

ทบทวนวรรณคดี

2.1 ระบบทางด่วนพิเศษ <sup>(5)</sup>

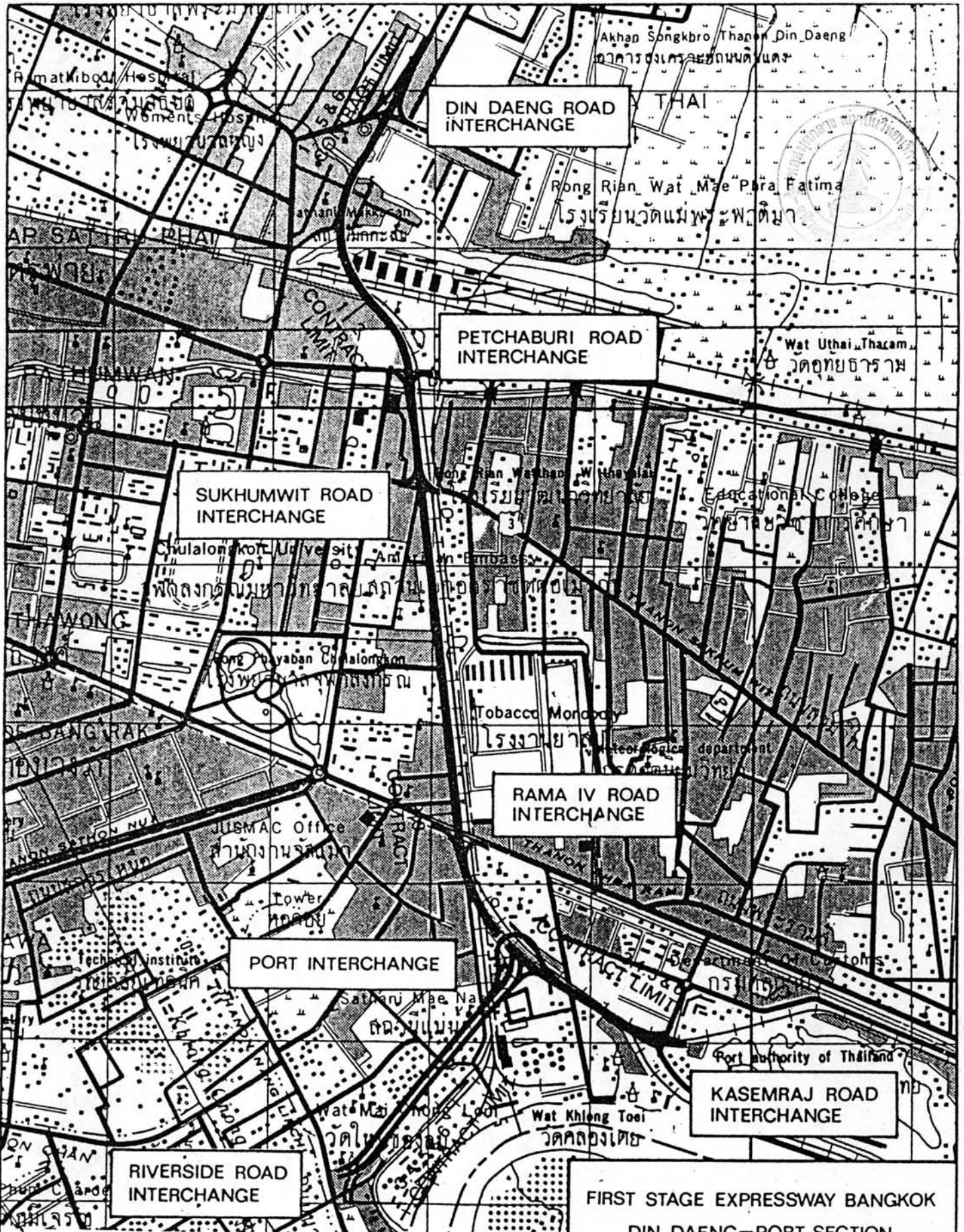
ทางด่วนมีลักษณะเหมือนถนน ซึ่งจัดสร้างให้เป็นทางวิ่งสำหรับรถยนต์ส่วนบุคคล แต่มีการควบคุมการเข้าหรือออก หมายความว่า อนุญาตให้รถยนต์เข้าหรือออกจากทางด่วนได้ เฉพาะจุดที่กำหนดเข้าหรือออกไว้เท่านั้น บริเวณที่ทางด่วนตัดกับถนนเดิม จะทำการก่อสร้างเป็นทางคนละระดับเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุด้านข้างของทางด่วนจะมีรั้วกั้นสองข้างทางเพื่อป้องกันไม่ให้คนหรือสัตว์เข้าไปกีดขวางการจราจรโดยเด็ดขาด ดังนั้นทางด่วนจึงเป็นถนนชนิดที่รถยนต์ส่วนตัว รถยนต์โดยสารและรถยนต์บรรทุกสามารถวิ่งไปสู่อุณหภูมิปลายทางได้ด้วยความเร็วและปลอดภัย

ระบบทางด่วนหมายถึง การเชื่อมทางด่วนหลายสายเข้าด้วยกันเป็นระบบ เพื่อให้มีประโยชน์ในการใช้สอยร่วมกัน ซึ่งการทำเช่นนี้สามารถอำนวยความสะดวกแก่รถยนต์เพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณกว่าประโยชน์จากทางด่วนเฉพาะสายใดสายหนึ่ง

ระบบทางด่วนประกอบด้วยทางด่วน 3 สาย มีความยาวทั้งสิ้น 27.1 กิโลเมตร ได้แก่

1. สายดินแดง-ท่าเรือ ระยะทาง 8.9 กิโลเมตร
2. สายบางนา-ท่าเรือ ระยะทาง 7.9 กิโลเมตร
3. สายดาวคะนอง-ท่าเรือ ระยะทาง 10.3 กิโลเมตร

เพื่อเชื่อมโยงทางหลวงแผ่นดินสายดินแดง-ดอนเมือง สายธนบุรี-ปากท่อ และสายบางนา-ตราด เข้าด้วยกัน ยานยนต์ต่าง ๆ สามารถใช้ทางด่วนทั้ง 3 สายติดต่อไปยังภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคใต้โดยตรง และรวดเร็ว ปลอดภัยไม่ต้องเข้ามาแออัดยึดเย็บคอกู่ในเมืองดังปัจจุบัน



รูป 2.1 เส้นทางส่วนตอนดินแดง-ท่าเรือ

FIRST STAGE EXPRESSWAY BANGKOK  
DIN DAENG-PORT SECTION

PLAN OF PROJECT

มาตรฐานสำหรับทางด่วนพิเศษ

ลักษณะถนน	ทางด่วนพิเศษ
ลักษณะผิวถนน	แอสฟัลท์คอนกรีต
หน้าที่และลักษณะการออกแบบ	ควบคุมการเข้าออก มีลักษณะเป็นทาง ต่างระดับตัดกัน ไม่อนุญาตให้จอดรถ ข้างทางวิ่ง
ความกว้าง	เขตทางกว้าง 150-250 ฟุต ผิวจราจรกว้าง 12 ฟุตต่อช่องจราจร(lane) ไหล่ถนนกว้าง 8-10 ฟุต เกาะกลางถนนกว้าง 8-30 ฟุต
ความชันสูงสุด	3 เปอร์เซ็นต์
ความเร็ว	50 ไมล์ต่อชั่วโมง

ประโยชน์ที่จะได้รับเนื่องจากการก่อสร้างระบบทางด่วน

ระบบทางด่วนจะเชื่อมทางหลวงแผ่นดินสายประธาน 3 สาย ซึ่งติดต่อไปยังภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคใต้ มีความยาวทั้งสิ้น 27.1 กิโลเมตร มี 6 ช่องจราจร มีเกาะกลางและมีการควบคุมการเข้าออก ซึ่งจะเปิดให้เข้าออกเฉพาะที่แยกดินแดง ถนนเพชรบุรี ถนนสุขุมวิท ถนนพระราม 4 ถนนเกษมราษฎร์ ทางเข้าท่าเรือแห่งใหม่ สุขุมวิท-ชอย 62 สีแยกบางนา ถนนนางลิ้นจี่ ถนนเสียบแม่ไม้ ถนนสุขสวัสดิ์และที่ทางหลวงสายธนบุรี-ปากท่อ

ระบบทางด่วนจะช่วยให้

1. ประหยัดพลังงานน้ำมัน
2. ประหยัดเวลาในการเดินทาง
3. ประหยัดเงินค่าบำรุงรักษารถ

4. ลดปริมาณรถยนต์ยานบนถนนทั่วไปในกรุงเทพฯ เนื่องจากรถซึ่งเดินทางระหว่างต่างจังหวัดหันมาใช้ทางด่วน ไม่จำเป็นต้องเข้าเมือง
5. ลดปริมาณรถยนต์ยานในบริเวณถนนที่ใกล้เคียงทางด่วน เนื่องจากใช้ระบบทางด่วน จะเดินทางได้รวดเร็วกว่า
6. ประหยัดค่าขนส่งสินค้าจากท่าเรือกรุงเทพฯ ไปยังต่างจังหวัด
7. ลดอุบัติเหตุ



## 2.2 ผลงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R. Brenner และ S. Viranuvut<sup>(1)</sup> ทำการวัดระดับความสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจรบนถนนลูขุมวิท ที่จังหวัดชลบุรี เพื่อที่จะศึกษาว่าระดับความสั่นสะเทือนในปลั๊กบับอยู่ในระดับใด สำหรับใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเปรียบเทียบว่าจะมีระดับความสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นเท่าใด เมื่อมีโรงงานอุตสาหกรรมที่กำลังจะทำการก่อสร้างขึ้นอยู่บริเวณใกล้เคียงกับถนน

ในการวัดระดับความสั่นสะเทือนโดยใช้ Velocity Transducer ที่ระยะประมาณ 2-30 เมตร ทั้งสองข้างของถนนจำนวน 12 แห่ง พบว่าที่ระยะประมาณ 10-20 เมตร ห่างจากขอบถนนวัดระดับความสั่นสะเทือนในรูปของ Peak particle velocity ได้ประมาณ 0.3 มิลลิเมตร/วินาที ซึ่งอยู่ในระดับที่เพียงแต่คนสามารถรับรู้ได้เท่านั้น ไม่สามารถเป็นอันตรายต่อสิ่งปลูกสร้างใด ๆ เลย

D. Nelson และ S. Viranuvut<sup>(6)</sup> ได้ศึกษาระดับความสั่นสะเทือนจากการจราจรของรถบรรทุกหนักรอบ ๆ วัดโพธิ์ว่าจะมีผลกระทบต่อพระพุทธรูปนอน ซึ่งเมื่อปี พ.ศ. 2512 ได้สังเกตเห็นรอยแตกตามส่วนต่าง ๆ ของพระพุทธรูป เช่น บริเวณใบหน้า พระเศียร และพระบาท

การวัดความสั่นสะเทือน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของฐานพระพุทธรูป ซึ่งห่างจากถนนประมาณ 20-30 เมตร พบว่า Peak particle velocity มีค่าตั้งแต่



0.0016-0.0049 นิ้ว/วินาที และมีช่วงความถี่ 12-15 Hz. ซึ่งความสั่นสะเทือนในระดับนี้ไม่อยู่ในระดับที่เป็นสาเหตุของความเสียหายของโครงสร้าง แต่อย่างไรก็ดี สภาพของถนนในขณะที่ทำการวัดได้มีการปรับปรุงให้มีสภาพใช้งานได้ดีและมีผิวหน้าที่เรียบ จึงทำให้มีระดับความสั่นสะเทือนในระดับต่ำเมื่อเทียบกับค่าที่เคยเกิดเมื่อปี พ.ศ. 2512 ก็ได้

สรุปว่า สาเหตุของการแตกร้าวของพระพุทธรูป คาดว่าอาจเกิดจากการทรุดตัวของฐานรากของพระพุทธรูปมากกว่าที่เกิดจากความสั่นสะเทือนเนื่องจากการจราจร

D.R. Leonard, J.W. Grainger and R. Eyre.<sup>(7)</sup> ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกของรถกับระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการใช้รถบรรทุก 8 คัน มีน้ำหนักตั้งแต่ 32-44 ตัน จากการเปรียบเทียบโดยใช้รถบรรทุก 2 คัน ที่มีรูปร่างและคุณสมบัติคล้ายกัน เช่น จำนวนเพลลาและระยะห่างระหว่างเพลลาเท่ากัน suspension system เหมือนกัน พบว่ารถที่มีน้ำหนักบรรทุก 44 ตัน สามารถทำให้เกิดระดับความสั่นสะเทือนได้สูงกว่ารถที่มีน้ำหนักบรรทุก 32 ตัน เพียงเล็กน้อย (แสดงว่าน้ำหนักบรรทุกของรถมีผลต่อระดับความสั่นสะเทือนเล็กน้อยเท่านั้น) และสรุปว่า vehicle suspension system มีอิทธิพลต่อระดับความสั่นสะเทือน เช่น รถที่มีเพลลาอยู่ ย่อมสามารถเพิ่มจำนวนที่ยวบดทับกับความเสียหายให้แก่โครงสร้างของถนนและทำให้เกิดความสั่นสะเทือนได้มากกว่ารถที่มีเพลลาเดียว

### 2.3 ธรรมชาติของคลื่น <sup>(8)</sup>

ในการศึกษาเรื่องความสั่นสะเทือนของวัตถุตัวกลาง จำเป็นต้องมีความเข้าใจเรื่องของคลื่นเสียก่อน เพราะคลื่นมีความสำคัญมากในวิชาฟิสิกส์ทุกสาขา คลื่นที่รู้จักกันดีคือ คลื่นน้ำ คลื่นเสียง คลื่นแสง คลื่นวิทยุ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ในบทที่จะกล่าวต่อไป จะสนใจเฉพาะคลื่นในตัวกลางที่ยืดหยุ่นได้ (elastic medium) และในการวิจัยครั้งนี้

จะเน้นเรื่องของการสั่นที่เกิดขึ้นที่ผิวดินเท่านั้น

ถ้าอนุภาคเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำกับทางเดิมเรียกว่าอนุภาคนั้นเกิดการสั่นหรือการแกว่ง (oscillate หรือ vibrate) ซึ่งในชีวิตประจำวันจะพบลักษณะการเคลื่อนที่แบบนี้อยู่เสมอ เช่น การสั่นของสายไวโอลิน การสั่นของวัตถุที่แขวนติดปลายสปริง การสั่นของโมเลกุลของอากาศในขณะที่คลื่นเสียงวิ่งผ่าน การเคลื่อนที่ใด ๆ ที่ซ้ำกลับไปกลับมาในลักษณะเดิมและมีช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ทั้งไปและกลับมาเท่า ๆ กัน เรียกว่าการเคลื่อนที่เป็นคาบเวลา (periodic motion) ถ้าเขียนกราฟระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement) กับเวลา (time) ของการเคลื่อนที่แบบนี้จะได้รูปกราฟของ sine หรือ cosines บางครั้งก็จะเรียกการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้ว่า การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก (harmonic motion) เพราะว่าการสั่นหรือการแกว่ง (oscillate หรือ vibrate) ทำให้เกิดคลื่น ดังนั้นพอจะนิยามคำว่ากักความของคลื่นได้ดังนี้

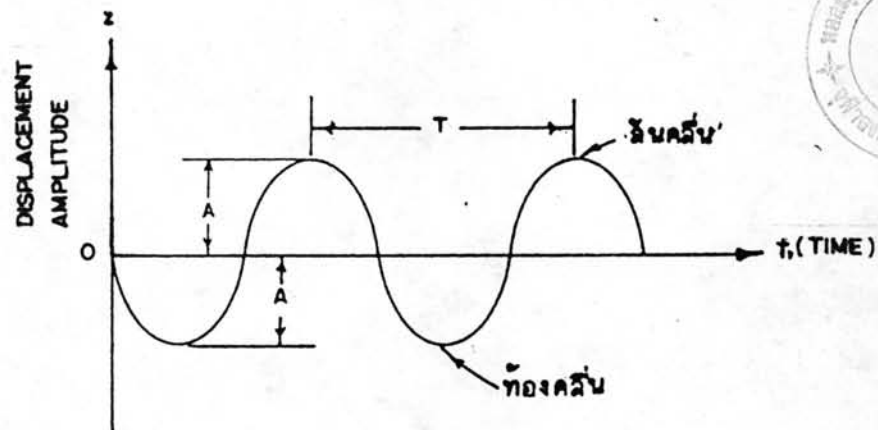
คลื่น (wave) คือสถานะหนึ่งของการรบกวน ซึ่งจะไปทำให้เกิดการสั่นของอนุภาคของตัวกลางรอบจุดสมดุล เนื่องจากคุณสมบัติการยืดหยุ่นของตัวกลางคลื่นจะเคลื่อนที่โดยการส่งผ่านพลังงานจากอนุภาคหนึ่งไปยังอนุภาคหนึ่งที่อยู่ติดกัน และไปยังอนุภาคต่อ ๆ ไป โดยอนุภาคเหล่านั้นจะสั่นรอบจุดสมดุลของมันเช่นเดียวกันโดยที่อนุภาคของตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่ ถ้าตัวกลางไม่เป็นวัสดุยืดหยุ่นโดยสมบูรณ์ (perfectly elastic) จะเกิดการสูญเสียพลังงานในตัวกลาง เรียกว่าเกิดแดมป์ (damp) หรือการหน่วงขึ้น ซึ่งจะทำให้ขนาด amplitude ของการสั่นเล็กลงเรื่อย ๆ จนหยุดสั่น เนื่องจากความเสียดทานภายในตัวกลาง

### 2.3.1 ลักษณะการสั่นของคลื่น

ความแตกต่างของคลื่นแต่ละชนิดจะสังเกตได้โดยการพิจารณาว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคของสสารตัวกลางมีความสัมพันธ์กับทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นอย่างไร ซึ่งถ้าแบ่งตามลักษณะการสั่นได้ 2 แบบ คือ

1. คลื่นตามขวาง (transverse wave) คือคลื่นที่เมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางใด อนุภาคของตัวกลางนั้นจะสั่นในแนวตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น
2. คลื่นตามยาว (longitudinal wave) คือคลื่นที่เมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางใดอนุภาคของตัวกลางนั้นจะสั่นในแนวเดียวกับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น

### 2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่น ความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่น



รูป 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบฮาร์มอนิก

พิจารณากการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวางลูกหนึ่ง ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นประกอบด้วย

ความถี่ (frequency),  $f$  คือจำนวนลูกคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านจุดคงที่จุดหนึ่งในหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หรือ Hertz.

คาบ (period),  $T$  คือเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจุดคงที่จุดหนึ่งได้หนึ่งลูกคลื่น มีหน่วยเป็นวินาที

การเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement) เป็นระยะทางที่แต่ละจุดบนส่วนโค้งหรือแต่ละอนุภาคของตัวกลางของคลื่นห่างจากแนวกลาง (จุดสมดุล)

แอมพลิจูด (amplitude) ของคลื่น คือระยะความสูงจากสันคลื่นถึงแนวกลาง (ระยะ  $A$  ในรูป 2.2) หรือจากแนวกลางถึงท้องคลื่น

ความยาวช่วงคลื่น (wavelength),  $\lambda$  คือระยะระหว่างสันคลื่นหนึ่งกับสันคลื่นถัดไปหรือท้องคลื่นหนึ่งกับท้องคลื่นถัดไป

หน้าคลื่น (wave front) คือแนวเส้นที่ลากผ่านจุดต่าง ๆ ที่มีเฟสเดียวกันของคลื่นที่ออกจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน

ความเร็วของคลื่น (wave velocity หรือ propagate velocity) คือความเร็วของการรบกวน (disturbance) ที่แผ่ (propagate) ไปในตัวกลาง (medium) หรือคือ ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ใน 1 หน่วยเวลา

$$\text{ความเร็วของคลื่น} = \frac{\text{ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่}}{\text{เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่}}$$

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

$$= \frac{\lambda}{1/f}$$

$$v = f\lambda \quad \dots (2.1)$$

จากสมการ (2.1) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว ความถี่ และ ความยาวของช่วงคลื่น เมื่อ

$v$  = อัตราเร็วของคลื่น (wave velocity หรือ propagate velocity)

$f$  = ความถี่ของคลื่น

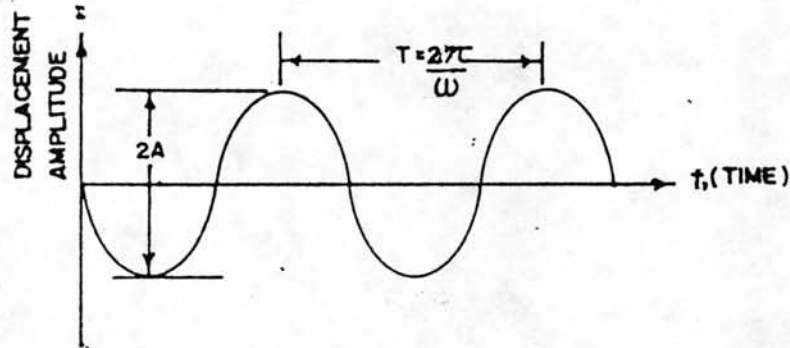
$\lambda$  = ความยาวช่วงคลื่น

2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement) ความเร็ว (velocity) และความเร่ง (acceleration)

การเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement), ความเร็ว (velocity)



และความเร่ง (acceleration) มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ถ้ารู้ค่าของตัวใดตัวหนึ่ง ก็จะสามารถรู้ค่าของตัวอื่น ๆ ที่เหลือได้ ตัวอย่าง เช่น พิจารณารูป sine wave ข้างล่างซึ่งเป็นแบบการเคลื่อนที่ที่ง่ายที่สุดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิค (harmonic motion)



รูป 2.3 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นขวาง

A คือ อัมพลิจูด ซึ่งวัดจากจุดสมดุลไปยังสันคลื่นหรือท้องคลื่น

2A คือ ระยะจากสันคลื่นถึงท้องคลื่น (peak-to-peak displacement amplitude)

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

T คือ คาบการแกว่ง (period) มีหน่วยเป็นวินาที

f คือ ความถี่ (frequency) มีหน่วยเป็น รอบ/วินาที (cycle per second) หรือบางทีก็เรียกว่า Hertz เขียนย่อว่า Hz.

จากคุณสมบัติของการแกว่งแบบฮาร์โมนิค ความถี่ (frequency) ของการแกว่งในหน่วยของรอบต่อหน่วยเวลา (cycle per unit time) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

007419

และเวลาของการแกว่งครบรอบ (period)

$$T = \frac{1}{f}$$

จากรูป 2.3 ณ ตำแหน่งใด ๆ ของการแกว่งแบบฮาร์มอนิก จะเขียน ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement) ความถี่เชิงมุม (angular frequency) และ เวลา  $t$  ได้โดยสมการ

$$\left. \begin{aligned} \text{การเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement)} &= z = A \sin (\omega t - \phi) \\ \text{ความเร็ว (velocity)} &= \frac{d z}{d t} = \dot{z} = A \cos (\omega t - \phi) \\ \text{ความเร่ง (acceleration)} &= \frac{d^2 z}{d t^2} = \ddot{z} = -\omega^2 A \sin (\omega t - \phi) \end{aligned} \right\} \dots (2.2)$$

เมื่อ  $z$  คือ อัมพลิจูด ณ ตำแหน่งใด ๆ

$A$  คือ ขนาดของอัมพลิจูด ซึ่งวัดจากจุดสมดุลไปยังสันคลื่นหรือท้องคลื่น

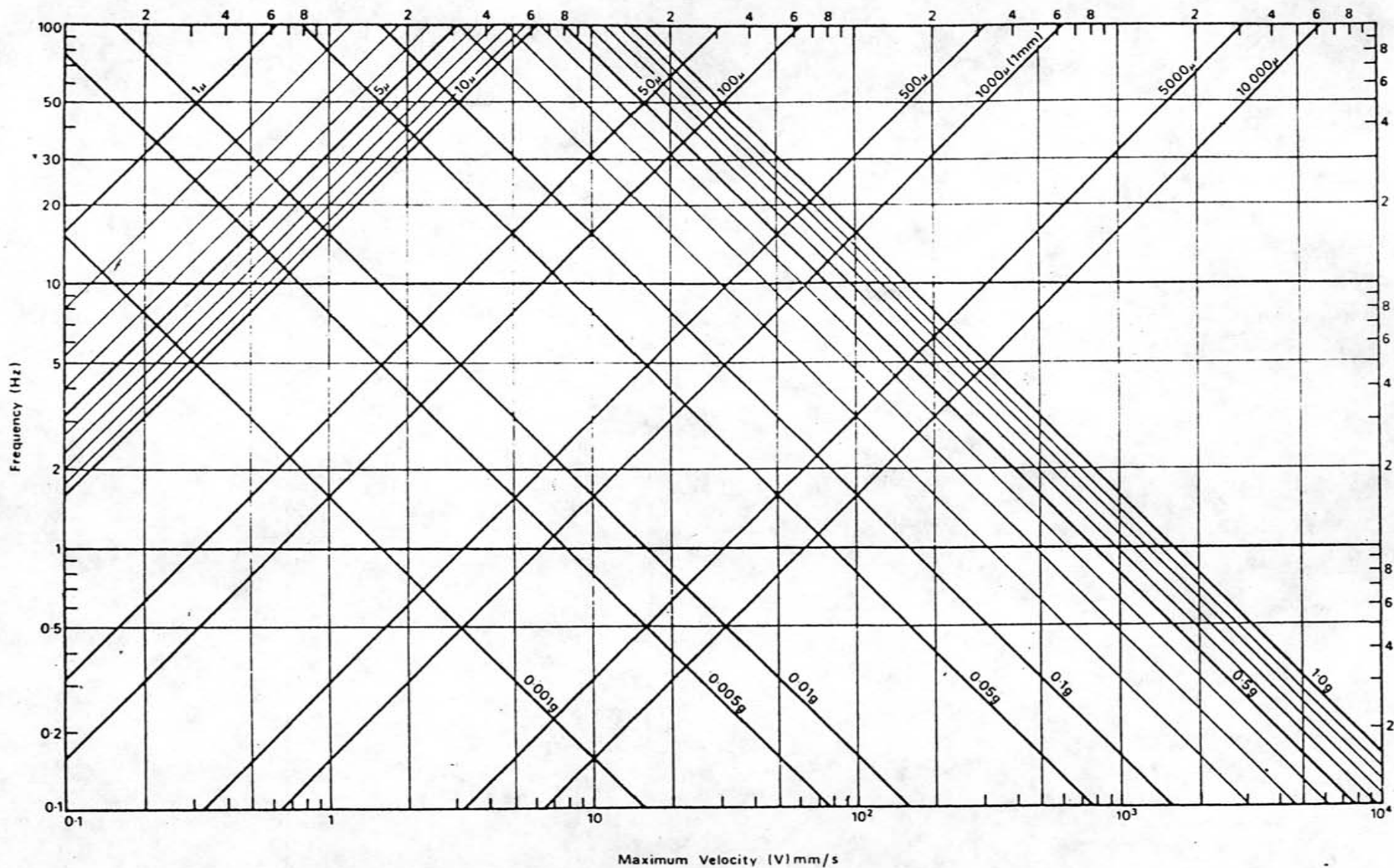
$\phi$  คือ ค่าคงที่ของเฟสหรือเฟสของการเคลื่อนที่ขณะเริ่มนับเวลา หรือ เรียกว่า phase angle

เพื่อความสะดวกในการหาค่าความสัมพันธ์ของ ความถี่ การเปลี่ยนตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง รูป 2.4 จะบอกความสัมพันธ์ของปริมาณทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวได้ ถ้ารู้ค่า 2 ค่าของปริมาณใด ๆ หรือปริมาณใดปริมาณหนึ่งกับความถี่ ก็สามารถหาค่าปริมาณที่เหลือได้ทั้งหมด

## 2.4 การแผ่ของคลื่น (Propagation of waves) ใน Elastic Half-Space

### 2.4.1 Stress waves

เมื่อมีน้ำหนัก (load) กระทำอย่างทันทีทันใดแก่มวลดินส่วนของดินที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่น้ำหนัก (load) จะถูกกระตุ้นให้มีปฏิกิริยาก่อน<sup>(9)</sup> คือจะเกิดการเปลี่ยนรูป (deformation) แล้วจึงจะค่อย ๆ ขยายไปยังบริเวณรอบ ๆ ในรูปของ stress waves



รูป 2.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดความเร็ว ความเร่งและความถี่

ลักษณะการแผ่ (propagate) ของ stress waves ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของดิน

#### 2.4.2 ชนิดของคลื่น (type of waves)

ทฤษฎี Elastic Half-Space ได้แบ่งชนิดของคลื่นออกเป็น 2 พวก คือ (10), (11)



##### 1. Body waves ประกอบด้วย

1.1 Compression wave หรือชื่ออื่น ๆ อีกคือ P-wave (primary, the fastest, first arriving wave), dilatation wave, longitudinal wave, irrotational wave.

1.2 Shear wave หรือ S-wave, secondary wave, transverse wave, equivoluminal wave, rotation wave.

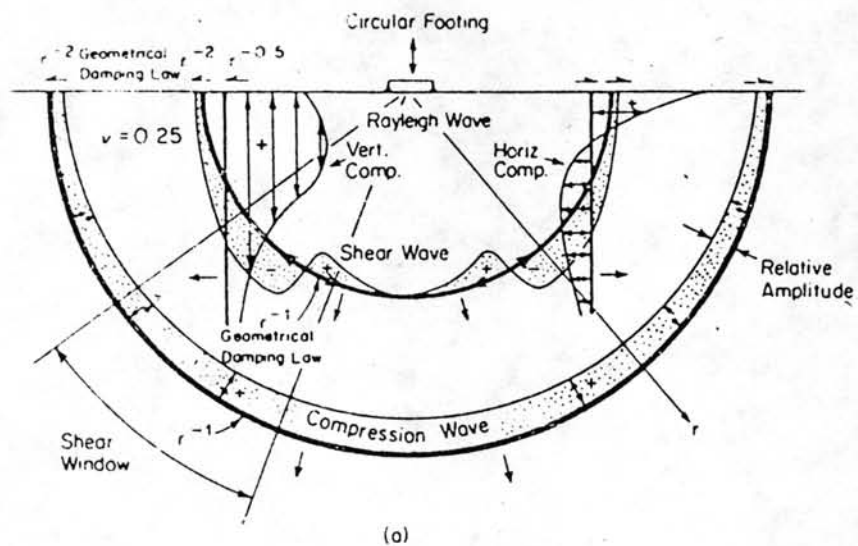
##### 2. Surface wave ประกอบด้วย

2.1 Love wave

2.2 Rayleigh wave (R-wave)

Ewing, Jardetzky, and Press (1967)<sup>(12)</sup> ได้แสดงว่าขนาดการสั่น (amplitude of oscillation) ของอนุภาคตัวกลางของ body waves จะลดลงเป็นสัดส่วนกับ  $1/r$  (เมื่อ  $r$  คือระยะจากรุกก้าเกิด) แต่ถ้าอยู่บน surface of half-space แล้วจะลดลงเป็นสัดส่วนกับ  $1/r^2$  ส่วน surface wave ของการสั่นสะเทือนของอนุภาคตัวกลางจะลดลงเป็นสัดส่วนกับ  $1/r^{0.5}$

Miller และ Pursey (1955)<sup>(13)</sup> ทำการทดลองโดยใช้ฐานรากชนิดวงกลม (circular footing) เขย่า (oscillate) บน homogeneous, isotropic, elastic half-space ซึ่งมี Poisson's ratio 0.25 พบว่าที่ระยะห่างมาก (large distance) จากรุกก้าเกิด (source) energy input ทั้งหมด



Wave Type	Per Cent of Total Energy
Rayleigh	67
Shear	26
Compression	7

(b)

Distribution of displacement waves from a circular footing on a homogeneous, isotropic, elastic half-space (from Woods, 1968).

\* According to Lysmer (1966), a distance of 2.5 wave lengths from the source is a large distance.

รูป 2.5 แสดงการกระจายของ displacement waves จากการเขย่าฐานรากชนิดวงกลมบน homogeneous, isotropic, elastic half-space

(จาก Woods, 1968).



100% จะส่งผ่าน (transmit) เป็นคลื่นชนิดต่าง ๆ ดังนี้

67% เป็น Rayleigh waves

26% เป็น Shear waves

7% เป็น Compression waves

จะเห็นว่าเกือบทั้งหมดของ input energy จะส่งผ่านเป็น Rayleigh waves และคลื่นทุกชนิดจะแผ่ขยายไปบริเวณรอบ ๆ ซึ่งจะทำให้ความเข้ม (density) ของคลื่นน้อยลง ในกรณีของ Rayleigh waves ความเข้มของคลื่น (wave density) จะค่อย ๆ เสื่อม (attenuate) ไปอย่างช้า ๆ บนผิวดินขณะที่มีระยะห่างจากจุดกำเนิด (source) มากขึ้น แต่จะหมดไปอย่างรวดเร็วในระยะที่ลึกลงไปจากผิวดิน ส่วน body waves จะเสื่อม (attenuate) อย่างรวดเร็วในระยะห่างจากจุดกำเนิด (source) ออกมา

#### 2.4.3 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่น

Timoshenko and Goodier (1951)<sup>(14)</sup> Ewing, Jardetsky and Press (1957)<sup>(12)</sup>, Barkan (1962)<sup>(4)</sup> และคนอื่น ๆ ได้ derive สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคใน infinite homogeneous, isotropic elastic medium ซึ่งกระทำโดย dynamic stress ไว้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + G \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= (\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + G \nabla^2 v \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= (\lambda + G) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + G \nabla^2 w \end{aligned} \right\} \dots (2.3)$$

$u, v, w$ , = elastic displacement ตามแกน  $x, y, z$  ตามลำดับ

$$\Delta = \text{cubical dilatation} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\nabla^2 = \text{Laplace operator} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$\rho = \text{ความหนาแน่นของตัวกลาง (Density of the elastic medium)}$$

$$= \frac{\gamma}{g}$$

$$\gamma = \text{density}$$

$$g = \text{acceleration of gravity}$$

$$\lambda, G = \text{Lame's constant}$$

$$\lambda = \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot E$$

$$G = \frac{1}{2(1+\nu)} \cdot E$$

$$E = \text{modulus of elasticity}$$

$$\nu = \text{Poisson's ratio}$$

จากสมการ (2.3) สามารถหาความเร็วของ body waves ได้ดังนี้

$$v_p = \sqrt{\frac{(\lambda+2G)}{\rho}} \quad \dots (2.4)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \dots (2.5)$$

$v_p$  = Compression wave velocity .

$v_s$  = Shear wave velocity

ตาราง 2.1 แสดงความเร็วของ P-waves และ S-waves ในดินชนิดต่าง ๆ กัน  
(จาก Barkan, 1962)

Soil	$\rho, \frac{\text{kg-sec}^2}{\text{cm}^4} \times 10^{-6}$	$v_p, \text{m/sec}$	$v_s, \text{m/sec}$
Moist clay	1.8	1,500	150
Loess at natural moisture	1.67	800	260
Dense sand and gravel	1.7	480	250
Fine-grained sand	1.65	300	110
Medium-grained sand	1.65	550	160
Medium-sized gravel	1.8	750	180

#### 2.4.4 ความเร็วของคลื่น Rayleigh (Rayleigh wave velocity)

Lord Rayleigh<sup>(15)</sup> เป็นคนแรกที่ตั้งทฤษฎีของ surface wave กล่าวคือ เมื่อ compression wave และ shear wave เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_p$  และ  $v_s$  ตามลำดับ แต่ที่ผิวดินคลื่นก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วอีกอันหนึ่ง โดยเรียกความ

เร้าเห็นว่า Rayleigh wave velocity,  $v_r$  โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง shear wave velocity และ Rayleigh wave velocity ดังนี้

$$v_r = K_1 v_s \quad \dots(2.6)$$

$$v_r = \text{Rayleigh wave velocity}$$

$$v_s = \text{Shear wave velocity}$$

ค่าของ  $K_1$  สามารถหาได้ (Timoshenko and Goodier, 1951)<sup>(14)</sup>

จากสมการ

$$K_1^6 - 8K_1^4 + (24-16\alpha_1^2) K_1^2 + 16(\alpha_1^2 - 1) = 0 \quad \dots(2.7)$$

และ 
$$\alpha_1^2 = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}$$

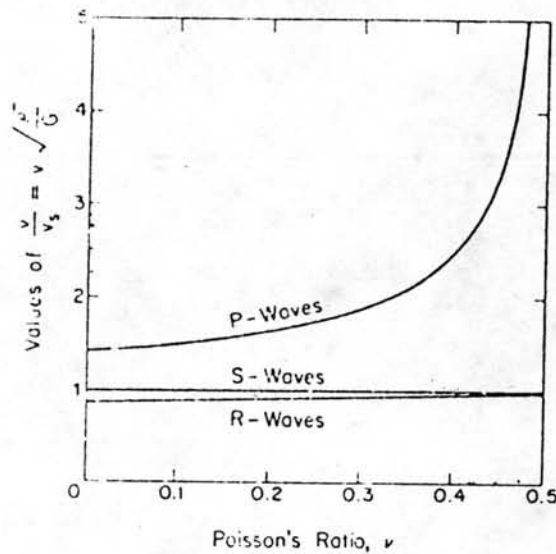
ปกติค่า  $K_1$  อยู่ในช่วงระหว่าง 0.874 - 0.955

ความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และความเร็วของการแผ่ (Propagation velocity) ของ Compression wave, shear wave และ Rayleigh wave ใน Semi-infinite elastic medium แสดงในรูป 2.6

จากรูป 2.6 จะเห็นว่าที่ Poisson's ratio,  $\nu$  เดียวกัน  $v_r$  และ  $v_s$  จะมีค่าใกล้เคียงกันโดย  $v_r$  จะมีค่าน้อยกว่า  $v_s$  เล็กน้อยเท่านั้น ส่วน  $v_p$  จะมีค่ามากที่สุด

Lamb (1904)<sup>(16)</sup> เนื่องจาก P-wave, S-wave และ R-wave เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกัน ดังนั้นอนุภาคของดิน (soil particles) บนผิวดิน (surface) จะถูกรบกวน (disturbance) เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (displacement) ในครั้งแรกโดย P-wave ก่อนและติดตามด้วย S-wave และสุดท้ายคือ R-wave ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ

รูป 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio, P-waves, S-waves และ R-waves ใน semi-infinite elastic medium (จาก Richart, 1962)



Relation between Poisson's ratio,  $\nu$ , and velocities of propagation of compression (P), shear (S), and Rayleigh (R) waves in a semi-infinite elastic medium (from Richart, 1962).

2.4.2 ว่าเกือบทั้งหมดของ energy ที่ส่งมาจากจุดกำเนิดเป็น R-wave ซึ่งจะเรียกว่า major tremor และส่วนที่เหลือเป็น P-wave และ S-wave ซึ่งจะเรียกว่า minor tremor

minor tremor จะมีขนาดของความสั่นสะเทือน (amplitude of oscillation) ลดลงอย่างรวดเร็วในระยะทางที่ห่างจากจุดกำเนิด (source) ออกไปในขณะที่ขนาดความสั่นสะเทือน (amplitude of oscillation) ของ major tremor จะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ดังนั้นจะเห็นว่า R-wave เป็นตัวที่มีบทบาทสำคัญในการพิจารณาระดับความสั่นสะเทือนที่ผิวดินในระยะที่ห่างออกมาจากจุดกำเนิด (source)

2.4.5 การเสื่อม (Attenuation) ของ Elastic Waves ในดิน เนื่องจาก Internal damping

ใน absolutely elastic material ขนาดของระดับความสั่นสะเทือนของ surface waves ณ ตำแหน่งที่ห่างมาก (large distance) จากจุดกำเนิดจะลดลงเป็นอัตราส่วนผกผันกับรากที่สอง (square root) ของระยะทางดังนี้



$$A_r = A_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} \quad \dots (2.8)$$

$A_r$  = ขนาด (amplitude) ของความสั่นสะเทือนที่ระยะ  $r$  จากจุดกำเนิด (source)

$A_0$  = ขนาด (amplitude) ของความสั่นสะเทือนที่ระยะ  $r_0$  จากจุดกำเนิด (source)

ข้อสมมุติ (assumption) ของ absolutely elastic material สมมุติว่าไม่มีการสูญเสียพลังงาน (energy losses) โดย internal damping ภายใต้อาคารที่เป็นตัวกลาง (medium) ในสภาพจริง ๆ ดินจะมีการดูดซึม (absorption) คลื่น (waves) ที่แผ่ (propagate) ออกจากจุดกำเนิดด้วย เนื่องจากตัวกลาง (medium) มิใช่เป็น absolutely elastic material ดังนั้นเมื่อคิดผลเนื่องจาก internal damping มาเกี่ยวข้องกับสมการ 2.8 จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$A_r = A_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} \cdot e^{-\alpha(r-r_0)} \quad \dots (2.9)$$

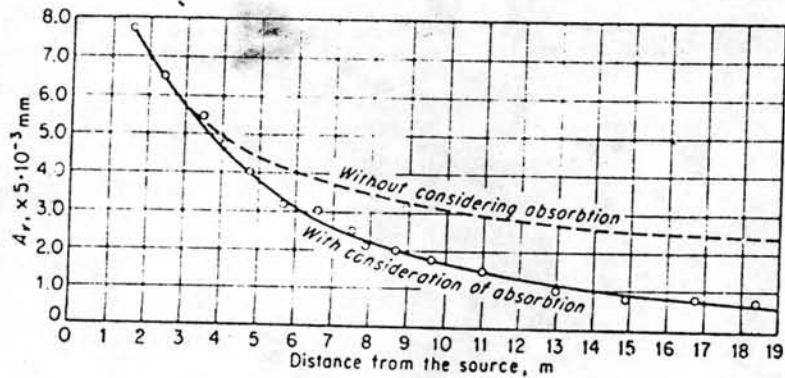
$\alpha$  = สัมประสิทธิ์ของการดูดซึมคลื่น (Coefficient of wave energy absorption, มีหน่วยเป็น ความยาว<sup>-1</sup> เช่น เมตร<sup>-1</sup> เซนติเมตร<sup>-1</sup>)

รูป 2.7 แสดง ผลการทดลองของ Barkan<sup>(4)</sup> เมื่อพิจารณาและไม่พิจารณาผลของ internal damping ต่อขนาดของ vertical amplitude จะเห็นว่าจากการทดลองจะให้ผลที่สอดคล้องกัน (ตามสมการ 2.8 และ 2.9)

## 2.5 การเกิด (Generation) และการส่งผ่าน (Transmission) ของความสั่นสะเทือน (Vibrations) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการจราจรของรถยนต์<sup>(3)</sup>

ขณะที่มีการจราจรของรถยนต์บนถนน ทำให้มีความสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในถนน บ้านเรือนและสิ่งปลูกสร้างได้ใน 2 ลักษณะดังนี้

รูป 2.7 แสดงผลการทดลองของ Barkan เพื่อตรวจสอบสมการ 2.8 และ 2.9 โดยใช้  
vertical amplitude,  $A_v$  เป็นตัวเปรียบเทียบ



ตาราง 2.2 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์ของการดูดซึมคลื่น,  $\alpha$  ของดินชนิดต่าง ๆ

(จาก Barkan 1962)

No.	Soil	Coefficient of absorption, $m^{-1}$
1	Yellow water-saturated fine-grained sand	0.100
2	Yellow water-saturated fine-grained sand in a frozen state	0.060
3	Gray water-saturated sand with laminae of peat and organic silt	0.040
4	Clayey sands with laminae of more clayey sands and of clays with some sand and silt, above ground-water level	0.040
5	Heavy water saturated brown clays with some sand and silt	0.040-0.120
6	Marly chalk	0.100
7	Loess and loessial soil	0.100

1. ความสั่นสะเทือน (vibrations) ที่เกิดจากการถ่ายแรงที่ไม่สมดุลย์ภายในรถยนต์และแรงปฏิริยาต่อกัน (interaction force) ระหว่างล้อรถยนต์ (ที่สัมผัส) กับผิวหน้าของถนน ก่อให้เกิดคลื่นความสั่นสะเทือนในถนนแล้วส่งผ่านไปยังพื้นดินในบริเวณข้างเคียงจนกระทั่งไปถึงบ้านเรือนและสิ่งปลูกสร้าง

2. ความสั่นสะเทือน (vibrations) ซึ่งเป็นผลจากการที่รถยนต์เคลื่อนที่ไปในอากาศ ทำให้เกิดคลื่นความดันอากาศ (air pressure waves) ส่งผ่านโดยตรงไปยังบ้านเรือนและสิ่งปลูกสร้าง นอกจากนี้ยังเกิดเนื่องจาก pressure fluctuations เนื่องจากเครื่องยนต์ ไอเสียและเสียง (noises) ที่เกิดขึ้นจากรถยนต์ด้วย

คลื่นความดันอากาศที่ส่งผ่านอากาศนี้ ปกติแล้วจะมีระดับที่ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหาย (damage) แก่โครงสร้างได้ นอกจากจะทำให้เกิดความรำคาญ (annoying) แก่คนและทำให้ประตู หน้าต่าง เปิดปิดอย่างดังผิดปกติเท่านั้น

ในการวิจัยครั้งนี้ จะเน้นเรื่องความสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงปฏิริยาระหว่างล้อรถยนต์และผิวหน้าของถนนเท่านั้น

#### 2.5.1 การเกิด (Generation) ของความสั่นสะเทือนในถนน

ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในถนนและสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งเป็นผลจากแรงปฏิริยาระหว่างล้อรถยนต์และผิวหน้าของถนนเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือ

1. เกิดจากการถ่ายแรงที่ไม่สมดุลย์ (out-of-balance forces) ที่เกิดขึ้นภายในรถยนต์ (เช่น เกิดจากเครื่องยนต์หรือล้อรถยนต์) ลู่ถนน
2. เกิดจากแรงปฏิริยาต่อกัน (intereaction forces) ระหว่างล้อรถยนต์และผิวหน้าของถนน ขณะที่รถยนต์วิ่งไปบนถนน

ในยุคสมัยปัจจุบัน รถยนต์ส่วนมากมีวิวัฒนาการด้านเครื่องยนต์เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงสามารถลดแรงที่ไม่สมดุลย์ (out-of-balance forces) ภายในรถยนต์ได้

เกือบทั้งหมด ดังนั้นปัญหาที่เหลืออยู่จึงเป็นเรื่องของแรงปฏิกิริยาต่อกัน (interaction forces) ระหว่างล้อรถยนต์และผิวหน้าของถนนเท่านั้นที่ยังมีอิทธิพลต่อการเกิดของความสั่นสะเทือน (vibrations) วิศวกรก็พยายามลดความสั่นสะเทือนอันนี้ โดยการทำให้ผิวหน้าถนนให้เรียบ\* (smooth) ได้ตามข้อกำหนด (specifications) แต่ก็สามารถทำได้ในช่วงระยะแรกที่ถนนก่อสร้างแล้วเสร็จใหม่ ๆ เท่านั้น เมื่อถนนถูกใช้ไปนานวัน จะเกิดการเสียหาย เช่น เกิดการหลุดออกของหินเนื่องจากยางมะตอยหรือปูนเสื่อมคุณภาพลงเกิดความไม่สม่ำเสมอ (irregularity) ของ profile เนื่องจากการทรุดตัวของถนน สิ่งเหล่านี้ล้วนแต่เป็นสาเหตุที่เพิ่มระดับความสั่นสะเทือนดังกล่าวมาแล้วได้ทั้งสิ้น

#### 2.5.2 การส่งผ่าน (Transmission) ของความสั่นสะเทือน

ความสั่นสะเทือนในที่เกิดขึ้นขณะที่รถยนต์วิ่งไปบนถนน ณ ผิวสัมผัสระหว่างล้อรถยนต์และผิวหน้าของถนนจะมี fluctuating dynamic forces เกิดขึ้นและส่งถ่ายไปยังถนนในรูปของ stress waves ซึ่งจะแผ่ (propagate) ผ่านผิวหน้าของถนนสู่พื้นดินในชั้นที่ถัดลงไป

ในถนนที่เป็นระบบชั้น (layered road) การเกิดขึ้น (generation) และการแผ่ (propagation) ของความสั่นสะเทือน (vibrations) ในรูปของ stress waves มีความสลับซับซ้อนและยุ่งยากมาก เพราะมีองค์ประกอบ (factors) หลากอย่างที่มีผลกระทบ (effect) ต่อ waveform ของการสั่นสะเทือน เช่น ความไม่สม่ำเสมอ (irregularity) ของถนนและจุดกำเนิดของความสั่นสะเทือน (source of vibrations) คือรถยนต์ไม่ได้อยู่นิ่งกับที่ แต่จะเคลื่อนที่และเปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อย ๆ (translational movement) ซึ่ง stress waves ที่ส่งไปยังพื้นถนนและพื้นดินรอบ ๆ จะไม่

---

\* (TRRL Report LR 580) เรียบ (smooth) ในที่นี้หมายถึง contour ไม่ใช่ surface texture ของถนน

เหมือนกับเกิดขึ้นในแบบที่ลดกำเนิดของความสั่นสะเทือนที่อยู่กับที่ (เช่น เกิดจากเครื่องจักร เป็นต้น)

นอกจากนี้ stress waves ที่ส่งไปยังถนนยังขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะ (shape) ของถนน ลักษณะความไม่สม่ำเสมอ (irregularity) ของถนน, น้ำหนักลงเพลา (axial load) รถยนต์, vehicle suspension, ความดันยาง (pneumatic tyre), internal properties of the vehicle และความเร็ว (speed) ของรถยนต์ด้วย ดังนั้น waveform จริง ๆ ของ stress waves จึงไม่เป็น purely sinusoidal ยิ่งในทางปฏิบัติแล้ว ดินแต่ละชนิดที่ใช้ในการก่อสร้างถนน (เช่น flexible roads) มีค่าความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) แตกต่างกันและค่าความยืดหยุ่นของดินยังเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ยิ่งกว่านั้นดินยังไม่มีคุณสมบัติเป็น elastic material อย่างแท้จริง แต่เป็น viscoelastic ซึ่งคุณสมบัติขึ้นอยู่กับ local stress และ rate of loading ด้วย

องค์ประกอบสำคัญที่อยากกล่าวเป็นพิเศษเพราะมีอิทธิพลอย่างสูงต่อระดับความสั่นสะเทือนได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอ (irregularity) ของผิวถนน ความขรุขระ รู และร่องต่าง ๆ บนถนน รอยต่อระหว่างถนน รอยต่อต่างระดับกันระหว่างถนนกับสะพาน ตลอดจนถนนที่เป็นคลื่น องค์ประกอบเหล่านี้ล้วนแต่เป็นเหตุทำให้ระดับความสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นเมื่อรถยนต์วิ่งผ่าน Whiffin and Leonard (1971)<sup>(3)</sup> ได้ทดลองวัดความสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่วิ่งบนถนนชนิดต่าง ๆ กัน ทั้งในกรณีวิ่งบนถนนปกติและวิ่งบน irregularity โดยใช้ ramp ทำด้วยไม้เป็นรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 230 มม. สูง 21 มม. แทน irregularity ผลการทดลองพบว่า รถยนต์ที่วิ่งผ่าน ramp ให้ค่า peak particle velocity สูงกว่าเมื่อรถยนต์วิ่งบนถนนปกติหลายเท่า และเมื่อทดลองเปลี่ยนขนาดของ ramp ก็ปรากฏผลเช่นเดิม Sutherland<sup>(2)</sup> ทดลองโดยใช้รถยนต์วิ่งผ่าน ramp หลายขนาดซึ่งใช้แทน irregularity ของถนน ผลการทดลองพบว่าเมื่อความสูงของ ramp เพิ่มขึ้นระดับความสั่นสะเทือนก็เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีองค์ประกอบมากมาย



ที่มีผลต่อ dynamic properties ของดิน เช่นที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งมีความยุ่งยากมากในทางปฏิบัติที่จะหาข้อยืนยันที่จะให้ความเชื่อถือได้อย่างแน่นอนว่า ขณะที่ยานต์วิ่งบนถนน (travelling vehicles) นั้น การส่งผ่าน (transmiss) และแผ่ (propagate) ของ stress waves ไปยังดินภายใต้ถนนและบริเวณรอบ ๆ มี waveform ที่แท้จริงลักษณะเป็นอย่างไร

