บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานการศึกษาในอดีต

ก่อนที่จะทำการศึกษาเรื่องความสั่นสะเทือนของวัตถุตัวกลางต้องทำการศึกษาเรื่องคลื่นก่อน ทั้งนี้เพราะรูปแบบของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นคลื่น

2.1 คลื่น (Wave)

คลื่นคือสภาวะหนึ่งของการถูกรบกวน ที่ก่อให้เกิดการสั่นของอนุภาคของตัวกลางที่คลื่นนั้นเคลื่อนที่ผ่านรอบจุดสมดุลย์ (Equilibrium Point) คลื่นจะเคลื่อนที่โดยการถ่ายพลังงานจากอนุภาคหนึ่งไปยังอนุภาคถัดไป และไปยังอนุภาคอื่นๆ ที่อยู่ต่อๆ ไปโดยที่จะทำให้อนุภาคเหล่านั้นสั่นรอบจุดสมดุลย์ของตัวเองเช่นเดียวกัน แต่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ (Displacement) ของอนุภาคของตัวกลางนั้น ถ้าตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านไม่มีลักษณะเป็นวัสดุยืดหยุ่นโดยสมบูรณ์ (Perfectly Elastic) จะเกิดการสูญเสียพลังงานในตัวกลางที่เรียกว่าเกิดแดมป์ (Damp) หรือการหน่วงเกิดขึ้นทำให้ขนาดของแอมปลิจูด (Amplitude) ของการสั่นมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเกิดการหยุดนิ่ง เนื่องจากความเสียดทานภายในตัวกลางเรียกความเสียดทานนี้ว่าการหน่วงของวัสดุ (Material Damping)

2.1.1 ประเภทของคลื่น

จากการพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลาง ที่คลื่นนั้นเคลื่อนที่ผ่านกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นนั้น จะแบ่งคลื่นได้เป็นสองประเภทคือ

1. คลื่นตามขวาง (Transverse wave) คือคลื่นที่เมื่อเคลื่อนที่ไปในตัวกลางของวัสดุใดแล้วทำให้อนุภาคของตัวกลางนั้นเกิดการสั่นหรือแกว่งในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นนั้น

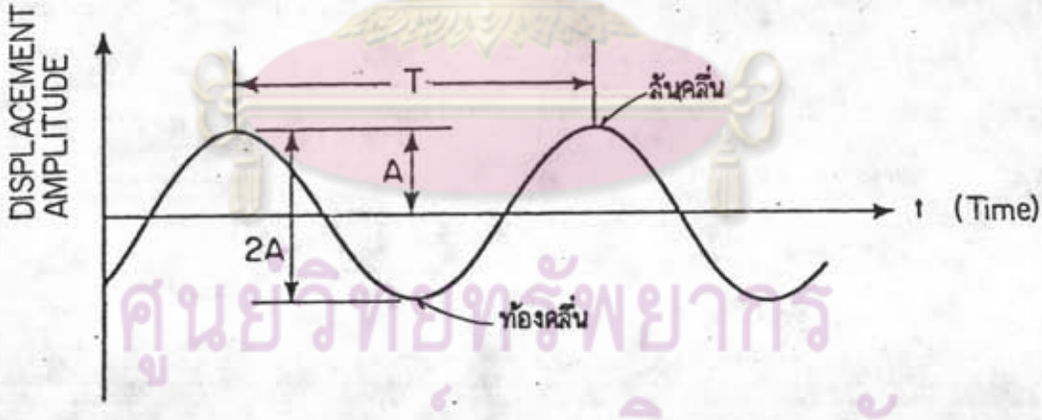
2. คลื่นตามยาว (Longitudinal wave) คือคลื่นที่เมื่อเคลื่อนที่ไปในตัวกลาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ของวัสดุใดแล้วทำให้อนุภาคของตัวกลางนั้นเกิดการสั่นหรือแกว่งในแนวทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่นนั้น

2.1.2 ธรรมชาติของคลื่น

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลางที่ยืดหยุ่นได้(Elastic Medium) ถ้าอนุภาคนั้น เกิดการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำกับแนวทางเดิม เรียกว่าอนุภาคนั้นเกิดการสั่น (Vibrate) หรือการแกว่ง (Oscillate) ขึ้น ลักษณะการเคลื่อนที่ใดๆ ที่ซ้ำกลับไปกลับมาในลักษณะซ้ำรูปแบบเดิม และมีช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ทั้งไปและกลับเท่าๆ กัน เรียกการเคลื่อนที่นั้นว่าการเคลื่อนที่เป็นคาบเวลา (Periodic Motion) ถ้าเขียนกราฟระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement) กับเวลา (Time)จะได้รูปกราฟของการเปลี่ยนตำแหน่งเป็นรูปกราฟของซายน์ (Sine) หรือโคซายน์ (Cosine) ดังได้แสดงในรูปที่ 2.1 บางครั้งจะเรียกการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ว่าการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก (Harmonic Motion)

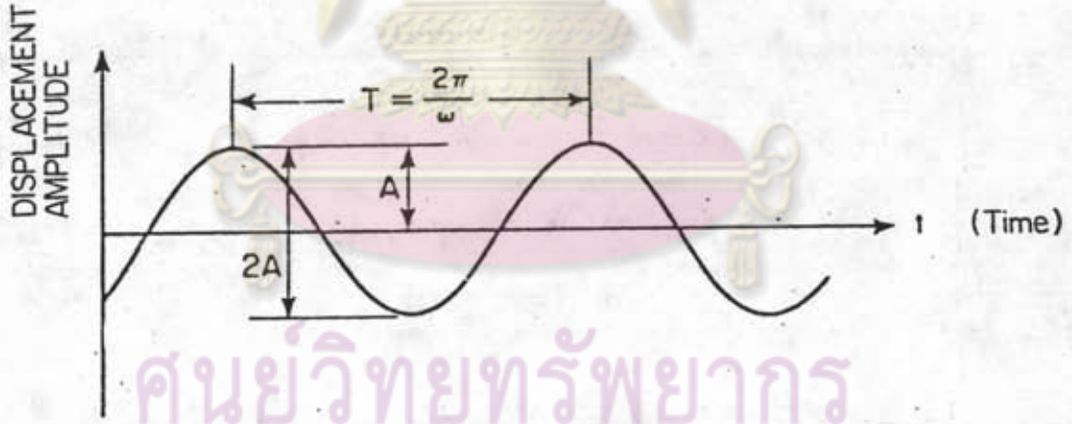


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement) ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) ของอนุภาค

พิจารณารูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement) มีลักษณะเป็นคลื่นแบบซายน์ (Sine wave) ที่เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ง่ายที่สุดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก (Harmonic Motion) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ที่เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง จากการศึกษา พบว่า การเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement) ความเร็ว และความเร่ง (Acceleration) มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันดังนี้ เมื่อรู้ค่าตัวใดตัวหนึ่งก็จะสามารถรู้ค่าตัวอื่นๆ ที่เหลือได้



รูปที่ 2.2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งและเวลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

016166

เมื่อ A คือแอมปลิจูด (Amplitude) วัดจากจุดสมดุลย์ไปยังสันคลื่นหรือท้องคลื่น

2A คือ ระยะจากสันคลื่นถึงท้องคลื่น (Peak to Peak Displacement Amplitude) วัดจากสันคลื่นไปยังท้องคลื่นลูกเดียวกัน

w คือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency)มีหน่วยเรเดียน ต่อ วินาที (Radian per second)

T คือ คาบของการแกว่ง (Period) มีหน่วยวินาทีต่อรอบ

f คือ ความถี่ (Frequency) มีหน่วยรอบต่อวินาที (Cycle per second) หรือบางครั้งเรียกว่าเฮิร์ต (Hertz,Hz)

จากคุณสมบัติคลื่นแบบฮาร์โมนิก สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการแกว่งของอนุภาคในรูปแบบของเวลา ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบรอบ (Time per unit cycle) ได้ดังนี้

$$f = \frac{1}{T} \text{ และ } \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

พิจารณารูปที่ 2.2 พบว่า ณ ตำแหน่งใด ๆ ของการสั่นแบบฮาร์โมนิกสามารถเขียนความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่ง(Displacement) ความเร็ว(Velocity)ความเร่ง (Acceleration) ความถี่เชิงมุม (Angular frequency) และเวลา (Time,t) ได้ดังนี้

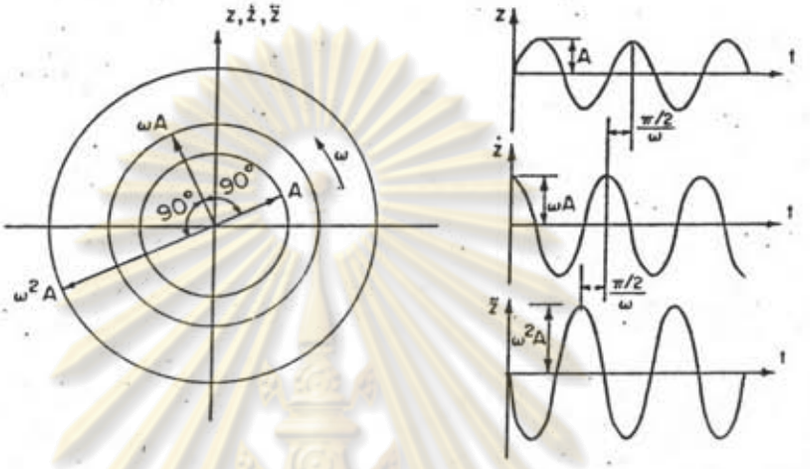
การเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement) , $Z = A\sin(\omega t - \emptyset)$ .....(1)

ความเร็ว (Velocity) , $\frac{dz}{dt} = Z^{\circ} = A\omega\cos(\omega t - \emptyset)$ .....(2)

ความเร่ง(Acceleration) , $\frac{d^2z}{dt^2} = \ddot{Z}^{\circ} = -A\omega^2\sin(\omega t - \emptyset)$ .....(3)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\emptyset$ คือค่าคงที่ของเฟส หรือเฟสของการเคลื่อนที่ขณะเริ่มจับเวลา ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งที่ความถี่ต่างๆ สามารถเขียนอยู่ในรูปกราฟของความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรทั้งสี่ ดังกล่าวไว้ข้างต้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 กล่าวคือ ถ้ารู้ค่าแอมปลิจูด (z) และความถี่ (f) ใดๆ ดังกล่าวข้างต้น สามารถหาค่าปริมาณอื่นๆ ที่เหลืออีก 2 ค่า ได้ทั้งสิ้น



. Vector representation of harmonic displacement, velocity and acceleration.

รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 การแผ่ของคลื่น (propagation of waves) ในตัวกลางยืดหยุ่นไม่มีขอบเขตจำกัด (Elastic Half Space)

2.2.1 คลื่นความเค้น (Stress Wave)

เมื่อมีน้ำหนักมากระทำที่ผิวของตัวกลาง อนุภาคของตัวกลางบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งที่มีน้ำหนักมากระทำ จะถูกกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาก่อน กล่าวคือ จะเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation)แล้วค่อยๆ ขยายไปสู่รอบๆ ในรูปของคลื่นความเค้น (Stress waves) เช่น คลื่นแรงอัด (Compression wave) และคลื่นแรงเฉือน (Shear wave) เป็นต้น

2.2.2 ชนิดของคลื่น (Type of Wave) ในทฤษฎียืดหยุ่นไม่มีขอบเขตจำกัด (Elastic Half Space)

ในทฤษฎียืดหยุ่นไม่มีขอบเขตจำกัด (Elastic Half Space) ได้แบ่งคลื่นออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. คลื่นในตัวกลาง(Body Wave) ประกอบด้วยคลื่นแรงอัด (Compression wave) คลื่นแรงเฉือน (Shear wave) คลื่นตามยาว (Longitudinal wave)และคลื่นตามขวาง (Transverse wave)

2. คลื่นตามผิว (Surface wave) ประกอบด้วยคลื่นเรไลซ์ (Rayleigh wave)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

2.2.3 ความเร็วของคลื่นความเค้นในทฤษฎียืดหยุ่นไม่มีขอบเขตจำกัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Timoshenko and Goodier และบุคคลอื่นๆ ได้สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์สำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลางในตัวกลางที่มีลักษณะเนื้อเดียวกันตลอดเหมือนกันทุกทิศทาง และมีความยืดหยุ่นไม่จำกัด [Infinite homogenous, Isotropic Elastic Medium] ที่ถูกกระทำโดยความเค้นพลวัต [Dynamic Stress]

$$\frac{\partial \sigma x}{\partial x} + \frac{\partial \tau yx}{\partial y} + \frac{\partial \tau zx}{\partial z} = \frac{\rho \partial^2 u}{\partial t^2} \quad \ldots\ldots(4)$$

$$\frac{\partial \sigma y}{\partial y} + \frac{\partial \tau xy}{\partial x} + \frac{\partial \tau zy}{\partial z} = \frac{\rho \partial^2 v}{\partial t^2} \quad \ldots\ldots(5)$$

$$\frac{\partial \sigma z}{\partial z} + \frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau yz}{\partial y} = \frac{\rho \partial^2 w}{\partial t^2} \quad \ldots\ldots(6)$$

เมื่อ u,v และ w คือการขจัดยืดหยุ่น (Elastic Displacement) ตามแนวแกน x,y และ z ตามลำดับ และ ρ คือความหนาแน่น (Mass density)

สมการแสดงความสัมพันธ์ทั้งสามดังกล่าว สามารถที่จะหาความเร็วของคลื่นความเค้น (Stress wave) ได้ ดังนี้

$$V_p = [(\lambda + 2G)/\rho]^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots(7)$$

$$V_s = [\lambda/\rho]^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots(8)$$

เมื่อ Vp = ความเร็วของคลื่นแรงอัด (Compression wave)

Vs = ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน (shear wave velocity)

Lord Rayleigh เป็นคนแรกที่ตั้งทฤษฎีของคลื่นตามผิว (Surface wave) กล่าวคือ เมื่อคลื่นแรงอัด (Compression wave) และคลื่นแรงเฉือน (Shear wave) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว Vp และ Vs ตามลำดับ ที่ผิวของตัวกลางจะมีคลื่นอีกประเภทหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วอีกค่าหนึ่ง เรียกคลื่นชนิดนี้ว่าคลื่นเรไลช์ (Rayleigh wave) และจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว Vr ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคลื่นแรงเฉือน (Shear wave) ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$Vr = K1 \cdot Vs \quad \ldots\ldots(9)$$

Vr = ความเร็วของคลื่นเรไลช์ (Rayleigh wave velocity)

Vs = ความเร็วของคลื่นแรงเฉือน (Shear wave velocity)

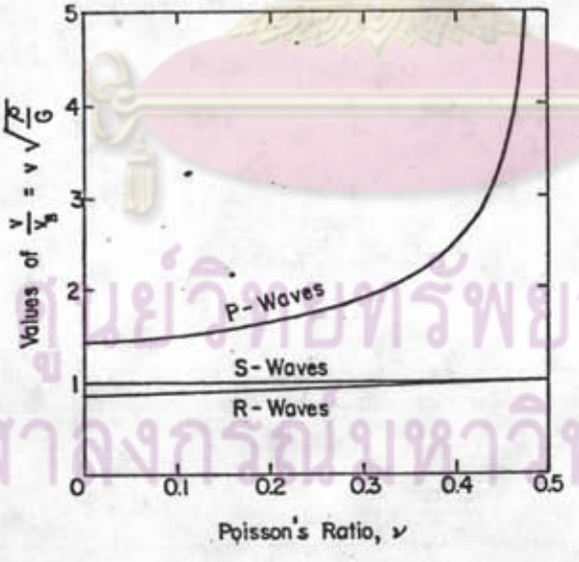
ค่าของ K1 สามารถหาได้ (Timoshenko and Goodier) จากสมการ ได้ดังนี้

$$K1^6 - 8K1^4 + (24 - 16\alpha^2)K1^2 + 16(\alpha^2 - 1) = 0 \quad \ldots\ldots(10)$$

เมื่อ $= \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}$

โดยทั่วไปค่า K1 จะอยู่ระหว่าง 0.874 - 0.955

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของการแผ่ (Propagation Velocity) ของคลื่นแรงอัด (Compression wave) คลื่นแรงเฉือน (Shear wave) และคลื่นเรไลซ์ (Rayleigh wave) ที่ค่าสัดส่วนปัวซองค์ (Poisson's ratio) เดียวกัน คลื่นแรงอัดจะมีค่าความเร็วมากที่สุด ส่วนค่าความเร็วของคลื่นแรงเฉือน (Shear wave) และคลื่นเรไลซ์ (Rayleigh) จะมีค่าใกล้เคียงกันแต่จะน้อยกว่าคลื่นแรงอัด (Compression wave)



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

รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการแผ่ของคลื่นที่ค่าสัดส่วนปัวซองค์ต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.4 การส่งผ่านและการเสื่อมของคลื่นความเค้น

จากการทำการศึกษา โดยใช้ฐานรากชนิดวงกลม (Circular footing) เขย่า (Oscillate) บนตัวกลางที่มีลักษณะเนื้อเดียวกันตลอด เหมือนกันทุกทิศทางและยืดหยุ่นไม่มีขอบเขตจำกัด (Homogeneous ,Isotropic ,Elastic Half Space) ที่มีค่าสัดส่วนปัวซองค์ (Poisson's ratio) เท่ากับ 0.25 พบว่า ที่ระยะห่างมากจากจุดกำเนิด (Source) พลังงานที่ใส่เข้าไป (Energy Input) ทั้งหมด 100% จะถูกส่งผ่านในรูปคลื่นชนิดต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ดังนี้คือ

67% เป็นคลื่นเรไลช์ (Rayleigh wave)
26% เป็นคลื่นแรงเฉือน (Shear wave)
7% เป็นคลื่นแรงอัด (Commpression wave)

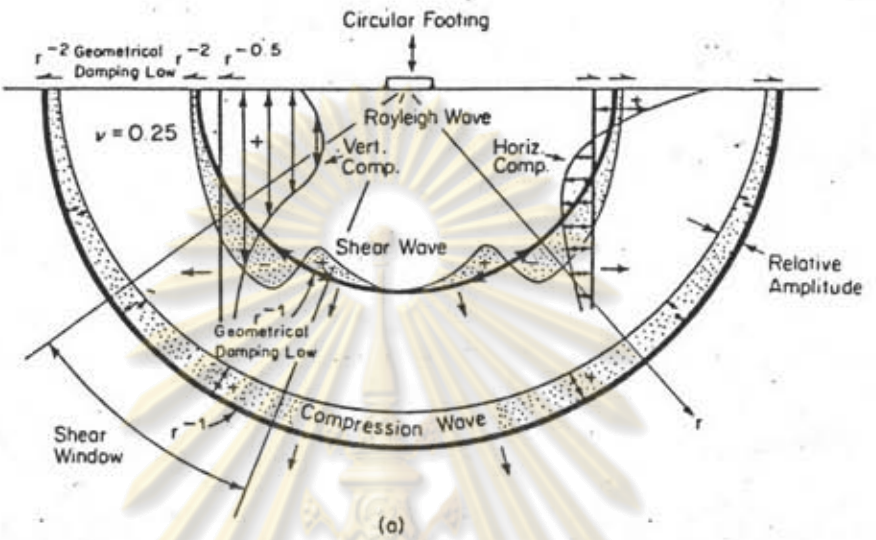
2.3 การออกแบบฐานรากรับความสั่นสะเทือน

ระบบของความสั่นสะเทือนโดยทั่ว ๆ ไป สามารถแยกพิจารณาออกได้เป็น 2 ระบบคือ

1. การสั่นแบบอิสระ (Free Vibration) หรือการสั่นในช่วงเปลี่ยนแปลงสั้น ๆ (Transient Vibration) คือการสั่นของระบบที่เกิดขึ้นจากแรงที่มีในระบบ (Inherent in the system) เองมิใช่เกิดขึ้นจากแรงภายนอกหรือในระบบที่ได้รับแรงช่วงสั้น ๆ (Transient Force)

2. การสั่นภายใต้แรงกระทำ (Forced Vibration) คือการสั่นของระบบที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำจากภายนอกระบบ (External Force)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



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*).

รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการกระจายของคลื่นเมื่อเขย่าฐานรากวงกลมบนตัวกลางที่มีลักษณะเนื้อเดียวกันตลอดเหมือนกันทุกทิศทางและยืดหยุ่นไม่มีขอบเขตจำกัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.1 แบบจำลองที่ใช้

การออกแบบฐานรากตื้น (Shallow Foundation) เพื่อรองรับความสั่นสะเทือน นั้น อาศัยรูปแบบพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบ โดยใช้ระบบของตัวแปรอิสระหนึ่งตัว (Single Degree of Freedom System) ที่อาศัยแบบจำลอง (Model) ของระบบ มวล สปริง และตัวหน่วง (Mass Spring with Viscous Damping System) แทนระบบฐานรากที่วางอยู่บนตัวกลางที่ยืดหยุ่นได้ (Elastic Medium) ด้วยระบบของ มวล สปริง และตัวหน่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

2.3.2 การสั่นแบบอิสระที่มีความหนืด (Free Vibration with Viscous Damping)

พิจารณาสมดุลย์ของฐานราก ที่เกิดการสั่นแบบอิสระ เมื่อแรงกระทำจากภายนอก $Q = Q_0 \sin \omega t$ กระทำต่อฐานรากมีค่าเป็น ø จากรูปที่ 2.6 พบว่าจากกฎข้อ 2 ของนิวตัน (2^{nd}) จะได้สมการอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ (Differential Equation of Motion) มีค่า

$$m\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = 0 \qquad \text{.....(11)}$$

จากสมการ (12) พบว่าจะมีสมการคำตอบอยู่ในรูปของ $Z = Ae^{rt}$ เมื่อ A คือค่าคงที่ แทนค่าในสมการ (11) จะได้ว่า

$$r = -\frac{c}{2m} \pm \left[\frac{c}{4m^2} - \frac{K}{m}\right] \qquad \text{.....(12)}$$

m คือ มวล (Mass)

$Z, \dot{Z}, \ddot{Z}$, คือ การขจัด ความเร็ว และความเร่ง ตามลำดับ

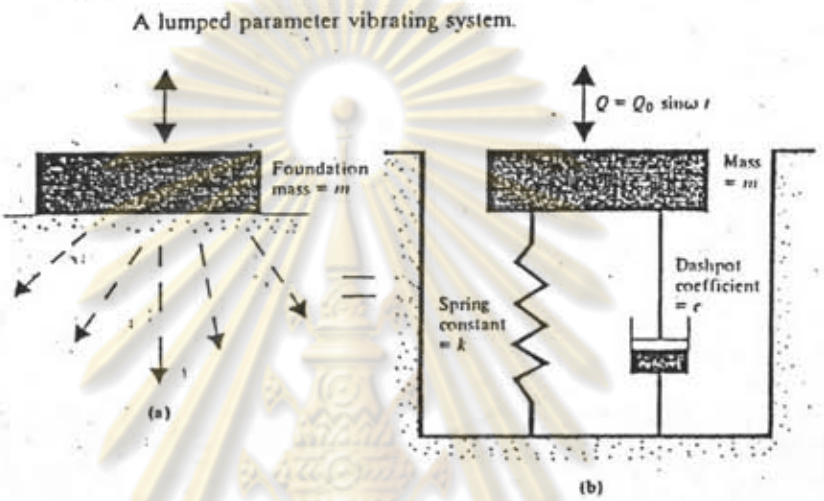
c คือ Dashpot Coefficient

K คือ ค่าคงที่ของสปริง (Spring constant)

จากสมการที่ (12) สามารถแยกพิจารณาได้ 3 กรณี ดังนี้ คือ

1. กรณีของ $\frac{c^2}{4m^2} = \frac{K}{m}$ นั่นคือ $c = 2[Km]^{\frac{1}{2}}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองของระบบมวล สปริงและตัวหน่วง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เรียกกรณีนี้ว่าความหน่วงวิกฤต (Critical Damping) เมื่อนำสมการคำตอบของการเคลื่อนที่ Z พลอต (Plot) กับเวลา (Time,t) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 พบว่า จะไม่เกิดการสั่นของฐานราก แต่จะเกิดการเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งสมดุลย์แล้วจึงเกิดการหยุดนิ่ง

เมื่อสัดส่วนความหน่วง (Damping ratio), $D = C/C_c$

C_c คือ ความหน่วงวิกฤต ; $C_c = 2[Km]^{\frac{1}{2}}$

พบว่ากรณีนี้จะมีค่าสัดส่วนความหน่วง $D = 1$

2. กรณีของ $\frac{C^2}{4m^2} > \frac{K}{m}$ ดังนั้น $C > 4[Km]^{\frac{1}{2}}$

กรณีนี้ค่าสัดส่วนความหน่วง $D > 1$ เรียกกรณีนี้ว่าโอเวอร์แดมป์ (Overdamped) เมื่อนำสมการคำตอบของการเคลื่อนที่ Z พลอตกับค่าของเวลา (Time,t) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พบว่าไม่เกิดการสั่นแต่เกิดการเคลื่อนที่ของฐานรากผ่านตำแหน่งสมดุลย์และเกิดการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดสมดุลย์เมื่อเวลาผ่านไป

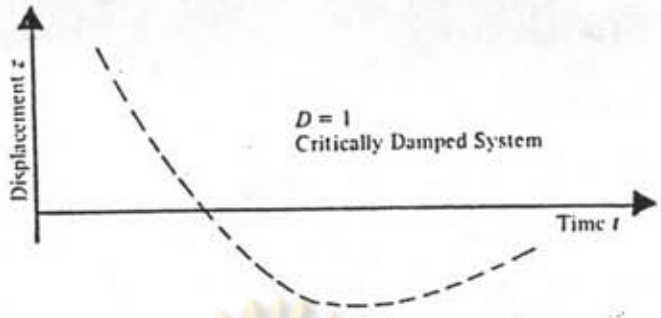
3. กรณีของ $\frac{C^2}{4m^2} < \frac{K}{m}$ ดังนั้น $C < 4[Km]^{\frac{1}{2}}$

กรณีนี้ค่าสัดส่วนความหน่วง $D < 1$ เรียกกรณีนี้ว่าอันเดอร์แดมป์ (Underdamped) เมื่อนำสมการคำตอบของการเคลื่อนที่ Z พลอตกับเวลา t ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่าจะเกิดการสั่นของฐานรากขึ้น และค่าแอมปลิจูดของการสั่นจะลดลงจนในที่สุดเกิดการหยุดสั่นเมื่อเวลาผ่านไป

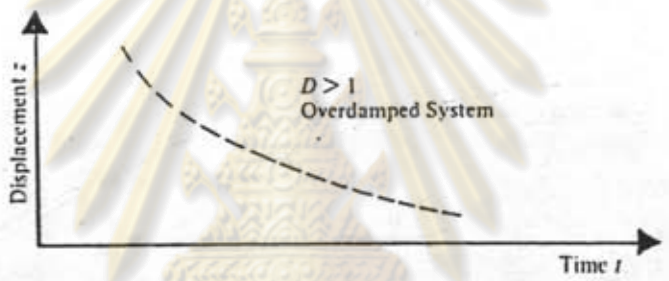
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ (12) $r = -\frac{C}{2m} \pm \left[\frac{C^2}{4m^2} - \frac{K}{m}\right]^{\frac{1}{2}}$

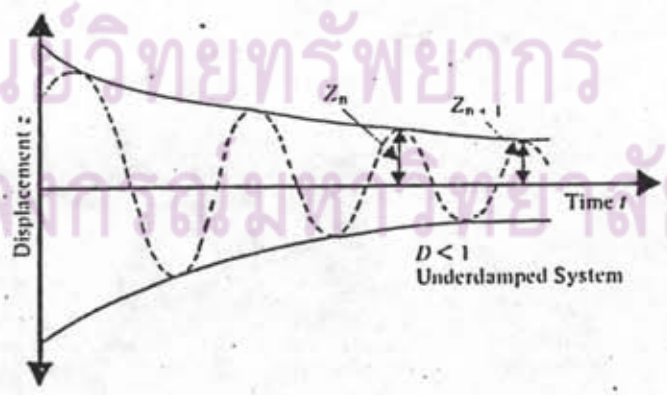
เขียนใหม่ได้ว่า $r = \omega_n \left\{-D + [D^2 - 1]^{\frac{1}{2}}\right\}$



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่กับเวลา กรณีความหน่วงวิกฤต



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่กับเวลา กรณีโอเวอร์แดมป์



รูปที่ 2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่กับเวลา กรณีอันเดอร์แดมป์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ ω_n คือค่าความถี่เชิงมุมตามธรรมชาติ (Natural Circular Frequency)

$$\omega_n = [Km]^{\frac{1}{2}}$$

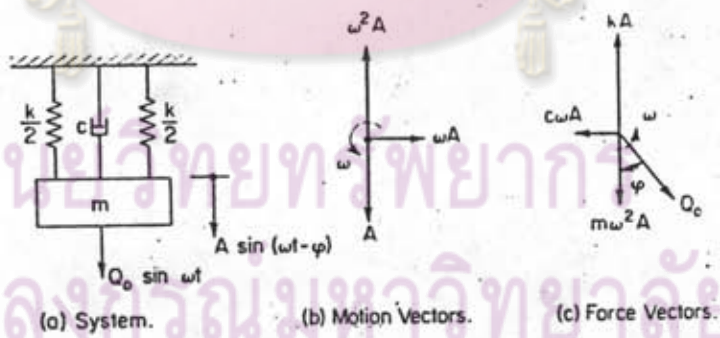
2.3.3 การสั่นภายใต้แรงกระทำที่มีความหนืด (Forced Vibration with Viscoue Damping System)

เมื่อมีแรงภายนอก $Q = Q_0 \sin \omega t$ กระทำต่อฐานรากดังแสดงในรูปที่ 2.10 พบว่า มีเวคเตอร์ของการเคลื่อนที่ (Motion Vector) และเวคเตอร์ของแรงที่มากระทำต่อมวล (Forced Vectors) แสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ

เมื่อสมมติว่าการขจัด (Displacement) ของมวลมีค่า $Z = A \sin(\omega t - \emptyset)$

A = แอมปลิจูดสูงสุดของการสั่นของมวล (Maximum Amplitude)

$\emptyset$ = มุมของเวคเตอร์ของการขจัด (Displacement Vector) นำหน้า (Lead) เวคเตอร์ของแรงที่มากระทำ (Exciting Forced Vector) ต่อมวล



(a) System. (b) Motion Vectors. (c) Force Vectors.

Figure 2-13. Forced vibrations of a single-degree-of-freedom system with viscous damping.

รูปที่ 2.10, 2.11, 2.12 แสดงเวคเตอร์ของการเคลื่อนที่และของแรงที่มากระทำต่อมวล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมดุลย์ของผลรวมของเวคเตอร์ของแรงที่มากระทำในแนวราบ (Horizontal) และแนวดิ่ง (Vertical) ได้ว่า

$$KA - m\omega A - Q\cos\phi = 0 \qquad \text{.....(13)}$$

$$C\omega A - Q\sin\phi = 0 \qquad \text{.....(14)}$$

จากสมการทั้งสองข้างต้น สามารถหาค่าตัวไม่ทราบค่า แอมปลิจูด A และมุม ϕ ได้ดังนี้

$$A = \frac{Q}{\sqrt{(K-m\omega^2)^2 + C^2\omega^2}} \qquad \text{.....(15)}$$

$$\tan\phi = \frac{C\omega}{K - m\omega^2} \qquad \text{.....(16)}$$

จาก

$$D = C/C_c = C/2[Km]^{\frac{1}{2}}$$

$$\omega_n = 2\sqrt{\frac{K}{m}}$$

สามารถจัดเทอมสมการคำตอบของ A และ tanϕได้ใหม่ ดังนี้

$$M = \frac{A}{Q/K} = \frac{1}{\sqrt{[1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + [2D\frac{\omega}{\omega_n}]^2}} \qquad \text{.....(17)}$$

$$\tan\phi = \frac{2D\frac{\omega}{\omega_n}}{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2} \qquad \text{.....(18)}$$

M = ไดนามิก แมกนิฟิเคชั่น แฟคเตอร์ (Dynamic Magnification Factor)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำสมการที่ 17 และ 18 มาพลอตที่ค่าลัดส่วนความหน่วง (Damping ratio,D) ต่างๆ กัน จะได้กราฟแสดงในรูปที่ 2.13 สำหรับแอมปลิจูดของแรงที่มากระทำมีค่าคงที่ (Constant Force Amplitude) คือค่าแอมปลิจูด Q ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่เชิงมุม w พบว่าความถี่กำธร (Resonance Frequency,fm) ที่ก่อให้เกิดค่าแอมปลิจูดสูงสุดและค่าไดนามิกส์ แมกนิฟิเคชั่น แฟคเตอร์ สูงสุดของระบบจะมีค่า ดังนี้

$$fm = fn\sqrt{1-2D^2}, \quad Mmax = 1/2D\sqrt{1-D^2}$$

fn = ความถี่ธรรมชาติภายใต้การสั่นอย่างอิสระ [Natural Frequency of Free Vibration)

รูปที่ 2.14 แสดงการพลอตสมการที่ 17 สำหรับกรณีที่แอมปลิจูดของแรงที่มากระทำ Q มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่า ω ($Q_0 = me\omega^2$)

เมื่อ m = มวลที่เกิดการเคลื่อนที่เยื้องศูนย์ทั้งหมด (Total Eccentric Mass)

e = ค่าเยื้องศูนย์ (Eccentricity) ของระบบการหมุนของมวล (Rotating Mass System)

ดังแสดงในรูปที่ 2.15 พบว่าค่าความถี่ fmr และ M สูงสุดของระบบนี้มีค่า

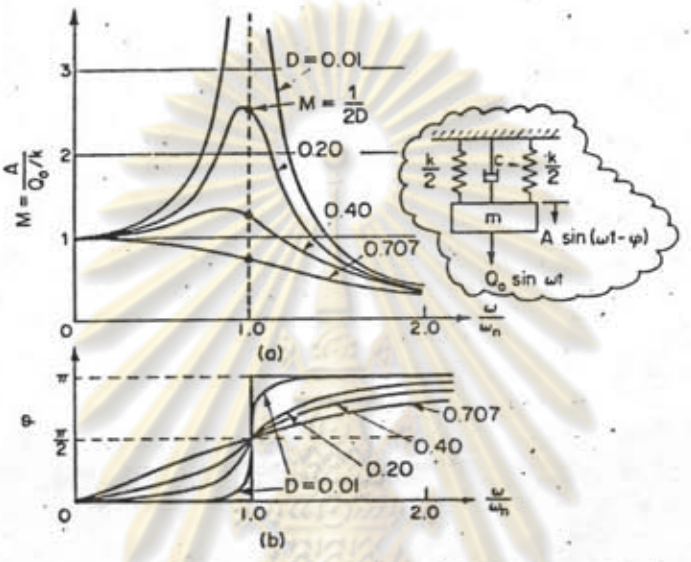
$$fmr = fn\frac{1}{\sqrt{1-2D^2}}$$

$$Mmax = \frac{1}{2D\sqrt{1-D^2}}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.4 มาตรฐานที่ควรคำนึงในการออกแบบฐานรากรับน้ำหนักพลวัต (Criteria for a Satesfactory Foundation for Dynamic Load)

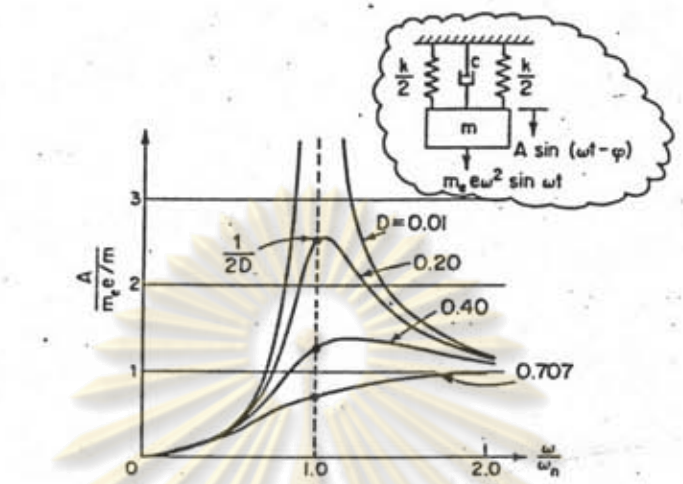
ในการออกแบบฐานรากเพื่อรองรับน้ำหนักพลวัตนั้นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ



Response curves for a viscously damped single-degree-of-freedom system.

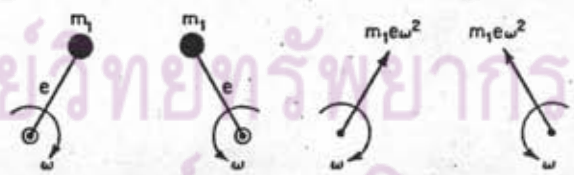
รูปที่ 2.13 แสดงกราฟของคำตอบเมื่อแอมปลิจูดของแรงที่มากระทำมีค่าคงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Response curves for rotating mass type excitation of a viscously damped single-degree-of-freedom system.

รูปที่ 2.14 แสดงกราฟของคำตอบเมื่อแอมปลิจูดของแรงที่มากระทำมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่เชิงมุม



Forces produced by two counterrotating masses.

รูปที่ 2.15 แสดงระบบการหมุนของมวล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ต้องไม่เกิดการกำธร (Resonance) นั่นคือจะต้องออกแบบมิให้เกิดความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของระบบฐานราก (Foundation Soil System) มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ (Coincide) ความถี่ของน้ำหนักพลวัต (Dynamic Load) ที่มากระทำกับฐานราก ทั้งนี้ เพราะที่จุดที่เกิดการกำธร (Resonance) จะเป็นจุดที่เกิดแอมปลิจูดของการสั่น (Amplitude of Motion) ที่มีค่ามากที่สุดของระบบฐานราก

2. แอมปลิจูดของการสั่น (Amplitude of Motion) ณ ที่ความถี่ของระบบขณะปฏิบัติงาน (Operating Frequencies) จะต้องไม่มีค่าเกินขีดจำกัดของแอมปลิจูด (Limiting Amplitude) ที่เสนอขึ้นโดยบุคคล หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่างๆ

3. ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะต้องไม่ก่อให้เกิดการรบกวน หรือก่อให้เกิดความเสียหาย (Damage) ต่อผู้คน เครื่องจักรหรือสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บริเวณใกล้เคียงได้ ซึ่งจากการทำการศึกษาถึงระบบความรุนแรงของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ได้แบ่งแยกความรุนแรงของความสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อคนและสิ่งปลูกสร้างออกเป็นระดับดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแอมปลิจูดของการขจัด (Displacement Amplitude) กับความถี่ที่เกิดการสั่นนั้น

2.3.5 ข้อเสนอแนะบางประการในการออกแบบฐานรากรับความสั่นสะเทือน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการกำธร (Resonance) และแนวทางลดผลของความสั่นสะเทือน

ในการออกแบบฐานรากเพื่อรับความสั่นสะเทือน จะต้องคำนึงถึงกฎทั่ว ๆ ไปอยู่เสมอ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงสภาพการกำธร (Resonance Conditions) ที่อาจจะเกิดขึ้นซึ่งเป็นสภาพที่มีแอมปลิจูดของการสั่นสะเทือนมากที่สุด (รุนแรงมากที่สุด)

1. ความถี่กำธร (Resonance Frequency) ของระบบฐานราก-มวลดิน (Foundation-soil System) ควรจะน้อยกว่าครึ่งของความถี่ที่ปฏิบัติงาน (Operating Frequency) สำหรับเครื่องจักรที่มีความถี่ที่ปฏิบัติงานมากกว่า 1,000 รอบต่อนาทีซึ่งกรณีนี้ควรที่จะต้องทำการตรวจเช็คดูว่าเกิดความถี่กำธรเมื่อเริ่มต้นทำงาน (Starting) และหยุดทำงาน (Stopping) ด้วยหรือไม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

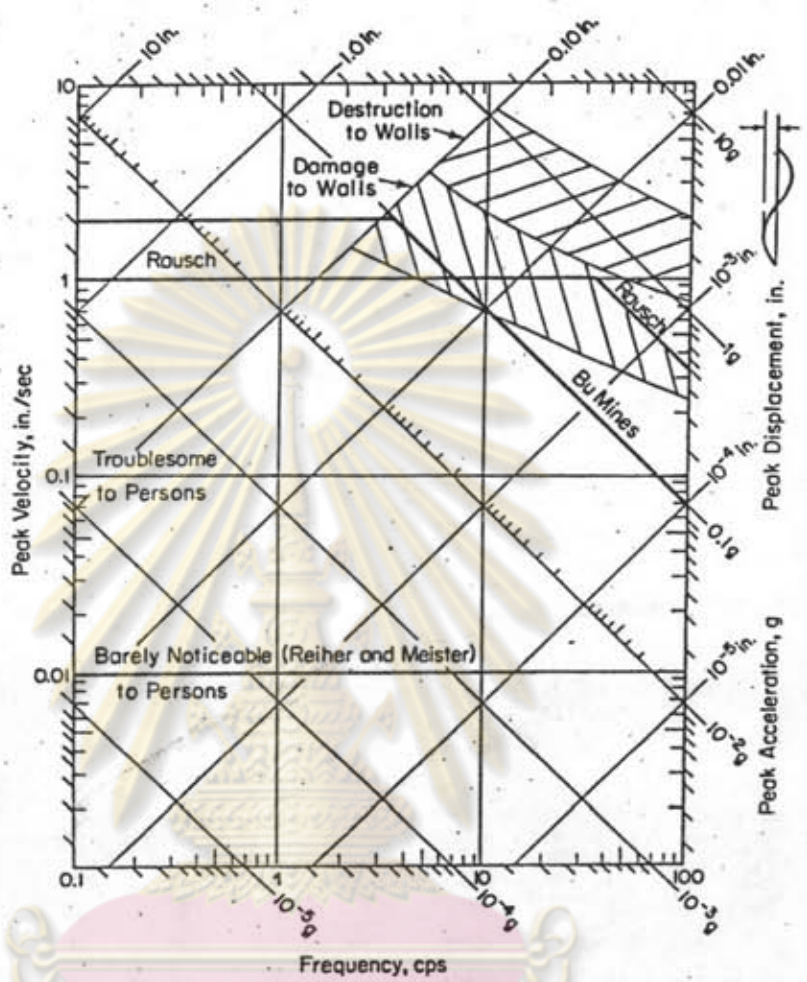


Figure 10-3. Response spectra for vibration limits.

รูปที่ 2.16 แสดงระดับความรุนแรงของความสั่นสะเทือน
ที่ส่งผลกระทบต่อคนและสิ่งปลูกสร้าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. สำหรับเครื่องจักรที่มีรอบการทำงานต่ำ (Low-speed Machines) ที่มีความถี่ที่ปฏิบัติงานประมาณ 350-400 รอบต่อนาที ความถี่กำธรของระบบฐานราก-มวลดินไม่ควรมีค่าน้อยกว่า 2 เท่าของความถี่ที่ทำการปฏิบัติงาน

3. ในการออกแบบฐานรากเพื่อรองรับความสั่นสะเทือนทุกประเภท เมื่อเพิ่มน้ำหนักของฐานราก จะทำให้ค่าความถี่กำธรลดลง

4. การเพิ่มขนาดพื้นที่ของฐานรากจะทำให้ค่าความถี่กำธรของฐานรากเพิ่มขึ้น

5. การเพิ่มค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus) ของมวลดินที่รองรับฐานราก เช่นการเพิ่มความแข็งแรง (Grouting) จะทำให้ค่าความถี่กำธรของฐานรากมีค่าเพิ่มขึ้น

6. ในฐานรากเดียวกันการเพิ่มความแข็งแรงขึ้นรองรับใต้ฐานรากจะทำให้ค่าแอมปลิจูดการสั่นลดลง

7. การเพิ่มขนาดและความต่อเนื่องของฐานรากจะทำให้ค่าแอมปลิจูดการสั่นลดลง

2.4 ผลกระทบของความสั่นสะเทือนที่มีต่ออาคารและโครงสร้างทางวิศวกรรม

ก่อนที่จะรู้ถึงว่า ระดับความรุนแรงของความสั่นสะเทือน ที่เกิดขึ้นในระดับใดจึงเพียงพอที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารและโครงสร้างทางวิศวกรรมได้นั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจในประเภทของความเสียหายที่จะเกิดขึ้น เนื่องจากความสั่นสะเทือนเสียก่อน

M.W.Jackson (1967) แห่ง University of New Mexico ได้อภิปรายถึงปัญหาเกี่ยวกับระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสิ่งปลูกสร้างและโครงสร้างทางวิศวกรรม โดยได้แบ่งความเสียหาย (Damage) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความสั่นสะเทือนออกเป็น 2 ประเภท

1. ความเสียหายของโครงสร้าง (Structural Damage) หมายถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างแล้วทำให้หน้าที่ (Function) หรือการใช้งานของโครงสร้างนั้นอ่อน

แอ (Impair) หรือเสื่อมลง เช่น การแตกร้าวของผนังของอาคารบ้านเรือน เป็นต้น

2. ความเสียหายทางสถาปัตยกรรม (Architectural Damage) หมายถึง ความเสียหายเล็กๆ น้อยๆ ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง เช่น การแตกร้าวของวัสดุเปราะและปูนฉาบ เป็นต้น

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างความเสียหายทางโครงสร้าง(Structural Damage) และทางสถาปัตยกรรม (Architectural Damage) พบว่าความเสียหายทางสถาปัตยกรรมจะส่งผลในแง่ของความรู้สึก (Sensation) ที่ไม่ปลอดภัยมากกว่าที่จะทำให้เกิดอันตราย หรือความเสียหายให้แก่โครงสร้าง และมีค่าระดับของความสั่นสะเทือนต่ำกว่าความเสียเสียหายทางโครงสร้างอย่างมาก

นอกเหนือไปจากความสั่นสะเทือนที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นต่ออาคารและโครงสร้างทางวิศวกรรมแล้ว ยังมีสาเหตุอีกหลายประการที่ทำให้เกิดความเสียหายลักษณะดังกล่าวได้เช่นกัน อาทิเช่น การทรุดตัวไม่เท่ากันของฐานราก (Differential Settlement) ความเสียหาย เนื่องจากการเสื่อมคุณภาพของวัสดุ ดังนั้น ก่อนที่ลงความเห็นว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นดังกล่าว เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุใด จึงจำเป็นต้องทำการพิจารณาอย่างรอบคอบและถ่องแท้เสียก่อน

2.4.1 <u>การเกิดความเสียหายของโครงสร้าง (Structure) เนื่องจากความสั่นสะเทือน</u>

ความสั่นสะเทือนทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้าง (Structure) ได้ 3 กรณี คือ

1. การเกิดจากการกระทำซ้ำ ๆ ซาก ๆ (Repetition) ของความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความสั่นสะเทือน สามารถทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการล้า (Fatique Damage) ของโครงสร้างขึ้นได้

2. ถ้าความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง (Instant of Time) มีขนาดมากพอจะทำให้เกิดความเค้นที่ก่อให้เกิดความเสียหายเฉพาะจุด (Local Repture

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 10803257

Stress) เพิ่มมากขึ้นจนทำให้เกิดการพังทลาย (Failure) ของโครงสร้างได้

3. ความสั่นสะเทือน สามารถทำให้เกิดการเพิ่มความเค้นจากเดิมที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการยืดหรือหดตัวของวัสดุ หรือการเปลี่ยนแปลงของความชื้น เป็นต้น ทำให้เกิดมีความเข้มของความเค้นสูงในตัวโครงสร้างขึ้นได้ จนเป็นสาเหตุการเกิดของการวิบัติ (Triggering Failure) ขึ้นได้

2.4.2 <u>หน่วยวัดความรุนแรงของความสั่นสะเทือน</u>

ในการศึกษาถึงผลกระทบของความสั่นสะเทือนต่อ อาคาร โครงสร้างทางวิศวกรรมและต่อการตอบสนองของมนุษย์ ได้มีผู้ทำการศึกษา และสถาบันต่าง ๆ ได้เสนอหน่วยเพื่อวัดระดับของความรุนแรงของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งกำหนดถึงผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นในแต่ละช่วงของระดับของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ได้แก่การขจัด (Displacement) ความเร็ว (Velocity) ความเร่ง (Acceleration) หรือหน่วยซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของหน่วยของความสัมพันธ์จาก Simple Harmonic Motion ดังนี้

$$V = 2\pi fA \qquad \text{.....(19)}$$

$$a = 4\pi f^2 A$$

เมื่อ V = ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Particle Velocity)

A = การเคลื่อนที่ของแอมปลิจูด (Displacement Amplitude)

a = ความเร่ง (Acceleration)

f = ความถี่ (Frequency)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยปกติระดับของความสั่นสะเทือน จะแสดงอยู่ในรูปของปริมาณต่างๆ ในรูปของฟังชั่นกับความถี่

ในปัจจุบันนี้ เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่า หน่วยที่ใช้วัดระดับของความสั่นสะเทือนที่เป็นอันตรายต่อสิ่งปลูกสร้าง และความรู้สึกของมนุษย์ คือค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาค (Maximum Particle Velocity) โดยเฉพาะที่ช่วงความถี่ระหว่าง 5-50 Hz (WISS,

1967) ซึ่งช่วงของความถี่ของความสั่นสะเทือนแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนถึงชนิด และขนาดของผลของความรุนแรงของความสั่นสะเทือน ดูตารางที่ 2.1 ส่วนกรณีของแผ่นดินไหวที่มีความถี่ต่ำ โดยปกติจะพิจารณาถึงความเร่งที่เป็นสาเหตุให้เกิดอันตราย ทั้งนี้ เนื่องจากแรงในแนวราบ (Horizontal Force) ที่เกิดขึ้น เป็นสัดส่วนกับความเร่งในแนวราบ (Horizontal Acceleration) ในการพิจารณาเกี่ยวกับอันตรายที่เกิดขึ้น ตัวเลขที่บ่งชี้ได้ดีอีกอย่างหนึ่ง คือ ผลของแรงที่เกิดขึ้น คูณ กับระยะเวลาที่แรงนั้นกระทำ สำหรับการสั่นของเส้นลวดที่ดึงขนานในแนวราบ (RICHARD,HALL,WOOD ,1970) แสดงให้เห็นว่าความเค้นพลวัต (Dynamic Stress) เป็นสัดส่วนกับความเร็วของอนุภาค (Particle Velocity) ดังสมการ

$$\sigma_{max.} = V_{max.} \qquad \text{.....(20)}$$

$\sigma_{max.}$ = max. dynamic longitudinal stress

$V_{max.}$ = max. particle velocity

E = Young's modulus

ρ = density

ซึ่งปริมาณ $\sqrt{E\rho}$ เรียกว่า ความต้านทานคลื่น (Wave Resistance) ในตารางที่ 2.2 แสดงค่าของ $\sqrt{E\rho}$ สำหรับวัสดุต่างๆ

นอกจากนี้ BENDEL (1971) ได้แสดงสมการของความสัมพันธ์ของ Bending Stress ที่เกิดขึ้นกับคานที่ไม่มีน้ำหนักมากระทบบนที่รองรับ (Plate) ซึ่งมีระดับความสั่นสะเทือนเดียวกัน (At resonance) ดังนี้คือ

$$\sigma_{max.}(\text{Bending stess}) = (1.0 - 2.0)\sqrt{E\rho} \qquad \text{.....(21)}$$

แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสั่นสะเทือนที่เท่ากัน Bending Stress จะมีค่าได้ถึง 2 เท่าของ Axial Stress แต่อย่างไรก็ดี กรณีที่ไม่คำนึงถึงรูปแบบของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น การวัดค่าความเร็วของอนุภาคจะใช้แทนการวัดความเค้นพลวัต (Dynamic Stress) ได้เป็นอย่างดี

ผลงานการศึกษาเท่าที่ผ่านมา ได้มีผู้ศึกษา ที่พยายามจะหาค่าความรุนแรงของ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความรุนแรงของความสั่นสะเทือนในรูปของความถี่ที่มีผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้าง

<table>
<tr><td>Frequency Range (Hz)</td><td>0 to 5</td><td>5 to 10</td><td>10 to 60</td><td>> 60</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Source of Vibration</td><td colspan="4">Machinery</td></tr>
<tr><td>Earthquakes</td><td>Traffic and Pile driving</td><td>Pile driving and Blasting</td><td>Blasting</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Natural (resonant) Frequency</td><td colspan="2">Total Structure</td><td rowspan="2">Walls and floors perpendicular to centerline</td><td rowspan="2">Walls and floors parallel to centerline</td></tr>
<tr><td>Tall buildings</td><td>Low buildings</td></tr>
<tr><td>Vibration Mode</td><td>The whole structure undergoes vibrations in shear and bending</td><td rowspan="3">Combination of velocity and acceleration</td><td colspan="2">Walls and floors undergo flexural and axial vibrations</td></tr>
<tr><td>Dynamic Stresses</td><td>Due to inertia forces</td><td colspan="2">Due to bending and axial stresses</td></tr>
<tr><td>Significant kinematic quantity</td><td>Acceleration</td><td colspan="2">Particle velocity</td></tr>
</table>

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าที่เริ่มเข้าสู่อันตรายของวัสดุต่าง ๆ

Material	Tensile Strength, σ_f (kN/m^2)	Wave Resistance $\sqrt{E\rho}$ $\frac{(kN\text{-}sec)}{m^3}$	Limiting Particle Velocity $y_{max} = \frac{\sigma_f}{\sqrt{E\rho}}$ (mm/sec)
Lime mortar	50	2500 to 5000	10
Brick-walls	200 to 400	2000 to 4000	50
Concrete (non-reinforced)	1000 to 1500	7000 to 10000	100

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสั่นสะเทือนและผลของอันตรายที่เกิดจากพลังงานความสั่นสะเทือนในรูปของหน่วย (Unit) ต่างๆ เช่น ZELLER (1931,1933,1949) ,SOIR (1965) , KOCH (1953) , GERMAN STANDARD D.I.N.4150 (1939) , KOHLER (1941) และ CRANDEL (1949) เป็นต้น บุคคลดังกล่าวได้ศึกษาให้ข้อจำกัดหน่วยวัดระดับความรุนแรงของความสั่นสะเทือนไว้ดังนี้ Zeller's power หรือ scale ของ Intensity , Damage number , Vibrar , Pal unit หรือ Pal scale ซึ่งรวบรวมโดย ZELLER และ Modifier Pal unit ซึ่งร่วมกับ GERMAN STANDARD D.I.N. ,4150 หน่วยความรุนแรงของความสั่นสะเทือนนี้มีพื้นฐานการพิจารณาในรูปของพลังงานกับเวลา

STEFFENS (1965) ได้เสนอ Basic Energy Unit (L) ซึ่งพิจารณาพลังงานจลน์ (Rinetic Energy) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความสั่นสะเทือนของมวลหนึ่งหน่วย (Unit Mass) ในช่วงเวลา 1 ใน 4 ของคาบ (Peroid) ของความสั่นสะเทือน ได้ความสัมพันธ์ของ Energy Unit (L) ดังนี้

$$\text{Energy unit (L)} = 2\pi^2 A^2 f^2 \ (cm^2/sec^2) \qquad .....(22)$$

ZELLER ได้เสนอหน่วยวัดระดับความรุนแรงของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในรูปของ Zeller's power (Z หรือ X) ที่เป็นผลรวมของความเร่งและความถี่ ได้ดังนี้

$$\text{Zeller's power , (Z หรือ X)} = a^2/f^2 = 16\pi^4 A^2 f^2 \ (cm^2/sec^3) \qquad .....(23)$$

นั่นคือ $$Z \text{ หรือ } X = 8\pi^2 L \qquad .....(24)$$

หรือโดยประมาณ $$Z \text{ หรือ } X = 80L \qquad .....(24)$$

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของความสั่นสะเทือนที่มีต่อคนและสิ่งปลูกสร้างทางวิศวกรรมระหว่าง Acceleration on Caucani Scale (mm /sec) ที่ใช้สำหรับความสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวกับ Zeller's power , Z และหน่วย Vibrar

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของความสั่นสะเทือน
ที่มีต่อมนุษย์และสิ่งปลูกสร้างทางวิศวกรรมของข้อกำหนด

The Zeller scale (derived from the Mercalli-Cancani scale)

Rating or degree	Assessment (effect on people or buildings)	Acceleration on M-C scale (mm/s^2)	Zeller's (Z) value (mm^3/s^2)	Corresponding strength in vibrar units
1	not noticeable	1	0–200	up to 13
2	very light	2·5	200–1000	13–20
3	light	5	$1–5 \times 10^3$	20–27
4	moderate (possibility of small cracks in plaster)	10	$5–25 \times 10^3$	27–34
5	fairly strong	25	$25–1000 \times 10^3$	34–40
6	Strong (possible slight structural damage)	50	$1–5 \times 10^4$	40–47
7	Very strong (serious cracking)	100	$5–20 \times 10^4$	47–53
8	severe (destructive)	250	$2–10 \times 10^5$	53–60
9	violent (devastating)	500	$1–5 \times 10^5$	60–67
10	very destructive	1000	$5–25 \times 10^5$	67–74
11	catastrophic	2500	$25–100 \times 10^5$	74–80
12	very catastrophic (ruinous)	5000	$>10^6$	over 80

Note: The possibility of fine cracks in plaster is denoted between degrees 3 and 4 on the scale, the Z-values being 2500 to 10000.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางดังกล่าวพบว่าค่า Zeller's power ครอบคลุมอยู่ในช่วงกว้างมากตั้งแต่ 1-10 (cm /sec) ทั้งนี้ เพื่อความเหมาะสมและถูกต้องยิ่งขึ้น จึงได้เสนอหน่วยวัดความสั่นสะเทือน Vibrar ขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า Zeller's power, Z ดังนี้

$$\text{Vibrar} = 10 \log_{10} Z/Z_0 \qquad \text{.....(26)}$$

เมื่อ $Z_0 = 0.1\ cm^2/sec^3$

ดังนั้น $\text{Vibrar} = 10 \log_{10} 10 Z$ .....(27)

แรกเริ่มนั้นหน่วย Vibrar ถูกเสนอขึ้นเพื่อใช้บ่งบอกถึงระดับของความสั่นสะเทือนที่มีผลกระทบต่อคน ต่อมา KOCH ได้ใช้สำหรับบ่งบอกถึงผลกระทบที่มีต่ออาคารและโครงสร้างทางวิศวกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.4

นอกจากนี้ STEFFENS (1965) ยังแสดงระบบและวิธีการที่เป็นการเปรียบเทียบผลกระทบจากความสั่นสะเทือนที่เกิดจากแอมปลิจูดและความถี่ต่างๆ กันโดยใช้ Vibrar ซึ่งแนะนำโดย KOCH (1953)

$$\text{Vibrar , S} = 10.\log (X/Xo) \qquad \text{.....(28)}$$

เมื่อ X = Zeller's power (cm^2/sec^3)

Xo = 0.1 cm /sec ซึ่งค่าของ X มาจากค่าความเร่ง

$a_S = 0.316\ cm/sec^2$

ดังนั้น $\text{Vibrar , S} = 10 \log(10X)$ .....(27a)

$= 10+10\log X$ .....(27b)

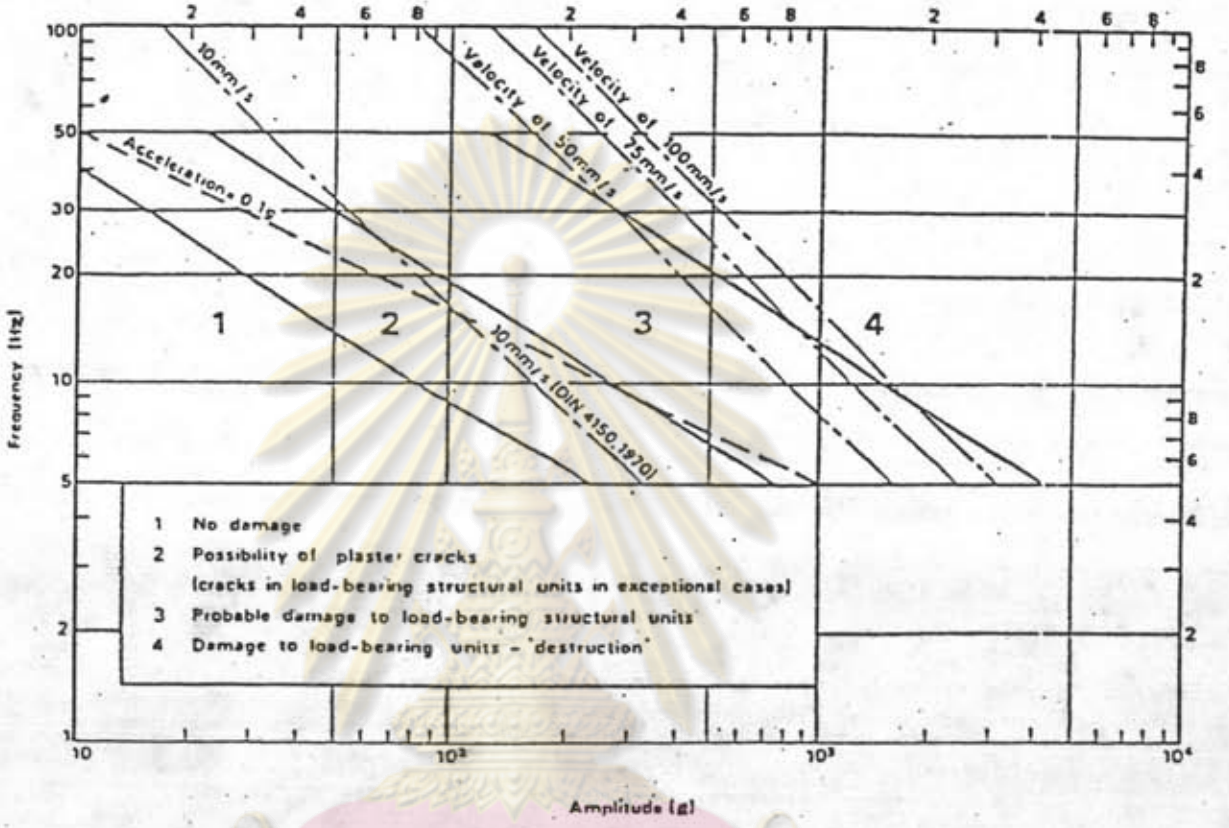
และเพื่อความสะดวก STEFFENS (1965) ได้เตรียมแผนภูมิ (Chart) ไว้ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 แสดงผลกระทบที่มีต่ออาคารและโครงสร้างทางวิศวกรรม ในหน่วย Vibrar

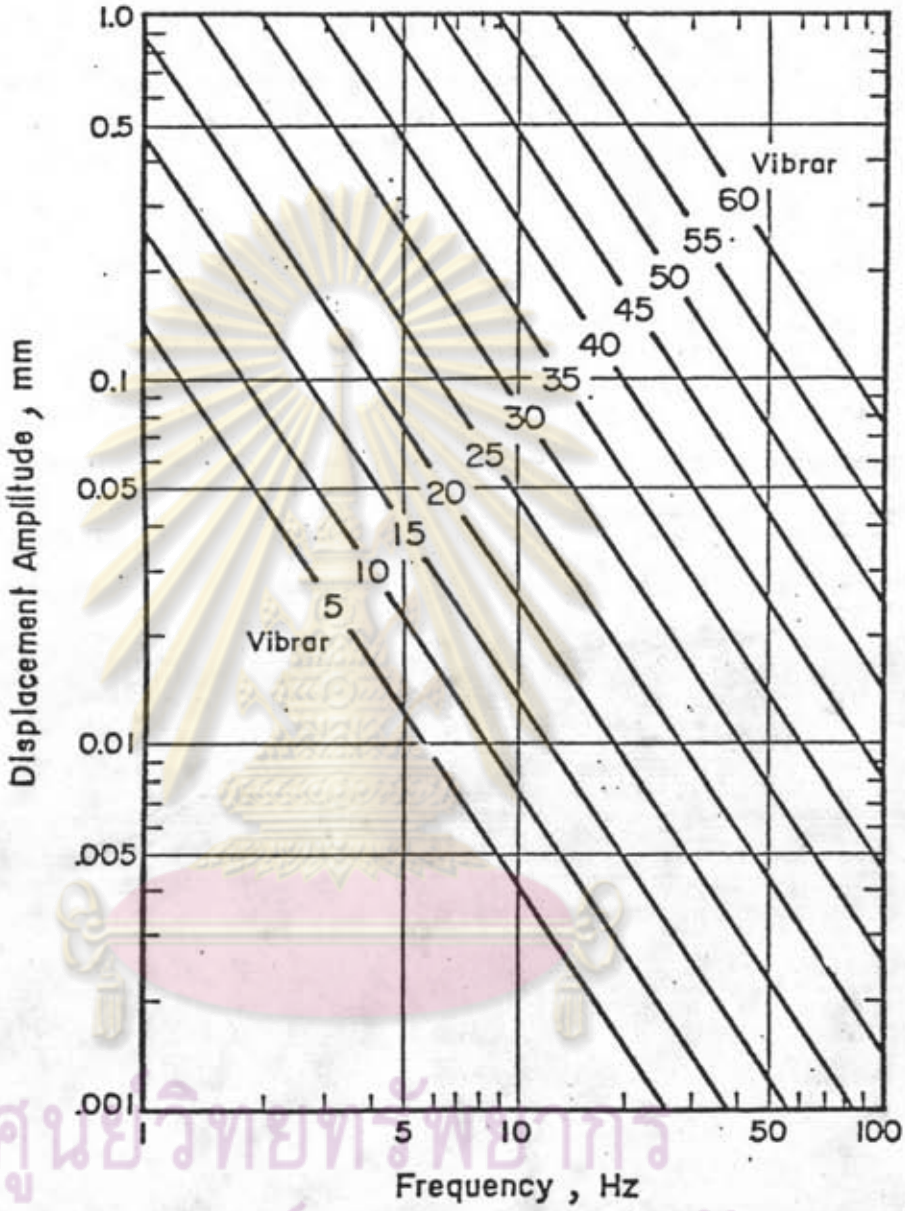
strength vibrar	classification of vibration	Possible Damage
10-20	Light	no. structural damage
20-40	Medium	no. structural damage
30-40	Streng	Light damage [for example cracking in rendering or or plaster
40-50	Heavy	Severe damage [for example cracks in load-bearing wall]
50-60	Very heavy	destruction to building

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของแอมปลิจูดสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ที่ความถี่ต่าง ๆ จากข้อกำหนดต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.18 แสดงค่า Vibrar Unit

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้ หน่วยของความรุนแรงของความสั่นสะเทือนที่ใช้กันโดยทั่วไปในชื่อของ Pal หรือ Zeller Pal ซึ่งแนะนำโดย ZELLER (1933)

$$\text{Zeller Pal}, S^{*} = 10.\log(X/X1) \qquad \text{.....(28)}$$

เมื่อ $X = 0.5 \ cm^2/sec^3$

$$\text{ดังนั้น Zeller Pal} = 10 \log (2X) \qquad \text{.....(28a)}$$

$$= 3.10+10\log X \qquad \text{.....(28b)}$$

$$\text{และ} \quad S^{*}(\text{Pal}) \cong S(\text{Vibrar}) - 7 \qquad \text{.....(29)}$$

ดังจะเห็นได้ชัดเจนแล้วว่า หน่วย Zeller Pal มีค่าน้อยกว่า Vibrar =7 กรณีที่จำเป็น ก็สามารถที่จะใช้หาค่าความรุนแรงในหน่วยของ Zeller Pal ได้ ผลกระทบจากความรุนแรงของความสั่นสะเทือนในหน่วยของ Zeller Pal แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

GERMAN STANDARD ,D.I.N. 4150 (1939) ได้เสนอหน่วย Pal ในรูปของความเร็วของอนุภาค ดังนี้

$$S^{**}(\text{DIN-Pal}) = 10.\log \left[\frac{V_{eff}}{V_{seff}}\right]^2 \qquad \text{.....(30)}$$

เมื่อ V_{seff} = ความเร็วต้นของอนุภาค (Theshold Value of Velocity)

และ V_{eff} = r.ω.s ของความเร็วของอนุภาค (Particle Velocity)

$$V_{eff} = \frac{2\pi Af}{\sqrt{2}} \quad cm/sec$$

KOHLER (1941) ได้เสนอหน่วย Damage number,S' หน่วยนี้แสดงอยู่ในรูปของ mm^2/sec^3 ดังนี้คือ

$$\text{Damage number}, S' = 2\pi^2 4A^2 f^3 \qquad \text{.....(31)}$$

$$S' = 78.96 \ A \ f \qquad \text{.....(31a)}$$

เมื่อ S' น้อยกว่า 500 mm^2/sec^3 ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งปลูกสร้าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าความรุนแรงของความสั่นสะเทือน
ในหน่วยของ Zeller Pal Scale

Intensity (Zeller Pal)	Sensation or Effect
0-10	Vibration perception depending on body position
10-20	General perception
20-30	Traffic vibrations; not tolerable for persons in building
30-40	Vibration in vehicles moving quietly
40-50	Vibration in vehicles; acceleration in lifts
50-60	Heavy vibrations in vehicles; vibration bearable by persons for short time without discomfort
60-80	Physical discomfort; sea sickness; pain, if associated with high frequencies

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CRANDEL (1949) เสนอหน่วย Energy Colfficient,ER เป็นบรรทัดฐานด้านอันตรายที่จะเกิดขึ้น คือ

$$ER = a^2/f^2 \quad m^2/sec^2 \qquad .....(32)$$

เมื่อ ER น้อยกว่า 0.3 m^2/sec^2 จะไม่เกิดอันตรายจากความสั่นสะเทือน

ทั้งนี้ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน SIOR (1961) ได้สรุปความสำคัญของหน่วยวัดความรุนแรงต่าง ๆ ในรูปความสัมพันธ์ ดังนี้

$$X(cm^2/sec^3) = 0.1974\ S'(mm^2/sec^3) = 0.1(10)^{0.1S} \quad (Vibrar)....(33)$$

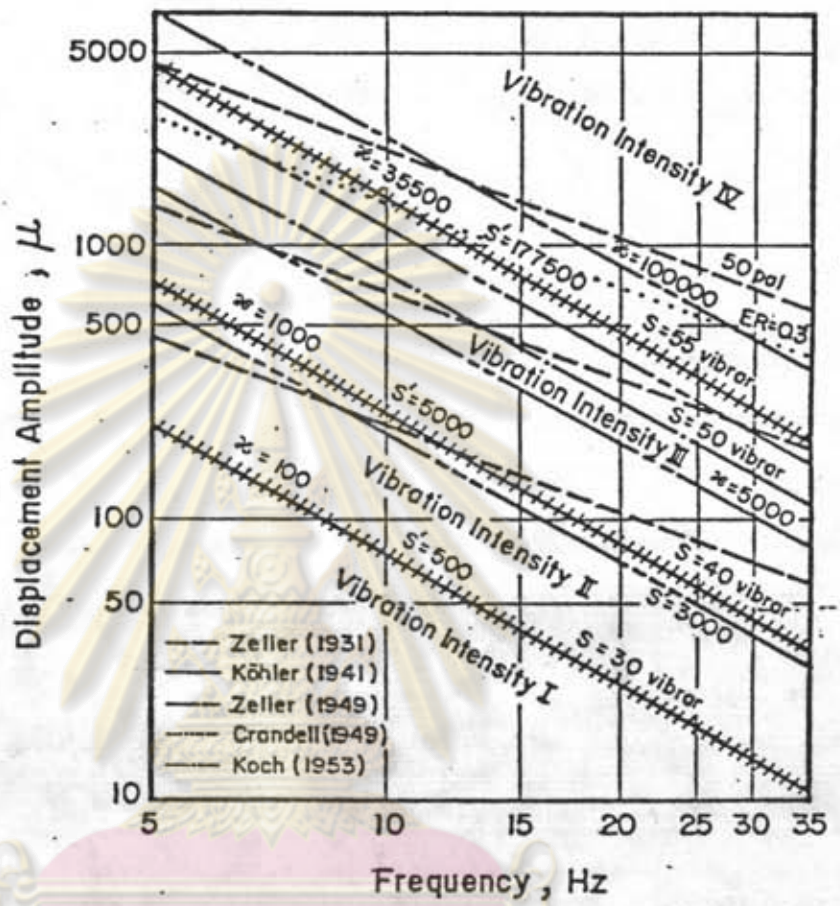
และได้เปรียบเทียบความแตกต่างของหน่วยวัดต่างๆ ดังความสัมพันธ์นี้ ไว้ในรูปที่ 2.19

นอกจากนี้ SIOR ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของระดับความสั่นสะเทือนอย่างกว้างขวาง และได้กำหนดขีดจำกัดของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตอกเสาเข็มอย่างปลอดภัย โดยได้แบ่งระดับความรุนแรงออกเป็น 4 กลุ่ม แต่ละกลุ่มจะมีผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับความรุนแรงของความสั่นสะเทือนต่าง ๆ กันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.6 SIOR เสนอแนะว่าจะเกิดความเสียหาย (Damage) ขึ้นในลำดับขั้นที่ 2 ได้ในกรณีเดียวกัน คือมีน้ำหนักสถิตย์ (Static Loading) มากระทำต่อวัสดุที่ใช้ทำการก่อสร้าง ก่อนที่จะเกิดการกระทำของน้ำหนักพลวัต (Dynamic Loading) โดยก่อให้เกิดเป็น Trigger Mechanism

2.4.3 ระดับของความสั่นสะเทือนที่มีผลกระทบต่ออาคารและโครงสร้างทางวิศวกรรม และบรรทัดฐานด้านอันตราย (Damage Criteria)

การกำหนดถึงพฤติกรรมของอาคาร หรือโครงสร้างทางวิศวกรรมที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับของความรุนแรงของความสั่นสะเทือนนั้น ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบหลายอย่างด้วย เช่น ขนาด อายุ และชนิดของโครงสร้าง รวมถึงคุณสมบัติทางความล้า (Fatique) ของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างนั้นด้วย จากการศึกษาของผู้ทำการวิจัยหลายท่าน พบว่าพฤติกรรมของโครงสร้างที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับของความรุนแรงของความสั่นสะเทือน จะมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.19 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของหน่วยวัด Vibrar จากข้อจำกัดของความรุนแรงของความสั่นสะเทือนตามตารางที่ 2.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 แสดงระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับชั้นความรุนแรงของความสั่นสะเทือนที่เสนอโดย SIOR

groups	Zeller's Power (mm^2/sec^3)	vibrar	Possible Damage
Degree 1	$1-1x10^4$	30	No evidence of Damage so far detected
Degree 2	10^4-10^5	30-40	Light damage such as plaster cracks, but cracks in load-bearing structural units possible
Degree 3	$1x10^5-35x10^5$	40-55	Damage in load bearing structural units probable
Degree 4	$>35x10^5$	>55	Darnage in load bear-ing structural units Destruction of entire structure

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เร็วสูงสุดของการสั่นของอนุภาค และค่านี้จะสัมพันธ์กับพลังงานที่มากระทำต่อโครงสร้างนั้น ทั้งนี้มิได้หมายความว่าค่าความเร็วสูงสุดของการสั่นของอนุภาคจะมีความสำคัญเพียงอย่างเดียว รูปร่างของคลื่น (Waveform) ช่วงระยะเวลาที่มากระทำ (Duration) และองค์ประกอบอื่นก็มีความสำคัญด้วยเช่นกัน

การศึกษาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใต้ความสั่นสะเทือน เริ่มแรกนั้นได้กระทำด้วยวิธีการระเบิด (Blasting) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของสิ่งปลูกสร้างที่เกิดขึ้นภายใต้ความสั่นสะเทือนเนื่องจากการระเบิดนี้ ผลการทดสอบสรุปได้ว่าสิ่งปลูกสร้างทุกชนิดจะไม่มีอันตรายหรือเกิดความเสียหายเกิดขึ้นถ้าแอมปลิจูดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกิน 400 ไมครอน (Microns) แต่ถ้าสภาพสิ่งก่อสร้างไม่ดีนักอาจจะเกิดการแตกร้าวของปูนฉาบหรือกำแพงได้ สถาบันบางแห่งได้กำหนดว่าขนาดของแอมปลิจูดที่เกิดขึ้นสำหรับสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ภายนอกเขตควบคุมการระเบิดต้องมีค่าไม่เกิน 200 ไมครอน และในบางประเทศได้กำหนดค่าของแอมปลิจูดสูงสุดที่ยอมให้สำหรับในโครงสร้างชนิดต่างๆ มาจนถึงปัจจุบันนี้ดังแสดงในตารางที่ 2.7 และได้ปรับปรุงขึ้นจนสามารถแบ่งระดับของความรุนแรงถึงขีดที่พึงระมัดระวัง (Caution Limits) สำหรับค่าแอมปลิจูดสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ดังแสดงในตารางที่ 2.8

GRANDELL ได้เสนอระบบสัดส่วนของพลังงานขึ้นสำหรับกำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับความปลอดภัยภายใต้ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการระเบิด ระบบนี้ได้กำหนดขั้นความรุนแรงไว้ ดังนี้

Caution stage เมื่อ A.f = 13.4 มม./วินาที [max.velocity]
= 84 มม./วินาที

danger stage เมื่อ A.f = 18.9 มม./วินาที [max.velocity]
= 120 มม./วินาที

A = แอมปลิจูด (มม)

f = ความถี่ของการสั่น (เฮิรตซ์)

อย่างไรก็ตาม พบว่าข้อกำหนดของ GRANDELL มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดโดย NEW JERSY AUTHORITIES ที่กำหนดอยู่ในรูปร่างของความเร็วของการสั่นของอนุภาคที่กำหนดไว้ในช่วงทุกๆ ความถี่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าแอมปลิจูดสูงสุดที่ยอมให้สำหรับโครงสร้างชนิดต่าง ๆ

Suggested maximum allowable amplitudes (blasting) (as formerly used)

Type of Property	Allowable amplitude (μ)
Quarry plant and buildings of basic design	>400
Quarry property, and in cases where minor damage unimportant	400
Housing estates and farm property	200
Churches and scheduled ancient monuments	127

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าแอมปลิจูดสูงสุดที่ยอมให้สำหรับโครงสร้างชนิดต่าง ๆ (ปรับปรุงจากตารางที่ 2.7)

Caution limits for amplitude (blasting)

Type of Property	Allowable amplitude (μ)
Civil engineering structures	760†
Isolated properties	400
Closely-congregated houses and properties	200
Structures of great value and frailty (for example, ancient monuments and churches) and properties in poor condition	100

†In very exceptional circumstances (for example, for structures owned by the blasting company) an amplitude of 1780 μ would be permitted.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EDWARD AND NORTHWOOD กำหนดจุดเริ่มต้นของการเกิดอันตราย (Threshold of Damage) เพื่อใช้ควบคุมการระเบิดที่จะมีผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้าง โดยกำหนดไว้ว่าจะเกิดอันตรายขึ้นเมื่อความเร็วของการสั่นของอนุภาคเท่ากับ 114 มม./วินาที ตารางที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของแอมปลิจูด และค่าความเร็วสูงสุดของการสั่นของอนุภาคที่ความถี่ต่างๆ กันจากข้อกำหนดทั้ง 3 ระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

JACKSON ได้กำหนดความเสียหายขึ้น จากการทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านสถิติ โดยอาศัยข้อมูลของ American Bureau of Mines ที่ได้จากการระเบิด สรุปได้ว่าจุดเริ่มต้นของการเกิดความเสียหายทางสถาปัตยกรรม เกิดขึ้นเมื่อค่าความเร็วสูงสุดของการสั่นของอนุภาคมีค่า 5 มม./วินาที และจะเกิดความเสียหายรอง (Minor Damage) เมื่อค่าความเร็วสูงสุดของการสั่นของอนุภาคมีค่าต่ำประมาณ 50-80 มม./วินาที

ต่อมา ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของความสั่นสะเทือนที่มีต่ออาคาร และโครงสร้างทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวางในเยอรมัน โดยมีผู้ทำการวิจัยและสถาบันต่าง ๆ เช่น ZELLER, GERMAN STANDARD INSTITUE เป็นต้น ได้เสนอหน่วยและสเกลสำหรับวัดความเข้มของความสั่นสะเทือน (Unit and Scale of Vibration Intensity) รวมถึงผลกระทบที่มีต่อโครงสร้างในแต่ละระดับของความเข้มของความสั่นสะเทือนไว้ด้วยดังจะกล่าวต่อไป

ZELLER ได้ริเริ่มปรับปรุงข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการระเบิดและการเกิดแผ่นดินไหวให้มีความเหมาะสมกับการสั่นสะเทือนอื่นๆ เช่นเครื่องจักร ทั้งนี้ เพราะว่าความถี่ของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในสิ่งปลูกสร้างหรือโครงสร้างทางวิศวกรรม เนื่องจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ นั้นจะมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหว แต่ทั้งนี้ จะมีขนาดของแอมปลิจูดต่ำมาก (Leet) ดังแสดงในตารางที่ 2.10 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าของระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ในรูปของความเร่ง ($\pi^2 f^2 .A$) และพลังงานจลน์ (พลังงานนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า $A^2.f^2$) พบว่าเมื่อพิจารณาค่าเนื่องจากการระเบิดมีค่าหนึ่งหน่วย แม้ว่าความเร่งที่เกิดขึ้น 3 กรณีของแหล่งกำเนิดจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาในแง่ของพลังงานแล้วพบว่าพลังงานที่เกิดจากแผ่นดินไหว จะมีค่ามากกว่ากรณีของการเดินและการระเบิดหลายร้อยเท่า เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างแล้ว LEET พบว่าความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการระเบิดและการเดินนั้นจะไม่เกิดความเสียหายขึ้นแต่จะเกิดความเสียหายอย่างมากในกรณีแผ่นดินไหว ดังนั้น เพื่อความเหมาะสมจะต้องมีข้อกำหนดใหม่เพื่อให้มีความเหมาะสมและ

ตารางที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของแอมปลิจูดและความเร็วสูงสุด ของการสั่นของข้อกำหนดระบบต่าง ๆ

Limiting amplitudes for blasting vibration, based on maximum velocity

Authority	Amplitude (μ) at given frequency (Hz)						Note on maximum velocity (mm/s)
	5	10	20	30	40	50	
New Jersey Rules	770	770	385	255	195	155	48 (above 10 Hz)
Crandell 'Caution'	2670	1340	670	445	335	265	84
Edwards-Northwood	3640	1820	910	605	455	365	114 (damage threshold)

ตารางที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบระดับความสั่นสะเทือน ในรูปของความเร่งและพลังงาน

Cases compared on the basis of acceleration and energy (after Leet)

Vibration caused by	Amplitude (A,mm)	Frequency (f,Hz)	Acceleration		A^3f^2	Relative KE
			(m/s^2)	Relative		
Earthquake	36	1·3	2·40	2·6	2190	414
Blasting	0·23	10	0·91	1·0	5·3	1·0
Walking	0·09	22	1·72	1·9	3·9	0·74

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สอดคล้องกับสภาวการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้ ได้มีการตรวจสอบอันตรายเนื่องจากความสั่นสะเทือนในสหรัฐอเมริกา ส่วนราชการซึ่งมีหน้าที่รับผิดชอบคือ U.S Bureau of Mines และยังมีการศึกษาถึงผลของอันตรายที่เกิดขึ้นในอีกหลายประเทศ เช่น สวีเดน แคนาดา เป็นต้น พร้อมทั้งแนะนำขีดจำกัดที่เหมาะสมเกี่ยวกับอันตราย ผู้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลต่างมีความเห็นตรงกันในการเลือกความเร็วสูงสุดของการสั่นของอนุภาคเป็นบรรทัดฐานที่เหมาะสมในการที่จะควบคุมอันตราย ที่จะเกิดขึ้นดังได้แสดงผลการศึกษาและรวบรวมไว้ในรูปที่ 2.20 แม้จะเป็นข้อที่ปรากฏชัดแล้วว่าความเร็วของการสั่นของอนุภาค 50 มม./วินาที เป็นค่าที่ล้าสมัยเกี่ยวกับขีดจำกัดความปลอดภัยในการคงอยู่ของโครงสร้างของอาคาร และรอยร้าวในอาคารจะเกิดที่ความเร็วของการสั่นของอนุภาค 255 มม./วินาทีก็ตาม แต่เนื่องจากความแตกต่างของชนิดของโครงสร้างและองค์ประกอบอื่นๆ ค่าความเร็วสูงสุดของการสั่นของอนุภาคที่แนะนำก็ไม่ควรเกิน 50 มม./วินาที

แท้จริงบรรทัดฐานด้านอันตรายนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและสภาวะของโครงสร้าง จะเห็นว่า อาคารที่สร้างใหม่สามารถทนทานต่อความรุนแรงของความสั่นสะเทือนได้ดีกว่าอาคารที่เก่ากว่า ความรุนแรงของความสั่นสะเทือนที่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างของอาคารที่คำนวณได้จาก Vibrar unit แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 มาตราวัดนี้เหมาะสำหรับอาคารที่มีการซ่อมแซมและดูแลรักษาเป็นอย่างดี Vibrar unit สามารถแสดงเป็นรูปของตารางได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.11 อันตรายหรือผลกระทบจากความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นใน Vibrar unit ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19

SIOR (1961) ได้ให้ข้ออธิบายความเป็นไปได้ของอันตรายที่เกิดจากความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม พร้อมทั้งข้อแนะนำเกี่ยวกับช่วงของความรุนแรงที่เหมาะสมที่ยอมรับได้รวมทั้งเสนอผลการศึกษา ดังนี้คือ

1. ผลการศึกษาความสั่นสะเทือนจากการตอก Sheet Pile ด้วยเครื่องตอกพลังไอน้ำ 5 ตัน-เมตร/ครั้ง ในดินเหนียวที่ระยะห่าง 4 เมตร ให้ค่า

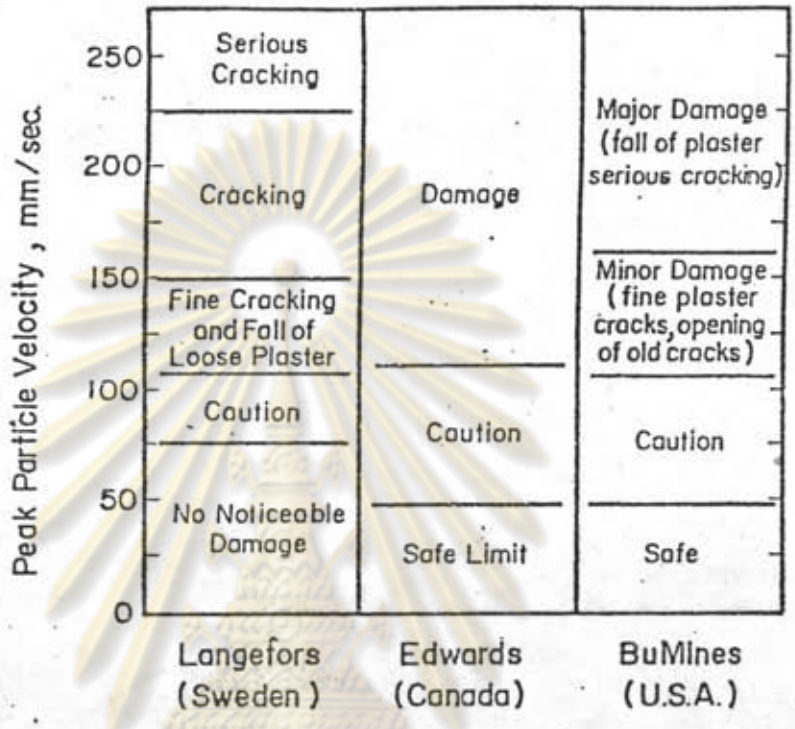
Vertical Displacement Amplitude = 662/M ค่าความถี่ = 18 Hz

และที่ระยะเดียวกันเมื่อเพิ่มพลังงานการตอกเสาเข็มเป็น 12 ตัน-เมตร/ครั้ง ให้ค่า

Vertical Displacement Amplitude = 535/M ค่าความถี่ = 14 Hz

ผลปรากฏว่าไม่มีผลของอันตรายที่สังเกตได้

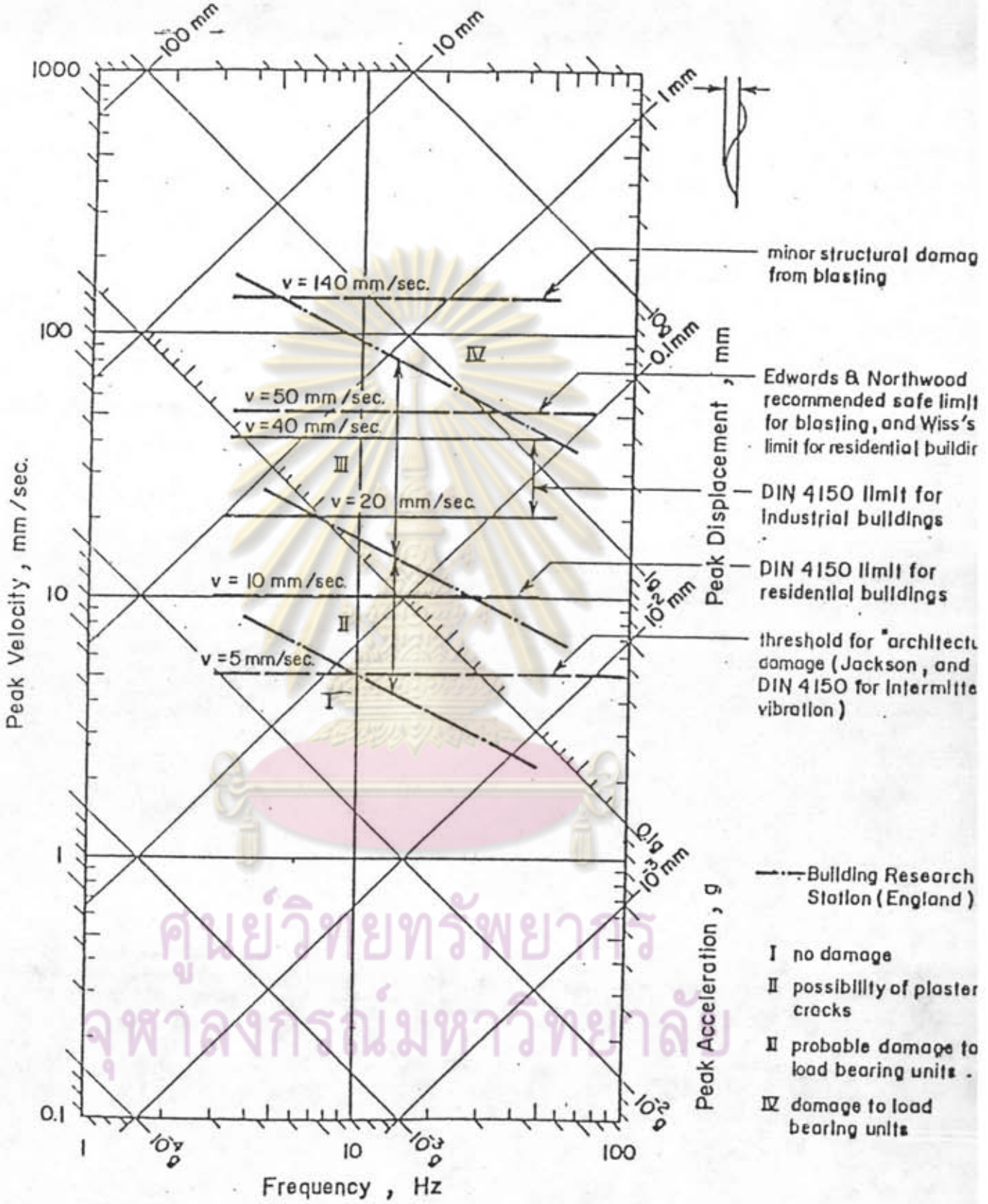
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Peak Particle Velocity as an Indication of Structural Damage (After WISS, 1968)

รูปที่ 2.20 แสดงความเร็วสูงสุดของอนุภาคที่ชี้ให้เห็นถึงความเสียหายของโครงสร้าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.21 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของระดับความสั่นสะเทือนในแกนตั้งที่มีต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. จากการตรวจวัดข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ได้ข้อมูลที่แสดงให้เห็นว่าระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนพื้นอาคารชั้นที่ 2 มีค่าสูงกว่าที่พื้นชั้นที่ 1 ประมาณ 2.5 เท่าโดยที่พื้นชั้นที่ 2 อยู่สูงกว่าพื้นชั้นที่1 = 7.4 เมตร

พื้นชั้นที่ 2 : A = 1.6 μ ; f = 17 Hz
พื้นชั้นที่ 1 : A = 0.7 μ ; f = 16 Hz

ผลของการสังเกตไม่ปรากฏร่องรอยของความเสียหายหรืออันตรายใดๆ

3. จากการตอกเสาเข็มซึ่งมีความยาว 3.2 เมตร ด้วยตุ้มตอกที่พลังงาน 12 ตัน-เมตร/ครั้ง ให้ผลการวัดที่ระยะ 15 เมตร ได้ค่า

Vertical Displacement Amplitude = 19 , ความถี่ 22 Hz

เงื่อนไขของความเสียหาย (Failure Condition) สามารถแสดงได้ด้วยค่าจำกัดของความเร็วสูงสุด ความเร่ง หรือการขจัด ในการพลอตบนไดอะแกรมแบบสามแกนสัมพันธ์ (Tripatite Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ข้อจำกัดของเงื่อนไขแต่ละเงื่อนไขเห็นได้จากเส้นขอบเขตของไดอะแกรม เมื่อค่าที่วัดได้อยู่เหนือเส้นขอบเขตแสดงว่าอยู่ในเงื่อนไขที่เกิดความเสียหาย เมื่อค่าที่วัดได้อยู่ใต้เส้นขอบเขตแสดงว่าอยู่ในเงื่อนไขที่ปลอดภัย นอกจากนี้ในรูปที่ 2.21 ยังได้แสดงถึงข้อจำกัดและเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

1. ข้อจำกัดของความปลอดภัยจากแรงระเบิด ซึ่งแนะนำโดย EDWARD AND NORTHWOOD (1960)

2. ข้อจำกัดของความปลอดภัยซึ่งแนะนำโดย WISS (1967) โดยคำนึงถึงรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนผนังปูนฉาบของอาคารพักอาศัย

3. ข้อเสนอของ DIN 4150 เป็นข้อจำกัดสำหรับอาคารพักอาศัยและโรงงานอุตสาหกรรม

4. สภาวะการเข้าสู่ความไม่ปลอดภัยทางด้านสถาปัตยกรรมแนะนำโดย JACKSON

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ข้อจำกัดที่เสนอโดย การวิจัยในการก่อสร้างอาคาร (Building Research Establishment, 1970) เป็นข้อจำกัดที่ระดับความเสียหายต่างๆของโครงสร้างจากระดับความสั่นสะเทือน

สุดท้าย WHIFFIN และ LEONARD (1971) ได้รวบรวมข้อจำกัดเกี่ยวกับพฤติกรรมของอาคารและการตอบสนองของมนุษย์ไว้ในตารางที่ 2.1

จากบรรทัดฐานต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้ว ก็ยังไม่ง่ายที่จะตัดสินใจได้ว่าระดับของความสั่นสะเทือนที่ระดับใด ที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งก่อสร้างหรือโครงสร้างต่างๆได้ อย่างไรก็ตาม บรรทัดฐานเหล่านี้ก็ยังใช้เป็นตัวตรวจสอบปัญหาหรืออันตรายที่เกิดขึ้นได้ เช่น การเกิดรอยแตกร้าวของปูนฉาบซึ่งเกิดขึ้นได้บ่อยครั้งและเป็นสิ่งเตือนอันตรายที่จะเห็นได้เป็นอันดับแรก

ปูนฉาบเป็นวัสดุที่เปราะ แตกร้าวได้ง่าย (Brittle and Weak) ความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นจากการหด หรือขยายตัวตามปกติและที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวของปูนฉาบได้ STEFFENS (1965)

U.S Buerau of Mines (1940), STEFFENS (1965) ได้ชี้ให้เห็นว่าที่ขนาดของแอมปลิจูด 0.25 am ซึ่งเป็นช่วงที่กว้าง หรือช่วงที่ความเร่ง 1 g ก่อให้เกิดรอยแตกร้าวของปูนฉาบได้ ข้อจำกัดนี้ เป็นขีดจำกัดที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ STEFFENS (1965) ยังได้สรุปไว้ว่า ลำพังเพียงความสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียวไม่เป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้ อย่างไรก็ดี JACKSON (1967) ได้ชี้ให้เห็นว่าความเสียหายอันดับรองอาจจะเกิดขึ้นได้ที่ระดับความสั่นสะเทือนต่ำๆ

เป็นที่แน่ชัดแล้วว่าส่วนของอาคารที่เปราะบาง เช่นผนังก่ออิฐฉาบปูน อาจจะเกิดความเสียหายได้ถึง 98% เมื่อมีความเค้นจากความสั่นสะเทือนเกิดขึ้น

2.5 การตอบสนองของมนุษย์ต่อความสั่นสะเทือน (Human Sensitivity)

ผลต่อการตอบสนองของมนุษย์จากความสั่นสะเทือน นับเป็นความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นความรู้สึกไม่สะดวกสบายจากความสั่นสะเทือนจะมีผลต่อมนุษย์ในด้านความไม่ปลอดภัยของอาคารที่อยู่อาศัย การศึกษารายละเอียด รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการตอบสนองของมนุษย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย REIHER และ MEISTER (1931) ได้ทำการทดสอบกับคนกลุ่มหนึ่งที่ได้รับความกระทบกระเทือนจากความสั่นสะเทือนแบบ Simple Harmonic Form แบบสม่ำเสมอ (Steady State) ทั้งในแนวตั้งและแนวราบ โดยทดลองเก็บข้อมูลที่ค่าแอมปลิจูดและความถี่ต่าง ๆ กันพร้อมกับบันทึกผลการตอบสนองไว้เป็นข้อมูลด้วยในขณะเดียวกันนั้น จากการศึกษาสรุปได้ว่าความสั่นสะเทือนในแนวตั้งมีผลต่อความรู้สึกของคนโดยเฉพาะคนที่นอนราบ มีแกนของลำตัวตั้งได้ฉากกับทิศทางของความสั่นสะเทือน ผลของความสั่นสะเทือนในแนวตั้งแสดงไว้ในรูปที่ 2.22 และค่าการขจัดความเร็ว และความเร่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.23 ซึ่งเป็นการพลอตแบบ Tripatite

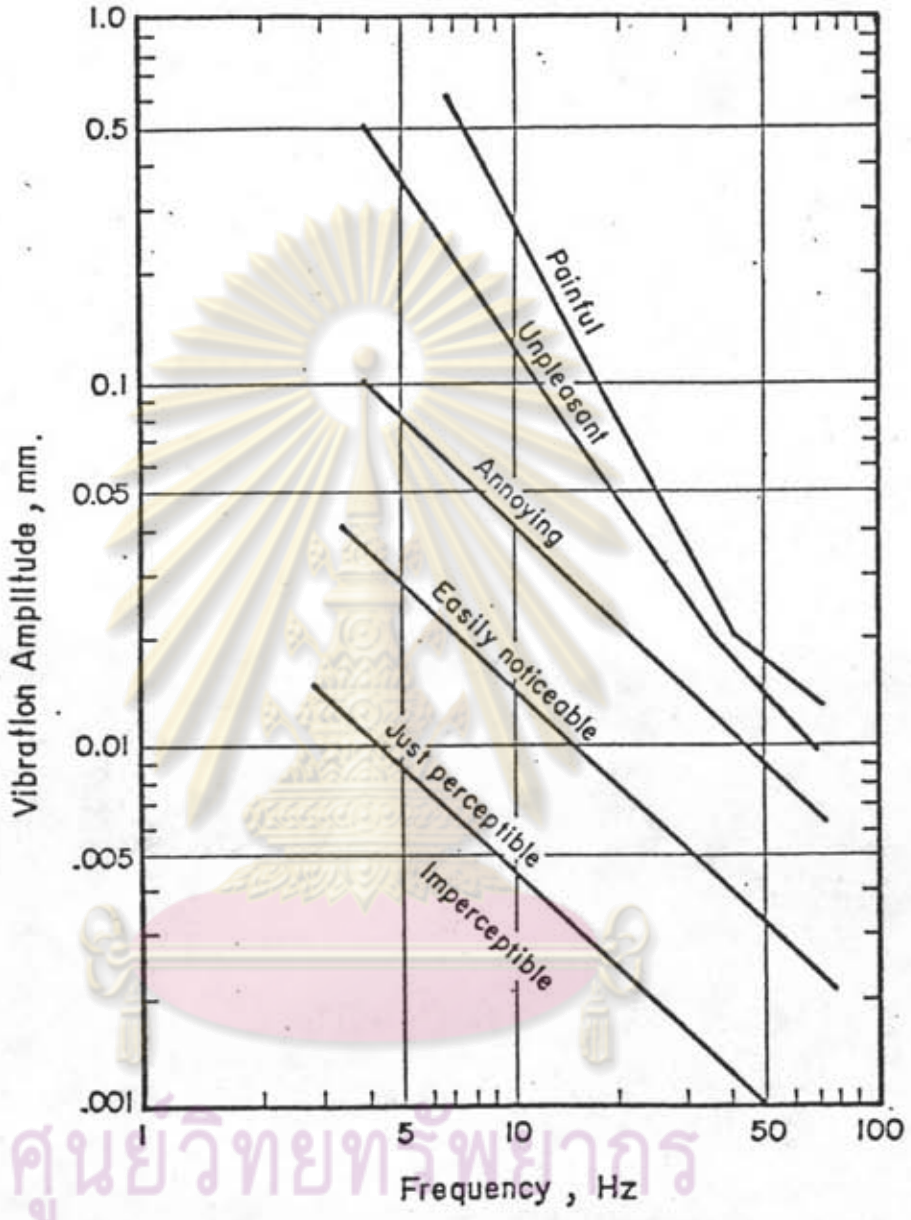
มีรายงานการศึกษาเสนอแนะข้อมูลเกี่ยวกับการตอบสนองของมนุษย์ต่อความสั่นสะเทือนในแนวตั้งจากผู้ศึกษาและวิจัยอีกหลายท่าน เช่น DIECKMANN (1958) เสนอค่า K เป็นค่าบ่งชี้ถึงการตอบสนองของมนุษย์ดังแสดงในตารางที่ 2.11,2.12 และรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าสามารถใช้ความเร่งเป็นบรรทัดฐานด้านการตอบสนองของมนุษย์ได้ โดยอยู่ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 5 Hz ในขณะที่ใช้ความเร่งเป็นบรรทัดฐานได้ในระหว่างช่วงความถี่ 5 - 40 Hz และใช้การขจัดเป็นบรรทัดฐานเมื่อความถี่ของความสั่นสะเทือนสูงขึ้น สำหรับการสั่นสะเทือนในแนวราบค่าที่ใช้เป็นบรรทัดฐานได้ที่ช่วงความถี่ต่าง ๆ ก็คือความเร่งที่ความถี่ต่ำกว่า 25 Hz

WISS (1967) ได้เสนอผลการศึกษาความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มในดินเหนียวโดยใช้ความเร็วของอนุภาค (Particle Velocity) เป็นบรรทัดฐานในช่วงความถี่ระหว่าง 15 - 25 Hz ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเป็นไปตามบรรทัดฐานของ DIECKMANN เนื่องจากค่า K เกิดขึ้นจากค่าแอมปลิจูดกับความถี่เช่นเดียวกับความเร็ว ค่า K จึงเป็นเสมือนค่าที่ใช้วัดความเครียดที่เกิดขึ้นของมนุษย์นั่นเอง

STEFFENS (1965) ได้เสนอผลการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่คำนวณจากการสังเกต (Empirical Formula) โดย POSTLEHWAITE (1944) และ OEHLER (1957) กับผลการศึกษาของ DIECKMANN ดังแสดงในตารางที่ 2.13

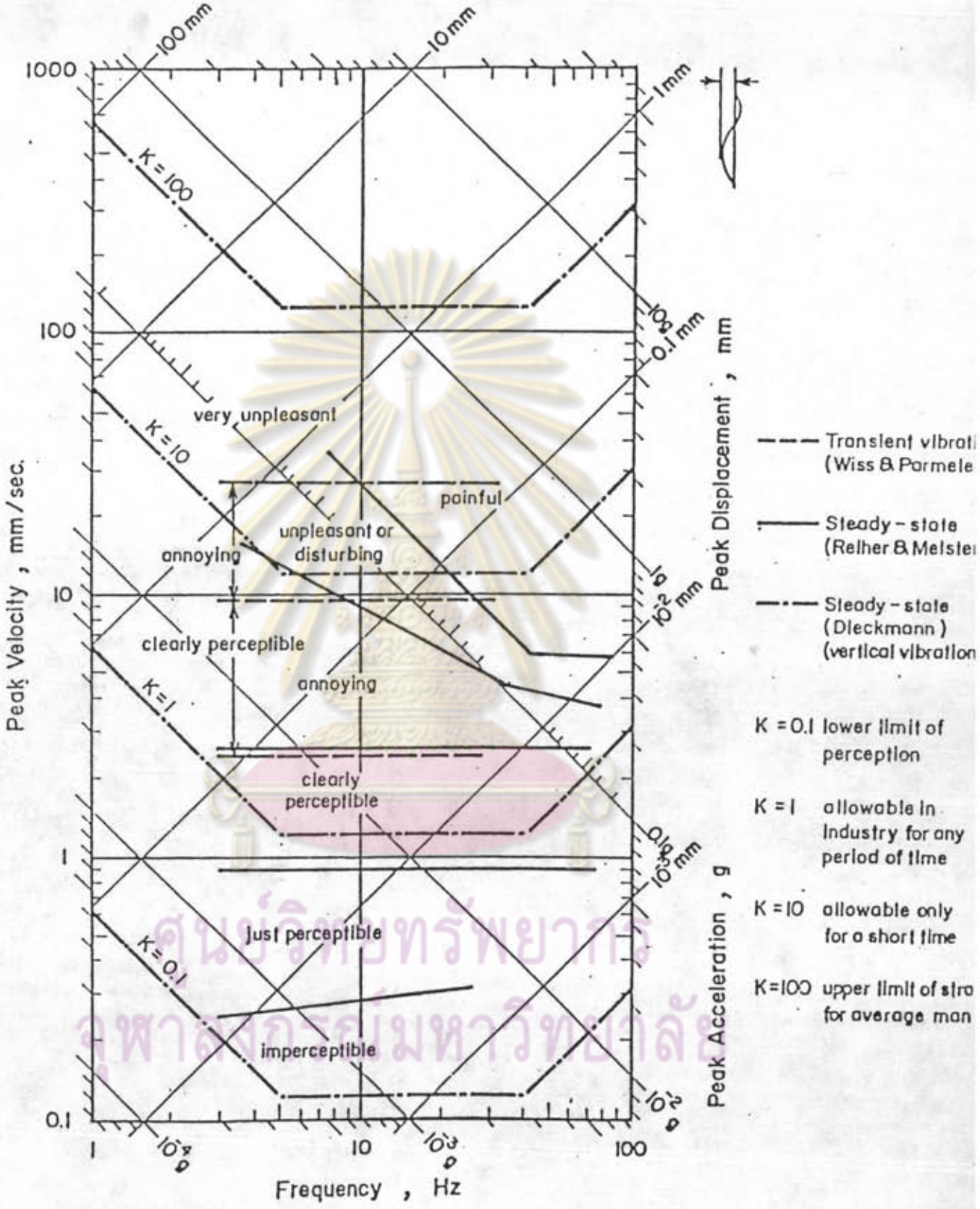
จากการศึกษารวบรวมข้อมูลที่ REIHER และ MEISTER (1931) ได้ศึกษามาแล้วเกี่ยวกับการตอบสนองของมนุษย์ โดยอยู่ในสภาพความสั่นสะเทือนแบบสม่ำเสมอ (Steady State) ต่อมา WISS และ PARMELEE (1974) ได้ทำการศึกษาและรวบรวมเกี่ยวกับการตอบสนองต่อความสั่นสะเทือนแบบ การสั่นในช่วงสั้นๆ (Transient) โดยพิจารณาว่าความถี่ การ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของระดับความสั่นสะเทือน
ในแกนตั้งที่มีต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม



รูปที่ 2.23 แสดงผลการตอบสนองของมนุษย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.11 แสดงระดับของความสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการตอบสนองของมนุษย์

(After DIECKMANN, 1958)

K value	Description
0.1	Lower limit of human perception
1	Allowable in industry for any period of time
10	Allowable only for a short time
100	Upper limit of strain endurance for the average man

ตารางที่ 2.12 แสดงการคำนวณค่า DIECKMANN'S VALUE)

For vertical vibration	For horizontal vibration
Up to 5 Hz; $K = Af^2$	Up to 2 Hz: $K = 2 Af^2$
From 5-40 Hz; $K = 5 Af$	From 2-25 Hz: $K = 4 Af$
Above 40 Hz: $K = 200 A$	Above 25 Hz; $K = 100 A$

(A is the amplitude in mm and f the frequency in Hz)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.13 แสดงค่าแอมปลิจูดที่ไม่สะดวกในการสั่นสะเทือน

(After STEFFENS, 1965)

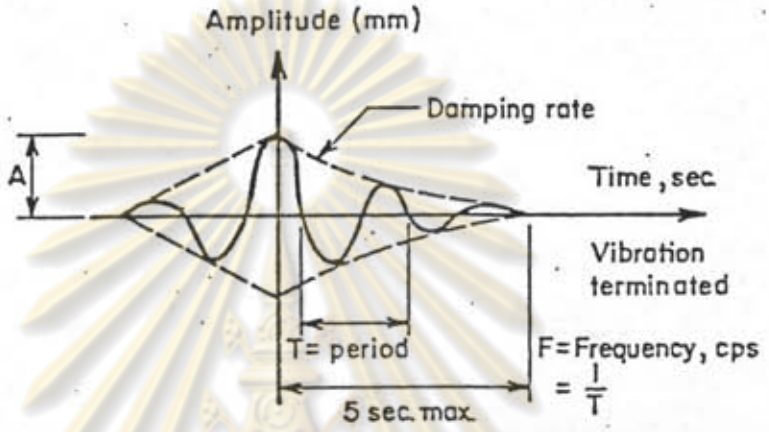
Authority	Amplitude (mm) at given frequency			
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz
Postlethwaite	0.660	0.2235	0.1422	0.1143
Oehler	0.406	0.0838	0.0381	0.0103
Dieckmann	0.457	0.1727	0.1104	0.0990

ขจัด และความหน่วง เป็นพารามิเตอร์ (Parameter) ที่เพิ่มเข้ามาเกี่ยวข้องในความสั่นสะเทือนแบบการสั่นในช่วงสั้นๆ (Transient) ในโครงการศึกษาของ WISS และ PARMELEE ประกอบด้วยกลุ่มทดลองซึ่งแยกแต่ละคนจากกัน ตำแหน่งการยืนเป็นไปตามการเกิดความสั่นสะเทือนในแนวตั้งมีความถี่ แอมปลิจูดและความหน่วงต่างๆ กันโดยมีการแบ่งพฤติกรรมเป็นอัตราส่วนบุคคล (Person Rate) ต่างๆ กันดังนี้

1. ยอมรับไม่ได้ (Imperceptible)
2. ปราศจากการยอมรับ (Barely Perceptible)
3. ยอมรับเป็นพิเศษ (Distinctly Perceptible)
4. ยอมรับอย่างหนักแน่น (Strongly Perceptible)
5. ความรุนแรง (Severe)

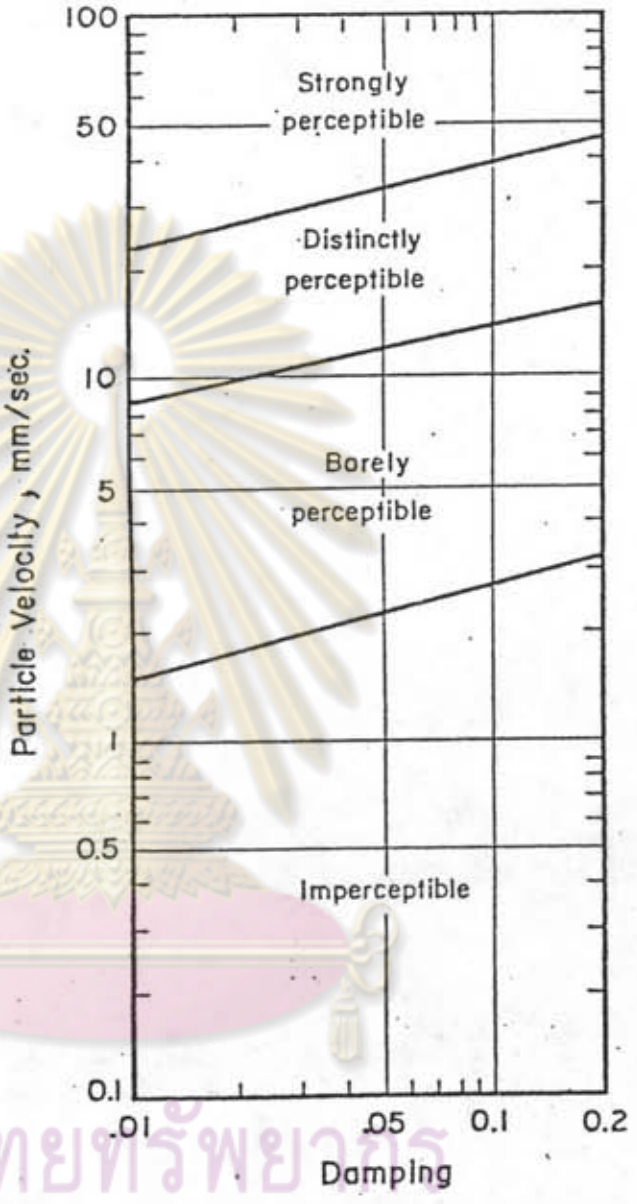
จากการทดลองกับคน 40 คน ได้ผลว่าการสั่นสะเทือนแบบการสั่นช่วงสั้นๆ (Transient) ที่แต่ละความถี่และการเคลื่นตัวสูงสุด (Peak Displacement) ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความเร็วในการสั่นของอนุภาคในช่วงต่ำๆ (Less Particle Velocity) เมื่อความหน่วงเพิ่มขึ้น WISS และ PARMELEE (1974) พบว่าผลที่เกิดจากการขจัดและความถี่ (ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเร็วในการสั่นของอนุภาค) คงที่ในแต่ละระดับของการยอมรับ (Perception) และความหน่วง และได้เสนอว่า ระดับของการรบกวนประมาณ 2.5 มม/วินาที สำหรับสภาวะการสั่นแบบสม่ำเสมอ (Steady State) และประมาณ 9.00 - 30.00 มม./วินาทีที่ช่วงความหน่วง (Damping Ratio) ระหว่าง 0 - 10 % ในกรณีการสั่นแบบช่วงสั้นๆ (Transient) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 และ 2.26 ส่วนในรูปที่ 2.24 เป็นรูปแสดงรูปแบบของคลื่นที่ WISS และ PARMELEE เชื่อว่ามีผลต่อการตอบสนองของมนุษย์บ้างเหมือนกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



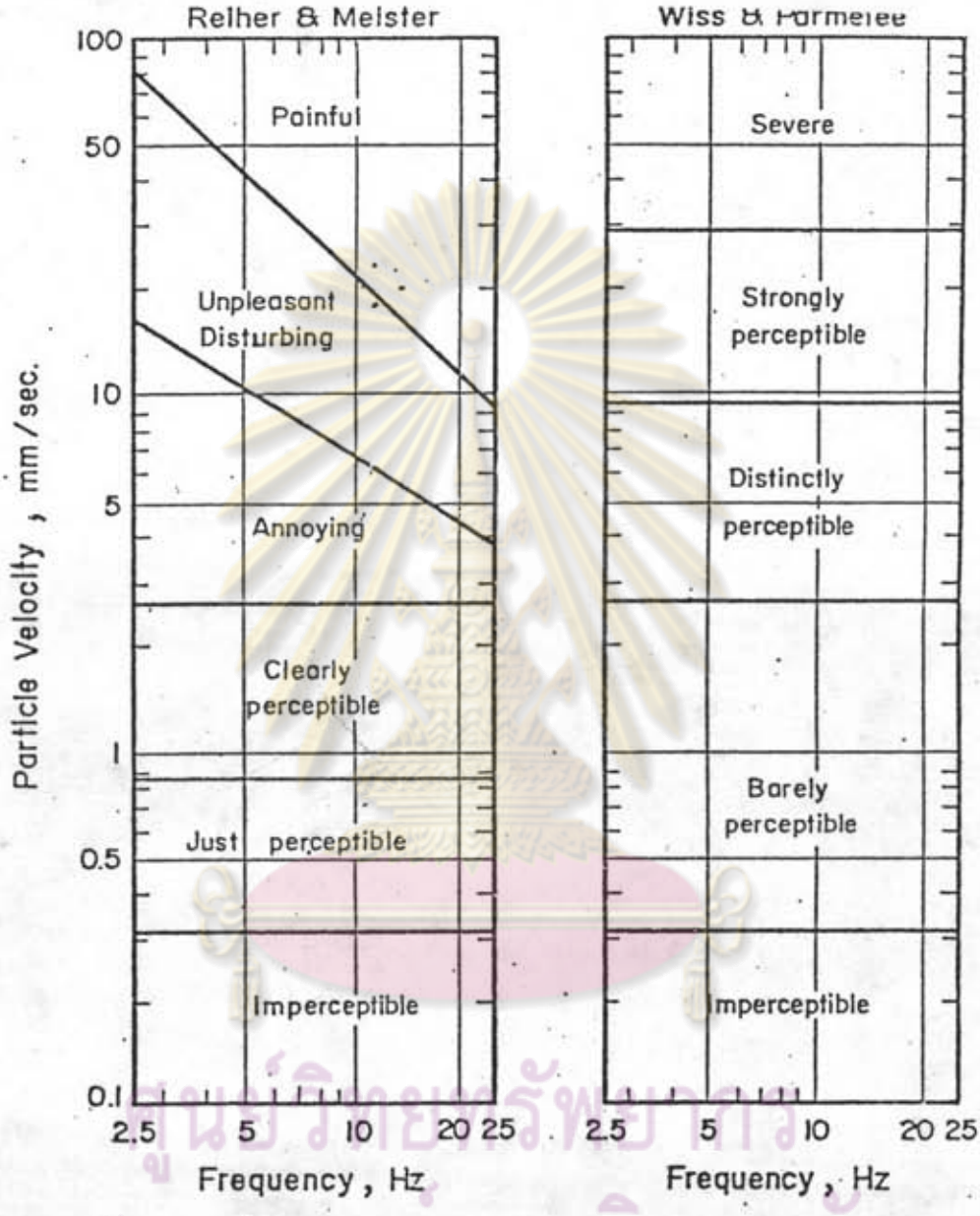
รูปที่ 2.24 แสดงรูปแบบของคลื่นของความสั่นสะเทือนที่เชื่อว่ามีผลกระทบต่อการตอบสนองของมนุษย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.25 แสดงการตอบสนองของมนุษย์ที่มีต่อการสั่นสะเทือนแบบ Transient ที่มีความหน่วง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Comparison of Transient Vibration of Zero Damping with Reiher & Meister's Scale

รูปที่ 2.26 แสดงการเปรียบเทียบความสั่นสะเทือนที่ไม่มีความหน่วงกับมาตรา REIHER และ MEISTER)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 พฤติกรรมของความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม

ธรรมชาติของความสั่นสะเทือนของพื้นดิน เพื่อให้กระจ่างในปัญหาที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม จะต้องทำความเข้าใจพฤติกรรมทางด้านไดนามิก (Dynamic) ของพื้นดินเกี่ยวกับคลื่น ชนิดของคลื่น ตลอดจนการเคลื่อนที่ของคลื่นดังได้กล่าวแล้วในตอนต้น

ลักษณะของคลื่นและการแพร่ของคลื่น ที่เกิดจากการสั่นของฐานรากกลมที่ระยะต่างๆ ห่างจากฐานรากได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 จาก WOOD(1968) ระยะห่างจากฐานรากที่เป็นต้นกำเนิดคลื่น ถึงแต่ละหน้าคลื่น (Wave Front) ในรูปที่ 2.5 นั้น เขียนขึ้นตามสัดส่วนของความเร็วแต่ละคลื่นในตัวกลาง มีค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) = 1/4 คลื่นที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้เกิดการเพิ่มปริมาตรของวัสดุที่เคลื่อนที่ผ่านแพร่กระจายออกไปแต่พลังงานจะค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางจากต้นกำเนิด ซึ่งการลดลงของพลังงาน หรือการเคลื่อนที่ของแอมปลิจูด (Displacement Amplitude) นี้เรียกว่า ความหน่วงทางภูมิศาสตร์ (Geometrical Damping), RICHART,HALL and WOOD(1970) และ EWING,JARDENSKY and PRESS,(1967) ได้แสดงให้เห็นว่า แอมปลิจูดของคลื่นในตัวกลางลดลงเป็นสัดส่วนตามอัตราส่วน 1/d ,d คือระยะห่างจากต้นกำเนิดยกเว้นตามผิวของตัวกลาง (Half Space) ค่าแอมปลิจูดจะลดลงตามอัตราส่วน 1/d และแอมปลิจูดของคลื่นเรไลช์จะลดลงตาม 1/d ด้วย

สำหรับต้นกำเนิดพลังงานแบบฐานรากกลมซึ่งทำให้เกิดการสั่นในแนวตั้งที่ผิวหน้าของตัวกลาง (Half Space), MILLER และ PURSEY (1955) ได้แสดงผลการทดสอบให้เห็นว่าการกระจายของพลังงานทั้งหมดจากต้นกำเนิด โดยคลื่นทั้ง 3 ชนิดจะเป็นการกระจายโดยคลื่นเรไลช์ 67 % คลื่นแรงเฉือน 26% และคลื่นแรงอัด 7% สืบเนื่องจากความเป็นจริงที่ว่าคือ 2/3 ของพลังงานทั้งหมด ที่เกิดขึ้นจากการสั่นในแนวตั้ง ถูกถ่ายทอดออกไปโดยคลื่นเรไลช์นั้น และพลังงานของคลื่นเรไลช์ลดลง ตามระยะทางช้ากว่าคลื่นในตัวกลาง (คลื่นแรงอัด คลื่นแรงเฉือน) ฉะนั้น คลื่นเรไลช์ จึงเป็นคลื่นที่เกี่ยวข้องกับฐานราก และพื้นผิวดินในบริเวณใกล้เคียง

2.6.1 สนามคลื่นที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม

การวิเคราะห์ความสั่นสะเทือนบนพื้นดินที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม มีข้อจำกัดอยู่

ที่ความยุ่งยาก เนื่องจากช่วงการตอกเสาเข็มจมลงในดิน ในระหว่างการตอก 2-3 ครั้งแรก เมื่อลูกตุ้มตกกระทบหมวกครอบหัวเสาเข็ม สนามคลื่นที่เกิดขึ้น สมมติว่าคล้ายคลึงกับสนามคลื่นที่เกิดจากการสั่นในแนวตั้งของฐานรากแบบวงกลมที่ผิวดิน ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น และในช่วงที่ปลายเสาเข็มตอกจมทะลุชั้นดินลงไป ATTEWELL และ FARMER (1973) ได้อธิบายการแพร่กระจายของคลื่นที่เกิดไว้ดังนี้คือ

การกระแทกของลูกตุ้มบนหมวกครอบเสาเข็มทำให้เกิดคลื่นในตัวกลาง (Body Wave) เคลื่อนลงไปตามตัวเสาเข็มและแพร่ลงไปยังดินที่ผิวส่วนปลายเสาเข็มซึ่งดินบริเวณนี้พลังงานที่เกิดจากการตอกจะส่งถ่ายต่อไปสู่ดิน และพลังงานส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ ผลลัพท์ของแอมปลิจูดของคลื่นที่เกิดขึ้น มีผลมาจากมุมตกกระทบของคลื่น และอัตราส่วนของความหนาแน่น ความเร็วของคลื่นดังกล่าวทั้ง 2 ชนิด (เสาเข็มและดิน) ในกรณีที่คลื่นในตัวกลางเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นเหล็กและดิน ผิวสัมผัสตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น(มุมตกกระทบ ø องศา) อัตราส่วนระหว่างแอมปลิจูดที่ส่งผ่าน กับแอมปลิจูดที่สะท้อนกลับ มีค่าประมาณ 2:1 อย่างไรก็ตาม ที่ผิวสัมผัสระหว่างเข็มกับดิน ที่มีค่ามุมตกกระทบของคลื่น = 90 องศาพลังงานของคลื่นดูเหมือนว่าจะสะท้อนกลับทั้งหมด และมีเพียงเล็กน้อยที่แปรหักเหกระจายพลังงานออกไป พลังงานส่วนใหญ่จะส่งถ่ายผ่านทางปลายเสาเข็มสู่ดินเสมือนเป็นคลื่นในตัวกลางเดียวกัน จากการหักเหและสะท้อนกลับของคลื่นเรไลช์ คลื่นแรงเฉือน จะทำให้คลื่นแรงอัดและคลื่นแรงเฉือนเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลต่อการเคลื่อนตัวของดินรอบๆ เสาเข็มนั้น ในรูปที่ 2.27 แสดงให้เห็นถึงสนามคลื่นที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม

2.6.2 <u>ลักษณะของความถี่ของคลื่นที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม</u>

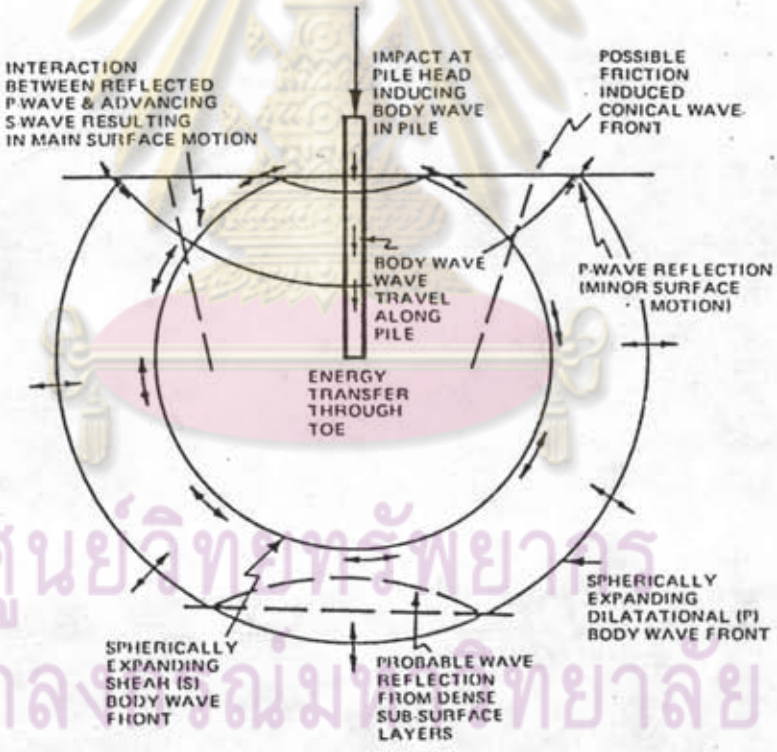
WISS (1967) พบว่า ความสั่นสะเทือนจากการกระแทกในการตอกเสาเข็มมีลักษณะของความถี่ของคลื่นขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ดังแสดงในตารางที่ 2.14

ในประเทศญี่ปุ่น KOBAYASHI (1967) พบว่า ความถี่ที่มีอิทธิพลได้แก่ความถี่ที่มีค่าแอมปลิจูดสูงสุด ในดินที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าแอมปลิจูดสูงและในดินที่มีความหนาแน่นต่ำคือยังไม่มีการยุบอัดตัว (Unconsolidate) จะมีค่าแอมปลิจูดต่ำกว่าและยังพบว่าความถี่จะสูงมากเมื่อปลายเสาเข็มหยั่งถึงชั้นหินใต้พื้นดิน ผลการศึกษาและทดสอบในสนามได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.14 แสดงความถี่ที่เกิดขึ้นในชั้น ดินชนิดต่าง ๆ (WISS, 1967)

(After WISS, 1967)

Soil Type	Frequencies
Alluvial Fill	5-10 cps
Clay	15-25 cps
Sand	30-40 cps



รูปที่ 2.27 แสดงสนามคลื่นที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.3 องค์ประกอบ ที่เป็นผลกระทบต่อการส่งถ่ายความสั่นสะเทือน (Factor Affecting Transmission of Vibration)

เมื่อลูกตุ้มตกกระทบหมวกครอบเสาเข็ม พลังงานที่ให้ (Input Energy) มีค่าเท่ากับน้ำหนักของลูกตุ้มที่ตอก พลังงานที่ได้รับ (Output Energy) จะถูกดูดกลืนไปในลักษณะต่าง ๆ กันดังที่ PRAKASH และ JAIN (1970) ได้อ้างไว้ดังนี้คือ

1. ในการเจาะทะลุของเสาเข็มสู่ชั้นดิน
2. ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่เป็นทั้งอิลาสติก (Elastic) หรือพลาสติก (Plastic)
3. ในการยืดหยุ่นจากการรับแรงอัดของตัวเสาเข็ม
4. ในการสะท้อนกลับของปั้นจั่นตอก
5. ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งอิลาสติก และพลาสติก ของชั้นดินรอบ ๆ ตัวเสาเข็มนั้น

พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางอิลาสติกของชั้นดินจะแพร่ผ่านเข้าไปสู่ชั้นดิน ซึ่งเป็นผลต่อรูปร่างลักษณะของคลื่น การกระจายของพลังงานจากการกระแทกในลักษณะที่แตกต่างกัน เป็นหน้าที่ (Function) ที่สัมพันธ์กัน และเป็นปัญหาที่ยุ่งยากมาก อย่างไรก็ดี ได้มีการถกเถียง และ รวบรวมองค์ประกอบ ที่มีผลกระทบต่อการส่งถ่ายพลังงานที่ปลายเสาเข็มไว้ดังนี้

1. ระยะจากต้นกำเนิดพลังงานจากการตอกเสาเข็ม กฎการแพร่ของคลื่นเรไลช์ภายใต้ความหน่วงทางภูมิศาสตร์ (Geometrical Damping) แสดงเป็นความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$Ad = Ao\sqrt{do/d} \qquad \text{.....(34)}$$

เมื่อ Ad และ Ao คือ แอมปลิจูดของการเคลื่อนที่ (Displacement Amplitude) ที่ระยะ d และ do จากต้นกำเนิดตามลำดับ โดยสมมติฐานของตัวกลางยืดหยุ่นสมมติ ไม่รวมพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความหน่วง อย่างไรก็ตาม วัสดุที่แท้จริงก็แสดงให้เห็นว่ามีผลของคุณสมบัติของความหน่วงภายในเกี่ยวข้องด้วย เมื่อคิดความหน่วงภายในเนื้อวัสดุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.15 แสดงผลของความถี่ที่ได้จากการทดสอบชั้นดินต่างชนิดในประเทศญี่ปุ่น

Location	Piling machine	Pile	Length	Geology	Predominant frequency
Yamashina, Kyoto (Horizontal)	Unknown	Concrete	10 m	Gravelly clay	24 cps 25 40
Kation.road1,Kyoto (Horizontal)	Diesel Hammer	H-beam	Unknown	Sandy loam, gravelly silt	6-7
Nomoto Br. Kyoto (Horizontal)	Drop Hammer	Concrete	10 m	Alternation of Sandy clay and sand	13 7-8
Tarumi, Hyogo (Horizontal)	Diesel Hammer	Concrete	Unknown	Alternation of silt and sand	7-10 16
Ogikubo, Tokyo (Horizontal)	Diesel Hammer	Concrete	Unknown	Loam, gravel sand and clay	40 20
Ogikubo, Tokyo (Vertical)	"	"	"	"	30 10 10
Nikawashima, Tokyo (Horizontal) (Vertical) (Horizontal) (Vertical)	Diesel Hammer "	Concrete Steel pipe	30 m 30 m	Silty clay "	4-7 4-7 5-8,30 5-7,25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการที่ 34 จะปรับใหม่เป็น

$$Ad = Ao\sqrt{do/d}\ e^{-\alpha(d-d_0)} \qquad \ldots\ldots(35)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย มีค่าระหว่าง 0.33-0.13 /ม. (BARKAN, 1962) ค่าอื่น ๆ ของ α นอกจากนี้ ได้มีผู้ศึกษาและแนะนำไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าค่าแปรไปเป็นช่วงกว้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและสภาวะของการทดสอบ (Test Condition) ในส่วนที่เกี่ยวกับชนิดของดินนั้น PENG (1972) พบว่า กรณีของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ α แปรไปตามความถี่และมีค่าแตกต่างกันระหว่างแนวคลื่นในแนวราบและแนวดิ่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.17

จากการวิเคราะห์โดย ATTEWELL และ FARMER (1973) ไม่ได้นำค่าความหน่วงของวัสดุมาคิด โดยคิดเฉพาะความหน่วงทางภูมิศาสตร์เท่านั้น ในกรณีของคลื่นตามผิวการแพร่ของคลื่นในลักษณะรูปทรงกระบอก (Cylindrical Front) ดินเกิดความสั่นสะเทือนจนถึงระดับลึก ;h ใต้ผิวลงไปให้ ρ เป็นค่าความหนาแน่นของดิน Vr เป็นความเร็วสูงสุดของอนุภาค และ λ เป็นความยาวของช่วงคลื่น พลังงานทั้งหมดของคลื่นที่ระยะ d จากต้นกำเนิดมีค่าดังนี้ คือ

$$E_R = \frac{1}{2} V_R^2 2\pi\, dh\lambda \approx E_o \qquad \ldots\ldots(36)$$

ดังนั้น $$V_R / V_{RO} = \sqrt{\frac{d_o}{d}} \qquad \ldots\ldots(36a)$$

และ $$V_R = K_R \frac{\sqrt{E_o}}{d} \qquad \ldots\ldots(36b)$$

เมื่อ $K_R = (\pi\rho h\lambda)^{-\frac{1}{2}}$ และเป็นค่าคงที่เมื่อ h คงที่

คลื่นในตัวกลางซึ่งแยกจาก Spherial Wave Front เป็นตัวนำพลังงานทั้งหมดที่ระยะรัศมี d

$$E_p = \frac{1}{2}\rho V_p^2 \frac{4}{3}\pi d^2 \approx E_o \qquad \ldots\ldots(37)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.16 แสดงค่า สำหรับชั้นดินต่าง ๆ

Investigator	Soil Conditions	Coeff. of Attenuation α, m^{-1}
BARKAN (1962)	Yellow water-saturated fine-grained sand	0.098
BARKAN (1962)	Heavy water-saturated brown clays with some sand and silt	0.121
WES (1965)	Uniform, fine sand	0.029
FORSSBLAD(1965)	Silty, gravelly sand	0.131
WOODS (1967)	Silty, fine sand	0.262

ตารางที่ 2.17 แสดงค่า α ที่แปรไปตามความถี่และมีค่าแตกต่างกัน

Frequency Hz	Coefficient of Attenuation α, m^{-1}	
	Vertical Component	Horizontal Component
46	0.344	0.446
67	0.387	0.262
90	0.439	0.413
110	0.443	0.426
130	0.439	0.439

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้น $$Vp/Vpo = \sqrt{\frac{do}{d}}$$

$$Vp = Kp\sqrt{\frac{Eo}{d}}$$

เมื่อ $$Kp = (\frac{2}{3}\gamma g)^{-\frac{1}{2}}$$

ผลการศึกษาโดย ATTEWELL และ FARMER (1973) แสดงให้เห็นว่า ความสั่นสะเทือนที่ผิวดินที่เกิดจากการตอก Sheet Pile ในชั้นดินเหนียว เป็นไปตามทางเดินแบบรีโทรเกรด เอลลิปติคอล (Retrograde Elliptical Form) เหมือนกับการแพร่ของคลื่นเรไลช์และเป็นไปตามสมการ (36b) แต่จากการวัดค่าในสนามโดยทั่วไปให้ค่าที่แสดงให้เห็นว่าความเร็วของอนุภาคผกผันเป็นสัดส่วนกลับกับระยะทาง d (ดูรูปที่ 2.28 ประกอบ) จึงสรุปได้ว่าความสั่นสะเทือนของพื้นดินในช่วงเริ่มแรกของการแพร่ของคลื่นที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาค ทั้ง ATTEWELL, FARMER (1973) และ WISS (1967) ได้พลอตผลของการเคลื่อนตัวของอนุภาคใน Log-Log scale ระหว่างความเร็วของการเคลื่อนตัวของอนุภาค กับ $\frac{\sqrt{Eo}}{ds}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.29

ATTEWELL และ FARMER (1933) ได้เสนอสมการที่ใช้คาดคะเนความเร็วของการเคลื่อนตัวของอนุภาคไว้ดังนี้

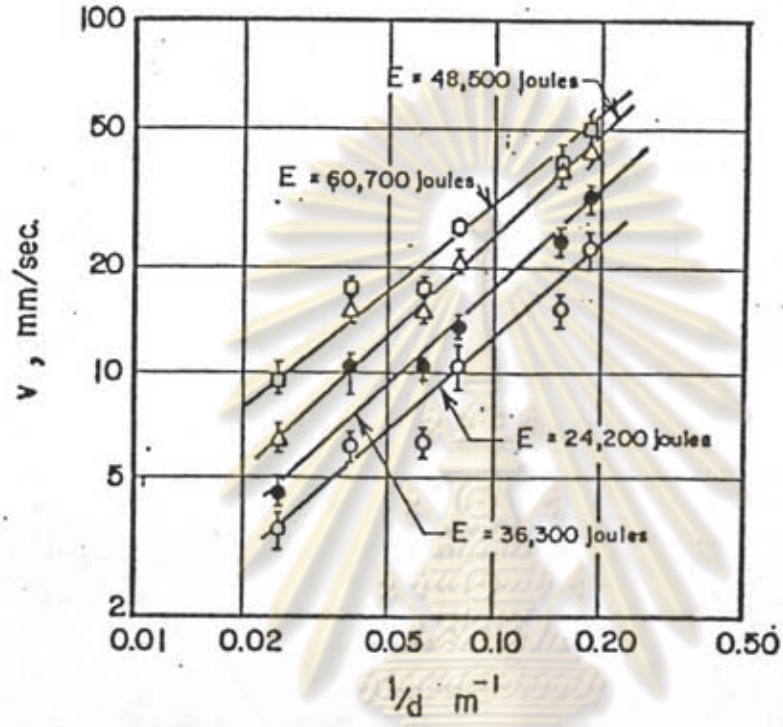
$$V = 1.5\sqrt{Eo}/d \qquad \ldots\ldots (38)$$

เมื่อ v = ความเร็วของการเคลื่อนตัวของอนุภาค, มม/วินาที
Eo = พลังงานที่ให้ที่ต้นกำเนิด, จูล
d_S = scismic distance ม.
d = ระยะทางราบ

2. พลังงานการตอก (Driving Energy)

ความรุนแรงของความสั่นสะเทือน ขึ้นอยู่กับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องตอก

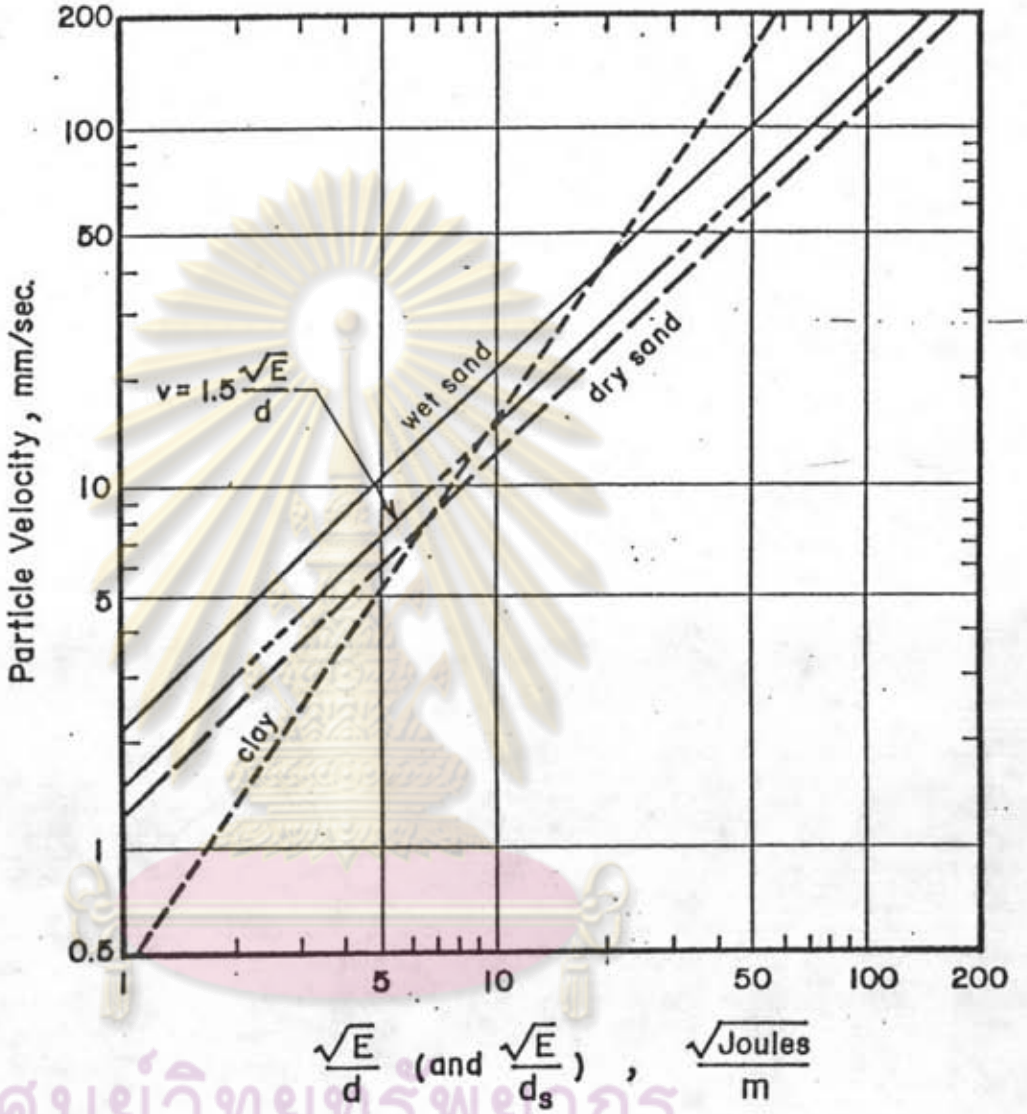
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Attenuation of Particle Velocity at Ground Surface with Distance for Various Energy Sources (After ATTEWELL and FARMER , 1973)

รูปที่ 2.28 แสดงค่าความเร็วของอนุภาคผกผันกับระยะทาง (d)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Particle Velocity Attenuation with Distance in Wet Sand, Dry Sand and Clay (Using Seismic Distance, d_s) (WISS, 1967) and an Upper Bound of $v = 1.5\frac{\sqrt{E}}{d}$ by ATTEWELL & FARMER (1973)

รูปที่ 2.29 แสดงผลของการเคลื่อนตัวของอนุภาคใน log-log scale ระหว่างความเร็วของการเคลื่อนตัวของอนุภาคกับ $\frac{\sqrt{Eo}}{d}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องตอกที่มีกำลังการตอกสูงก็ให้พลังงานที่จะส่งถ่ายสู่ดินสูงด้วย ทั้ง WISS (1967) ATTEWELL และ FARMER (1973) ได้พิจารณาถึงพลังงานการตอกว่าเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีผลต่อความรุนแรงของความสั่นสะเทือน ดังแสดงในรูปที่ 2.30

3. ระยะเจาะลึกของเสาเข็ม

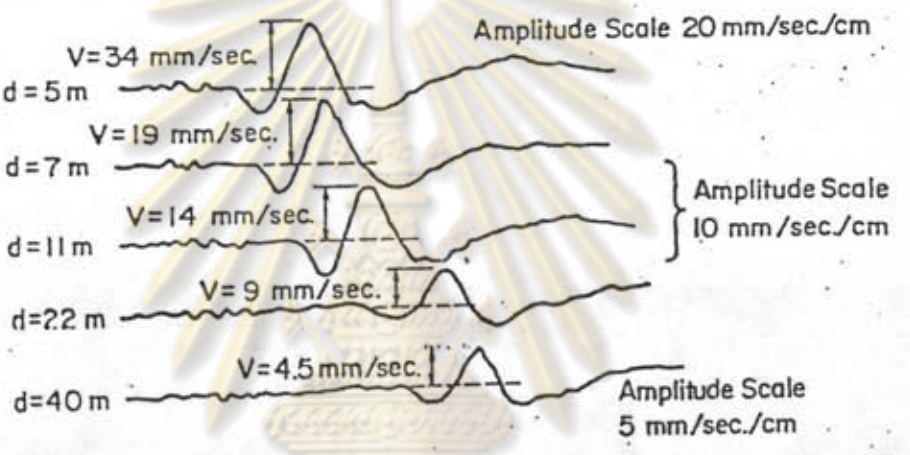
ความรุนแรงของความสั่นสะเทือนในระดับเจาะลึกแต่ละระดับนั้น ขึ้นอยู่กับ ชนิดของดินที่ระดับนั้น ๆ รูปลักษณะคลื่นของความสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่แต่ละครั้งของการตอก วัดที่ระยะ 33 เมตร จากแนวแกนเสาเข็ม โดย O'NEILL (1970) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.31 จากรูปจะเห็นได้ว่า ในช่วงแรกเมื่อเริ่มตอกเสาเข็มแอมปลิจูดต่ำมากเนื่องจากอัตราการเจาะลึกสูง พลังงานการตอกทั้งหมดถูกดูดกลืนด้วยตัวเสาเข็มไปทั้งหมด หลังจากการตอกครั้งที่ 10 แอมปลิจูดเริ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดหนึ่งซึ่งความรุนแรงไม่เพิ่ม หรือลดลงมากไปกว่านี้จนการตอกสิ้นสุดลง โดยลักษณะชั้นดินคงรูปนี้ มีชั้นดินที่แข็งกว่าอยู่ใต้ชั้นดินอ่อนที่อยู่ส่วนบน และยังพบว่าเมื่อปลายเสาเข็มจะถึงชั้นดินแข็ง ความสั่นสะเทือนที่ผิวเกิดขึ้นน้อยกว่าที่ปลายเสาเข็มจมอยู่ในชั้นดินที่สม่ำเสมอ (Uniform)

4. ชนิดของดิน Stiff Soil เป็นสื่อส่งถ่ายพลังงานที่มีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Medium และ Soft soil ดูดกลืนพลังงานได้มากกว่า เนื่องจากมีคุณสมบัติความหน่วงสูงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นแบบพลาสติก (Plastic) ดังนั้นใน Stiff soil คลื่นจะเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่า การลดลงของความรุนแรงของความสั่นสะเทือนอยู่ในอัตราที่ต่ำ ในทางกลับกันใน Plastic soil การเคลื่อนที่ของคลื่นสั้น และความรุนแรงลดลงอย่างรวดเร็ว PRAKASH และ JAIN (1970)

เป็นการยากที่จะแบ่งแยกให้ชัดเจนลงไปว่า ดินชนิดใด ประเภทใดดีกว่า จะต้องพิจารณาลักษณะความยืดหยุ่น (Elasticity) และความหน่วง (Damping) ของดินด้วย เช่น ในการตรวจสอบความสั่นสะเทือนจากการจราจร ปรากฏว่าในชั้นดินทราย (Sandy Soil) มีค่าความเร่งต่ำกว่าในดินเหนียวชื้น (Wet Clay) ความสั่นสะเทือนในดินเหนียว จะลดลงเร็วกว่าในดินทราย STEFFENS (1965)

5. ชนิดของโครงสร้าง รูปแบบการก่อสร้างอาคาร เป็นองค์ประกอบซึ่งมีผลต่อ

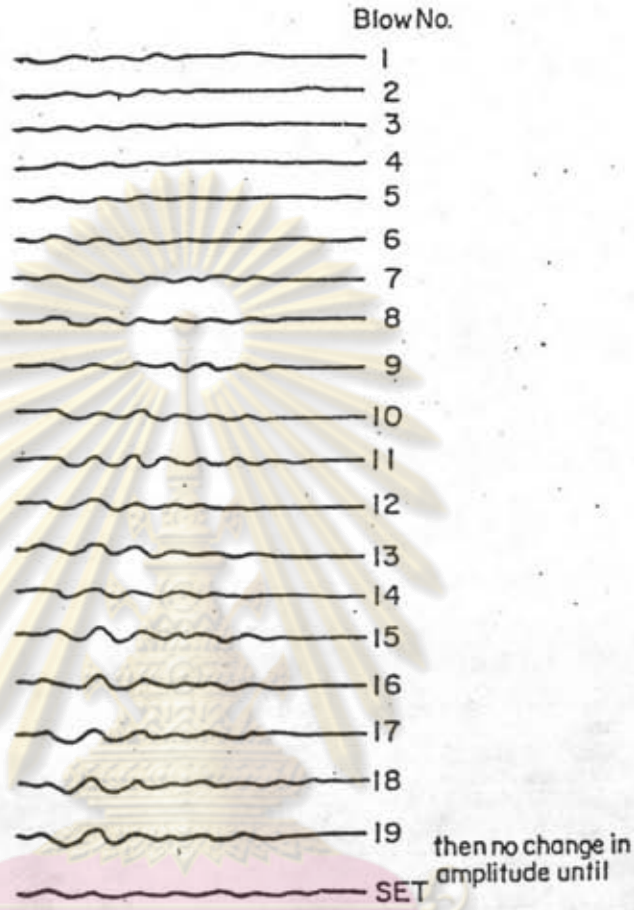
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Typical Wave Trace, Driven Sheet Piles
E = 36,300 Joules (After ATTEWELL
and FARMER, 1973)

รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะคลื่นที่เกิดจากการตอก Sheet Pile ,พลังงาน 36,300 จูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Variation of Vertical Vibration During Pile Driving (After O' NEILL , 1970)

รูปที่ 2.31 แสดงรูปลักษณะคลื่นของความสั่นสะเทือนในแนวตั้งระหว่างการตอกเสาเข็ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การส่งถ่ายความสั่นสะเทือน คุณสมบัติด้านความหน่วง (Damping) ของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างอาคารเป็นองค์ประกอบที่สำคัญยิ่ง โดยปกติอาคารคอนกรีต และอาคารก่ออิฐ มีคุณสมบัติในการส่งถ่ายความสั่นสะเทือนได้ดี จากการวัดความสั่นสะเทือนบนอาคารที่ออกแบบต่างกันตามสภาพการทดสอบต่าง ๆ โดย GENSCHEL (1962) พบว่า ชนิดของอาคารที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อความแตกต่างของความสั่นสะเทือน เมื่อเทียบกันด้วยพฤติกรรมทางไดนามิก อย่างไรก็ตามองค์การที่รับผิดชอบเกี่ยวกับความสั่นสะเทือนในเยอรมัน ได้แนะนำว่า อาคารควรมีลักษณะโครงสร้างเป็นเหมือนกล่องเพื่อช่วยลดความสั่นสะเทือน (STEFFENS, 1965)

6. คลื่นเสริมจากแหล่งอื่น

ในบางกรณีขณะที่ทำการตอกเสาเข็มอยู่ใกล้เคียงกับอาคารอาจมีความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนอกเหนือจากความสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มที่มาจากแหล่งอื่นได้ ตัวอย่างเช่น ความสั่นสะเทือนจากการจราจรและเครื่องจักรที่กำลังทำงานในอาคารเป็นต้น ฉะนั้นการออกแบบฐานรากของเครื่องจักรแยกจากฐานรากของตัวอาคารจึงเป็นสิ่งที่ควรปฏิบัติ เนื่องจากอาคารส่วนใหญ่ที่ตั้งอยู่ในเมืองมักจะตั้งเรียงรายอยู่ตลอดริมถนน ความสั่นสะเทือนจากการจราจรจึงมีส่วนเสริมความรุนแรงให้กับความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม

SUTHEFLAN (1950) ได้รวบรวมความรู้เกี่ยวกับความสั่นสะเทือนจากการจราจร โดยได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับองค์ประกอบ ที่มีผลต่อความสั่นสะเทือน ได้แก่ น้ำหนักของรถยนต์ ความเร็วของรถยนต์ การหยุดรถ และลักษณะการเร่งของรถยนต์ สภาพของผิวถนน (ขรุขระ หรือเรียบ) ความหนาของชั้นของพื้นถนน ระยะห่างของรถจากอาคารที่ทำการตรวจสอบและสภาพของชั้นดินใต้พื้นทางนั้น ในองค์ประกอบดังกล่าว สภาพของผิวถนนเป็นองค์ประกอบที่มีอิทธิพลที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการวัดทดสอบความรุนแรงยังไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างของอาคารได้ และได้เขียนข้อวิจารณ์ว่าลำพังความสั่นสะเทือนจากการจราจรเพียงอย่างเดียวไม่ก่อให้เกิดอันตรายโดยตรงได้ อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ที่สาเหตุของความเสียหายของอาคารที่เกิดขึ้นต่ออาคารเกิดจากสาเหตุอื่น

NELSON และ VIRANUVAT (1973) ได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับความสั่นสะเทือนจากการจราจรในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยได้วัดตรวจสอบเก็บข้อมูลความสั่นสะเทือนจากการจราจรที่วัดโพธิ์ กรุงเทพฯ เนื่องจากพระพุทธรูปนอนในวัดโพธิ์ เริ่มมีรอยร้าวเกิดขึ้นเป็นเวลา 4-5 ปี ก่อนทำการทดสอบ ซึ่งเชื่อว่าความแตกร้าวมีสาเหตุมาจากความสั่นสะเทือนที่เกิดจาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การจราจรที่คับคั่งบริเวณถนนข้างเคียงวัด เนื่องจากการยุบอัดตัวแบบถ่ายน้ำหนักชั้นแรกของชั้นดินฐานรากได้สิ้นสุดไปเมื่อ 100 ปีมาแล้ว จากการวัดความสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งต่างๆ ผู้ศึกษาพบว่า ระดับของความสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจร ความรุนแรงไม่เพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างเสียหายได้ อย่างไรก็ตาม ความสั่นสะเทือนในอดีตที่ผ่านมาอาจจะรุนแรงกว่าในขณะที่ทำการวัด เนื่องจากสภาพของผิวจราจรที่ขรุขระ ผู้วิจัยได้สรุปว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง หรือทั้งสองสาเหตุ ดังนี้ คือ

(1) การเสื่อมสภาพของโครงสร้างฐานรากที่เก่าแก่

(2) การทรุดตัวเนื่องจากการแยกตัวของโครงสร้างของดิน ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจากการจราจร

2.6.4 <u>การทรุดตัวทางไดนามิกเนื่องจากการตอกเสาเข็ม</u>
<u>(Dynamic Settlement from Pile Driving)</u>

มีหลายสาเหตุที่ทำให้เกิดการทรุดตัวของอาคารข้างเคียง เนื่องจากความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม การตอกเสาเข็มใกล้เคียงกับกลุ่มเสาเข็มที่มีน้ำหนักมากระทำแล้วสามารถที่จะทำให้เกิดการทรุดตัวของกลุ่มเสาเข็มเหล่านี้ได้ เนื่องจากการสูญเสียแรงเสียดทานหรือการทรุดตัวของวัสดุที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับการรับน้ำหนักที่ปลายเข็ม O'NEILL(1970) นอกจากนี้ ความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม ยังมีผลกระทบต่อค่า Angle of Repose ของดินกรวด คือทำให้มุมมีค่าลดลง 50 % จากค่า Static Value O'NEILL(1970) และยังลดค่ากำลังรับน้ำหนักของกลุ่มเสาเข็มของฐานรากข้างเคียงอีกด้วยและยิ่งใหญ่กว่านั้นความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มยังเป็นผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนช่องว่าง(Void Ratio)ของดินกรวดรอบๆเสาเข็มที่ตอกนั้น (SZECHY,1961) ซึ่งผลของการลดช่องว่างในดินก็คือแรงอัดที่ทำให้เกิดการทรุดตัวตามมานั่นเอง

เพื่อประเมินค่าผลกระทบของความสั่นสะเทือน จากการตอกเสาเข็มต่อค่าความฝืดของเสาเข็ม (Skin Friction)ที่ตอกลงไปในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น(Cohesionless soil) PRAKASH และ AGARWAL (1971) ได้ทดสอบในห้องทดลองโดยการทำเข็มจำลองทำจากอลูมิเนี่ยมกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ยาว 55 เซนติเมตร เข็มจำลองนี้ฝังในทรายและถูกดึงขึ้นตรงๆ และคำนวณค่าสูงสุดของแรงต้านเนื่องจากความฝืดไว้ จากผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองปรากฏว่า จากค่าความเร่งที่กำหนดให้ค่าแรงฝืดของเสาเข็มลดลงในขณะที่จำนวนรอบของความสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ในกรณี เสาเข็มต้นเดียวเมื่อความเร่งมีค่าสูงขึ้น 1.0 g ค่าแรงฝืดจะลดลงประมาณ 30 % จากค่า Static Value โดยการสั่น 100 ครั้ง และจากการสั่น 600 ครั้ง ค่าความเร่ง 0.1 g ค่าแรงฝืดลดลง 20% จาก Static Value

กรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม

(1) ความเสียหายของอาคารในเขตกรุงเทพมหานคร

ในปี 1970 ได้มีการก่อสร้างอาคารของบริษัท ออลไลด์ นิวสเปเปอร์ จำกัด (Allied Newspaper CO,LTD) ที่ถนนพระราม 4 กรุงเทพฯ และมีการตอกเสาเข็มบริเวณใกล้เคียงกับอาคารข้างเคียงเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสองชั้นฐานรากเป็นเสาเข็มไม้ยาว 6 เมตร เสาเข็มของอาคารใหม่เป็นเสาเข็มขนาด 0.33 x 0.37 x 23.00 เมตร ซึ่งตอกห่างจากรั้วก่ออิฐมอญประมาณ 60 เซนติเมตรและห่างจากผนังก่ออิฐมอญของตัวบ้านประมาณ 3.00 เมตร ปรากฏว่าเกิดรอยร้าวขึ้นที่มุมข้างผนังก่ออิฐ และบางจุดที่มุมของวงกบหน้าต่างซึ่งเกิดจากการบิดตัวด้วย ที่กลางพื้นคอนกรีตชั้นที่ 1 ได้เกิดการบวม (Heaved) ขึ้นประมาณ 15 เซนติเมตร ในขณะที่กำแพงรั้วเอียงไปประมาณ 20 องศา จากแนวตั้ง

ภายหลังจากการสำรวจความเสียหายสรุปได้ว่า การตอกเสาเข็มใกล้กับอาคารเดิมมากเกินไปจะทำให้เกิดผลกระทบ 2 ประการ คือ

ก. ผลกระทบจากความสั่นสะเทือน

ข. ผลกระทบจากการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน

เนื่องจากกำแพงรั้ว เป็นกำแพงที่ค่อนข้างเก่ามาก และเดิมมีการทรุดตัวอยู่แล้ว ฉะนั้น ความสั่นสะเทือนจึงเป็นสาเหตุหนึ่งในการนำไปสู่การแตกร้าวของกำแพงที่ปรากฏขึ้นหรืออาจจะพูดได้อีกแง่หนึ่งว่าบ้านหลังนี้ ได้รับความกระทบกระเทือนจากการจราจรบนถนนพระราม 4 มาก่อนแล้ว พอความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็มข้างเคียงมาเสริมอีก จึงทำให้เกิดรอยร้าวบนผนังของอาคารขึ้นจนเห็นได้ชัด สมมติฐานของความสั่นสะเทือนที่ว่าการเกิดความสั่นสะเทือนที่ซ้ำๆ แม้ว่าความสั่นสะเทือนนั้นจะมีแอมปลิจูดที่มีขนาดเล็กก็ตามอาจจะทำให้เกิดรอยร้าว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ได้ สาเหตุจากความล้า(fatique) สำหรับการบวมอืดของดินใต้พื้นคอนกรีตเชื่อว่าเป็นผลกระทบจากการเคลื่อนตัว เนื่องจากการแทนที่ขึ้นดินของเสาเข็ม ระหว่างการตอกเสาเข็มได้มีการร้องเรียนเกิดขึ้นเนื่องจากความกลัวของเจ้าของบ้าน สาเหตุจากความกลัวมีอยู่ 2 ประการคือ

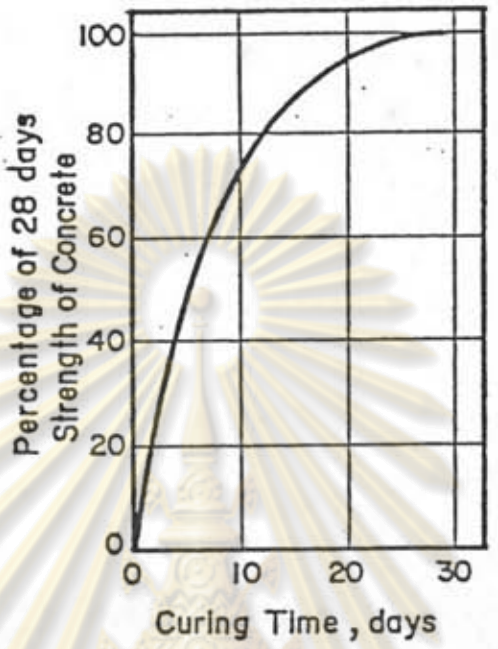
ก. ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นทำให้ผนังภายในบ้านเกิดการสั่นและรู้สึกว่าอยู่ไม่สบายเป็นอย่างยิ่ง

ข. ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น จะทำให้บ้านพัง

แต่อย่างไรก็ดี ไม่ปรากฏรอยร้าวบนโครงสร้างหลัก (เสา คาน) ของตัวบ้าน แต่ไม่มีการตรวจวัดระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตอกเสาเข็มในขณะนั้น ทางหนึ่งที่เป็นการลดความสั่นสะเทือน ก็คือการลดความสูงของระยะยกตุ้มตอกเสาเข็ม หรือพูดอีกอย่างหนึ่งก็คือลดพลังงานจากการตอกเสาเข็มนั่นเอง

(2) ระยะที่ปลอดภัยจากคอนกรีตที่กำลังบ่ม

ปัญหาที่เป็นที่สนใจโดยทั่วไปในการก่อสร้างคือ กรณีที่มีการตอกเสาเข็มในขณะที่มีการเทคอนกรีต ได้มีคำถามบ่อยครั้งว่าการตอกเสาเข็มจะมีผลกระทบต่อคอนกรีตที่เทเสร็จใหม่ (Green Concrete) หรือไม่ อย่างไร จากการศึกษาที่ผ่านมาในอดีต WISS (1967) ได้ให้เหตุผลไว้ดังนี้คือ จากสมมติฐานที่ว่า ที่ความเร็วของอนุภาค 125 มม./วินาที เป็นค่าระดับที่ปลอดภัยและค่อนข้างจะล้าสมัยสำหรับคอนกรีตที่กำลังบ่มอยู่และรับรองว่าเป็นระดับที่คอนกรีตจะสามารถรับกำลังที่ต้องการได้ จึงเป็นไปได้ว่าสามารถที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับของความสั่นสะเทือนกับเวลาตั้งแต่เริ่มเทคอนกรีตเมื่อประเมินผลการลดลงของระดับความสั่นสะเทือน กับระยะห่างได้แล้วระยะของการตอกเสาเข็มที่ยอมให้สำหรับลูกตุ้มแต่ละขนาดก็สามารถที่จะหาได้โดยเป็นฟังก์ชั่นของระยะเวลาบ่มคอนกรีต สมมติว่า ในการก่อสร้าง ณ สถานที่แห่งหนึ่งรายการข้อกำหนดต้องการกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน 24,840 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เปอร์เซนต์ของกำลังของคอนกรีตที่ 28 วันเทียบกับระยะเวลาการบ่มคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.32 เส้นกราฟนี้แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตมีกำลังประมาณ 5 % ในเวลา 12 ชั่วโมง(ครึ่งวัน) หรือ 20 % ในเวลา 24 ชั่วโมง(1 วัน) ดังนั้น ระดับความรุนแรงของความสั่นสะเทือนจะต้องมีเปอร์เซนต์ของความเร็วของอนุภาคที่ 125 มม./วินาที ณ เปอร์เซนต์ดังกล่าวเช่นเดียวกัน ดังนั้นความเร็วของอนุภาคจะเป็น 6.25 และ 12.5 มม.



Strength of Concrete vs. Curing Time , f_c = 24840 kN/m^2 at 28 Days (After WISS , 1967)

รูปที่ 2.32 แสดงความแข็งแรงของคอนกรีตกับระยะเวลาการบ่ม fc = 24840 กิโลนิวตัน/วินาที ที่ 28 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต่อ วินาที ตามลำดับ ถ้าชั้นดินเป็นดินเหนียวความเร็วของอนุภาคจากความสั่นสะเทือนจะเป็น $\sqrt{E_0/d}$ ซึ่งมีค่าเป็น 5.6 และ 8.8 มม./วินาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.29 ถ้าตอกเสาเข็มด้วยพลังงาน 20,025 จูลน์ ระยะที่ใกล้ที่สุดที่ยอมให้เป็น 18.75 และ 12.50 เมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 2.33 เส้นโค้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้หาระยะที่ปลอดภัยสำหรับการตอกเสาเข็มกับระยะเวลาการบ่มคอนกรีตได้ด้วย

(3) การควบคุมการตอกเสาเข็มใกล้เคียงกับอุปกรณ์ที่ต้องระมัดระวัง

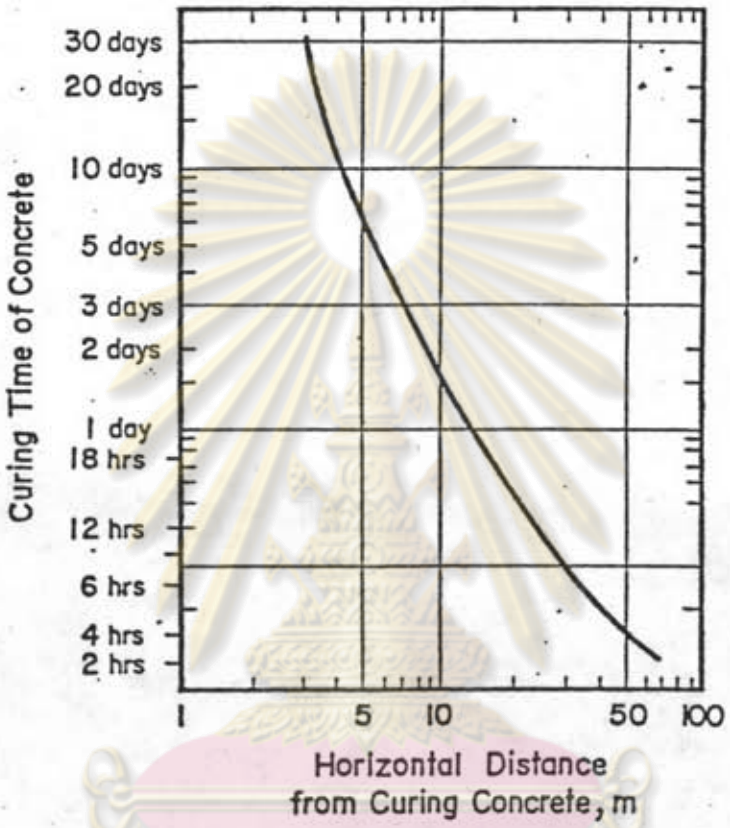
ปัญหาที่มีมากขึ้น เกี่ยวกับการตอกเสาเข็ม ใกล้เคียงกับพื้นที่ห้องปฏิบัติการ เนื่องจากความสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม จะส่งผลกระทบต่องานการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลกระทบนี้ ได้แก่ ผลกระทบต่อการอ่านค่ากัลวาโนมิเตอร์และการตรวจสอบระดับผิวหน้าของของเหลว ในตารางที่ 2.18 ได้ให้ข้อแนะนำสำหรับความไวตัวของเครื่องมือ เนื่องจากความสั่นสะเทือน จะต้องมีการวางแนวทางในการควบคุมระดับความสั่นสะเทือนให้มีค่าต่ำในบริเวณพื้นที่ห้องปฏิบัติการ ดังตัวอย่างของการควบคุมการตอกเสาเข็ม ซึ่งทำโดย CROCKETT (1965) ดังต่อไปนี้

ในการก่อสร้าง ซึ่งต้องมีการตอกเสาเข็มบริเวณพื้นที่ด้านข้างตลอดแนวของโรงงานซึ่งอยู่ระหว่างการผลิตเคเบิล จากการสำรวจตรวจสอบกรรมวิธีการผลิตอย่างถี่ถ้วน ได้พบว่า สายงานการผลิตของโรงงานแห่งนี้ มีส่วนที่ไวตัวต่อความถี่ และแอมปลิจูดของความสั่นสะเทือน ที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม โดยจะทำให้ต้องหยุดทำการผลิตขณะที่ทำการตอกเสาเข็ม ดังนั้น ผู้รับจ้างทำการตอกเสาเข็มจึงต้องวางโครงการการตอกเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.34 จากรูปจะเห็นได้ว่าการตอกเสาเข็มมีทั้งช่วงที่ต้องหยุดในระหว่างที่โรงงานทำการผลิต และช่วงที่จะต้องควบคุมการตอกเสาเข็มอย่างระมัดระวัง

2.7 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน

เป็นที่ทราบโดยทั่วไปแล้วว่า เมื่อพื้นดินถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของเสาเข็มที่ตอกลงไป ย่อมทำให้เกิดการบวมอัดของพื้นดิน และกลุ่มเข็มข้างเคียง นอกจากนี้ยังเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดินด้วย ซึ่งหากปริมาณของเสาเข็มที่ตอกมีเป็นจำนวนมากและหนาแน่นย่อมทำให้เกิดการเคลื่อนตัว เนื่องจากการถูกแทนที่ได้มาก และอาจก่อให้เกิดอันตรายต่ออาคาร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Limiting Safe Distance vs. Curing Time of Concrete for Pile Driver Rated at 20000 Joules of Energy (After WISS , 1967)

รูปที่ 2.33 แสดงข้อจำกัดระยะความปลอดภัย กับระยะการบ่มคอนกรีต สำหรับอัตราการตอกเสาเข็มด้วยพลังงาน 20000 จูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

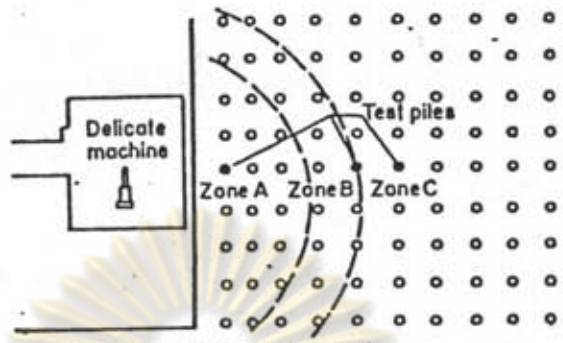
ตารางที่ 2.18 แสดงความไวตัวของเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ
เนื่องจากความสั่นสะเทือน

(After WHIFFIN & LEONARD , 1971)

Type of instrument	Displacement in microns	
	Satisfactory	Excessive
Mettler analytical balance	R	0.1
Sartorius analytical balance	0.2	0.8
Leeds-Northrup reflective galvanometer	0.02	0.1
Zeiss interferometer microscope	R	0.1
Electron microscope	0.5	12.0
Photo-microscope	1.25	11.5
Watts Microptic autocollimator	0.05	0.07
Haas standard barometer	0.25	0.7

R indicates that the instrument can be used only during periods of little vibration.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Zone A Machine stopped
Zone B In use with precautions
Zone C In use on normal production

Control of Vibration Due to Pile Driving
(After CROCKETT., 1965)

รูปที่ 2.34 แสดงการควบคุมความสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเสาเข็ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้างเคียง โดยเฉพาะเสาเข็มและฐานราก

กลไกทางปฐพีวิศวกรรม ที่มีผลจากการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน ยังไม่เป็นที่เข้าใจได้อย่างกระจ่างชัด ส่วนใหญ่เท่าที่มีการศึกษาจะตั้งสมมติฐานให้ดินมีพฤติกรรมเป็นอินคอมเพรสสิเบิล (Incompressible) ซึ่งปริมาณดินที่ถูกแทนที่ด้วยเสาเข็มจะเท่ากับปริมาณของเสาเข็มที่ตอกลงไปในดิน ฉะนั้นการนำวิธีการตอกเสาเข็ม โดยการเจาะนำก่อนจึงเชื่อว่าน่าจะเป็นการลดปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน ซึ่งจะเป็นผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงได้ ดังเช่นในกรณีการก่อสร้างเพิ่มเติมส่วนผลิตน้ำ ของโรงกรองน้ำบางเขน ซึ่งได้ใช้วิธีการตอกเสาเข็มโดยการเจาะนำก่อน และได้มีการติดตั้งเครื่องมืออินคลิโนมิเตอร์ (Inclinometer) , ดีฟเซทเทิลเม้นเพลต (Deep Settlement Plate) เพื่อวัดตรวจสอบข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและการทรุดตัวของชั้นดิน มาใช้ในการควบคุมให้เป็นไปตามรายการข้อกำหนด แต่การศึกษาในครั้งนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำข้อมูลมาประกอบ และใช้เป็นประโยชน์สำหรับทำนาย (Prediction) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นดิน ซึ่งเป็นผลจากการตอกเสาเข็มจำนวนมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย