ๆ ก็จะมีส่วนช่วยไม่ทำให้รับรู้ต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น การสั่นสะเทือนไม่สามารถยอมรับได้ถ้ามีความเร็วมากกว่า 5 mm/s สำหรับคนเดินเท้าที่ยืนบนสะพาน และถ้ามากกว่า 25 mm/s ลดลงมาถึง 10 mm/s (สำหรับความถี่ 1-8 Hz) ไม่สามารถยอมรับได้ สำหรับการเดินบนสะพาน

HUMAN SENSITIVITY TO VERTICAL VIBRATIONS
(REIHER AND MEISTER)



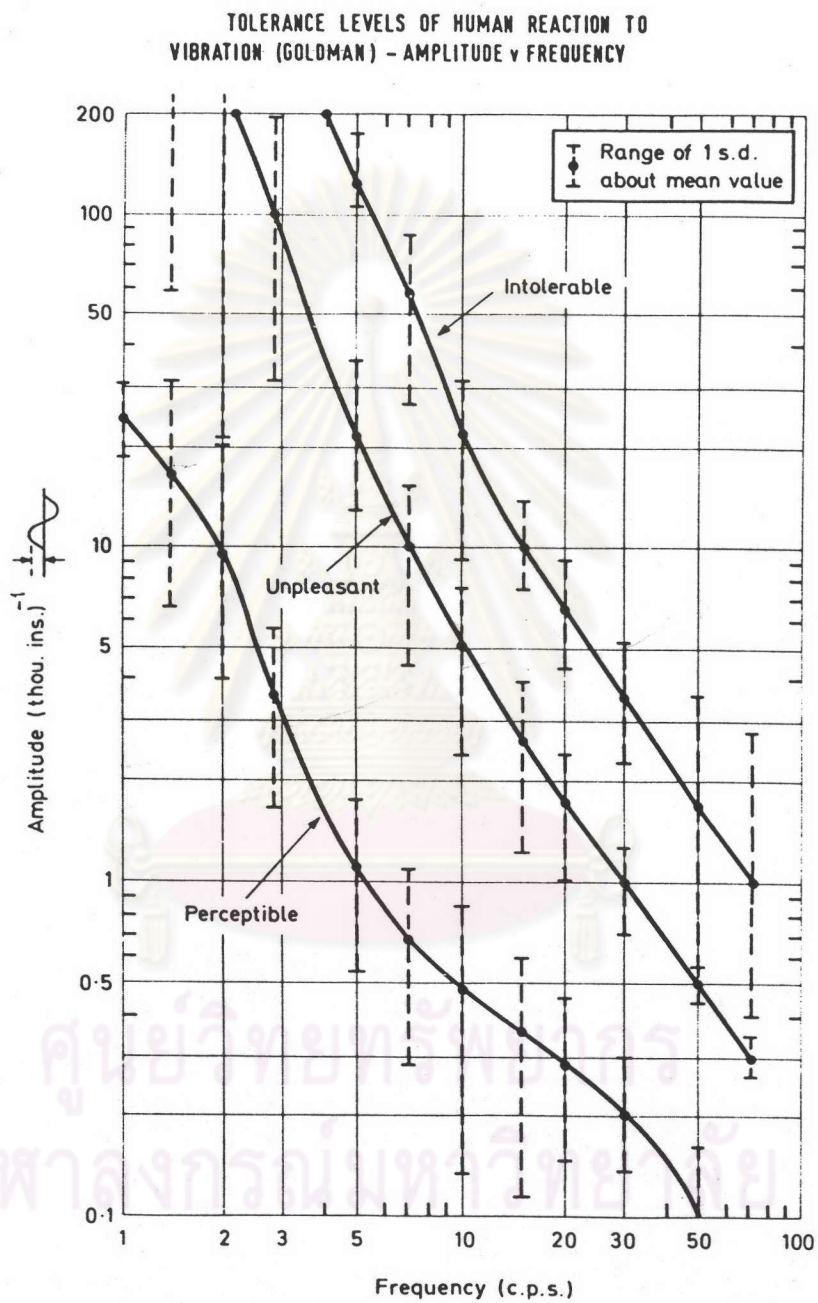
รูป 4.1 ความรู้สึกของคนต่อการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (Reiher and Meister)
Amplitude VS. Frequency

HUMAN SENSITIVITY TO VERTICAL VIBRATIONS (REIHER AND MEISTER)



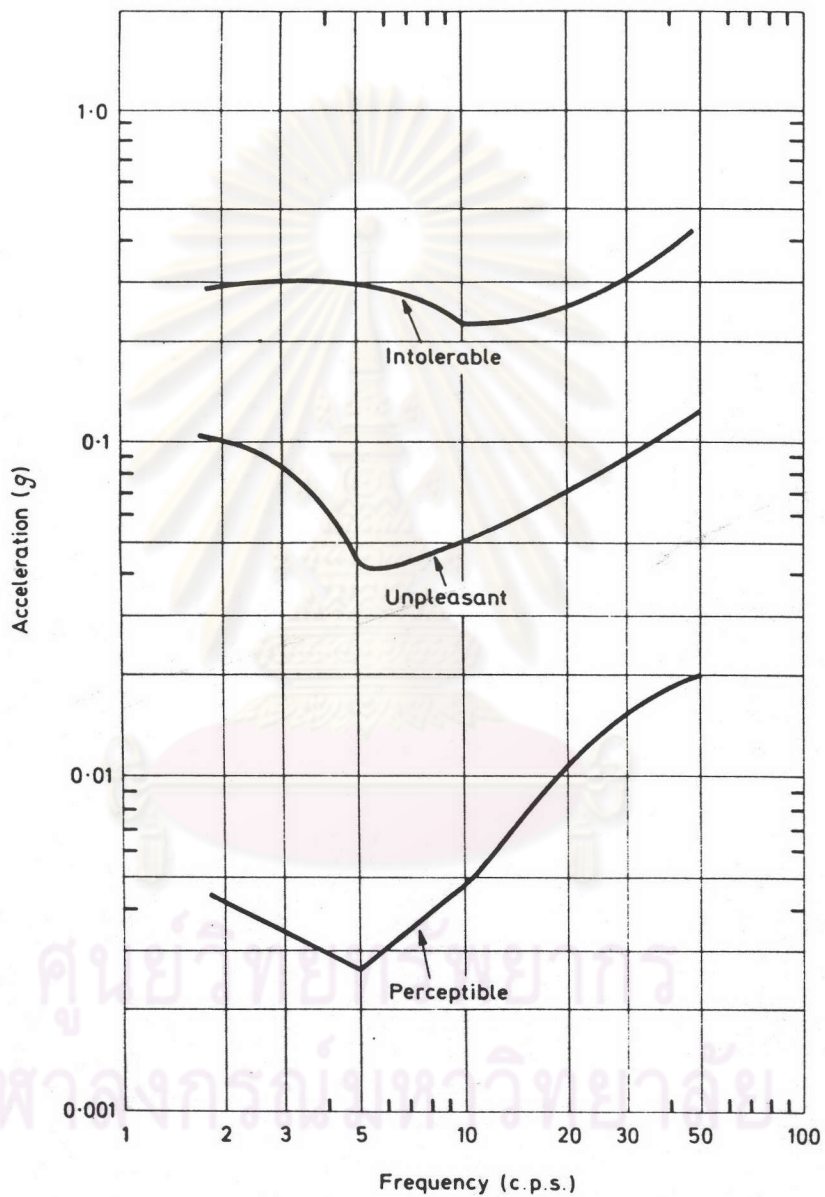
รูป 4.2 ความรู้สึกของคนต่อการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (Reiher and Meister)

Velocity VS. Frequency



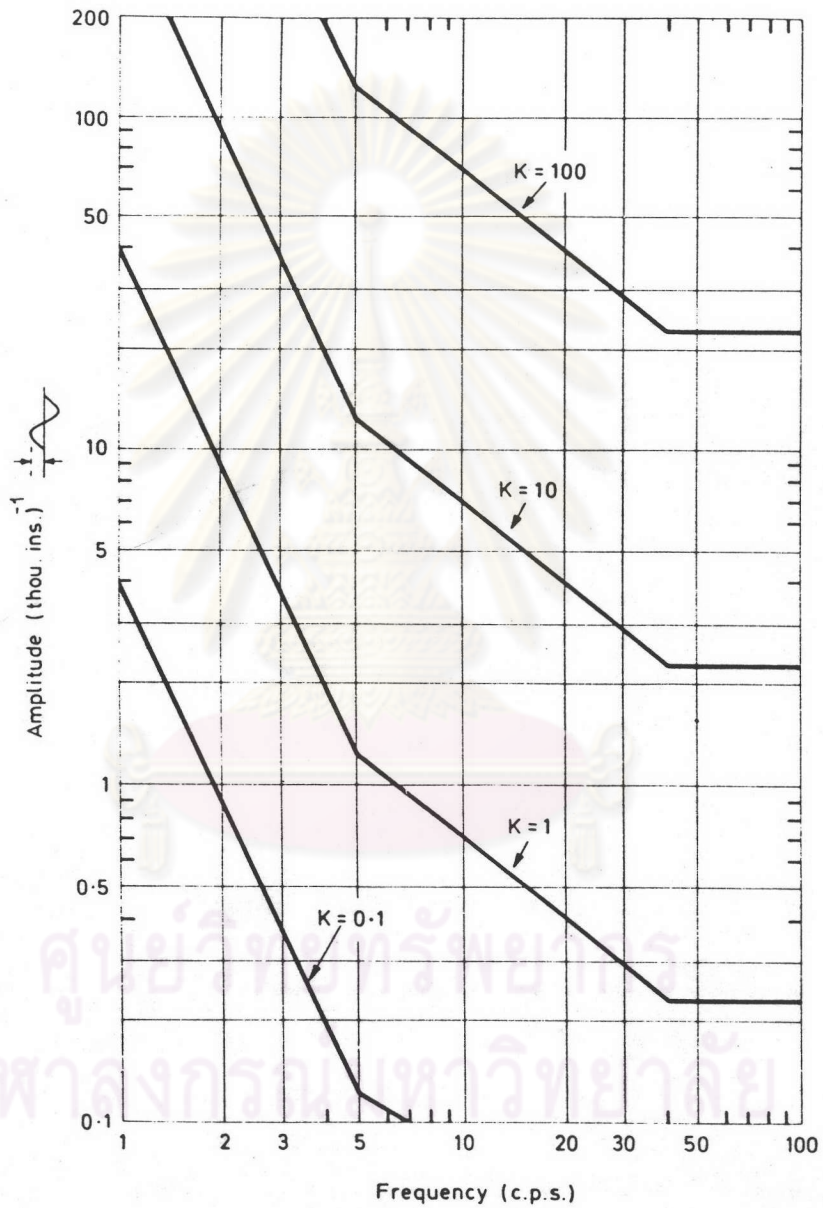
รูป 4.3 Tolerance levels ของคนต่อการสั่นสะเทือน (Goldman)
Amplitude VS. Frequency

TOLERANCE LEVELS OF HUMAN REACTION TO
VIBRATION (GOLDMAN) - ACCELERATION v FREQUENCY



รูป 4.4 Tolerance levels ของคนต่อการสั่นสะเทือน (Goldman)
Acceleration VS. Frequency

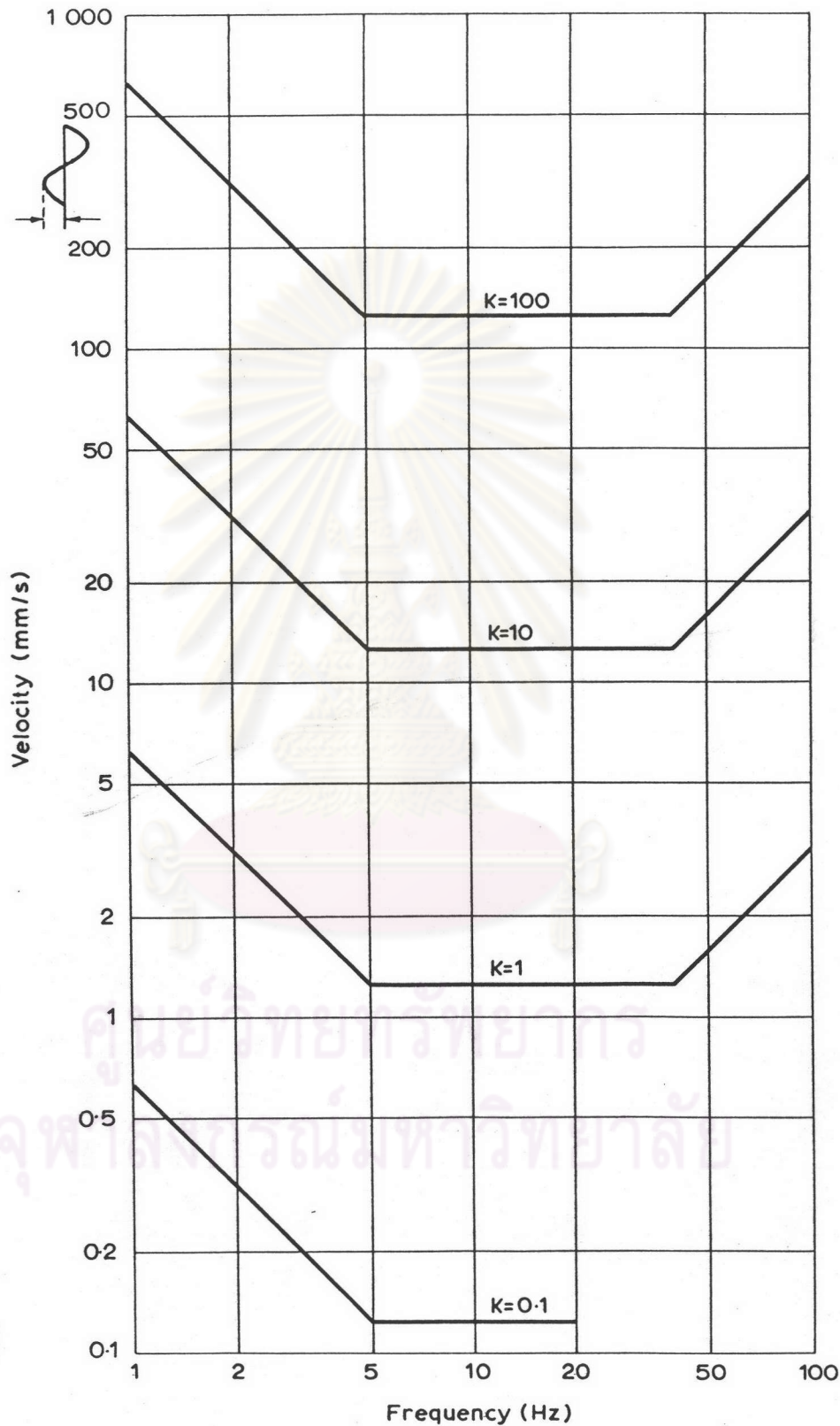
SCALE OF STRAIN FOR VERTICAL VIBRATIONS
(DIECKMANN)



รูป 4.5 ระดับของความเครียดของคนต่อการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (Dieckmann)

Amplitude VS. Frequency

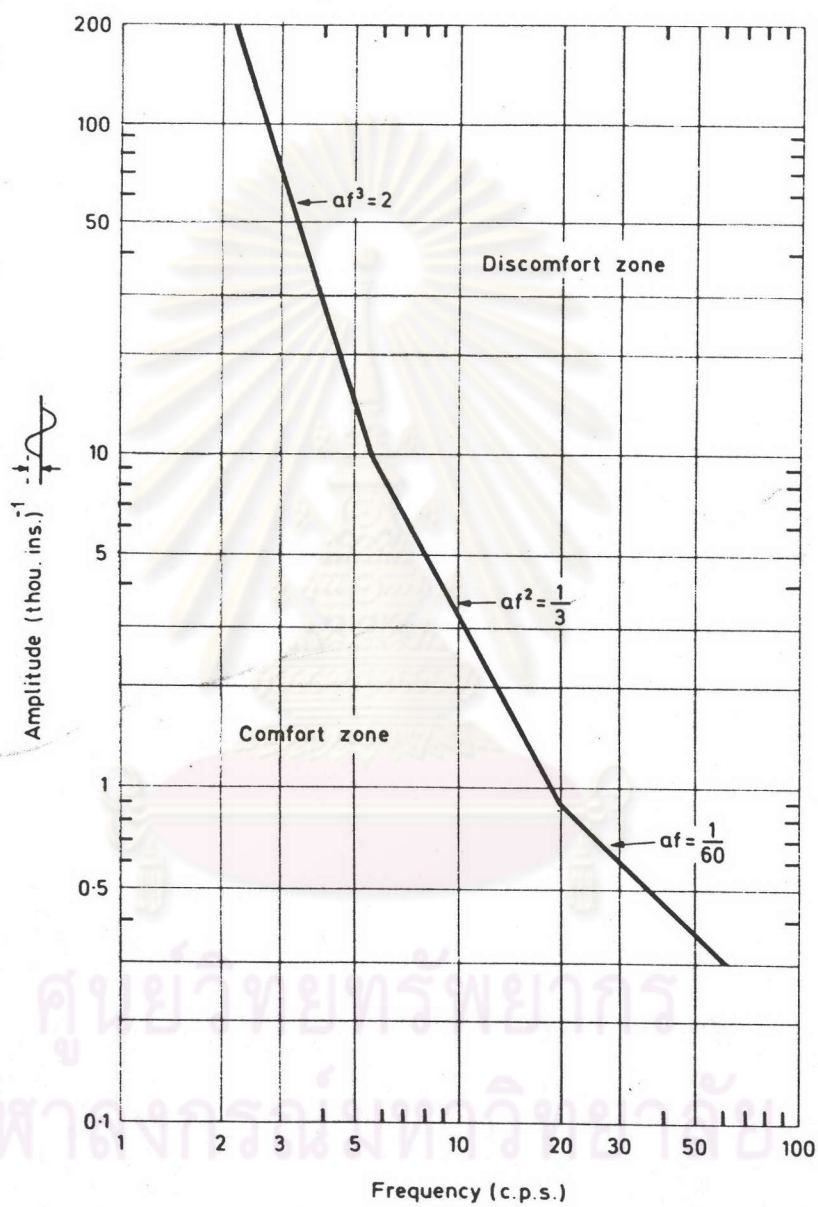
HUMAN SENSITIVITY TO VERTICAL VIBRATIONS
(DIECKMANN)



รูป 4.6 ระดับของความเครียดของคนต่อการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (Dieckmann)

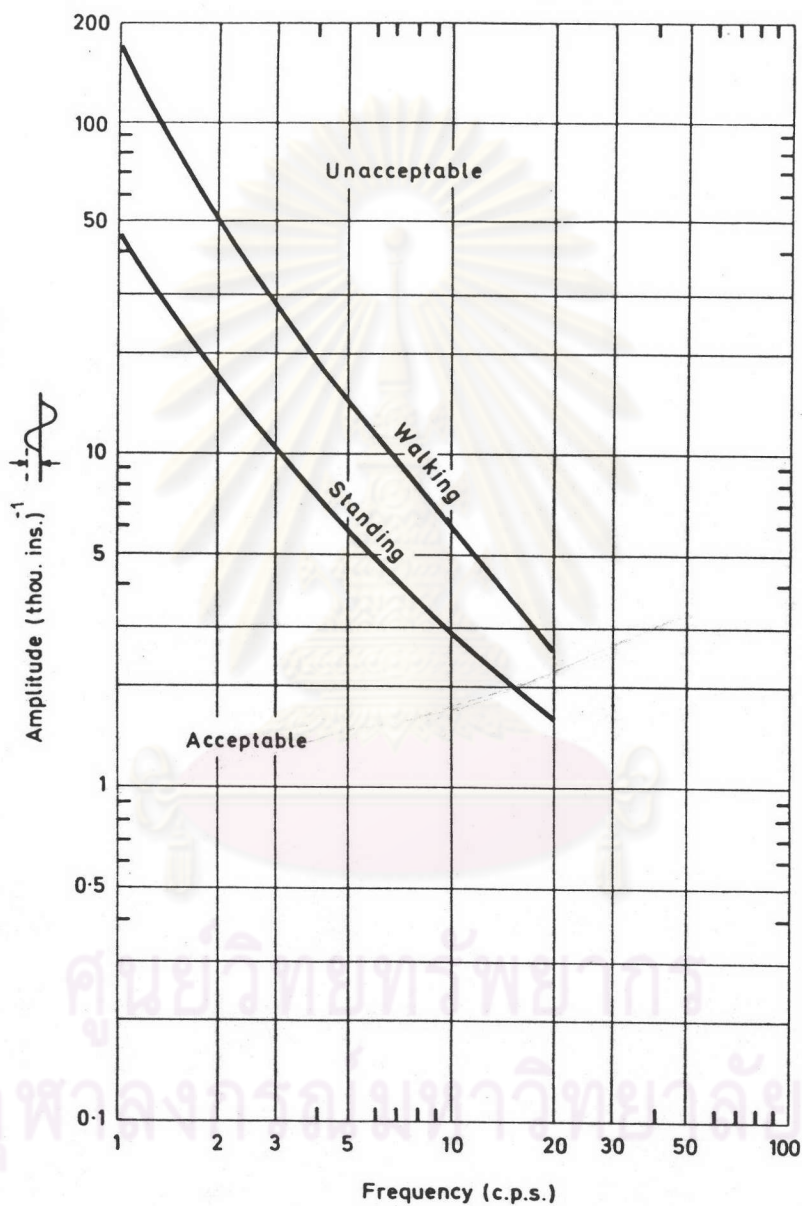
Velocity VS. Frequency

VERTICAL VIBRATION LIMITS FOR AUTOMOBILE
PASSENGER COMFORT (JANEWAY)



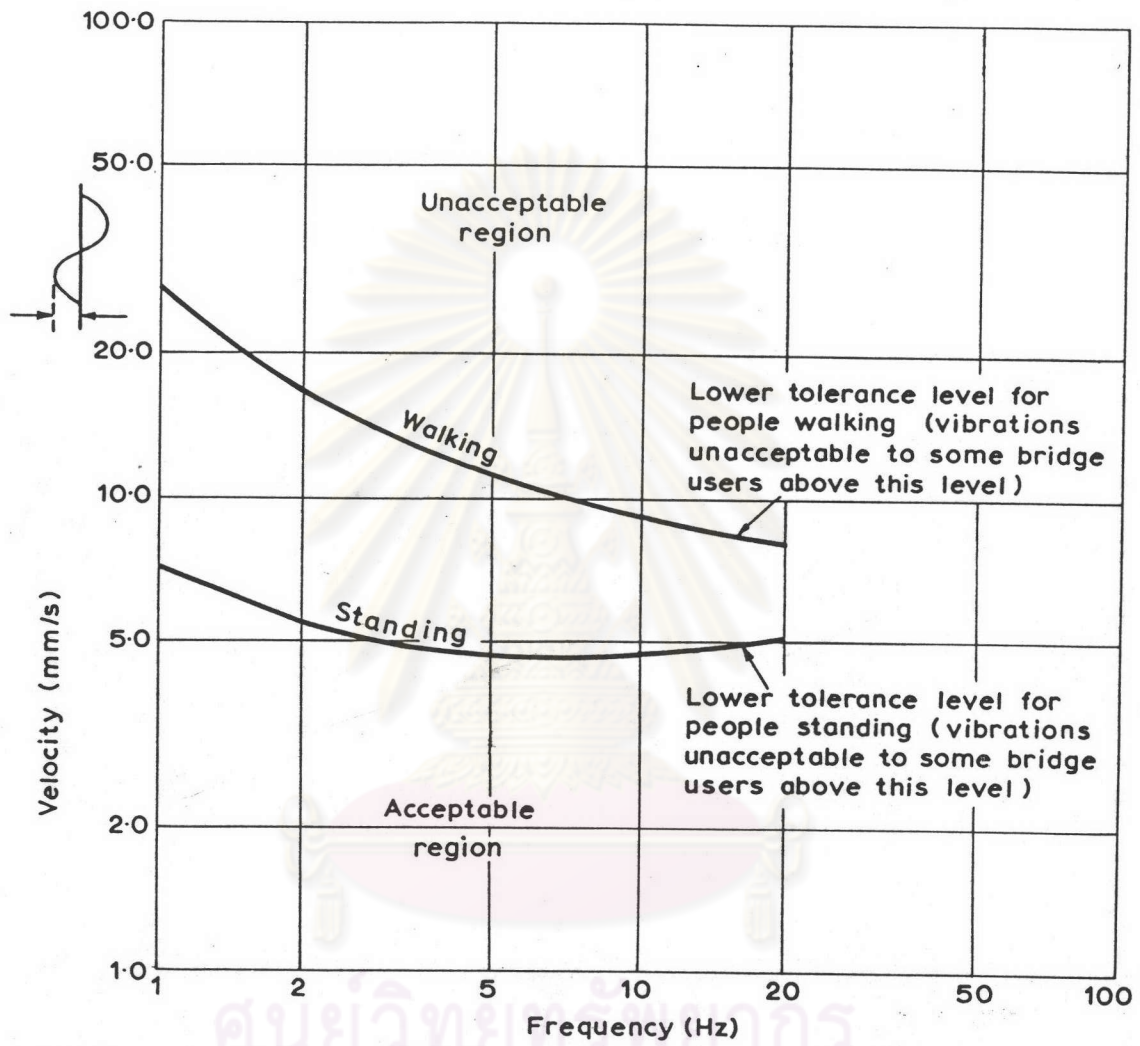
รูป 4.7 ข้อจำกัดสำหรับการสั่นสะเทือนในแนวตั้งสำหรับความสะดวกสบายของผู้โดยสาร (Janeway), Amplitude VS. Frequency

HUMAN TOLERANCE LEVELS FOR BRIDGE VIBRATIONS
(RESULTS OF R.R.L. TESTS. DECEMBER 1965)



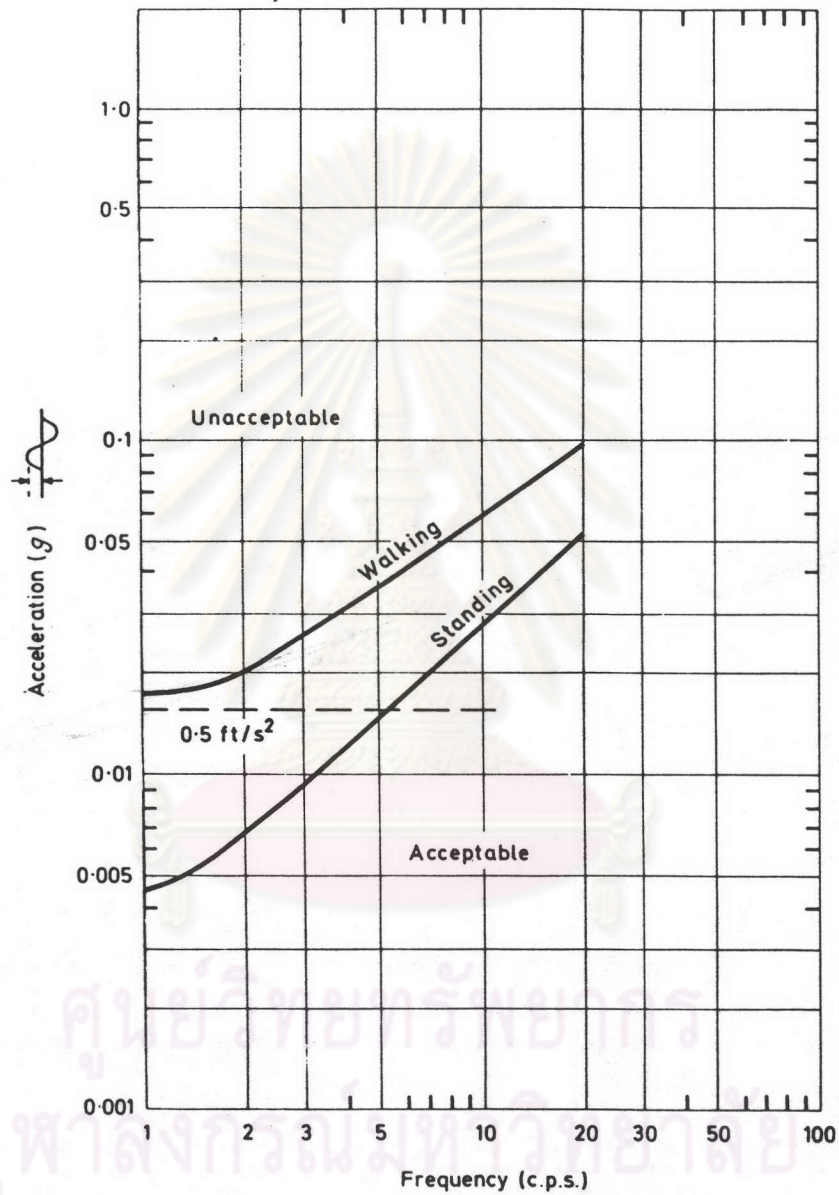
รูป 4.8 Tolerance levels ของคนเดินเท้าต่อการสั่นสะเทือนของสะพาน
(R.R.L.), Amplitude VS. Frequency

HUMAN TOLERANCE LEVELS FOR BRIDGE VIBRATIONS



รูป 4.9 Tolerance levels ของคนเดินเท้าต่อการสั่นสะเทือนของสะพาน
(R.R.L.), Velocity VS. Frequency

HUMAN TOLERANCE LEVELS FOR BRIDGE VIBRATIONS
(EXPRESSED IN TERMS OF g)



รูป 4.10 Tolerance levels ของคนเดินเท้าต่อการสั่นสะเทือนของสะพาน
(R.R.L.), Acceleration VS. Frequency

4.2 ผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีต่อโครงสร้างสะพาน

M.W. Jackson ได้พิจารณาความเสียหาย (damage) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นสะเทือนเป็น 2 ลักษณะคือ

1. Structural damage หมายถึง ความเสียหายที่ทำให้เกิดการเสียหายหน้าที่ (function) หรือการใช้งานของโครงสร้าง
2. Architectural damage หมายถึง ความเสียหายเล็ก ๆ น้อย ๆ เช่น การแตกร้าวของปูนฉาบผนัง หรือการร้าวของวัสดุเปราะ ความเสียหายลักษณะนี้ให้ผลในแง่ของการก่อความรำคาญ (annoying) มากกว่าที่จะก่อให้เกิดอันตรายหรือทำความเสียหายให้แก่โครงสร้าง

บทบาทของการสั่นสะเทือนในการทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้ 3 แนวทางคือ

1. ถ้าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง (instant of time) มีขนาดมากพอ จะทำให้ Local rupture stress เพิ่มมากขึ้น จนทำให้เกิดการพังทลาย (failure) ของโครงสร้าง
2. ถ้าการสั่นสะเทือนนั้นเกิดซ้ำ ๆ (repetition) จะทำให้เกิดการล้า (fatigue damage) ของโครงสร้าง
3. การสั่นสะเทือนจะทำให้เกิด stress ซึ่งจะ superimpose กับ stress เดิม ซึ่งมีค่ามากอยู่แล้วจนเป็นชนวน (triggering off) ของการพังทลายได้

ในสภาวะปกติระดับของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการจราจร จะมีระดับต่ำในการที่จะทำให้เกิดการพังทลายโดยตรง (direct failure) การมีส่วนช่วยให้เกิด fatigue failure ก็มีส่วนน้อยเพราะว่า factor of safety ที่ใช้สำหรับคานเหล็กสามารถต้านทานได้ แต่ผลจาก "triggering" เป็นผลกระทบที่สำคัญที่สุดของการสั่นสะเทือนเนื่องจากปริมาณการจราจร (Whiffin และ Leonard, 1971)

ระดับของการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อโครงสร้างนั้น Jackson ได้วิเคราะห์ข้อมูลทางด้านสถิติของ American Bureau of Mines (การระเบิดในเหมือง) และกำหนด Peak Particle Velocity 5 mm/s เป็นจุดเริ่มต้นของ Architectural damage และที่ความเร็ว 50-80 mm/s เป็นจุดเริ่มของความเสียหายเล็กน้อย (minor damage) นอกจากนี้ยังมีหลายหน่วยงานที่กำหนดระดับการสั่นสะเทือนของโครงสร้างและสะพาน ดังต่อไปนี้

4.2.1 German Standard DIN 4150 Part 3 (1986)

ทำการกำหนดระดับการสั่นสะเทือนดังนี้คือ

4.2.1.1 Short-term (Transient) structural vibration

สำหรับโครงสร้างที่ไม่มีผลของ Resonance เข้ามาเกี่ยวข้อง และไม่คำนึงถึง Fatigue จะกำหนดความเร็วของการสั่นสะเทือนที่มากที่สุดของแกนใด ๆ (\hat{V}_i) ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อโครงสร้างทั้งอาคาร กำหนดตามตาราง 4.1 แต่ถ้าประเมินการสั่นสะเทือนของส่วนประกอบของตึกโดยเฉพาะการสั่นสะเทือนของพื้น ความเร็วของการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (\hat{V}_v) ที่มากที่สุดต้องไม่เกิน 20 mm/s

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.1 ความเร็วของการสั่นสะเทือน (\hat{v}_i) ของโครงสร้าง สำหรับการประเมินผลกระทบจาก Short-term (Transient) vibration

Guideline values of vibration velocity, \hat{v}_i , for evaluating the effects of short-term vibration

Line	Type of structure	Vibration velocity, \hat{v}_i , in mm/s				Plane of floor of uppermost full storey
		Foundation			Frequency mixture	
		less than 10 Hz	10 to 50 Hz	50 to 100*) Hz		
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings and buildings of similar design	20	20 to 40	40 to 50	40	
2	Dwellings and buildings of similar design and/or use	5	5 to 15	15 to 20	15	
3	Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, do not correspond to those listed in lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. buildings that are under a preservation order)	3	3 to 8	8 to 10	8	

*) For frequencies above 100 Hz, at least the values specified in this column shall be applied.

4.2.1.2 Steady-state vibration

ในกรณีของ Girder ที่การสั่นสะเทือนอาจเกิด

Resonance ความเร็วของการสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง (\hat{v}_v) ต้องไม่มากกว่า 10 mm/s

จึงจะ เป็นที่ยอมรับได้

4.2.2 Standard SN 640312 (1978)

The Association of Swiss Highway Engineers

ได้แบ่งโครงสร้างออกเป็น 4 ลำดับชั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของการก่อสร้าง (ตาราง 4.2) และ ตาราง 4.3 เป็นเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับโครงสร้างตามตาราง 4.2 โดยพิจารณาแหล่งของการเกิดการสั่นสะเทือนเป็น 2 ประเภท (Source M และ S) สำหรับสะพานเป็นโครงสร้าง ลำดับชั้นที่ 1 และปริมาณการจราจรเป็น Source M จากตาราง 4.3 ที่ความถี่ของการ

สั่นสะเทือน 10-30 Hz ความเร็วของการสั่นสะเทือนที่มากที่สุด V_{max} คิดเป็น Vector velocity ต้องมีค่าไม่เกิน 12 mm/s จึงจะยอมรับได้ (Bachmann และ Ammann, 1987)

ตาราง 4.2 การแบ่งลำดับชั้นของโครงสร้าง SN 640312

structural category	definition
I	reinforced-concrete and steel structures (without plaster) such as industrial buildings, bridges, masts, retaining walls, unburied pipelines; underground structures such as caverns, tunnels, galleries, lined and unlined
II	buildings with concrete floors and basement walls, above-grade walls of concrete, brick or ashlar masonry; ashlar retaining walls, buried pipelines; underground structures such as caverns, tunnels, galleries, with masonry lining
III	buildings with concrete basement floors and walls, above-grade masonry walls, timber joist floors
IV	buildings which are particularly vulnerable or worth protecting

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.3 เกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ SN 640312 สำหรับโครงสร้างตามตาราง 4.2

structural category	source M		source S	
	f [Hz]	v _{max} [mm/s]	f [Hz]	v _{max} [mm/s]
I	10 – 30	12	10 – 60	30
	30 – 60	12 – 18*	60 – 90	30 – 40**
II	10 – 30	8	10 – 60	18
	30 – 60	8 – 12*	60 – 90	18 – 25**
III	10 – 30	5	10 – 60	12
	30 – 60	5 – 8*	60 – 90	12 – 18**
IV	10 – 30	3	10 – 60	8
	30 – 60	3 – 5*	60 – 90	8 – 12**

source M: machinery, traffic, construction works – (*) the lower value applies to 30 Hz, the upper to 60 Hz, with interpolation in between.
source S: blasting operations – (***) the lower value applies to 60 Hz, the upper to 90 Hz, with interpolation in between.

4.2.3 RRL Report LR 418

Whiffin และ Leonard (1971) ได้สรุปปฏิบัติการตอบสนองของคน และความเสียหายของสิ่งปลูกสร้าง ที่ความเร็วของการสั่นสะเทือนต่าง ๆ อันเนื่องมาจาก ปริมาณการจราจร (ตาราง 4.4)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.4 ปฏิกริยาตอบสนองของคนและความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างจากการสั่นสะเทือน

(Whiffin และ Leonard, 1971)

Summary: Reaction of people and damage to buildings at various vibration levels

Peak particle Velocity** mm/s	Human reaction	Effect on buildings
0 to 0.15	Imperceptible by people – no intrusion.	Vibrations unlikely to cause damage of any type.
0.15 to 0.3	Threshold of perception – possibility of intrusion.	Vibrations unlikely to cause damage of any type.
2.0	Vibrations perceptible	Recommended upper level of the vibration to which ruins and ancient monuments should be subjected.
2.5	Level at which continuous vibrations begin to annoy people.	Virtually no risk of “architectural” damage to normal buildings.
5	Vibrations annoying to people in buildings (this agrees with the levels established for people standing on bridges and subjected to relatively short periods of vibrations)	Threshold at which there is a risk of “architectural” damage to normal dwelling-houses with plastered walls and ceilings. Special types of finish such as lining of walls, flexible ceiling treatment, etc., would minimise “architectural” damage.
10 – 15	Vibrations considered unpleasant by people subjected to continuous vibrations and unacceptable to some people walking on bridges.	Vibrations at a greater level than normally expected from traffic, but would cause “architectural” damage and possibly minor structural damage.

** The numbers in this column are based on the peak particle velocity in the vertical direction. Where human reactions are concerned, the value is that at the point at which the person is situated. For buildings, the value refers to the ground motion but no allowance is included for the amplifying effect of structural components.

4.3 ข้อกำหนดในการออกแบบสำหรับการสั่นสะเทือนของสะพาน

4.3.1 AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges (1989)

ในปัจจุบันไม่มีข้อกำหนดที่ปรับปรุงใหม่สำหรับ Live-load impact ในการออกแบบสะพานทางหลวง นอกจากจะใช้ "Impact factor" เป็นข้อกำหนดสำหรับ "Dynamic allowance" สำหรับน้ำหนักจากปริมาณการจราจร

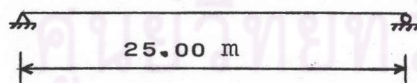
AASHTO หัวข้อ 3.8.2 ได้กำหนด Impact factor (I) สำหรับการออกแบบสะพานทางหลวงดังนี้

$$I = \frac{50}{L+125} \quad \dots (4.1)$$

I = Impact factor (มีค่าไม่เกิน 30%)

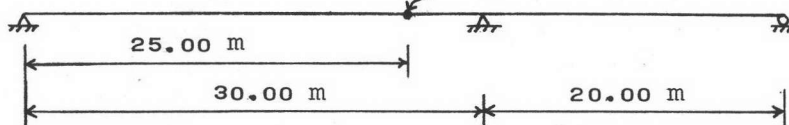
L = ส่วนของ Span ที่รับน้ำหนักซึ่งทำให้เกิด Maximum stress ใน member นั้น ๆ มีหน่วยเป็นฟุต

ดังนั้น Simple span ยาว 25.00 เมตร ของสะพานลอยไทย-เบลเยียม จะหา Impact factor ได้จาก



$$I = \frac{50}{25 \times 3.28 + 125} = 0.24$$

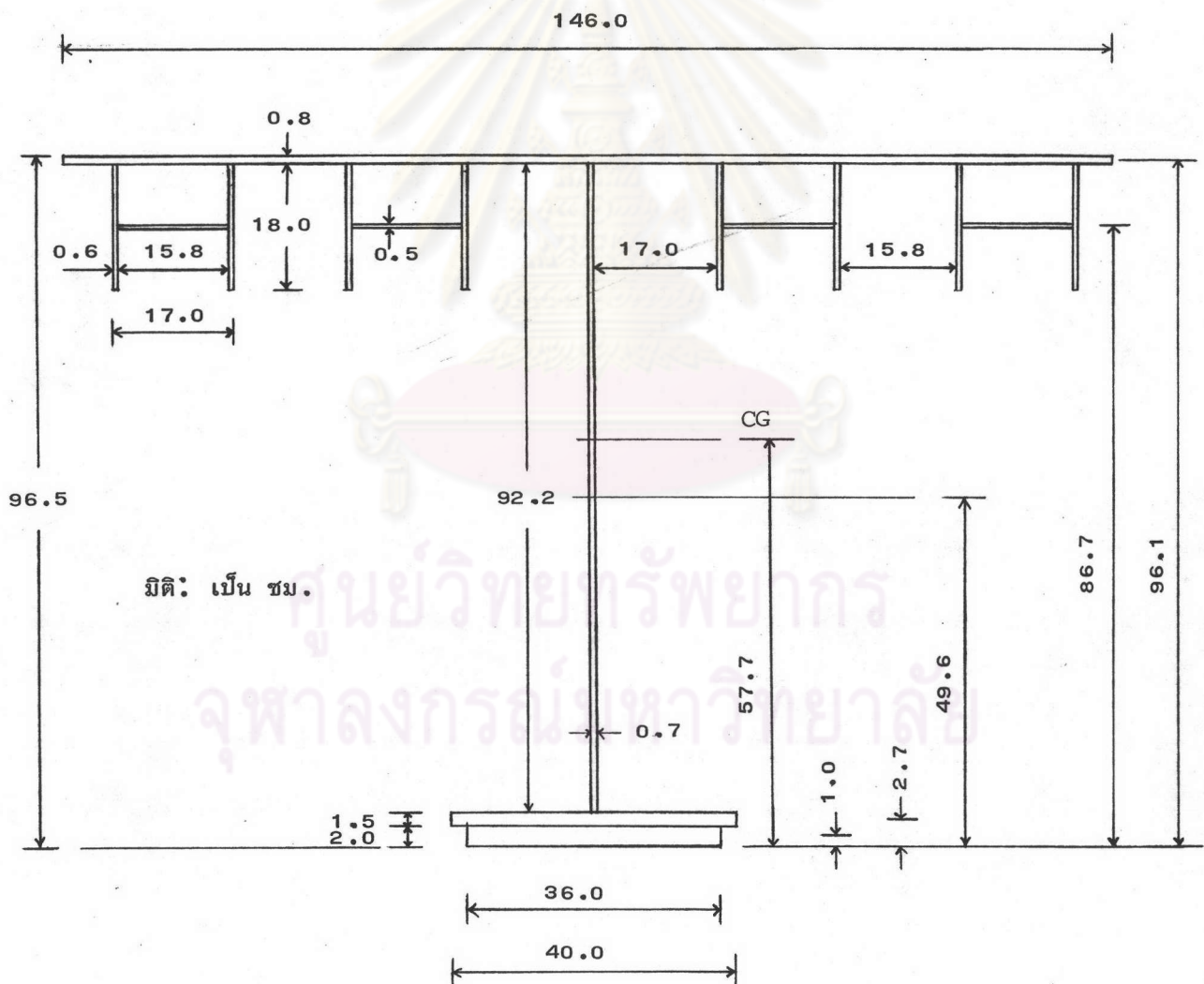
และ Continuous span ยาว 30.00 เมตร Impact มีค่า hinge



$$I = \frac{50}{25 \times 3.28 + 125} = 0.24$$

นอกจากกำหนด Impact factor เพื่อรับ Dynamic loading จากปริมาณการจราจรแล้ว ยังกำหนดในทางอ้อมในรูปของ Stiffness ของโครงสร้าง โดยกำหนด Depth-span ratios อัตราส่วนของ Structural depth กับความยาวของ Span และกำหนด Deflection-span ratios อัตราส่วนของ Deflection กับความยาวของ Span

คานหลักของสะพานลอยไทย-เบลเยียม เป็นคานประกอบ (Plate girder) ซึ่งมีรูปตัดของคานและคุณสมบัติของหน้าตัดตามรูป 4.11 และตาราง 4.5 ตามลำดับ (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ข)



รูป 4.11 รูปตัดของคานประกอบ (Plate girder)

ตาราง 4.5 คุณสมบัติของหน้าตัด (Section properties)

Sections	A (cm ²)	I _O (cm ⁴)	Y _b (NA to Bot)	Ay _b	d (CG to NA)	Ad ²
Top flange	117	6	96.1	11,244	38.4	172,524
H-shape	118	2,333	86.7	10,231	29.0	99,238
Web	65	45,720	49.6	3,224	8.1	4,265
Bottom flange	60	11	2.7	162	55.0	181,500
Cover plate	<u>72</u>	<u>24</u>	1.0	<u>72</u>	56.7	<u>231,472</u>
	432	48,094		24,933		688,999
						<u>48,094</u> ⁺
						= 737,093
	$\bar{y} = \frac{24,933}{432} = 57.7 \text{ cm}$					
	$S_b = \frac{737,093}{57.7} = 12,775 \text{ cm}^3$					
	$\bar{I} = 737,093 \text{ cm}^4$					
	$S_t = \frac{737,093}{38.8} = 18,997 \text{ cm}^3$					

AASHTO หัวข้อ 10.5.1 กำหนด Depth-span ratios, อัตราส่วนของ

Structural depth กับความยาวของ Span ต้องไม่น้อยกว่า 1/25 โดยที่อัตราส่วนนี้ของ Continuous span ความยาวของ Span ที่ใช้จะเป็นระยะของ Dead load point of contraflexure ดังนั้น Simple span 25.00 เมตร และ Continuous span 30.00 เมตร ค่า Depth ของ girder ต้องมากกว่า $2500/25 = 100 \text{ cm}$

จากรูป 4.11 Depth = 96.5 cm < 100 cm

AASHTO หัวข้อ 10.6.2 กำหนด Computed deflection ของ Simple หรือ Continuous spans โดยกำหนด Deflection-span ratios อัตราส่วนของ Deflection กับความยาวของ Span เนื่องจาก Service live load plus impact ต้องไม่เกิน 1/800 นอกจากสะพานในเมืองที่มีคนเดินเท้า อัตราส่วนนี้ต้องไม่เกิน 1/1,000 ตาราง 4.6 แสดงค่า Deflection ที่ยอมให้กับ Computed deflections (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ข)

ตาราง 4.6 Deflection ที่ยอมให้กับ Computed deflection

Spans (m)	$\Delta = L/800$ (cm)	Computed Deflections (cm)
25.00	3.125	5.087
30.00	3.750	6.445

จากข้อกำหนด Depth-span ratios Deflection-span ratios จะเห็นว่า Stiffness ของโครงสร้างไม่พอที่จะรับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงสมควรที่จะเพิ่ม Stiffness ของ Girder อีกดังนี้

สำหรับ Span 25.00 m กำหนด $\Delta = 3.125$ cm $EI\delta_D = 1,881,917$
 $EI\delta_{L+I} = 1.24 (4,832,879)$

ดังนั้น Required I = $\frac{[1,881,917 + 1.24(4,832,879)] \times 10^8}{(2.1 \times 10^{10})(0.03125)} = 1,199,952 \text{ cm}^4$

ต้องเพิ่มค่า I อีกประมาณ = $(1,199,952 - 737,093) = 462,859 \text{ cm}^4$

สำหรับ Span 30.00 m กำหนด $\Delta = 3.750 \text{ cm}$ $EI \delta_D = 2,362,827,$
 $EI \delta_{L+I} = 1.24(6,140,710)$

ดังนั้น Required $I = \frac{[2,362,827 + 1.24(6,140,710)] \times 10^8}{(2.1 \times 10^{10})(0.03750)} = 1,266,960 \text{ cm}^4$

ต้องเพิ่มค่า I อีกประมาณ $= (1,266,960 - 737,093) = 529,867 \text{ cm}^4$

4.3.2 ข้อกำหนดทางพลวัตของโครงสร้าง

เป็นสิ่งจำเป็นมากในการตรวจสอบการตอบสนองทางพลวัตของ
 โครงสร้าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกรณีของ Resonance โดยการทำให้ First mode natural
 frequency ของสะพานมีค่ามากกว่า Forcing frequency จากขดยาน ซึ่งพารามิเตอร์
 ที่สำคัญ 2 อย่างที่พิจารณาี้คือ Span ratio L_1/L_2 (สำหรับ Continuous span) และ
 อัตราส่วนของ Flexural rigidity กับ dead load (EI/m)

จากตาราง 3.4 บทที่ 3 จะเห็นว่าความถี่ธรรมชาติของสะพานลอยไทย-
 เบลเยี่ยมนี้มีค่าน้อยกว่า Forcing frequency จากขดยาน ดังนั้นจึงสมควรที่จะเพิ่ม
 Stiffness ของโครงสร้าง โดยเพิ่มค่า Moment of inertia (I) ของ girders
 ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของ AASHTO

4.4 การตรวจสอบหน่วยแรง (Stresses) ของ Plate girder

ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสะพานลอยไทย-เบลเยี่ยม ในการวิจัยนี้จะยึดถือตาม
 "Standard Specifications for Highway Bridges, 1989" ของ AASHTO ซึ่งมี
 รายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 วัสดุ (Materials)

AASHTO หัวข้อ 10.2.2 กำหนดคุณสมบัติของ Structural carbon
 steel ดังนี้

- Modulus of elasticity (E) of all grades of structural steel

$$E = 29,000,000 \text{ psi } (2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2, 200 \text{ GPa})$$

- Type: AASHTO Designation:- M 270 Grade 36

Equivalent ASTM Designation:- A 709 Grade 36 (A36 เดิม)

$$F_y = 36,000 \text{ psi } (2,500 \text{ kg/cm}^2)$$

โดยที่ F_y = Specified minimum yield point of steel

ในมาตรฐานสำหรับอาคารเหล็กรูปพรรณของ ว.ส.ท. เหล็กรูปพรรณทั่วไปซึ่งมีความหนา

$t < 40 \text{ mm}$ ถ้าไม่มีเอกสารการทดสอบให้ใช้กำลังจุดคานงได้สูงสุดไม่เกิน $F_y = 2,500 \text{ kg/cm}^2$

(วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2518)

4.4.2 หน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stresses)

ตาราง 10.32.1 A ของ AASHTO กำหนด Allowable stresses

ดังนี้

4.4.2.1 ตรวจสอบหน่วยแรงเค้นดัด

กำหนดระยะค้ำยันด้านข้าง (Lateral support)

$$\frac{L}{b} < 36 \quad \dots (4.2)$$

โดยที่ L = member length

b = compression flange width

ในกรณีของ M⁺ $\frac{L}{b} = \frac{3.125}{0.158} = 19.78 < 36$ ใช้ได้

กำหนด F_b = Allowable bending stress (compression in extreme fiber)

$$F_b = 0.55 f_y \left(1 - \frac{(L/r')^2 F_y}{4\pi^2 E} \right) \quad \text{โดยที่} \quad (r')^2 = \frac{b^2}{12}$$

จะได้ $F_b = 20,000 - 7.5 \left(\frac{L}{b}\right)^2 \dots (4.3)$

ดังนั้น $F_b = 20,000 - 7.5(19.78)^2$
 $= 17,066 \text{ psi } (1,181 \text{ kg/cm}^2)$

สำหรับ Positive moment $f_b = 691 < 1,181 \text{ kg/cm}^2$ ใช้ได้

ในกรณีของ M^- $\frac{L}{b} = \frac{3.125}{0.36} = 8.68 < 36$ ใช้ได้

ดังนั้น $F_b = 20,000 - 7.5(8.68)^2$
 $= 19,435 \text{ psi } (1,345 \text{ kg/cm}^2)$

สำหรับ Negative moment $f_b = 915.4 < 1,345 \text{ kg/cm}^2$ ใช้ได้

โดยที่ $f_b =$ Computed compressive bending stress (รายละเอียดการคำนวณ อยู่ในภาคผนวก ค)

4.4.2.2 ตรวจสอบหน่วยแรงเฉือน

กำหนด $F_v =$ Allowable shear stress

$$F_v = 0.33 F_y \dots (4.4)$$

ดังนั้น

$$F_v = 0.33(36,000)$$

$$= 12,000 \text{ psi } (830 \text{ kg/cm}^2)$$

สำหรับ Simple span 25 m $f_v = 348 < 830 \text{ kg/cm}^2$ ใช้ได้

สำหรับ Continuous span 30 m $f_v = 377 < 830 \text{ kg/cm}^2$ ใช้ได้

โดยที่ $f_v =$ Average calculated unit shearing stress in the gross section of the web plate (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ค)

4.4.3 ตรวจสอบปีกของคานประกอบ (Flanges)

AASHTO หัวข้อ 10.34.2.1.3 กำหนดอัตราส่วนความกว้างกับความหนาของ Compression flange plate (b/t_f) ของ welded girders ควรจะมีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนที่กำหนดดังนี้

$$\frac{b}{t_f} < \frac{3,250}{\sqrt{f_b}} \quad \text{และ} \quad \frac{b}{t_f} < 24 \quad \dots (4.5)$$

โดยที่ b = Compression flange width
 t_f = Compression flange thickness
 f_b = Computed compressive bending stress (psi)

พิจารณา Top flange $\frac{b}{t_f} = \frac{17.0}{0.8} < \frac{3,250}{\sqrt{691 \times 2.24 \times 2.54^2}}$

21.2 < 32.5 ใช้ได้

และ 21.2 < 24 ใช้ได้

4.4.4 ตรวจสอบความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง (Web Plates)

AASHTO หัวข้อ 10.34.3.1.1 กำหนดความหนาของ Web plates (t_w) ของ Girders ที่ไม่มี Longitudinal stiffeners ดังนี้

$$t_w > \frac{D\sqrt{f_b}}{23,000} \quad \text{และ} \quad t_w > \frac{D}{170} \quad \dots (4.6)$$

โดยที่ D = Depth of web plate
 f_b = Computed compressive bending stress (psi)

ใช้ $f_b = 915 \text{ kg/cm}^2$ $t_w > \frac{92.2 \sqrt{915 \times 2.24 \times 2.54^2}}{23,000}$

$$0.7 > 0.46 \text{ cm} \quad \text{ใช้ได้}$$

$$> \frac{D}{170}$$

$$> \frac{92.2}{170} = 0.54 \text{ cm} \quad \text{ใช้ได้}$$

AASHTO หัวข้อ 10.8.1 กำหนดความหนาของ Web plate =
0.23 inches (0.58 cm)

ดังนั้น $t_w = 0.7 > 0.58 \text{ cm}$ ใช้ได้

4.4.5 ตรวจสอบความหนาของ Cover Plates

AASHTO หัวข้อ 10.13.3 กำหนดความหนาของ Single cover plate (t_R) ดังนี้

$$t_R < 2t_f \quad \dots (4.7)$$

โดยที่ t_f = ความหนาของ flang ที่ Cover plate ประกอบ

$$t_R = 2.0 < 2(1.5) \\ < 3.0 \text{ cm} \quad \text{ใช้ได้}$$

และกำหนดความหนาทั้งหมดของ Cover plate, Total $t_R < 2.5 t_f = 2.5(1.5)$
 $= 3.75 \text{ cm}$

4.4.6 เหล็กเสริมข้างคานภายใน (Transverse Intermediate Stiffeners)

AASHTO หัวข้อ 10.34.4.1 กำหนดว่าไม่ต้องมีเหล็กเสริมข้างคานภายใน
ถ้าความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง (t_w) มีค่าดังนี้

$$t_w > \frac{D}{150} \quad \dots (4.8)$$

และ f_v มีค่าน้อยกว่า F_v

$$f_v < F_v \quad (F_v = \frac{7.33 \times 10^7}{(D/t_w)^2} \leq \frac{F_y}{3}) \quad \dots (4.9)$$

$$t_w > \frac{D}{150}$$

$$0.7 > \frac{92.2}{150} = 0.61 \text{ cm} \quad \text{ใช้ได้}$$

สำหรับ Simple span $f_v < \frac{7.33 \times 10^7}{(D/t_w)^2}$

แต่ $348 \times 2.24 \times 2.54^2 > \frac{7.33 \times 10^7}{(92.2/0.7)^2}$

$$5,029 > 4,225 \text{ psi}$$

สำหรับ Continuous span $f_v < \frac{7.33 \times 10^7}{(D/t_w)^2}$

แต่ $377 \times 2.24 \times 2.54^2 > \frac{7.33 \times 10^7}{(92.2/0.7)^2}$

$$5,448 > 4,225 \text{ psi}$$

ลักษณะการใช้งานของ Stiffeners ขณะนี้เป็น Bearing stiffeners รับคานขวาง

(@ 3.125 m) ถือว่าใช้ได้ และจากที่ใช้ f_v มากสุด (ที่ Support) เปรียบเทียบ จะได้

f_v ที่พิจารณามากกว่า F_v ไปบ้าง