



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

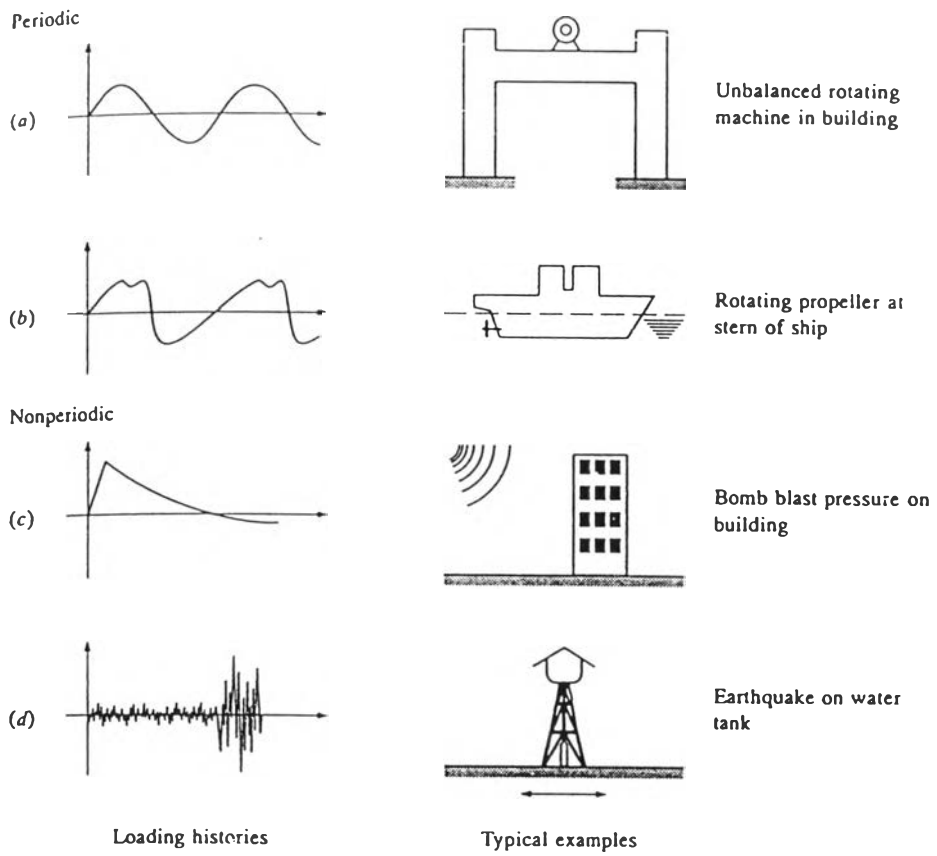
แรงลมและแรงจากแผ่นดินไหวเป็นแรงทางพลศาสตร์ การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาการตอบสนองของ โครงสร้างต่อแรงลมและแรงแผ่นดินไหวจึงจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีพื้นฐานทางพลศาสตร์ตามลักษณะการเกิดของแรงตามธรรมชาติของแรงลม และแรงแผ่นดินไหวที่แตกต่างกัน แม้ว่าต้นตอของแรงเป็นแรงพลศาสตร์เหมือนกัน แต่ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาวิธีแรงสถิตเทียบเท่ามีความแตกต่างกันดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป

2.1 พลศาสตร์ของโครงสร้าง

แรงกระทำต่อโครงสร้างแบบพลศาสตร์มีขนาดและทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อแรงดังกล่าวกระทำต่อ โครงสร้างจะทำให้โครงสร้างมีการตอบสนองในลักษณะที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นเดียวกัน การวิเคราะห์ โครงสร้างโดยวิธีพลศาสตร์จึงแตกต่างจากการวิเคราะห์ในแบบสถิตศาสตร์ และมีความซับซ้อนกว่ามาก โดยแบ่งแยกออกเป็นค่าแรงที่แปรเปลี่ยนตามเวลา ลักษณะของโครงสร้าง และการตอบสนองของโครงสร้าง

2.1.1 แรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

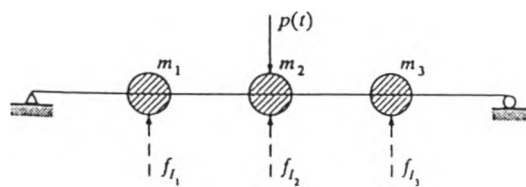
ลักษณะของแรงทางพลศาสตร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แรงที่มีคาบ (Periodic Load) กับแรงแบบสุ่ม (Random Load) ลักษณะของแรงที่มีคาบ ยกตัวอย่างได้เช่นแรงที่เกิดจากการหมุนของเครื่องจักรซึ่งจะมีรอบการหมุนที่สามารถรู้ได้ว่ามีค่าความถี่เชิงมุมเท่าไร และสามารถหาคาบของแรงได้ แรงแบบสุ่มยกตัวอย่างเช่น แรงจากแผ่นดินไหว แรงลม เป็นต้น รูปที่ 2.1 แสดงถึงลักษณะแรงทางพลศาสตร์ทั้ง 2 แบบ



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างลักษณะแรงทางพลศาสตร์



รูปที่ 2.2 คานที่รับแรงกระทำแบบพลศาสตร์



รูปที่ 2.3 แสดงการพิจารณามวลเป็นจุด

2.1.2 น้ำหนักของโครงสร้าง

การวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ของโครงสร้าง หมายถึงการสนองตอบของโครงสร้าง ตามลักษณะสถิตไฟเนสของโครงสร้าง แต่ในการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ พฤติกรรมการสนองตอบของโครงสร้าง จะต้องพิจารณาน้ำหนักของโครงสร้างเป็นส่วนเพิ่มเติมด้วย ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2 เป็นคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย มีแรงกระทำเป็นจุด ในการวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์จะมีความยุ่งยากน้อยในการคำนวณหาแรงภายใน และหาค่าการแอ่นตัวของคานโดยพิจารณาน้ำหนักบรรทุกเป็นจุด น้ำหนักของคานพิจารณาเป็นแบบกระจายและจะไม่มี ความแตกต่างกันมากนักหากจะแยกพิจารณาน้ำหนักของคานออกเป็นจุดตามความยาวของคานเป็นช่วงๆ แต่ในการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์จะต้องพิจารณาน้ำหนักและความเร่งของคานเป็นส่วนสำคัญเนื่องด้วยค่าความเร่งของการสั่นตัวของคานในแต่ละจุดจะไม่เท่าเทียมกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ดังกล่าวค่อนข้างยุ่งยากโดยเฉพาะเมื่อแรงที่กระทำมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจึงต้องจำลองแบบให้น้ำหนักของโครงสร้างอยู่รวมกันเป็นจุด (Lumped Mass) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะสามารถลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ ได้ในระดับหนึ่ง แต่การวิเคราะห์ยังคงต้องทำให้ง่ายในหลายๆด้าน แต่ยังคงให้การสนองตอบได้สอดคล้องกับพฤติกรรมที่แท้จริง

2.1.3 การจำลองการตอบสนองทางโครงสร้าง

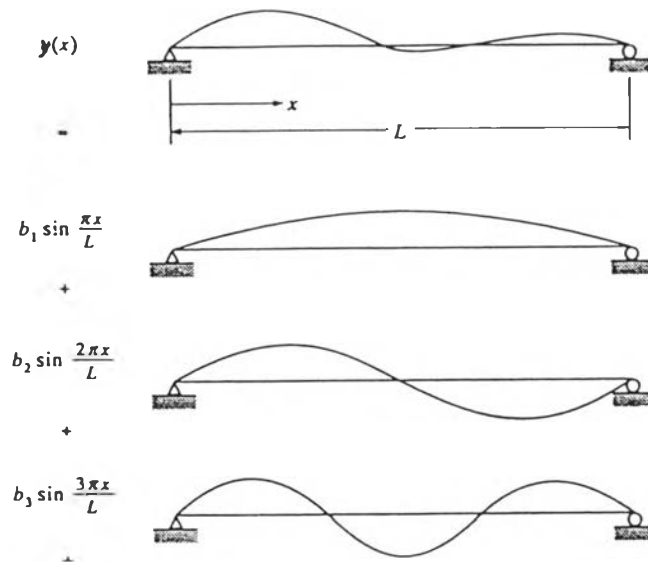
จากการจำลองน้ำหนักของโครงสร้างดังตัวอย่างที่แบ่งออกเป็นจุด 3 จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะสามารถวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้าง ตามตัวอย่างที่มีระดับขั้นความเสรี (Degree of Freedom) เป็น 3 จะให้การตอบสนองในรูปแบบของค่าการเคลื่อนตัวของคานแต่ละจุดด้วยสมการการเคลื่อนตัวของคาน ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.4 และสมการข้างล่าง

$$y(x) = \sum b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (2.1)$$

สมการการเคลื่อนตัวของคานดังกล่าวสามารถเขียนได้ใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการทั่วไปเพื่อแสดงลักษณะค่าการสนองตอบของโครงสร้างที่เกิดจากผลรวมของการเคลื่อนตัวในแต่ละแบบตามจำนวนของระดับขั้นความเสรีของระบบโครงสร้าง

$$y(x) = \sum_i y_i \mu_i(x) \quad (2.2)$$

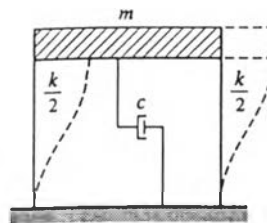
ซึ่งค่า $\mu_i(x)$ คือรูปร่างการเคลื่อนตัว (Mode Shape) และ ค่า y_i คือค่าตัวคูณซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับรูปร่างการเคลื่อนตัวแต่ละแบบ หรือเรียกว่า Generalized Coordinates ซึ่งค่า y_i เทียบได้กับค่า b_1, b_2, b_3 และ $\mu_i(x)$ เทียบได้กับค่าฟังก์ชันไซน์ ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของคาน

2.1.4 แบบจำลองของโครงสร้างทางพลศาสตร์

พิจารณาแบบจำลองอย่างง่ายซึ่งเป็นตัวแทนของโครงสร้างที่วิเคราะห์ทางพลศาสตร์ ประกอบด้วย มวล ซึ่งแทนมวลของโครงสร้าง สปริง แทนค่าสติเฟนสของโครงสร้าง และระบบการหน่วง (Dashpot System) ของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจำลองแบบโครงสร้างทางพลศาสตร์

จากแบบจำลองดังกล่าวสามารถเขียนสมการการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสำหรับโครงสร้างที่มีระดับชั้นความเสียดทานหนึ่ง

$$\ddot{y} + 2(2\pi f_o)\xi \dot{y} + \frac{K}{m}y = \frac{F(t)}{m} \quad (2.3)$$

โดยที่

- \ddot{y}, \dot{y}, y = ความเร่ง ความเร็ว และการเคลื่อนตัวของมวลตามลำดับ
- f_o = ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง
- ξ = อัตราส่วนการหน่วง (Damping Ratio)
- m = มวล
- K = สติฟเนสของโครงสร้าง
- $F(t)$ = แรงที่กระทำกับระบบ โดยเป็นฟังก์ชันของเวลา

ในส่วนฟังก์ชันของแรง กรณีที่แรงเป็นแบบมีคาบ (Periodic load) สมมติให้ $F(t)$ เป็นแรงฮาร์โมนิก กระทำด้วยความถี่ f ดังนั้นฟังก์ชันของแรงแสดงได้ว่า

$$F(t) = F_o \cos(2\pi f t) \quad (2.4)$$

- โดยที่ F_o = แอมพลิจูดของคลื่นฮาร์โมนิก
- f = ความถี่ของแรง
- t = เวลา

การเคลื่อนตัวของสนองตอบของโครงสร้างเมื่อรับแรง $F(t)$ กระทำ จะหาได้โดยการแก้สมการอนุพันธ์ในสมการที่ (2.3) และผลเฉลยที่ได้คือ

$$y(t) = F_o \frac{H(f)}{K} \cos(2\pi f t + \phi) \quad (2.5)$$

$$\text{โดยที่ } H(f) = \frac{1}{\left[\left\{ 1 - \left(\frac{f}{f_o} \right)^2 \right\}^2 + \left\{ 2\xi \left(\frac{f}{f_o} \right) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.6)$$

ϕ = มุมเฟส (Phase Angle)

K = สติฟเนสของโครงสร้าง

สำหรับฟังก์ชันของแรงในกรณีของแรงแบบสุ่ม ซึ่งประกอบไปด้วยแรงฮาร์โมนิกที่มีความถี่หลายความถี่รวมอยู่ด้วยกัน แรงกระทำต่อระบบจะเป็นผลรวมแรงฮาร์โมนิกในแต่ละความถี่เข้าด้วยกัน นั่นคือ

$$F(t) = \sum_{i=1}^n F_i \cos(2\pi f_i t) \quad (2.7)$$

F_i = แอมพลิจูดของแรงฮาร์โมนิกที่ i

f_i = ความถี่ของแรงฮาร์โมนิกที่ i

ดังนั้นเมื่อแทนค่าฟังก์ชันของแรงในสมการที่ (2.7) ลงในสมการที่ (2.6) จะได้สมการการเคลื่อนตัวของโครงสร้างคือ

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{K} H(f_i) \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2.8)$$

สมการที่เป็นสมการเพื่อหาค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองของระบบทั้งในสมการที่ (2.5) และ (2.8) จัดเป็นระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่ง ในกรณีที่ระบบมีระดับขั้นความเสรีมากกว่าหนึ่ง การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยการแทนค่าการเคลื่อนตัว $y(t)$ ด้วย

$$y(x, t) = \sum_i y_i(t) \mu_i(x) \quad (2.9)$$

โดยที่

$y(x, t)$ = การเคลื่อนตัวตอบสนองที่จุด x ที่เวลา t

$\mu_i(x)$ = รูปร่างการเคลื่อนตัวของโครงสร้างในโหมดที่ n

$y_i(t)$ = ระยะการเคลื่อนที่ตอบสนองของโครงสร้างของโหมดที่ i

หรือสามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้

$$y(x, t) = \Phi Y(t) \quad (2.10)$$

โดย

$$\begin{aligned} \Phi &= \text{เมตริกซ์รูปร่างการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง (Mode shape matrix)} \\ &= [\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \dots \ \phi_i] \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1i} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{i1} & \phi_{i2} & \dots & \phi_{ii} \end{bmatrix}$$

$$Y(t) = \text{เมตริกซ์ระยะการเคลื่อนที่ตอบสนองของโครงสร้าง (Generalized displacement)}$$

แทนสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.3)

$$m\Phi\ddot{Y}(t) + c\Phi\dot{Y}(t) + K\Phi Y(t) = F(t) \quad (2.11)$$

$$\text{เมื่อ } c = 2m\omega_0\xi = 2m(2\pi f_0)\xi$$

สำหรับระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเป็น i คุณสมบัติสมการที่ (2.11) ด้วย ϕ_n^T ซึ่งเป็นรูปร่างการเคลื่อนที่ในโหมดที่ n ได้สมการ

$$\phi_n^T m\Phi\ddot{Y}(t) + \phi_n^T c\Phi\dot{Y}(t) + \phi_n^T K\Phi Y(t) = \phi_n^T F(t) \quad (2.12)$$

จากคุณสมบัติเชิงตั้งฉากของเมตริกซ์ (Orthogonality conditions)

$$\begin{aligned} \phi_m^T m\phi_n &= 0 \\ \phi_m^T K\phi_n &= 0 \\ \phi_m^T c\phi_n &= 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

เมื่อ $m \neq n$ ดังนั้นสมการที่ (2.12) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\tilde{M}_n \ddot{Y}_n(t) + \tilde{C}_n \dot{Y}_n(t) + \tilde{K}_n Y_n(t) = \tilde{F}_n(t) \quad (2.14)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \tilde{M}_n &= \phi_n^T m \phi_n \\ \tilde{K}_n &= \phi_n^T K \phi_n \\ \tilde{F}_n &= \phi_n^T F \phi_n \\ \tilde{C}_n &= \phi_n^T c \phi_n \end{aligned} \quad (2.15)$$

โดยผลเฉลยของสมการที่(2.14) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Y_n(t) = \frac{1}{\tilde{M}_n \omega_{Dn}} \int_0^t \tilde{F}_n(\tau) \exp[-\xi_n \omega_n(t-\tau)] \sin \omega_{Dn}(t-\tau) d\tau \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$\omega_{Dn} = \omega_n \sqrt{1-\xi_n^2}$$

สมการที่ (2.16) เป็นสมการพื้นฐานสำหรับหาค่าการตอบสนองของโครงสร้างในโหมดที่ n และผลรวมของค่าการตอบสนองของโครงสร้างทุกๆ โหมดสำหรับระบบที่มีระดับชั้นความเสรีเป็น i สามารถแสดงได้ดังสมการข้างล่าง

$$y(x,t) = \phi_1(x)Y_1(t) + \phi_2(x)Y_2(t) + \dots + \phi_i(x)Y_i(t) \quad (2.17)$$

2.1.5 คาบของโครงสร้าง

สำหรับระบบโครงสร้างที่มีระดับชั้นความเสรีเท่ากับหนึ่ง จากรูปที่ 2.5 คาบของโครงสร้างคำนวณได้จากการปล่อยให้ระบบมีการเคลื่อนตัวอย่างอิสระ ดังแสดงในสมการการเคลื่อนที่ (2.3) โดยแรงกระทำทางด้านขวาของสมการมีค่าเป็นศูนย์ สมมติให้ความหน่วงเป็นศูนย์

$$m\ddot{y} + ky = 0 \quad (2.18)$$

กำหนดให้ผลเฉลยในสมการที่ (2.18) เป็นดังในสมการที่ (2.19)

$$y = A \cos \omega t \quad (2.19)$$

เมื่อ ω คือค่าความถี่เชิงมุม t คือเวลา และ A คือค่าคงที่ แทนค่าสมการที่ (2.19) ลงในสมการที่ (2.18) ได้

$$(-m\omega^2 + k) A \cos \omega t = 0 \quad (2.20)$$

สำหรับผลที่เป็นจริงสำหรับทุกๆค่าของเวลา ดังนั้นสมการที่ (2.21) เขียนใหม่ได้เป็น

$$-m\omega^2 + k = 0$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.21)$$

ความถี่เชิงมุมสามารถเขียนได้ในรูปของคาบการสั่นดังนี้

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.22)$$

แทนค่าสมการที่ (2.22) ลงใน (2.21)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) แสดงให้เห็นว่าคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้างแปรผันตามกับมวลของโครงสร้าง และแปรผกผันกับค่าสติฟเนสของโครงสร้าง แสดงว่ามวลของโครงสร้างกับค่าสติฟเนส k มีผลโดยตรงต่อคาบของโครงสร้าง

สำหรับระบบโครงสร้างที่มีระดับขั้นความเสรีแบบพหุ (Multi Degree of Freedom) สมการการเคลื่อนที่แบบอิสระ (แรงกระทำเป็นศูนย์) ของระบบที่มีระดับขั้นความเสรีแบบพหุ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$[M]_{n \times n} \{\ddot{y}\}_i + [k]_{n \times n} \{y\}_i = \{0\}_{n \times 1} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$[M] = \text{เมตริกซ์มวลของโครงสร้างขนาด } i \times i$$

$$[K] = \text{เมตริกซ์สติฟเนสของโครงสร้างขนาด } i \times i$$

กำหนดให้ผลเฉลยของสมการที่ (2.24) เป็นดังในสมการ (2.25)

$$\{y\} = \{a\} \sin(\omega t - \alpha) \quad (2.25)$$

แทนสมการที่ (2.25) ลงในสมการที่ (2.24)

$$[[k] - \omega^2 [M]] \{a\} = \{0\} \quad (2.26)$$

สำหรับผลเฉลยที่เป็นจริงสำหรับทุกค่าของ $\{a\}$

$$|[k] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (2.27)$$

ค่าความถี่เชิงมุม ω สามารถหาได้โดยแก้สมการดีเทอร์มิแนนต์ในสมการที่ (2.27) ทำให้ได้ค่า ω i ค่าสำหรับระบบที่มีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ i

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับแรงลม

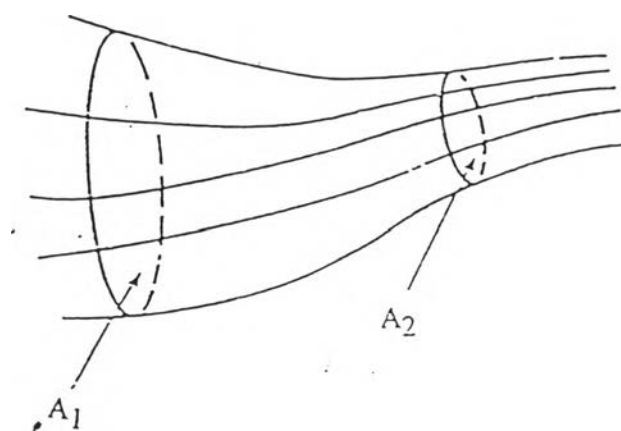
ลม เป็นของไหลชนิดหนึ่งจากการเคลื่อนที่ของอากาศ พฤติกรรมการไหลของลมจึงเป็นไปตามสมการการไหลของ เบนอร์นูลิ (Bernoulli's Equation) การเคลื่อนที่ของลมในบริเวณที่ติดกับพื้นผิวโลกจะเกิดขึ้นน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์อันเกิดจากความขรุขระและความเสียดทานของพื้นผิวโลก การไหลของลมในระดับที่สูงขึ้นไปจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นความเร็วลมจึงมีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ที่ผิวโลกและมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพฤติกรรมการไหลอาจจำลองด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายลักษณะความเร็วลมที่ความสูงต่างๆด้วยทฤษฎีกฎยกกำลัง (Power Law) ความขรุขระและความเสียดทานของผิวโลก ยังส่งผลกระทบต่อลมพัดผ่านของลมให้มีลักษณะการไหลแบบไม่ราบเรียบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศที่ลมพัดผ่าน อนึ่งเมื่อลมปะทะกับสิ่งที่กีดขวางก็จะถ่ายเทพลังงานให้กับสิ่งกีดขวางนั้น ซึ่งการถ่ายเทพลังงาน

ของลมสามารถอธิบายพฤติกรรมได้ด้วยสมการสเปกตรัมของความเร็วม อันประกอบด้วยความถี่ ขนาด และความเร็วม เป็นต้น

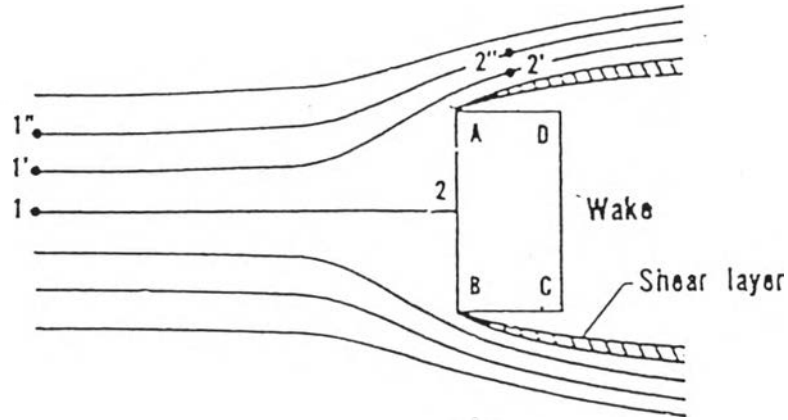
2.2.1 ทฤษฎีการไหลของลม

การเคลื่อนไหวของอากาศที่เป็นต้นตอของการเกิดลม โดยพื้นฐานเกิดจากความแตกต่างของความดัน และอุณหภูมิของอากาศระหว่างจุดสองจุดภายใต้ความสูงเดียวกัน โดยความดันอากาศในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จะน้อยกว่าความดันในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้นอากาศจะเกิดการไหลจากบริเวณที่มีความดันมากกว่าไปสู่บริเวณที่มีความดันน้อยกว่า

ด้วยลมเป็นการไหลของอากาศ จึงมีหลักการเบื้องต้นเช่นเดียวกับพฤติกรรมกรรมการไหลของของไหลโดยทั่วไป นั่นคือในช่วงเวลาหนึ่งมวลของไหลที่ไหลเข้าปริมาตรวัดขนาดหนึ่งๆ จะเท่ากับมวลของของไหลที่ไหลออกจากปริมาตรนั้น และเนื่องจากหลักการพื้นฐานนี้ทำให้ความเร็วของการไหลเมื่อไหลผ่านพื้นที่ A_2 จะมีค่าสูงกว่าเมื่อไหลผ่านพื้นที่ A_1 ที่มีพื้นที่มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การไหลของลมผ่านพื้นที่ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.7 แนวการไหลของลมเมื่อปะทะกับสิ่งกีดขวาง

ดังนั้นเมื่อลมไหลผ่านบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางเช่น อาคาร บ้านเรือน หรือโครงสร้างใดๆ จะทำให้พื้นที่หน้าตัดที่ลมจะผ่านลดลง ทำให้การไหลเปลี่ยนแปลงกระแสดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 พิจารณาแนวการไหลจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 จุด 1 เป็นจุดที่อยู่ด้านต้นลมมวลของอากาศเมื่อไหลเข้าใกล้จุดที่ 2 ความเร็วจะลดลง เมื่อถึงจุดที่ 2 ความเร็วจะเป็นศูนย์ ค่าความดันที่จุดที่ 2 นี้ สามารถคำนวณได้จากสมการการไหลของเบอร์นูลิ โดยที่ความเร็วของการไหลที่จุด 1 คือ U_1 จะเท่ากับความเร็วของการไหลที่ไม่โดนรบกวน แทนด้วย U และความดันที่จุด 1 คือ P_1 มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ แทนด้วย P_0 ดังนั้นค่าความดันที่จุดที่ 2 สามารถแสดงได้ดังนี้

ความดันที่จุดที่ 2 = ความดันที่จุดที่ 1

$$\frac{1}{2} \rho U_2^2 + P_2 = \frac{1}{2} \rho U_1^2 + P_1$$

$$P_2 - P_0 = \frac{1}{2} \rho U^2 \tag{2.28}$$

กำหนดให้ $P = P_2 - P_0$ ดังนั้นเขียนสมการที่ (2.28) ใหม่ได้ดังนี้

$$P = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2.29)$$

เมื่อ

P = ความดันเนื่องจากแรงลม

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

U = ความเร็วลม

ซึ่งสมการที่ (2.29) จะเป็นสมการพื้นฐานในการหาค่าแรงลมเมื่อรู้ค่าความเร็วลมโดยค่าความเร็วลมนี้สามารถหาได้จากการวัดตามสภาพภูมิประเทศ

2.2.2 การตรวจวัดความเร็วลม

ในการหาค่าความเร็วลมสำหรับนำไปใช้กับอาคารโครงสร้างบนผิวโลก ข้อมูลความเร็วลมที่มีประโยชน์คือความเร็วลมผิวพื้น (Surface Wind Speeds) ซึ่งทำการสังเกตในช่วงระดับความสูง 10 ถึง 30 เมตรจากระดับพื้นดิน โดยได้ข้อมูลจากสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวนทั้งหมด 73 สถานี ซึ่งตั้งกระจายอยู่ในพื้นที่ต่างๆทั่วประเทศไทย ข้อมูลที่เก็บบันทึกได้แก่ข้อมูลความเร็วลมราย 3 ชั่วโมง และข้อมูลความเร็วลมสูงสุดประจำวัน โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเร็วลมมีอยู่ 3 แบบด้วยกันคือ

ก. แบบแผ่นกระดก (Pressure Plate Anemometer) ทำงานโดยอาศัยแผ่นกระดกซึ่งสเกลบอกความเร็วเมื่อลมพัดผ่านเครื่องมือ สามารถบอกทิศทางของลมโดยการประมาณและสามารถบอกความเร็วลมโดยการเทียบกับสเกลบอกความเร็ว ปัจจุบันเครื่องมือชนิดนี้แทบไม่ได้ใช้กันแล้ว

ข. แบบท่อความดัน (Pressure Tube Anemometer) ทำงานโดยอาศัยท่อความกดอากาศและแพนหาง ทำการบันทึกความเร็วและทิศทางของลมในรูปแบบของกราฟ เครื่องมือชนิดนี้สามารถบันทึกข้อมูลได้ตลอด 24 ชั่วโมง ทำให้ได้ข้อมูลความเร็วลมที่ละเอียด แต่ปัจจุบันมีใช้อยู่เพียง 5 สถานีทั่วประเทศไทย

ค. แบบลูกถ้วย (Cup Anemometer) เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันมากที่สุดในประเทศไทย สามารถแสดงความเร็วลมได้สูงสุด 60 นีออต และทิศทางที่ลมพัดผ่านวัดได้ 360 องศา

ข้อมูลความเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ได้แก่ข้อมูลที่ทำกรเก็บความเร็วและทิศทางของลมทุกๆคาบ 3 ชั่วโมง ส่วนมากใช้เครื่องมือแบบรูปถ้วยในการเก็บข้อมูล ค่าความเร็วและทิศทางที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยที่ทำการสังเกตในช่วงเวลาประมาณ 1 - 2 นาที

ข้อมูลความเร็วสูงสุดประจำวัน ได้แก่ข้อมูลที่ทำให้การเก็บค่าความเร็วลมที่พัดผ่านสถานีที่มีค่าความเร็วสูงสุดในแต่ละวันพร้อมด้วยทิศทาง เครื่องมือที่ใช้คือเครื่องมือแบบลูกถ้วย และแบบท่อความกดอากาศ ความเร็วลมที่อ่านได้ถือเป็นค่าเฉลี่ยใน 5 วินาที

จากข้อมูลความเร็วลมและทิศทางลมที่กรมอุตุนิยมวิทยาเก็บบันทึกไว้แบ่งเป็นค่าข้อมูลความเร็วลมในแต่ละทิศทางโดยข้อมูลส่วนใหญ่แบ่งออกเป็น 16 ทิศทางดังแสดงตัวอย่างข้อมูลความเร็วลมในรูปที่ 2.8 ข้อมูลความเร็วลมที่ทำให้การเก็บบันทึกได้นี้จะเป็นค่าความเร็วลมที่วัดได้ที่มีความสูงหนึ่งๆ ค่าความเร็วลมนี้นำไปหาค่าความเร็วลมสูงสุดสำหรับนำไปใช้คำนวณออกแบบต่อไป

2.2.3 ค่าความเร็วลมสูงสุดสำหรับออกแบบและแผนที่ความเร็วลม

ค่าความเร็วลมสูงสุดเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบอาคารด้านทานแรงลม เริ่มด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูลความเร็วลมจากกรมอุตุนิยมวิทยาโดยสถานีตรวจอากาศซึ่งตั้งกระจายครอบคลุมพื้นที่อยู่เกือบทั่วประเทศไทย โดยเก็บค่าความเร็วสูงสุดแต่ละวันในแต่ละทิศทาง จำนวน 16 ทิศ จากข้อมูลความเร็วลมประจำวันดังกล่าว นำไปหาค่าปลายสุดรายปี หรือคือค่าความเร็วลมสูงสุดที่วัดได้ในแต่ละปีนั่นเอง การเก็บข้อมูลความเร็วลมโดยส่วนใหญ่จะเก็บที่ระดับความสูงประมาณ 10 เมตร แต่สำหรับบางสถานีอาจเก็บค่าความเร็วลมที่ระดับต่างกันไป ดังนั้นจึงทำการแปลงค่าความเร็วลมที่เก็บที่ความสูงต่างๆกัน เป็นค่าความเร็วลมเกรดียนท์ที่ระดับความสูงเกรดียนท์ ซึ่งเป็นระดับความสูงที่ถือว่าค่าความเร็วลมจะมีค่าคงที่แม้จะมีความสูงเพิ่มขึ้นจากความสูงเกรดียนท์ก็ตาม โดยใช้กฎยกกำลังในการคำนวณหาความเร็วลมเกรดียนท์

จากค่าความเร็วลมเกรดียนท์ที่ได้ในแต่ละปีนำไปผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ โดยใช้การกระจายค่าปลายสุดแบบที่ 1 ของ Gumbel [20] เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ $\frac{1}{\alpha_n}$ และ U_n เพื่อนำไปหาค่าความเร็วลมเกรดียนท์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในคาบ 50 ปี และ 100 ปี โดยที่ Gumbell เสนอการกระจายค่าปลายสุดแบบที่ 1 (Distribution of Extreme Value Type 1) โดยสามารถหาค่าความเร็วลมสูงสุด V ที่ใช้สำหรับออกแบบได้ดังสมการ

$$V = U_n - \left(\frac{1}{\alpha_n} \right) \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{R} \right) \right] \quad (2.30)$$

โดยที่

α_n = สัมประสิทธิ์วัดการกระจายของข้อมูล

U_n = ฐานนิยมของข้อมูล

R = คาบการกลับ (Return Period)

โดยที่ $\frac{1}{\alpha_n}$ และ U_n หาได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$\frac{1}{\alpha_n} = \frac{n \sum (R_i V_i) - \sum R_i \sum V_i}{n \sum R_i^2 - \sum R_i^2} \quad (2.31)$$

$$U_n = \frac{n \sum V_i - \frac{1}{\alpha_n} \sum R_i}{n} \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$R_i = -\ln(-\ln P(V_i))$$

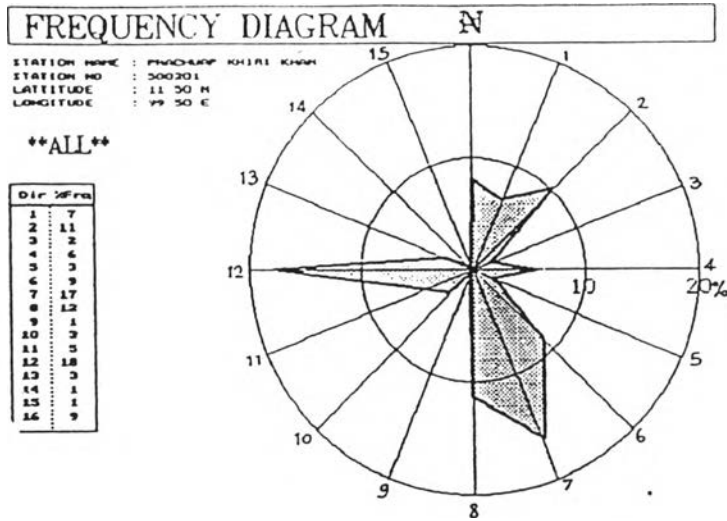
V_i = ข้อมูลความเร็วลมที่ทำการสังเกตเก็บรวบรวม เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

จากวิธีการที่แสดงคร่าวๆข้างบน นำไปหาค่าความเร็วลมสูงสุดสำหรับออกแบบของแต่ละสถานที่ที่มีการเก็บข้อมูลความเร็วลม จากค่าความเร็วลมดังกล่าวสามารถนำมาสร้างแผนที่แสดงเส้นระดับชั้นของความเร็วลมสำหรับออกแบบได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9

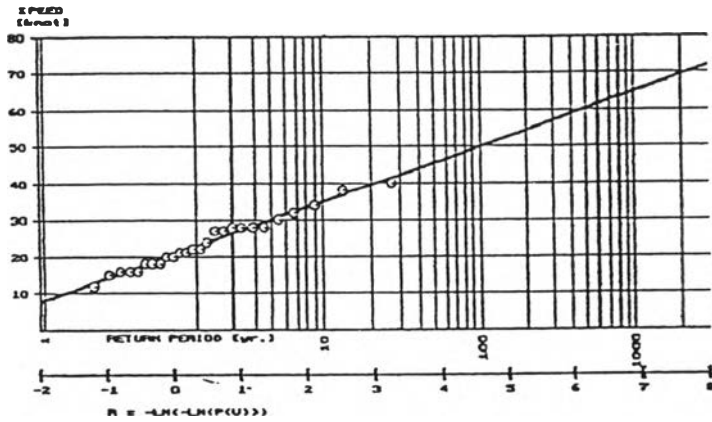
2.2.4 ค่าความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง ($\bar{U}(z)$)

เนื่องจากอากาศเป็นของไหล จากคุณสมบัติความหนืดของอากาศทำให้การเคลื่อนที่ของอากาศบริเวณที่ติดกับพื้นผิวโลกมีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์ ปรากฏการณ์เกิดขึ้นที่ชั้นการไหลของอากาศบริเวณที่ติดกับพื้นผิวโลก และได้ส่งผลกระทบต่ออากาศในชั้นถัดๆ ไปที่อยู่ติดกัน ทำให้ความเร็วลมในชั้นอากาศต่างๆมีค่าไม่คงที่ จึงทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศจะเริ่มจากค่าความเร็วที่มีค่าน้อยมากจนสามารถกำหนดได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณติดกับผิวโลก และค่อยๆเพิ่มขนาดความเร็วตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น

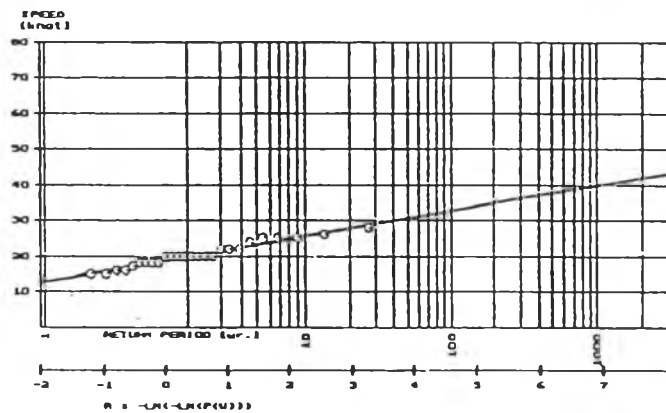
จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตามความสูงนี้เอง ทำให้มีการพิจารณาค่าความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูงซึ่งเป็นค่าความเร็วลมที่นำไปใช้ในการคำนวณหาแรงลมโดยวิธีแรงสถิติเทียบเท่าที่ความสูงต่างๆ กฎยกกำลัง เป็นสูตรที่นิยมใช้ในการคำนวณหาความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูงต่างๆ โดยกฎยกกำลังถูกเสนอเป็นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1916 โดย G. Hellman [20] เสนอว่าการกระจายความเร็วลมตามระดับความสูงสามารถเขียนอยู่ในรูปของกฎยกกำลัง



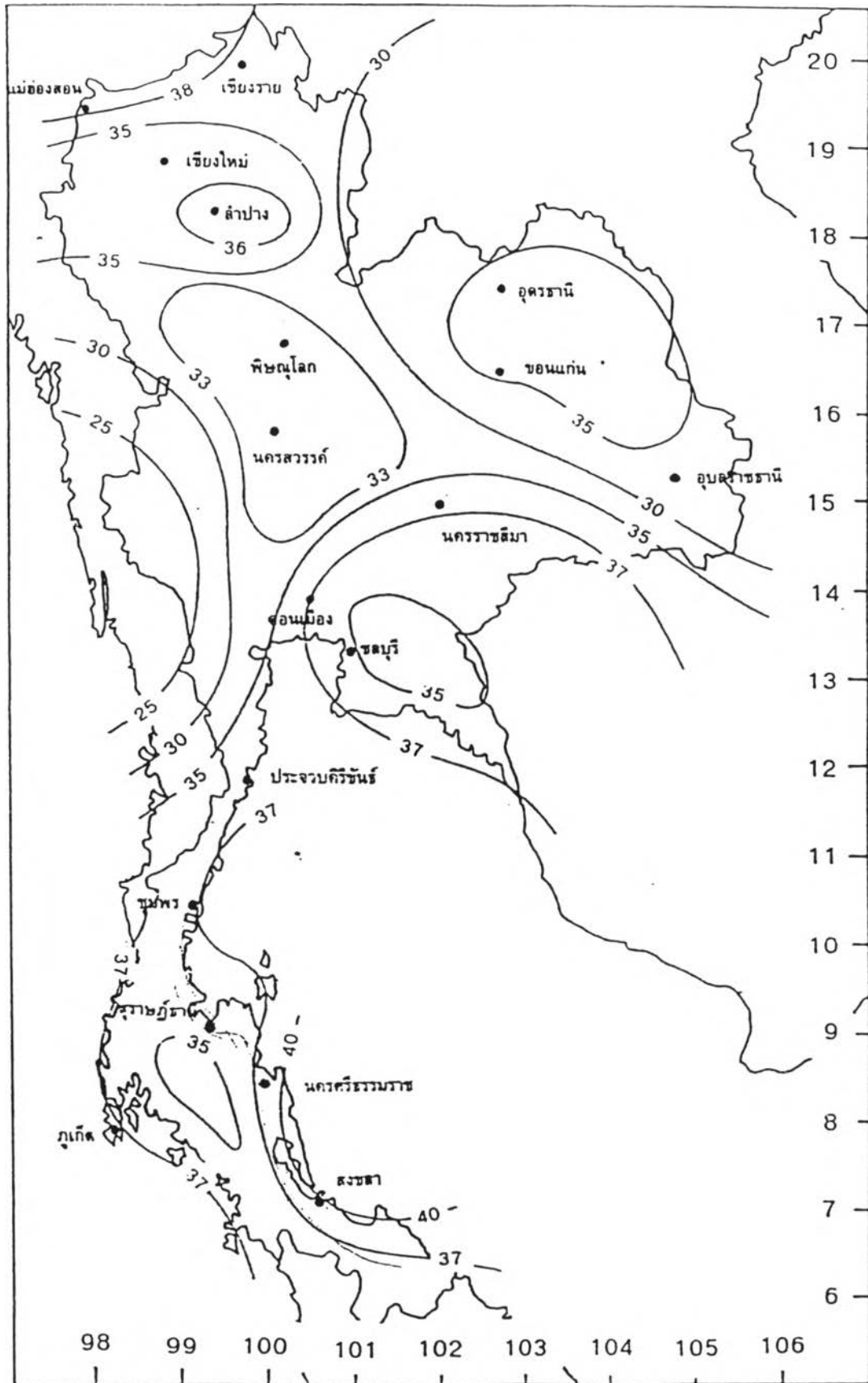
PRACHUAP KHIRI KHAN
 DIRECTION : 4
 CORR. : 0.990



PRACHUAP KHIRI KHAN
 DIRECTION : 10
 CORR. : 0.981



รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างข้อมูลความเร็วลม [2]



รูปที่ 2.9 แสดงค่าความเร็วลมเกรเดียนต์เฉลี่ยหนึ่งชั่วโมงสำหรับออกแบบ ที่คาบการกลับ 50 ปี [2]

$$\bar{U}(z) = \bar{U}(z_g) \left(\frac{z}{z_g} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2.33)$$

โดยที่

z = ความสูง (เมตร)

z_g = ความสูงเกรเดียนท์ (เมตร)

$\bar{U}(z)$ = ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง z

$\bar{U}(z_g)$ = ความเร็วลมเกรเดียนท์

α = ค่ายกกำลัง

Davenport [21] ได้ศึกษาและรวบรวมสภาพภูมิประเทศแบบต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกระจายความเร็วลมที่ระดับความสูงต่างๆ และเสนอค่าตัวเลขยกกำลัง α ว่ามีค่าคงที่ที่ความสูงเกรเดียนท์หนึ่งๆ และมีค่า α แตกต่างกันไปตามความขรุขระของภูมิประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 การคำนวณหาความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูงโดยกฎยกกำลัง เป็นสูตรที่ใช้กันทั่วไปโดยเฉพาะในข้อกำหนดในการออกแบบต้านทานแรงลมของประเทศแคนาดา (National Building Code of Canada) รวมทั้งงานวิจัยในประเทศไทยที่เกี่ยวกับเรื่องของแรงลมที่ผ่านมาก็ใช้กฎยกกำลังในการคำนวณหาความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง ดังเช่นงานวิจัยของ อุทัย ฤกษ์ศิริรัตน์ [1] เพื่อหาค่าแรงลมสถิติเทียบเท่าในการคำนวณออกแบบอาคารสูงในกรุงเทพฯ งานวิจัยของ อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พาณิชย์ [10] ศึกษาเรื่องข้อกำหนดในการออกแบบต้านทานแรงลม โดยเฉพาะงานวิจัยของ นรินทร์ เอื้อศิริวรรณ [2] ที่ศึกษาหาความเร็วลมออกแบบและหน่วยแรงลมออกแบบเสนอแนะสำหรับประเทศไทย ซึ่งความเร็วลมออกแบบที่เสนอโดยนรินทร์ เป็นความเร็วลมเกรเดียนท์ที่ใช้กฎยกกำลังในการหาค่าความเร็วลม งานวิจัยนี้ใช้ค่าความเร็วลมออกแบบที่เสนอโดยนรินทร์ ดังนั้นเพื่อความสอดคล้องในการวิจัย จึงเลือกกฎยกกำลังในการหาค่าความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของแรงกับความเร็วมดังแสดงในสมการที่ (2.29) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\bar{P}(z) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2(z) \quad (2.34)$$

เมื่อ

$\bar{P}(z)$ = ความดันเฉลี่ยเนื่องจากแรงลมที่ความสูง z

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

$\bar{U}(z)$ = ความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง z

ตารางที่ 2.1 แสดงการแบ่งลักษณะความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ,ค่าความสูงเกรเดียนท์ และค่าตัวเลขยกกำลัง [21]

แบบ	สภาพภูมิประเทศ	∞	Zg (เมตร)
1	พื้นที่ผิวราบเรียบมาก เช่นสภาพผืนน้ำเปิดกว้างโล่ง	1/8.5	245
2	พื้นที่ราบ มีสิ่งบดบังผิวหน้าขนาดต่ำ เช่น ท่งหญ้ากว้าง, ทะเลทราย	1/7.5	275
3	พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน มีสิ่งบดบังพื้นผิวขนาดใหญ่ขึ้น เช่น พื้นที่การเกษตรที่มีต้นไม้และสิ่งปลูกสร้างกระจุกกระจายห่างกันมากๆ	1/6.5	300
4	พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน มีวัดกุหรือแนวสิ่งกีดขวางทางลมขนาดเตี้ย เช่นทุ่งนาโล่งมีแนวต้นไม้เตี้ยๆ และมีสิ่งปลูกสร้างกระจุกกระจาย	1/5.5	335
5	พื้นที่ราบหรือลุ่มดอน พื้นผิวกระจายไปด้วยสิ่งกีดขวางทางลมขนาดต่างๆจำนวนมาก เช่น พื้นที่การเกษตรที่มีพื้นที่โล่งน้อย มีแนวต้นไม้กีดขวางทางลมหนาแน่นกว่าแบบที่4 หรือมีอาคารขนาด 2 ชั้นกระจุกกระจาย	1/4.5	365
6	พื้นที่ลุ่มดอนหรือพื้นที่ราบ มีสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากและสม่ำเสมอ เช่น ป่า,ป่าแคระ หรือ อุทยานป่า	1/3.5	410
7	พื้นที่กระจายเต็มไปด้วยสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่ เช่น พื้นที่ในเมือง หรือบริเวณรอบๆเมืองขนาดใหญ่ๆ	1/3	460
8	พื้นที่เต็มไปด้วยสิ่งกีดขวางทางลมขนาดใหญ่โตมาก เช่น บริเวณใจกลางเมืองหลวงขนาดใหญ่	1/2.5 - 1/1.5	550

2.2.5 สัมประสิทธิ์ของแรงลม

ลักษณะรูปร่างของโครงสร้างมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของลม ทำให้หน่วยแรงดันที่กระทำต่อโครงสร้างเนื่องจากแรงลม มีความแตกต่างกันตามสภาพลักษณะสิ่งกีดขวางการไหลของลม ลมไหลผ่านโครงสร้างที่มีลักษณะกลมมนได้ง่ายกว่าโครงสร้างที่มีลักษณะรูปเหลี่ยม ทำให้โครงสร้างที่ต้านลมมากกว่าจะรับแรงกระทำเนื่องจากลมมากกว่า ผลกระทบจากลักษณะรูปร่างของสิ่งกีดขวางต่อการไหลของลม ทำให้มีการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ของลม โดยส่วนใหญ่เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม สำหรับโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม จะมีค่าสัมประสิทธิ์ในด้านปะทะลมเท่ากับ 0.8 ที่ทุกระดับความสูง และด้านหลบลมมีค่าเท่ากับ -0.5 ที่ทุกระดับความสูงเช่นเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วลมนี้เป็นค่าที่ใช้คูณปรับเพื่อหาค่าความดันเนื่องจากลมตามลักษณะรูปร่างของโครงสร้าง ดังนั้นสมการที่ (2.34) สามารถเขียนใหม่โดยรวมค่าสัมประสิทธิ์แรงลมได้ดังนี้

$$\bar{P}(z) = \frac{1}{2} \rho C_D \bar{U}^2(z) \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$C_D = \text{สัมประสิทธิ์ของแรงลม}$$

สมการที่ (2.35) เป็นสมการพื้นฐานในการแปลงความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง z มาเป็นความดันเฉลี่ยที่ความสูง z ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาค่าแรงกระทำต่อโครงสร้างเนื่องจากลม โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าต่อไป

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับแรงแผ่นดินไหว

2.3.1 กลไกการเกิดแผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว คือ ความสั่นสะเทือนของพื้นดินที่กระจายมาจากศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว อันมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่อย่างฉับพลันของเปลือกโลก โดยปกติเปลือกโลกมักอยู่ในภาวะกดกันอยู่ตลอดเวลาซึ่งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ปริมาตร ความเค้นที่สะสมอยู่ในเปลือกโลก เป็นสาเหตุทำให้เกิดการบิดงอ คดโค้ง และแตกหักของชั้นหิน ซึ่งเมื่อชั้นหินแตกออกเป็นแนวทำให้เกิดรอยเลื่อน (Fault) ซึ่งการแตกหักหรือการเคลื่อนที่อย่างฉับพลันของรอยเลื่อนนี้เองที่เป็นสาเหตุของการเกิดแผ่นดินไหว

ชั้นของเปลือกโลกประกอบขึ้นจากแผ่นพื้นหินขนาดใหญ่โดยมีการสำรวจและประมาณว่าชั้นของเปลือกโลกประกอบด้วยชั้นของแผ่นหินประมาณ 20 แผ่น ทับถมกันอยู่เหนือหินร้อนที่หลอมละลาย แผ่นหินเหล่านี้มีการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ ด้วยแรงดันจากกระแสการไหลตัวของหินร้อนที่หลอมเหลวอยู่ข้างใต้แผ่นชั้นหิน การเคลื่อนตัวนี้ก่อให้เกิดแรงมหาศาลตามบริเวณรอยต่อของแผ่นหิน เกิดการสะสมค่าความเค้นและความเครียดขึ้นในบริเวณรอยต่อนี้อย่างช้าๆ และเมื่อค่าความเครียดมีค่าสูงถึงจุดที่ความแข็งแรงของเนื้อหินจะต้านทานได้ก็จะเกิดการแตกหักของชั้นหิน เมื่อเกิดการแตกหักของหินที่จุดหนึ่งจุดใดค่าความเครียดที่บริเวณนั้นจะลดตัวลงอย่างฉับพลัน ส่งผลให้ค่าความเครียดสัมพัทธ์ที่บริเวณใกล้เคียงมีค่าสูงขึ้น และเกิดการแตกหักต่อเนื่องกันไป การแตกหักดังกล่าวมักเกิดขึ้นตามรอยเลื่อน (Fault) ที่มีอยู่ ขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจะแปรผันกับความรุนแรงและการแตกหักต่อเนื่องของแผ่นหิน ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปริมาณการสะสมพลังงานในบริเวณรอยต่อนั้นๆ ดังนั้นแผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่จะมีความเวลาเฉลี่ยในการเกิดซ้ำ (Return Period) ที่ยาวนานกว่าการเกิดแผ่นดินไหวขนาดเล็ก เพราะต้องใช้ระยะเวลาในการสะสมพลังงานนานกว่า

จากลักษณะกลไกการเกิดแผ่นดินไหว และความซับซ้อนและไม่สม่ำเสมอของลักษณะรอยต่อตามสภาพความเป็นจริงของลักษณะผิวโลกทำให้การวิเคราะห์หาตำแหน่ง ขนาด และเวลาที่ จะเกิดแผ่นดินไหวเป็นไปได้ยาก แต่จากลักษณะของกลไกการเกิดแผ่นดินไหวทำให้สามารถบอกได้ว่า ตำแหน่งของการเกิดแผ่นดินไหวเกือบทั้งหมดจะอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นชั้นหิน หรือพอจะเรียกได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ซึ่งสามารถแบ่งเป็นเขตกำเนิดย่อยลงไปได้อีกตามลักษณะความคล้ายคลึงทางโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหว และสามารถแบ่งได้ตามลักษณะรูปแบบการเคลื่อนตัวและการจัดวางตัวของแผ่นพื้นหิน รวมถึงประวัติและความถี่ในการเกิดแผ่นดินไหวในบริเวณนั้นๆ ดังนั้น ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถพยากรณ์ได้ว่าแผ่นดินไหวจะเกิดขึ้นเมื่อใด แต่เราก็สามารถรู้ได้ว่าบริเวณพื้นที่ใดมีโอกาสที่จะเกิดแผ่นดินไหวได้บ้าง

2.3.2 การวัดขนาดของแผ่นดินไหว

ขนาดของแผ่นดินไหวคือค่าพลังงานแผ่นดินไหวที่ปล่อยออกมา โดยวัดค่าความรุนแรงเป็นหน่วย ริคเตอร์ (Richter) ขนาดของแผ่นดินไหวแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Body Magnitude (MB) และ Local Magnitude (ML) โดยในปี 1956 Gutenberg และ Richter [22] ได้เสนอสูตรสำหรับคำนวณหา Body Magnitude ดังนี้

$$MB = \log\left(\frac{A}{T}\right) + Q(\Delta, h) \quad (2.36)$$

เมื่อ

T = คาบของการสั่น

A = แอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ของคลื่น

Δ = ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด

h = ความลึก

ในการวิเคราะห์ค่าขนาดของแผ่นดินไหวส่วนใหญ่จะใช้ค่า Local Magnitude (ML) โดยค่าของ Body Magnitude (MB) กับ Local Magnitude (ML) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$ML = MB + 0.4(MB - 6) \quad (2.37)$$

สำหรับการข้อมูลขนาดแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยที่มีการบันทึกไว้นั้นมีค่าค่อนข้างน้อยแต่อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ. 1985 ดร. ปริญญาและคณะ [11] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหวที่มีการบันทึกในประเทศไทยโดยกรมอุตุนิยมวิทยา และจากสถานีวัดต่างๆในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1910 - 1983 ซึ่งทำการเก็บบันทึกไว้โดยองค์กรต่างๆเช่น UNESCO, USGS, NOAA, ISS, UNDP เป็นต้น และได้เสนอเป็นแผนที่แสดงตำแหน่งและขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นข้อมูลขนาดของแผ่นดินไหวที่นำไปใช้วิเคราะห์ต่อไป

2.3.3 ค่าอัตราเร่งสูงสุดและแผนที่ความเร่งสูงสุด

การวิเคราะห์ค่าอัตราเร่งสูงสุดเพื่อนำไปใช้เป็นค่าอัตราเร่งสำหรับออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ทำได้โดยนำข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวที่เก็บได้มาผ่านกระบวนการวิเคราะห์ดังแสดงเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

2.3.3.1 แบบจำลองหาอัตราเร่งที่ลดลงตามระยะทาง

ความเร่งของแผ่นดินไหวมีขนาดลดลงตามระยะทางที่คลื่นแผ่นดินไหวกระจายออกไปจากแหล่งกำเนิด ความเร่งของแผ่นดินไหวที่ระยะห่างจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหว สามารถหาได้จากแบบจำลองสำหรับอัตราเร่งที่มีขนาดลดลงตามระยะทาง (Attenuation Model) ดังนี้

$$\log A = b_1 + b_2 M + b_3 \log(R + b_4) \quad (2.38)$$

โดยที่

- A = ค่าอัตราเร่งแผ่นดินไหว
 $b_1 - b_4$ = ค่าคงที่ๆขึ้นอยู่กับข้อมูลแผ่นดินไหวในพื้นที่นั้นๆ
 M = ขนาดของแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็นริกเตอร์
 R = ระยะห่างจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหว

จากสมการอัตราเร่งที่มีขนาดลดลงตามระยะทางดังกล่าวเมื่อประกอบกับข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริง ทำให้สามารถหาค่าคงที่ $b_1 - b_4$ ได้และได้มีการเสนอค่าสมการที่แตกต่างกันออกไปยกตัวอย่างเช่น

Esteva

$$A = \frac{5600e^{0.8M}}{(R + 40)^2} \quad (2.39)$$

Oliveira

$$A = \frac{1230e^{0.8M}}{(R + 25)^2} \quad (2.40)$$

McGuire

$$A = \frac{(472.3)10e^{278M}}{(R + 25)^{1.301}} \quad (2.41)$$

Katayama

$$\log A = 2.308 - 1.637 \log(R + 30) + 0.411M \quad (2.42)$$

จากการวิจัยของ ดร.ปริญญา [11] พบว่าแบบจำลองของ Esteva ให้ค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับค่าอัตราเร่งที่วัดได้จากสถานที่วัดแผ่นดินไหวที่เขื่อนศรีนครินทร์ และเขื่อนเขาแหลม และในปี พศ. 2539 ปณีธาน และนพค [14] ก็เลือกใช้แบบจำลองของ Esteva ดังกล่าวเพื่อเป็นแบบจำลองสำหรับหาค่าความเร่งแผ่นดินไหวที่ลดลงตามระยะทาง ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าความเร่งแผ่นดินไหวที่ได้จากงานวิจัยของ นพค จึงใช้แบบจำลองของ Esteva ในการหาอัตราเร่งที่ลดลงตามระยะทาง

2.3.3.2 ความถี่ของการเกิดแผ่นดินไหวและการวิเคราะห์ความถดถอย

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของความเร่งที่มีขนาดมากกว่าความเร่ง A เฉลี่ยต่อปี (Annual Mean Rate of Occurrence) กับค่าความเร่ง A แสดงได้ดังนี้

$$\log v = b + a \log A \quad (2.43)$$

เมื่อ

v = อัตราการเกิดของความเร่งที่มีขนาดมากกว่าความเร่ง A เฉลี่ยต่อปี

b, a = ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลถดถอย ของข้อมูลความเร่งแผ่นดินไหวที่มีการบันทึกเอาไว้

2.3.3.3 ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดแผ่นดินไหว

ค่าความน่าจะเป็นของค่าเกิน (Probability of Exceedance P_e) มีค่าเท่ากับ v ในกรณีที่ v มีค่าน้อยๆ

$$P_e = v \quad (2.44)$$

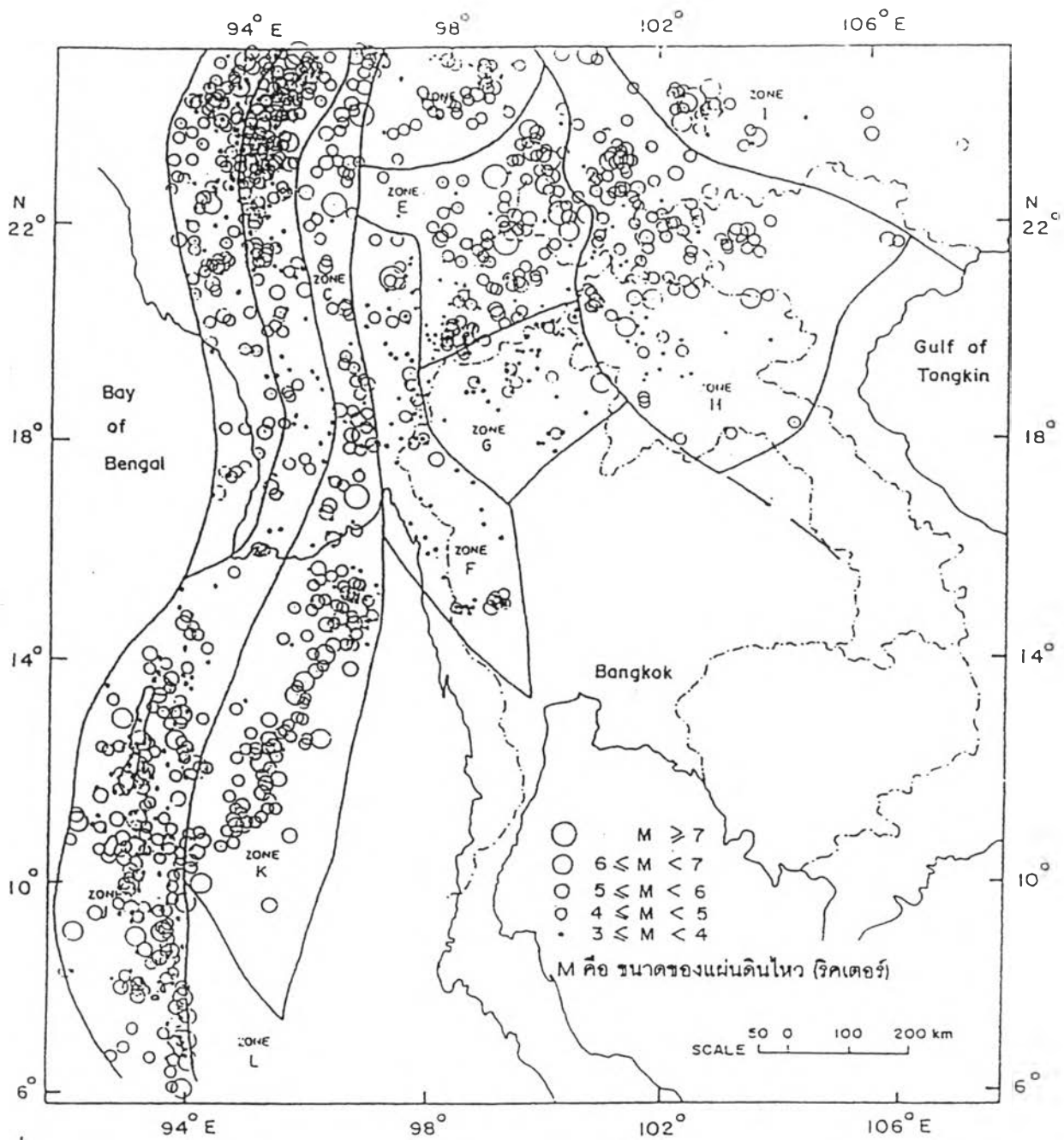
ถ้า P_e คือความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวไม่เกินค่าหนึ่งๆ สำหรับ โครงสร้างที่มีอายุการใช้งาน ดังนั้นโอกาสของการเกิดแผ่นดินไหวไม่เกินค่าหนึ่งๆ สำหรับ โครงสร้างที่มีอายุการใช้งาน T_s ปี

$$\begin{aligned} Q &= (1 - P_e)^{T_s} \\ &= (1 - v)^{T_s} \end{aligned} \quad (2.45)$$

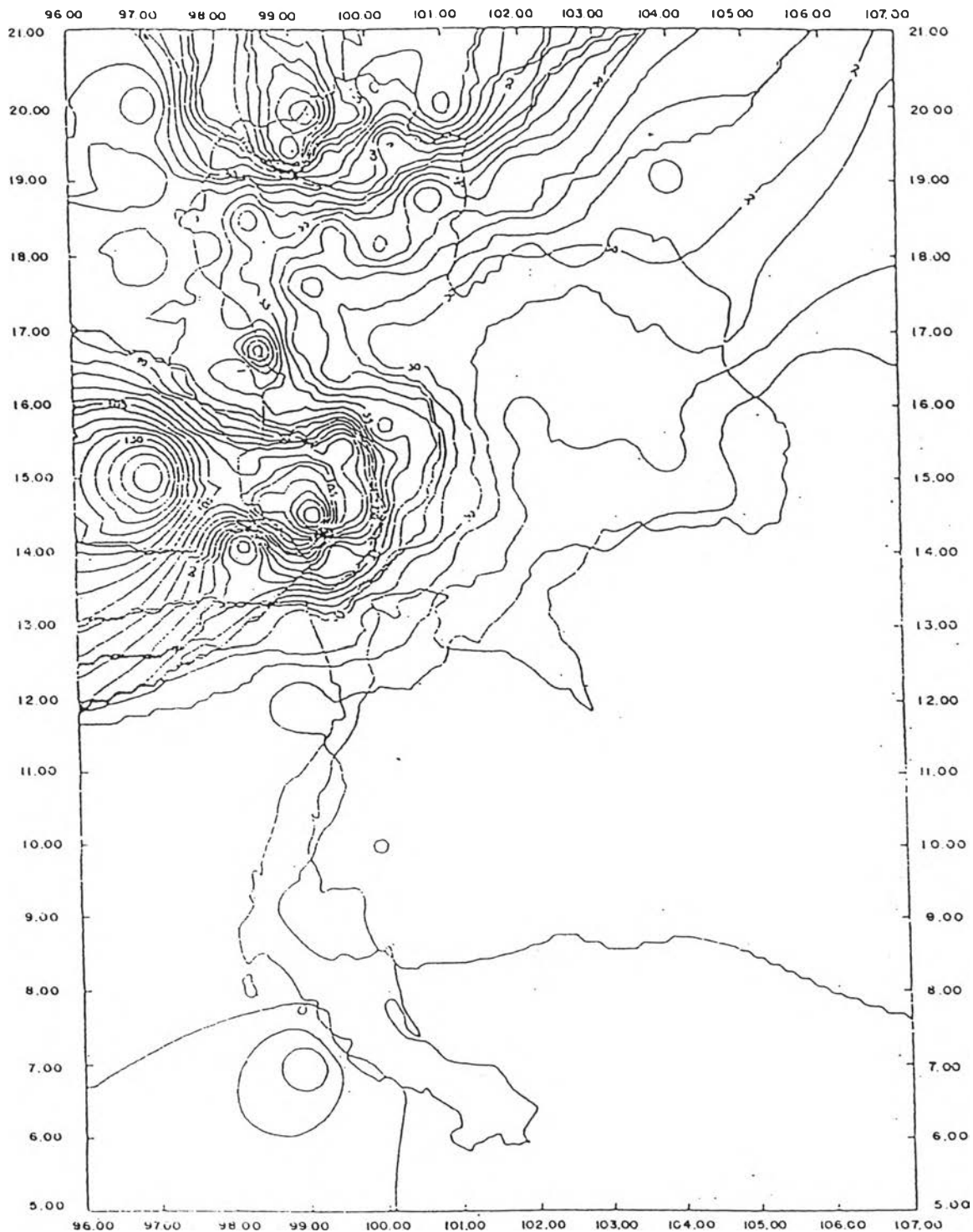
ค่า Q คือค่าฟังก์ชันการกระจายสะสม (Cumulative Distribution Function) หรือโอกาสของการเกิดแผ่นดินไหวไม่เกินค่าหนึ่งๆ สำหรับโครงสร้างที่มีอายุการใช้งาน T_s ปี

แทนสมการที่ 2.43 ลงในสมการที่ 2.45

$$\begin{aligned} Q &= [1 - 10^{a \log .1 + b}]^{T_s} \\ &= [1 - A^a 10^b]^{T_s} \end{aligned} \quad (2.46)$$



รูปที่ 2.10 แผนที่แสดงตำแหน่งและขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 80 ปี
(คศ. 1910 - 1989)



รูปที่ 2.11 แผนที่แสดงเส้นชั้นอัตราเร่งของค่าอัตราเร่งสูงสุดบวกค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน [14]

2.3.3.4 การหาค่าอัตราเร่งสูงสุด

จากวิธีการจำลองการเกิดแผ่นดินไหวตามวิธี มอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) โดยการสุ่มตัวเลขจาก 0 - 1 จำนวน 1000 ครั้ง โดยค่าตัวเลขที่สุ่มได้แต่ละครั้ง สมมติให้เป็นค่า Q แทนค่า $Q = a b T_s$ ลงในสมการที่ 5 เพื่อหาค่าความเร่ง A ก็จะได้ค่าความเร่ง 1000 ค่านำค่าความเร่งเฉลี่ยจาก 1000 ค่า บวกกับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อนำไปใช้เป็นค่าความเร่งสูงสุดสำหรับอายุใช้งานของโครงสร้าง T_s ความน่าจะเป็นในการเกิดความเร่งไม่เกินค่าความเร่งสูงสุด สามารถหาได้จากข้อมูลความเร่งจำนวน 1000 ครั้ง

จากขั้นตอนดังแสดงข้างบนจะได้ค่าอัตราเร่งสูงสุดเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าแรงแผ่นดินไหวสำหรับออกแบบโครงสร้างต่อไป จากวิธีหาค่าอัตราเร่งสูงสุดดังกล่าว ในปี พ.ศ. 2539 นพดล คูหาที่สนะตีกุล [14] วิเคราะห์ข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวและสร้างแผนที่เส้นชั้นขนาดของอัตราเร่งที่ผิวดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยเสนอค่าอัตราเร่งเฉลี่ยบวกค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดที่อาจจะเกิดขึ้นในประเทศไทยมีค่าเท่ากับ 140 gals หรือ 0.14 g เมื่อ g คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก และมีค่าความน่าจะเป็นในการเกิดประมาณ 84 เปอร์เซ็นต์ ในอายุการใช้งาน 50 ปี

2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์

จากทฤษฎีพื้นฐานทางพลศาสตร์เบื้องต้นที่แสดงอยู่ในหัวข้อที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าชนิดของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเป็นตัวกำหนดวิธีในการวิเคราะห์โครงสร้าง แรงลม และแรงแผ่นดินไหวเป็นแรงทางพลศาสตร์ การวิเคราะห์โครงสร้างจึงต้องใช้วิธีพลศาสตร์ และเนื่องจากแรงลม แรงแผ่นดินไหว เป็นลักษณะแรงแบบสุ่ม (Random Load) ในขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์จึงต้องกำหนดรูปแบบสมการของแรงเพื่อใช้หาค่าแรงที่เวลาต่าง เมื่อได้ค่าแรงกระทำที่แปรเปลี่ยนตามเวลาแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์กับโครงสร้างต่อไป การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จ SAP90 เพื่อใช้ช่วยในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ โดยแสดงรูปแบบในการวิเคราะห์ได้ดังนี้

2.4.1 การหาค่าแรงลมเพื่อใช้คำนวณโดยวิธีพลศาสตร์

หน่วยแรงลมที่กระทำต่ออาคารสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$P(z) = \frac{1}{2} \rho C_D U^2(z) \quad (2.47)$$

โดยที่

$$U(z, t) = \bar{U}(z) + u(z, t) \quad (2.48)$$

เมื่อ

$\bar{U}(z)$ = ค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง z

$u(z, t)$ = ความเร็วลมส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความเร็วลมเฉลี่ย

แทนสมการที่ (2.48) ลงในสมการที่ (2.47) ได้

$$P(z) = \frac{1}{2} \rho C_D [\bar{U}(z) + u(z, t)]^2 \quad (2.49)$$

ค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง z สามารถหาได้จากสูตรยกกำลัง ส่วนค่าความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าเฉลี่ย $u(z, t)$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสเปกตรัมของความเร็วลม ($S(n)$) โดยกำหนดให้

$$u(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(\omega_i t - \theta_i) \quad (2.50)$$

โดยที่

$u(z, t)$ = ค่าความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง z

ใดๆซึ่งมีค่าไม่เท่ากันที่เวลาต่างๆ

ω_i = ความถี่เชิงมุม

a_i = ค่าแอมพลิจูดของสมการที่ความถี่เชิงมุม ω_i

θ_i = มุมเปลี่ยนแปลง

กำหนดให้สมการที่ (2.50) เป็นสมการที่ไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยของสมการที่ (2.50)

คือ

$$E[x(t)] = \sum_{i=1}^{\infty} a_i E[\cos(\omega_i t - \theta_i)] = 0 \quad (2.51)$$

ดังนั้น

$$E[\cos \theta_i] = \int_0^{2\pi} \cos\left(\frac{1}{2\pi}\right) d\theta_i = 0 \quad (2.52)$$

ค่าเฉลี่ยยกกำลังสองเท่ากับ

$$E[x^2(t)] = E\left[\sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(\omega_i t - \theta_i) \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cos(\omega_j t - \theta_j)\right] \quad (2.53)$$

กรณีที่ $i \neq j$

$$\begin{aligned} E\left[a_i \cos(\omega_i t - \theta_i) a_j \cos(\omega_j t - \theta_j)\right] &= a_i a_j E[\cos(\omega_i t - \theta_i)] \\ &\quad \times E[\cos(\omega_j t - \theta_j)] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.54)$$

กรณีที่ $i = j$

$$\begin{aligned} E\left[a_i \cos(\omega_i t - \theta_i) a_j \cos(\omega_j t - \theta_j)\right] &= a_i^2 E[\cos^2(\omega_i t - \theta_i)] \\ &= a_i^2 \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi} \cos^2(\omega_i t - \theta_i) d\theta_i \\ &= \frac{a_i^2}{2} \end{aligned} \quad (2.55)$$

ดังนั้น

$$E[x^2(t)] = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i^2}{2} \quad (2.56)$$

จาก

$$E[x^2(t)] = \sum_{i=1}^{\infty} S(\omega_i) \Delta\omega_i \quad (2.57)$$

จากสมการที่ (2.56) และสมการที่ (2.57)

$$\begin{aligned}\frac{a_i^2}{2} &= S(\omega_i) \Delta\omega_i \\ a_i^2 &= 2S(\omega_i)\Delta\omega_i \\ a_i &= \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega_i}\end{aligned}\quad (2.58)$$

แทนสมการที่ (2.58) ลงในสมการที่ (2.50)

$$u(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2S_u(\omega_i) \Delta\omega_i} \cos(\omega_i t - \theta_i) \quad (2.59)$$

สมการที่ (2.59) เป็นสมการที่ใช้แปลงค่าสเปกตรัมความเปลี่ยนแปลงของความเร็วลม $S_u(\omega)$ ให้มาอยู่ในรูปของค่าความเร็วลมที่เวลาต่างๆ แทนค่าความเร็วลมที่เวลาต่างๆ ที่หาได้จากสมการที่ (2.59) ลงในสมการที่ (2.49) ก็จะได้ค่าหน่วยแรงลมที่กระทำต่ออาคาร โครงสร้างที่เวลาต่างๆ จากนั้นทำการแปลงค่าหน่วยแรงลมให้เป็นแรง โดยคูณค่าความดันที่ได้ด้วยบริเวณพื้นที่ที่รับแรง ก็จะได้แรงลมที่กระทำต่ออาคารซึ่งเป็นแรงทางพลศาสตร์ ดังนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงลมได้ดังนี้

$$F(z) = \frac{1}{2} \rho C_D U^2(z) A \quad (2.60)$$

$$F(z, t) = \frac{1}{2} \rho C_D (\bar{U}(z) + u(z, t))^2 A \quad (2.61)$$

แทนค่า $u(z, t)$ ในสมการที่ (2.59) ลงในสมการที่ (2.61)

$$F(z, t) = \frac{1}{2} \rho C_D \left(\bar{U}(z) + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2S_u(\omega_i) \Delta\omega_i} \cos(\omega_i t - \theta_{ix}) \right)^2 A \quad (2.62)$$

เมื่อ

$$A = \text{พื้นที่ผิวของอาคารที่ต้านทานแรงลม}$$

ดังนั้นค่าแรงลมสำหรับที่เป็นแรงพลศาสตร์สำหรับคำนวณโดยวิธีพลศาสตร์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.62)

2.4.2 แรงแผ่นดินไหวเพื่อใช้ในการคำนวณโดยวิธีพลศาสตร์

แรงกระทำต่อโครงสร้างเนื่องจากแผ่นดินไหวมีต้นกำเนิดมาจากคลื่นแผ่นดินไหว คลื่นแผ่นดินไหวสามารถจำลองขึ้นโดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยค่าความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวที่เวลาใดๆ คือค่าผลรวมของฟังก์ชันคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave) จำนวน n คลื่น โดยมีค่าความถี่เชิงมุมแตกต่างกันออกไป

$$\ddot{y}_g(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (2.63)$$

โดยที่

$\ddot{y}_g(t)$ = ค่าความเร่งของแผ่นดินไหวที่เวลา t

A_i = ขนาดของความเร่งในฮาร์โมนิกที่ i

ω_i = ความถี่เชิงมุมที่ฮาร์โมนิกที่ i

ϕ_i = มุมเฟส (Phase Angle)

การจำลองคลื่นแผ่นดินไหว นิยมใช้โปรแกรม Simquake ในการสร้างคลื่นแผ่นดินไหวโดยมีลักษณะสมบัติ (Characteristic) ของคลื่นแผ่นดินไหวซึ่งกำหนดด้วยฟังก์ชันเพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตี (Power Spectral Density) ดังนี้

$$G(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)]^2 + 4\xi_g^2 (\omega/\omega_g)^2} G_0 \quad (2.64)$$

โดยที่

G_0 = ค่าวัดความเร่งของการสั่นไหว

ω_g = ความถี่เด่นของชั้นดินแข็ง

ξ_g = ความหน่วงของชั้นดินแข็ง

จากค่าฟังก์ชันเพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตี และค่าอัตราเร่งสูงสุดที่ใช้สำหรับออกแบบใน ทำให้สามารถจำลองคลื่นแผ่นดินไหวได้ โดยอาศัยโปรแกรม Simquake ดังกล่าว และการวิเคราะห์

ค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองของโครงสร้างสามารถหาได้จากสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างดังนี้

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F(t) \quad (2.65)$$

จากสมการของนิวตัน

$$\begin{aligned} F(t) &= ma(t) \\ &= m\ddot{y}_g(t) \end{aligned} \quad (2.66)$$

ดังนั้น

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = m\ddot{y}_g(t) \quad (2.67)$$

จากสมการข้างบน พิจารณาค่าทางด้านขวาของสมการซึ่งแทนค่าแรงที่กระทำต่อโครงสร้างนั้นแสดงอยู่ในรูปของค่าอัตราเร่งที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่าอัตราเร่งดังกล่าวสามารถเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา หรือป้อนข้อมูลเป็นค่าความเร่งที่เวลาต่างๆ (Time History) ซึ่งวิธีหลังเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เรื่องแผ่นดินไหว โดยใช้ค่าคลื่นความเร่งแผ่นดินไหวที่จำลองได้เป็นค่าแรงที่ใส่เข้าไปในด้านขวาของสมการที่ (2.67) และจากสมการที่ (2.67) สามารถเขียนผลเฉลยได้ดังนี้

$$y(t) = \frac{1}{\omega_0} \int_0^t \ddot{y}_g(\tau) e^{-c\omega(t-\tau)} \sin\omega(t-\tau) d\tau \quad (2.68)$$

ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวตอบสนองของโครงสร้างสามารถหาได้จากสมการที่ (2.68) ค่าความเร็ว และค่าความเร่งตอบสนองก็สามารถหาได้ โดยการดิฟเฟอเรนทิเอตสมการที่ (2.68) เทียบกับเวลา