

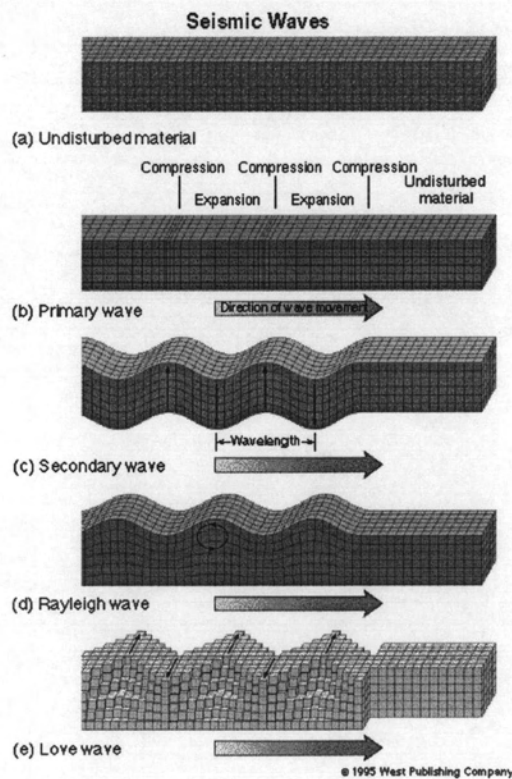
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นดินไหว

การสั่นสะเทือนที่เกิดจากคลื่นในตัวกะทันหันของผิวโลกทำให้อนุภาคของดินเคลื่อนตัวเป็น 3 มิติ คือมีการเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวตั้ง ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหว (seismometer) เมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะเกิดคลื่น 2 ชนิดคือ

- 1) คลื่นภายในโลก (body wave) เป็นคลื่นที่เดินทางจากจุดกำเนิดไปภายในโลก โดยประกอบด้วยคลื่น P (primary wave) ซึ่งทำให้อนุภาคดินเกิดการอัดตัวขยายตัวในทิศทางที่คลื่นเดินทาง และคลื่น S (secondary wave) ซึ่งทำให้อนุภาคดินส่ายตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นเดินทาง (รูปที่ 2.1) โดยคาบของคลื่นนี้อยู่ที่ประมาณ 0.01 – 50 s
- 2) คลื่นพื้นผิว (surface wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนตัวไปบนพื้นผิวโลกเท่านั้น จำแนกออกได้เป็นคลื่น เรย์เล และคลื่นเลิฟ (รูปที่ 2.1) โดยคลื่นประเภทนี้มีคาบประมาณ 10-350 s



รูปที่ 2.1 คลื่นแผ่นดินไหวประเภทต่างๆ (จาก <http://www.darylscience.com>)

ขนาด (magnitude) เป็นปริมาณที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่พื้นโลกปลดปล่อยออกมาในรูปของการสั่นสะเทือน คำนวณได้จากการตรวจวัดค่าความสูงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือตรวจแผ่นดินไหว เป็นปริมาณที่บ่งชี้ขนาด ณ บริเวณจุดศูนย์กลาง ขนาดที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีด้วยกันหลายมาตราได้แก่

มาตราคลื่นท้องถิ่น (local magnitude; ML) เป็นขนาดแผ่นดินไหวในยุคเริ่มแรก บ่งบอกถึงปริมาณของแผ่นดินไหวท้องถิ่นหรือแผ่นดินไหวระยะใกล้ (ระยะทางน้อยกว่า 1,000 กิโลเมตร) คำนวณได้จากความสูงของคลื่นซึ่งตรวจด้วยเครื่องมือตรวจความสั่นสะเทือนแบบวัดการขจัด (displacement) ได้แก่เครื่อง Wood Anderson ซึ่งมีกำลังขยาย 2,800 เท่า หน่วยขนาดนี้นำเสนอโดย C.F. Richter นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา ดังนั้นหน่วยของขนาด ML ที่ใช้จึงเป็น "ริคเตอร์" โดยนำค่าของความสูงของคลื่นที่สูงที่สุดของคลื่น S ซึ่งมีช่วงคลื่นอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 วินาทีมาใช้ในการคำนวณค่าของ ML จะเริ่มอิมตัวที่ 6.5

มาตราคลื่นหลัก (body wave magnitude; mb) แสดงขนาดของเหตุการณ์แผ่นดินไหวทั้งใกล้และไกล (ระยะทางมากกว่า 1,000 กิโลเมตร) เรียกว่าขนาดของคลื่นหลัก (body-wave magnitude) ในการคำนวณใช้คลื่นหลักได้แก่คลื่น P ที่มีความยาวช่วงคลื่นประมาณ 1.0-5.0 วินาที ค่าของ mb จะเริ่มอิมตัวที่ 5.5 และจะอิมตัวที่ 6.0

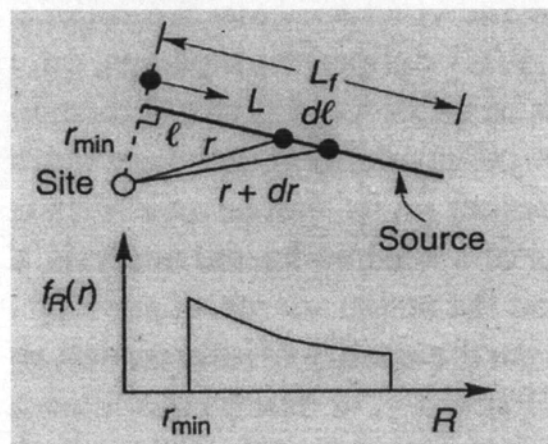
มาตราคลื่นผิวพื้น (surface wave magnitude; M_s) แสดงขนาดของเหตุการณ์แผ่นดินไหวไกลและมีขนาดใหญ่ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าขนาดคลื่นผิวพื้น (surface-wave magnitude) ในการคำนวณใช้คลื่นผิวพื้นที่มีความยาวช่วงคลื่นประมาณ 18-22 วินาที ค่าของ M_s จะเริ่มอิมตัวที่ 7.25 และจะอิมตัวที่ 8.0

มาตราขนาดโมเมนต์ (moment magnitude; M_w) เป็นปริมาณที่แสดงถึงปริมาณพลังงานของคลื่นแผ่นดินไหวได้ดีกว่าขนาดชนิดอื่น สามารถวิเคราะห์ได้จาก โมเมนต์แผ่นดินไหว (seismic moment; M_0) โดยที่ M_0 สามารถคำนวณได้จากหลายวิธีเช่น จากการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวซึ่งค่อนข้างซับซ้อน หรือจากการสำรวจทางธรณีวิทยาเพื่อหาผลคูณของการขจัดของรอยเลื่อนเมื่อเกิดแผ่นดินไหว (fault displacement) ส่วนใหญ่ขนาด M_w ใช้สำหรับกรณีแผ่นดินไหวไกลที่มีขนาดใหญ่

2.2 การวิเคราะห์ภัยแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น

การวิเคราะห์ภัยแผ่นดินไหวด้วยวิธีความน่าจะเป็น (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) เป็นวิธีที่ถูกพัฒนาโดย Cornell (1968) และ Algermissen และคณะ (1982) วิธีการวิเคราะห์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้ (Kramer, 1996)

1) เตรียมข้อมูล โดยระบุคุณสมบัติต่างๆ ของข้อมูลแผ่นดินไหวและแหล่งกำเนิด ทั้งขนาดเวลาและพิภพ แล้วแบ่งข้อมูลเหล่านั้นออกเป็นเซตๆ ตามความรุนแรงและความถี่ในการเกิดแผ่นดินไหว แล้วหาความน่าจะเป็นของระยะทางจากสถานีวัดถึงแหล่งกำเนิดตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การหาค่าความน่าจะเป็นของระยะทางจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว

จากรูปที่ 2.2 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดแผ่นดินไหวในแหล่งกำเนิดช่วง l ถึง $l + dl$ จะมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นที่ระยะ r ถึง $r + dr$

$$f_L(l)dl = f_R(r)dr \quad (2.1)$$

$$f_R(r) = f_L(l) \frac{dl}{dr} \quad (2.2)$$

$$l^2 = r^2 - r_{\min}^2 \quad (2.3)$$

$$f_R(r) = \frac{r}{L_f \sqrt{r^2 - r_{\min}^2}} \quad (2.4)$$

โดยที่ $f_L(l)$ คือความน่าจะเป็นของระยะทางจากจุดที่เกิดแผ่นดินไหวถึงจุดบนแหล่งกำเนิดที่ใกล้สถานีวัดที่สุด

$f_R(r)$ คือความน่าจะเป็นของระยะทางจากแหล่งกำเนิดที่จะเกิดแผ่นดินไหว

L_f คือความยาวของแหล่งกำเนิด

l คือระยะทางจากจุดที่เกิดแผ่นดินไหวถึงจุดบนแหล่งกำเนิดที่ใกล้สถานีวัดที่สุด

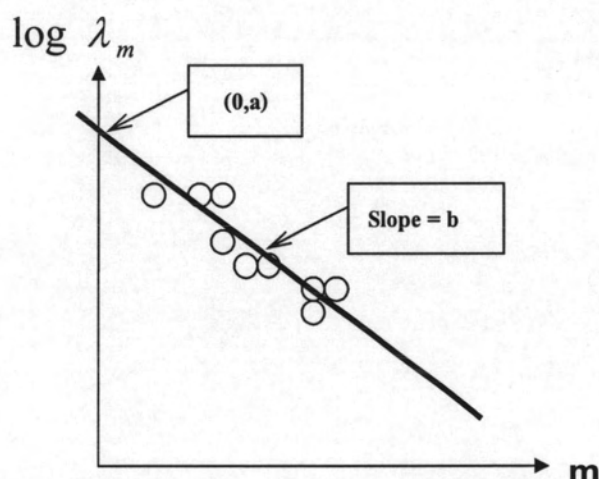
r คือระยะทางจากสถานีวัดถึงแหล่งกำเนิด

2) หาความสัมพันธ์ในการเกิดซ้ำของแผ่นดินไหว (Recurrence relationships) ในแต่ละเขตที่แบ่งไว้ โดย Gutenberg และ Richter (1944) ได้เสนอความสัมพันธ์ไว้เป็น

$$\log \lambda_m = a - bm \quad (2.5)$$

โดยที่ λ_m คืออัตราการเกิดแผ่นดินไหว (mean of annual rates of exceedance) ขนาดเกินกว่า m ใน 1 ปี

a และ b เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log \lambda_m$ กับ m



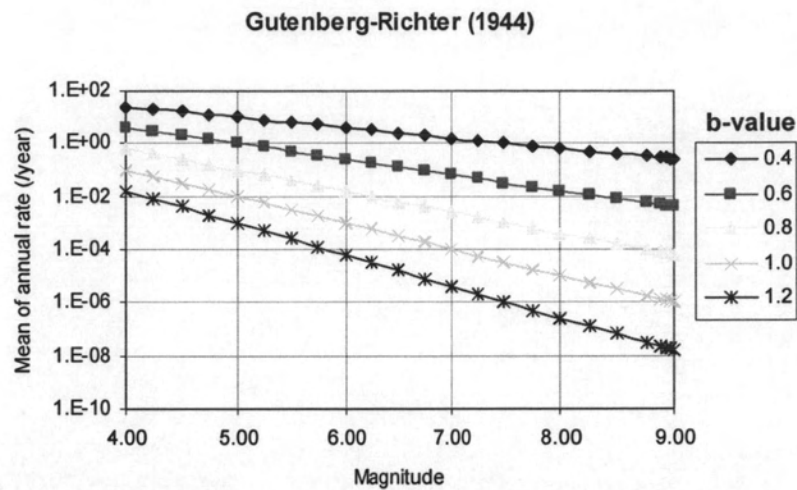
รูปที่ 2.3 การหาค่า a และ b จากกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดแผ่นดินไหว

จากนั้นทำการหาความน่าจะเป็นของอัตราการเกิดแผ่นดินไหวดังนี้

$$\text{จาก } \lambda_m = 10^{a-bm} = e^{\alpha-\beta m} \quad (2.6)$$

$$\text{โดยที่ } \alpha = 2.303a \text{ และ } \beta = 2.303b \quad (2.7)$$

สามารถเขียนกราฟจากสมการที่ (2.6) ได้รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแผ่นดินไหวกับขนาดของแผ่นดินไหว
ตามสมการของ Gutenberg-Richter (1944) โดยให้ค่า $a = 3$

แต่หากกำหนดให้ขนาดของแผ่นดินไหวมีค่าต่ำสุดเป็น m_0 อัตราการเกิดซ้ำของแผ่นดินไหวจะเป็นไปตามสมการของ McGuire และ Arabasz (1990) คือ

$$\lambda_m = \nu \exp[-\beta(m - m_0)] \quad ; \quad m > m_0 \quad (2.8)$$

โดยที่ $\nu = \exp(\alpha - \beta m_0)$ (2.9)

ผลของความน่าจะเป็นตามกฎของ Gutenberg-Richter สามารถจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function; CDF) เป็น

$$F_M(m) = P[M < m \mid M > m_0] = \frac{\lambda_{m_0} - \lambda_m}{\lambda_{m_0}} = 1 - e^{-\beta(m - m_0)} \quad (2.10)$$

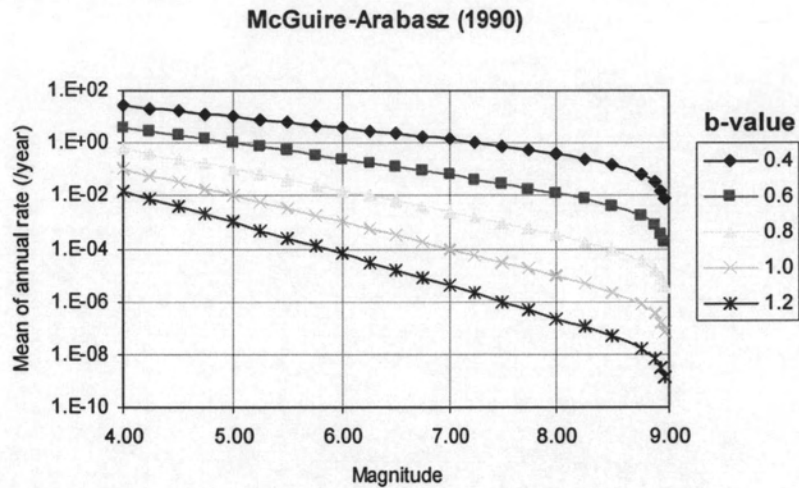
หรือความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวขนาด m (Probability density function; PDF) เป็น

$$f_M(m) = \frac{d}{dm} F_M(m) = \beta e^{-\beta(m - m_0)} \quad (2.11)$$

หรือหากกำหนดให้ขนาดของแผ่นดินไหวมีค่าต่ำสุดเป็น m_0 และค่าสูงสุดเป็น m_{\max} อัตราการเกิดซ้ำของแผ่นดินไหวจะเป็นไปตามสมการของ McGuire และ Arabasz (1990) คือ

$$\lambda_m = \nu \frac{\exp[-\beta(m - m_0)] - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]}; \quad m_0 < m < m_{\max} \quad (2.12)$$

สามารถเขียนกราฟจากสมการที่ (2.12) ได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแผ่นดินไหวกับขนาดของแผ่นดินไหว
ตามสมการของ McGuire และ Arabasz (1990) โดยให้ค่า $a = 3$

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่า สมการของ McGuire และ Arabasz (1990) จะทำการปรับโค้งให้ลู่ลงตรงช่วงปลายให้ใกล้เคียงกับข้อมูลแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริง

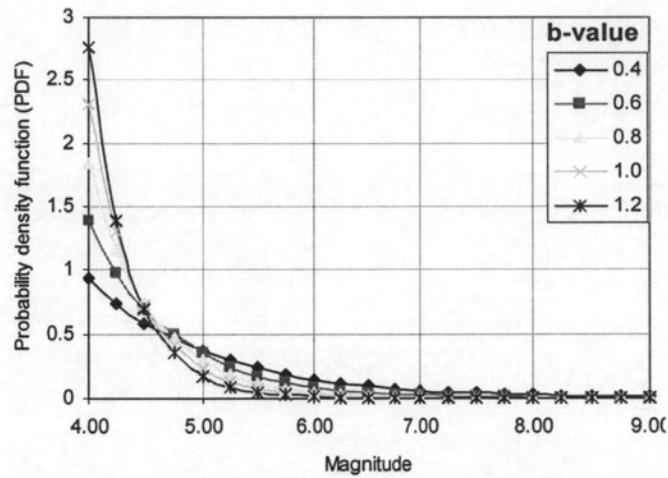
ผลของความน่าจะเป็นตามสมการอัตราการเกิดแผ่นดินไหวของ McGuire และ Arabasz (1990) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function; CDF) เป็น

$$F_M(m) = P[M < m \mid m_0 < M < m_{\max}] = \frac{1 - \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]} \quad (2.13)$$

และความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวขนาด m (Probability density function; PDF) เป็น

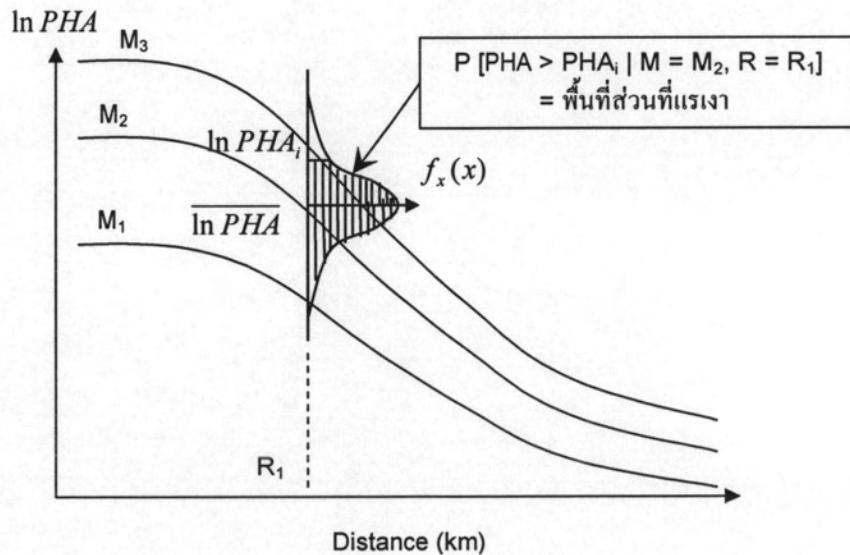
$$f_M(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]} \quad (2.14)$$

สามารถเขียนกราฟจากสมการที่ (2.14) ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวขนาด m ที่ค่า b ต่างๆ ตามสมการของ McGuire และ Arabasz (1990) โดยพื้นที่ใต้กราฟมีขนาดเท่ากับ 1

3) หาค่าความเร่งในแนวราบสูงสุด (peak horizontal acceleration, PHA) จากแบบจำลองการลดทอนของแผ่นดินไหว (Attenuation model) ซึ่งในแต่ละแบบจำลองการลดทอนของแผ่นดินไหวจะแบ่งความคลาดเคลื่อนไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นจึงต้องหาค่าความน่าจะเป็นตามวิธีการทางสถิติแบบการแจกแจงปกติ (Normal distribution) เพื่อนำความน่าจะเป็นที่ได้ไปรวมกับกรณีต่างๆ



รูปที่ 2.7 การหาความน่าจะเป็นเนื่องจากสมการลดทอนแผ่นดินไหวที่จะเกิดความเร่งในแนวราบสูงสุด PHA, จากแผ่นดินไหวขนาด M_2 ที่ระยะทาง R_1

ค่าความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (normal distribution) ที่ตำแหน่ง $\ln x$ ของข้อมูลที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\overline{\ln x}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ σ_x หรือฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function, PDF) เป็นไปตามสมการ

$$f_x(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \overline{\ln x}}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (2.15)$$

4) นำค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากแต่ละขั้นตอนมารวมกัน จะได้ค่าโอกาสที่จะเกิดความเร่งในแนวราบสูงสุด ในบริเวณต่างๆ ในรอบการเกิดแผ่นดินไหวที่กำหนด

2.3 สมการการลดทอนของแผ่นดินไหว (Attenuation equations)

Frankel และคณะ (2002) ได้จัดทำแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของสหรัฐอเมริกาขึ้นมาใหม่ ซึ่งปรับปรุงจากแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในปี 1996 (Frankel และคณะ; 1996)

2.3.1) สมการการลดทอนแผ่นดินไหวที่ใช้ในเขตตะวันตกของอเมริกา ได้แก่ สมการของ Abrahamson และ Silva (1997) สมการของ Boore Joyner และ Fumal (1997) สมการของ Campbell (1997) สมการของ Idriss (2002) และ สมการของ Sadigh และคณะ (1997)

Abrahamson และ Silva (1997) ได้วิเคราะห์สมการการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับค่าสเปกตรัมความเร่งและความเร่งสูงสุดที่ผิวดินของคลื่นแผ่นดินไหวที่ชั้นหิน สำหรับคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหวช่วง 0.01 วินาทีถึง 5 วินาที เป็นสมการ

$$\ln Y = f_1 + Ff_3 + HWf_{HW}(M)f_{HW}(r_{rup}) \quad (2.16)$$

โดยที่ Y คือค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในหน่วย g (ความหน่วง 5%) หรือความเร่งสูงสุดที่ผิวดินในหน่วย g

M คือขนาดของแผ่นดินไหว

r_{rup} คือระยะห่างที่ใกล้ที่สุดจากรอยเลื่อนที่เกิดแผ่นดินไหวในหน่วยกิโลเมตรและ

F คือชนิดของรอยเลื่อน (1 สำหรับการเคลื่อนที่แบบชนกัน, 0.5 สำหรับการเคลื่อนที่แบบชนกันและไถลขนานกัน และ 0 สำหรับการเคลื่อนที่แบบอื่น)

HW คือการพิจารณาผลของหินเพดาน (hanging wall) (1 สำหรับพื้นที่ที่อยู่เหนือหินเพดาน และ 0 สำหรับพื้นที่อื่นๆ)

$$f_1 = \begin{cases} a_1 + a_2(M - c_1) + a_{12}(8.5 - M)^n + [a_3 + a_{13}(M - c_1)] \ln R & ; M \leq c_1 \\ a_1 + a_4(M - c_1) + a_{12}(8.5 - M)^n + [a_3 + a_{13}(M - c_1)] \ln R & ; M > c_1 \end{cases} \quad (2.17)$$

โดยที่ $R = \sqrt{r_{rup} + c_4^2}$ (2.18)

$$f_3 = \begin{cases} a_5 & ; M \leq 5.8 \\ a_5 + \frac{a_6 - a_5}{c_1 - 5.8} & ; 5.8 < M < c_1 \\ a_6 & ; M \geq c_1 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$f_{HW}(M) = \begin{cases} 0 & ; M \leq 5.5 \\ M - 5.5 & ; 5.5 < M < 6.5 \\ 1 & ; M \geq 6.5 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$f_{HW}(r_{rup}) = \begin{cases} 0 & ; r_{rup} < 4 \\ a_9 \frac{r_{rup} - 4}{4} & ; 4 < r_{rup} < 8 \\ a_9 & ; 8 < r_{rup} < 18 \\ a_9 \left(1 - \frac{r_{rup} - 18}{7}\right) & ; 18 < r_{rup} < 24 \\ 0 & ; r_{rup} > 25 \end{cases} \quad (2.21)$$

$a_1, \dots, a_6, a_9, \dots, a_{13}, c_1, c_4, c_5$ และ n เป็นค่าพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว

Boore และคณะ (1997) ได้วิเคราะห์สมการการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับค่าสเปกตรัมความเร่งและความเร่งสูงสุดที่ผิวดินของคลื่นแผ่นดินไหวที่ชั้นหิน สำหรับคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหวช่วง 0 ถึง 2 วินาที เป็นสมการ

$$\ln Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \ln r + b_v \ln \frac{V_S}{V_A} \quad (2.22)$$

โดยที่ $r = \sqrt{r_{jb}^2 + h^2}$ (2.23)

Y คือค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในหน่วย g (ความหน่วง 5%) หรือความเร่งสูงสุดที่ผิวดินในหน่วย g

M คือขนาดของแผ่นดินไหว

V_s คือค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือนในดินโดยพิจารณาที่ความหนาแน่นมากกว่า 30 เมตร
 r_{jb} คือระยะห่างที่ใกล้ที่สุดในแนวราบจากรอยเลื่อนที่เกิดแผ่นดินไหวในหน่วยกิโลเมตร และ

$$b_1 = \begin{cases} b_{1SS} & \text{สำหรับรอยเลื่อนตามแนวระดับ (strike - slip fault)} \\ b_{1RV} & \text{สำหรับรอยเลื่อนย้อน (reverse fault)} \\ b_{1ALL} & \text{สำหรับแผ่นดินไหวทุกแบบ} \end{cases}$$

$b_{1SS}, b_{1RV}, b_{1ALL}, b_2, b_3, b_5, b_V, V_A$ และ h คือค่าพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว

Campbell (1997) ได้วิเคราะห์สมการการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับค่าสเปกตรัมความเร่งและความเร่งสูงสุดที่ผิวดินของคลื่นแผ่นดินไหวที่ชั้นหิน สำหรับคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหวช่วง 0.05 ถึง 4 วินาที เป็นสมการ

$$\begin{aligned} \ln A_H &= -3.512 + 0.904M - 1.328 \ln \sqrt{R^2 + [0.149 \exp(0.647M)]^2} \\ &+ [1.125 - 0.112 \ln R - 0.0957M]F + [0.440 - 0.171 \ln R]S_{SR} \\ &+ [0.405 + 0.222 \ln R]S_{HR} \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \ln SA_H &= \ln A_H + c_1 + c_2 \tanh[c_3(M - 4.7)] + (c_4 + c_5M)R \\ &+ 0.5c_6S_{SR} + c_6S_{HR} + c_7 \tanh(c_8D)(1 - S_{HR}) + f_{SA}(D) \end{aligned} \quad (2.25)$$

โดยที่ A_H คือความเร่งสูงสุดของแผ่นดินไหวในแนวราบในหน่วย g
 SA_H คือค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในแนวราบในหน่วย g (ความหน่วง 5%)
 M คือขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหว
 R คือระยะทางจากจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (epicenter) ในหน่วยกิโลเมตร
 F คือตัวแปรของรอยเลื่อนแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 0 สำหรับแผ่นดินไหวแบบแผ่นเปลือกโลกขนานกัน และเท่ากับ 1 สำหรับแบบอื่นๆ

$S_{SR} = 1$ และ $S_{HR} = 0$ สำหรับชั้นหินอ่อน (soft rock)

$S_{SR} = 0$ และ $S_{HR} = 1$ สำหรับชั้นหินแข็ง (hard rock) และ

D คือความลึกของชั้นหินที่ฐานของบริเวณที่พิจารณา มีหน่วยเป็นกิโลเมตร

$$f_{SA}(D) = \begin{cases} 0 & ; D \geq 1 \\ c_6(1 - S_{HR})(1 - D) + 0.5c_6(1 - D)S_{SR} & ; D < 1 \end{cases} \quad (2.26)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) เป็นไปตามสมการ

$$SE = \begin{cases} 0.55 & ; A_H < 0.068g \\ 0.173 - 0.14 \ln(A_H) & ; 0.068g \leq A_H \leq 0.21g \\ 0.39 & ; A_H > 0.21g \\ 0.889 - 0.0691M & ; M < 7.4 \\ 0.38 & ; M \geq 7.4 \end{cases} \quad (2.27)$$

c_1, c_2, \dots, c_8 คือค่าพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว

Idriss (1993 และ 2002) ได้วิเคราะห์สมการการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับค่าสเปคตรัมความเร่งและความเร่งสูงสุดที่ผิวดินของคลื่นแผ่นดินไหวที่ชั้นหิน สำหรับคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหวช่วง 0.01 ถึง 5 วินาที เป็นสมการ

$$\ln Y = (\alpha_1 + \alpha_2 M) - (\beta_1 + \beta_2 M) \ln(r_{rup} + 10) + \varphi F \quad (2.28)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) เป็นไปตามสมการ

$$SE = \begin{cases} \varepsilon_{\max} & ; M \leq 5 \\ \varepsilon_1 - 0.12M & ; 5 < M \leq 7.25 \\ \varepsilon_{\min} & ; M > 7.25 \end{cases} \quad (2.29)$$

โดยที่ Y คือค่าสเปคตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในหน่วย g (ความหน่วง 5%) หรือความเร่งสูงสุดที่ผิวดินในหน่วย g

M คือขนาดของแผ่นดินไหว

r_{rup} คือระยะห่างที่ใกล้ที่สุดจากรอยเลื่อนที่เกิดแผ่นดินไหวในหน่วยกิโลเมตรและ

F คือชนิดของรอยเลื่อน มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับรอยเลื่อนย้อน (reverse fault) และรอยเลื่อนเฉียง (oblique fault) และ 0 สำหรับรอยเลื่อนแบบอื่นๆ และ

$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \varepsilon_1, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}, \varphi$ คือค่าพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว

Sadigh และคณะ (1997) ได้วิเคราะห์สมการการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับค่าสเปกตรัมความเร่ง และความเร่งสูงสุดที่ผิวดินของคลื่นแผ่นดินไหวที่ชั้นหิน สำหรับคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหวช่วง 0 ถึง 4 วินาที เป็นสมการ

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_3 (8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln[r_{rup} + \exp(C_5 + C_6 M)] + C_7 \ln(r_{rup} + 2) \quad (2.30)$$

โดยที่ Y คือค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในหน่วย g (ความหน่วง 5%) หรือความเร่งสูงสุดที่ผิวดินในหน่วย g

M คือขนาดของแผ่นดินไหว

r_{rup} คือระยะห่างที่ใกล้ที่สุดจากรอยเลื่อนที่เกิดแผ่นดินไหวในหน่วยกิโลเมตรและ

C_1, C_2, \dots, C_7 คือค่าพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว

2.3.2) สมการการลดทอนแผ่นดินไหวที่ใช้ในเขตตอนกลางและตะวันออกของอเมริกาใต้แก่ สมการของ Toro และคณะ (1997) และสมการของ Atkinson และ Boore (1997)

Toro และคณะ (1997) ได้วิเคราะห์สมการการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับค่าสเปกตรัมความเร่งและความเร่งสูงสุดที่ผิวดินของคลื่นแผ่นดินไหว สำหรับความถี่ธรรมชาติของแผ่นดินไหวช่วง 0.5 ถึง 35 เฮิรตซ์ เป็นสมการ

$$\ln Y = C_1 + C_2 (M - 6) + C_3 (M - 6)^2 - C_4 \ln R_M - (C_5 - C_4) \max[\ln(\frac{R_M}{100}), 0] - C_6 R_M \quad (2.31)$$

$$\text{โดยที่ } R_M = \sqrt{r_{jb}^2 + C_7^2} \quad (2.32)$$

Y คือค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในหน่วย g (ความหน่วง 5%) หรือความเร่งสูงสุดที่ผิวดินในหน่วย g

M คือขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหว

r_{jb} คือระยะห่างที่ใกล้ที่สุดในแนวราบจากรอยเลื่อนที่เกิดแผ่นดินไหวในหน่วยกิโลเมตร และ

C_1, C_2, \dots, C_7 คือค่าพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว

Atkinson และ Boore (1997) ได้วิเคราะห์สมการการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับค่าสเปคตรัม ความเร่งและความเร่งสูงสุดที่ผิวดินของคลื่นแผ่นดินไหว สำหรับแผ่นดินไหวขนาด 4.0 ถึง 7.25 ระยะทาง 10 ถึง 500 กิโลเมตร ความถี่ธรรมชาติของแผ่นดินไหวช่วง 0.5 ถึง 20 เฮิรตซ์ เป็นสมการ

$$\ln Y = C_1 + C_2(M - 6) + C_3(M - 6)^2 - \ln R - C_4 r_{hypo} \quad (2.33)$$

โดยที่ Y คือค่าสเปคตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในหน่วย g (ความหน่วง 5%) หรือความเร่งสูงสุดที่ผิวดินในหน่วย g

M คือขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหว

r_{hypo} คือระยะห่างจากจุดศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (hypocenter) ในหน่วยกิโลเมตร และ

C_1, C_2, C_3, C_4 คือค่าพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว

2.3.3) สมการการลดทอนแผ่นดินไหวที่เกิดจากการมุดตัวของเปลือกโลกได้แก่ สมการของ Youngs และคณะ (1997) และสมการของ Megawati และคณะ (2005)

Young และคณะ (1997) ได้วิเคราะห์สมการการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับค่าสเปคตรัม ความเร่งและความเร่งสูงสุดที่ผิวดินของคลื่นแผ่นดินไหว สำหรับคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหวช่วง 0.01 ถึง 3 เฮิรตซ์ เป็นสมการ

$$\ln Y = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + C_M) + 0.00607H + 0.3846Z_r \quad (2.34)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน $SE = C_4 + C_5M$ (2.35)

โดยที่ Y คือค่าสเปคตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในหน่วย g (ความหน่วง 5%) หรือความเร่งสูงสุดที่ผิวดินในหน่วย g

M คือขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหว

r_{rup} คือระยะห่างที่ใกล้ที่สุดจากรอยเลื่อนที่เกิดแผ่นดินไหวในหน่วยกิโลเมตร

H คือความลึกของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว

$Z_r = 0$ สำหรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดบริเวณรอยต่อของแผ่นเปลือกโลก

$Z_r = 1$ สำหรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดภายในแผ่นเปลือกโลก และ

C_1, C_2, \dots, C_5 คือค่าพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว

$$C_M = 1.7818 \exp(0.554M) \quad (2.36)$$

Megawati และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของสมการการลดทอนของความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (PGA) ความเร็วสูงสุดที่ผิวดิน (PGV) และสเปกตรัมความเร่งของแผ่นดินไหว (RSA) สำหรับแผ่นดินไหวบริเวณเกาะสุมาตราที่เกิดจากการมุดตัวของเปลือกโลก กับความเสี่ยงภัยของแผ่นดินไหวในสิงคโปร์และกัวลาลัมเปอร์ ซึ่งเป็นเขตที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวต่ำ แต่มีการเกิดแผ่นดินไหวบ่อยครั้ง และแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในเขตนี้เป็นแผ่นดินไหวระยะไกล โดยมีแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวจากรอยเลื่อนสุมาตรา (Sumatran fault) และบริเวณเขตแผ่นดินไหวที่เกิดจากการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก (Sumatran-subduction zone) พบว่า ความเร่งสูงสุดที่ผิวดินที่วิเคราะห์ได้จากสมการการลดทอนแผ่นดินไหวที่ใช้ในญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา และยุโรป ไม่สอดคล้องกับค่าความเร่งที่ผิวดินที่วัดได้ในสิงคโปร์ ดังนั้นจึงได้มีการวิเคราะห์หาสมการการลดทอนแผ่นดินไหวที่เหมาะสมกับบริเวณนี้ใหม่ สำหรับแผ่นดินไหวขนาด 4.5 ถึง 8.0 ริกเตอร์ และมีระยะไกลในช่วง 150 กิโลเมตรถึง 1500 กิโลเมตร ได้เป็นสมการ

$$\ln(Y_H) = a_0 + a_1 M_w + a_2 M_w^2 + a_3 \ln(R) + a_4 R + a_5 H + \varepsilon_H \quad (2.37)$$

โดยที่ Y_H คือค่า PGA PGV หรือ RSA ตามแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหว (ความหน่วง 5%) มีหน่วยเป็น ซม.ต่อวินาที² ซม.ต่อวินาที และ ซม.ต่อวินาที² ตามลำดับ

M_w คือขนาดความแรงของแผ่นดินไหว

R คือระยะทางจากจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (epicenter) ในหน่วยกิโลเมตร

H คือระยะความลึกของแผ่นดินไหวเป็นกิโลเมตร และ

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 และ ε_H คือค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรเปลี่ยนตามค่า PGA PGV และ RSA

แต่ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าสมการการลดทอนของ Youngs และคณะก็ยังสามารถใช้วิเคราะห์ได้ในพื้นที่เสี่ยงภัยที่ห่างจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวภายในระยะทาง 100 กิโลเมตร

2.3.4) สมการการลดทอนแผ่นดินไหวที่เกิดบริเวณรอยเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก

Megawati และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของสมการการลดทอนของความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (PGA) ความเร็วสูงสุดที่ผิวดิน (PGV) และสเปกตรัมความเร่งของแผ่นดินไหว (RSA) สำหรับแผ่นดินไหวบริเวณเกาะสุมาตราที่เกิดจากรอยเลื่อนสุมาตรา (Sumatran fault) พบว่า ความเร่งสูงสุดที่ผิวดินที่วิเคราะห์ได้จากสมการการลดทอนแผ่นดินไหวที่ใช้ในญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา และยุโรป ไม่สอดคล้องกับค่าความเร่งที่ผิวดินที่วัดได้ในสิงคโปร์ ดังนั้นจึงได้มีการวิเคราะห์หาสมการ

การลดทอนแผ่นดินไหวที่เหมาะสมกับบริเวณนี้ใหม่ สำหรับแผ่นดินไหวขนาด 4.0 ถึง 8.0 และมีระยะไกลในช่วง 174 กิโลเมตร ถึง 1379 กิโลเมตร ได้เป็นสมการ

$$\ln(Y_H) = a_0 + a_1 M_W + a_2 M_W^2 + a_3 \ln(R) + a_4 R + \ln\{\max[\cos(2\phi), a_5 |\sin(2\phi)|]\} + \varepsilon_H \quad (2.38)$$

โดยที่ Y_H คือค่า PGA PGV หรือ RSA ตามแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหว (ความหน่วง 5%) มีหน่วยเป็น ซม.ต่อวินาที² ซม.ต่อวินาที และ ซม.ต่อวินาที² ตามลำดับ

M_W คือขนาดความแรงของแผ่นดินไหว

R คือระยะทางจากจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (epicenter) ในหน่วยกิโลเมตร

ϕ คือค่ามุมอะซิมุตตามเข็มนาฬิกาของเส้นระนาบรอยเลื่อนแผ่นดินไหวและ

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 และ ε_H คือค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรเปลี่ยนตามค่า PGA PGV และ RSA

จากการศึกษาที่ผ่านมาในการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในสหรัฐอเมริกา ทำให้สามารถสรุปสมการลดทอนแผ่นดินไหวที่ใช้กับแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวได้ 3 กลุ่มคือ

- 1) บริเวณที่รอยเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกยังมีการเคลื่อนตัวอยู่ ได้แก่สมการดังตารางที่ 2.1
- 2) บริเวณที่แผ่นดินไหวเกิดจากการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก ได้แก่สมการดังตารางที่ 2.2
- 3) บริเวณที่แผ่นดินไหวเกิดลึกเข้าไปในแผ่นเปลือกโลก ได้แก่สมการดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 สมการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับบริเวณที่รอยเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกยังมีการเคลื่อนตัวอยู่

ผู้วิจัย	สมการลดทอนแผ่นดินไหว
Abrahamson และ Silva (1997)	$\ln a = f_1(M_w, r_{rup}) + f_2(M_w)F + f_3(M_w, r_{rup})HW + f_4(S, A_{rock})$
Ambraseys และ Bommer (1992)	$\log a = C_1 + C_2 M - \log r + C_3 r$
Boore และคณะ (1997)	$\log a = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 + C_4 r + C_5 \log r + b_V(\log V_s - \log V_a)$
Campbell และ Bozorgnia (2000)	$\ln a = C_1 + C_2 M_w + C_3(8.5 - M_w)^2 + C_4 \ln\{R_s^2 [(C_5 + C_6\{S_{PS} + S_{SR}\} + C_7 S_{HR}) \exp\{C_8 M_w + C_9(8.5 - M_w)^2\}]^{1/2}\} + C_{10} F_{SS} + C_{11} F_{RV} + C_{12} F_{TH} + C_{13} S_{HS} + C_{14} S_{PS} + C_{15} S_{SR} + C_{16} S_{HR}$
Esteva และ Villaverde (1973)	$a = \frac{5600e^{0.8M}}{(R+40)^2}$
Idriss (1991)	$\ln a = [C_1 + \exp(C_2 + C_3 M)] + [C_4 - \exp(C_5 + C_6 M) \ln(r+20) + \phi F$
Sabetta และ Pugliese (1996)	$\log a = C_1 + C_2 M - \log(r^2 + h^2)^{1/2} + C_3 S$
Sadigh และคณะ (1997)	$\ln a = C_1 F + C_2 + C_3 M + C_4(8.5 - M)^{2.5} + C_5 \ln(r) + C_6 \ln(r_{rup} + 2)$
Spudich และคณะ (1999)	$\ln a = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 + C_4 \ln r + C_6 S$

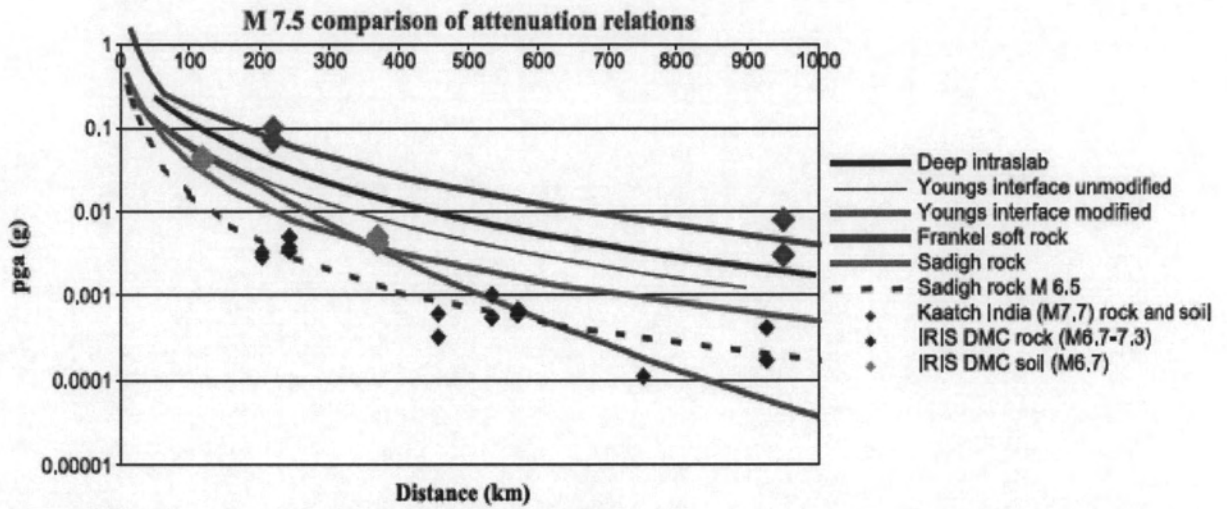
ตารางที่ 2.2 สมการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับบริเวณที่แผ่นดินไหวเกิดจากการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก

ผู้วิจัย	สมการลดทอนแผ่นดินไหว
Atkinson และ Boore (1997a)	$\ln a = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - \ln(r) - C_4r$
Crouse (1991)	$\ln a = C_1 + C_2M + C_3 \ln(r) + C_4h_{\text{hypo}}$
Megawati (2005)	$\ln a = C_0 + C_1M_W + C_2M^2_W + C_3 \ln r + C_4r + C_5H + \varepsilon_H$
Youngs และคณะ (1997)	$\ln a = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10-M)^3 + C_3 \ln(r_{\text{rup}} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_T$ $\ln a = -0.6687 + 1.438M + C_1 + C_2(10-M)^3 + C_3 \ln(r_{\text{rup}} + 1.097e^{0.671M}) + 0.00648H + 0.3643Z_T$
Fukushima และคณะ (1995)	$\ln a = C_1M + C_2r - \ln r + \sum \delta_i c_i$

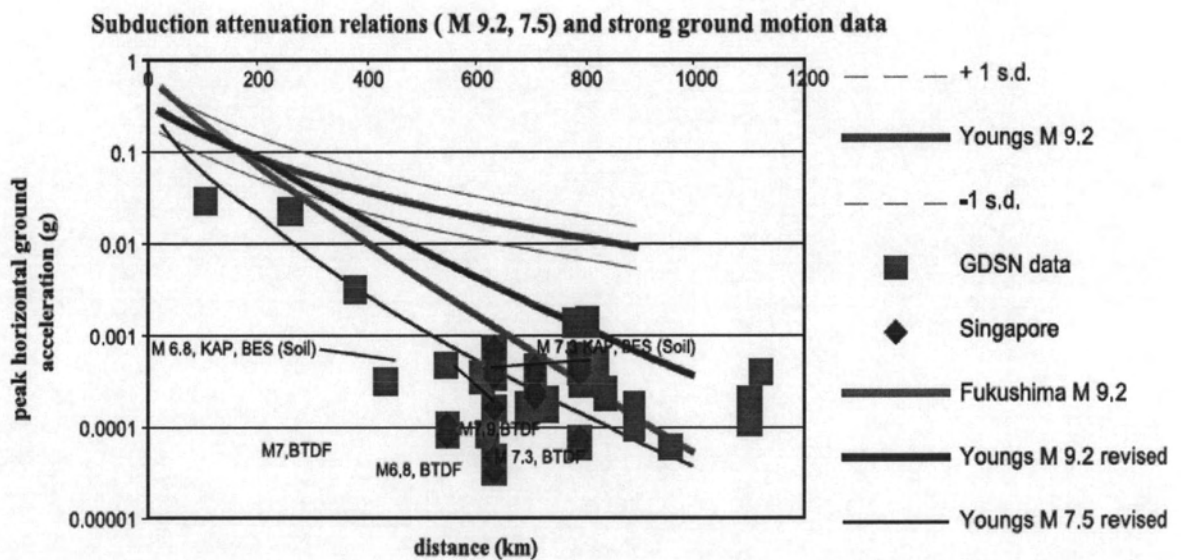
ตารางที่ 2.3 สมการลดทอนแผ่นดินไหวสำหรับบริเวณที่แผ่นดินไหวเกิดลึกเข้าไปในแผ่นเปลือกโลก

ผู้วิจัย	สมการลดทอนแผ่นดินไหว
Atkinson และ Boore (1997b)	$\ln a = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - \ln(r) - C_4r$
Dahle และคณะ (1995)	$\ln a = C_1 + C_2M + C_3 \ln r + C_4r + C_5S$
Hwang และ Huo (1997)	$\ln a = C_1 + C_2M + C_3 \ln[\sqrt{r^2 + H^2} + r_0(M)] + C_4 \sqrt{r^2 + H^2} + \varepsilon$
Toro และคณะ (1997)	$\ln a = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \ln(r_M) - (C_5 - C_4) \max[\ln\left(\frac{r_M}{100}\right), 0] - C_6r_M + \varepsilon_a + \varepsilon_b$

Petersen และคณะ (2004) ได้จัดทำแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวบริเวณเกาะสุมาตราและแหลมมาลายู และได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากสมการการลดทอนแผ่นดินไหวหลายสมการ ได้แก่ ที่ใช้ในสหรัฐอเมริกา (Frankel และคณะ 1996) ที่ใช้ในประเทศญี่ปุ่นซึ่งเป็นสมการของ Fukushima และ Tanaka (1990) และสมการดัดแปลงของ Youngs และคณะ เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับการหาค่าความเร่งสูงสุดของแผ่นดินไหวที่ผิวดินที่ระยะห่างจากจุดกำเนิดมากกว่า 200 กิโลเมตร โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากสมการการลดทอนแผ่นดินไหวเหล่านี้กับข้อมูลจาก IRIS Data Management Center (DMC) ดังรูปที่ 2.8 สำหรับแหล่งกำเนิดบริเวณรอยเลื่อน และรูปที่ 2.9 สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดจากการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก จากรูปที่ 2.8 และ 2.9 พบว่าสมการของ Sadigh และคณะ (1997) สำหรับแผ่นดินไหวที่เกิดบริเวณรอยเลื่อน และ สมการของ Youngs และคณะที่มีการปรับแก้สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดจากการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก มีความเหมาะสมมากกว่าสมการอื่นๆ จึงได้เลือกใช้สมการนี้ในการวิเคราะห์แผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวบริเวณเกาะสุมาตราและแหลมมาลายู



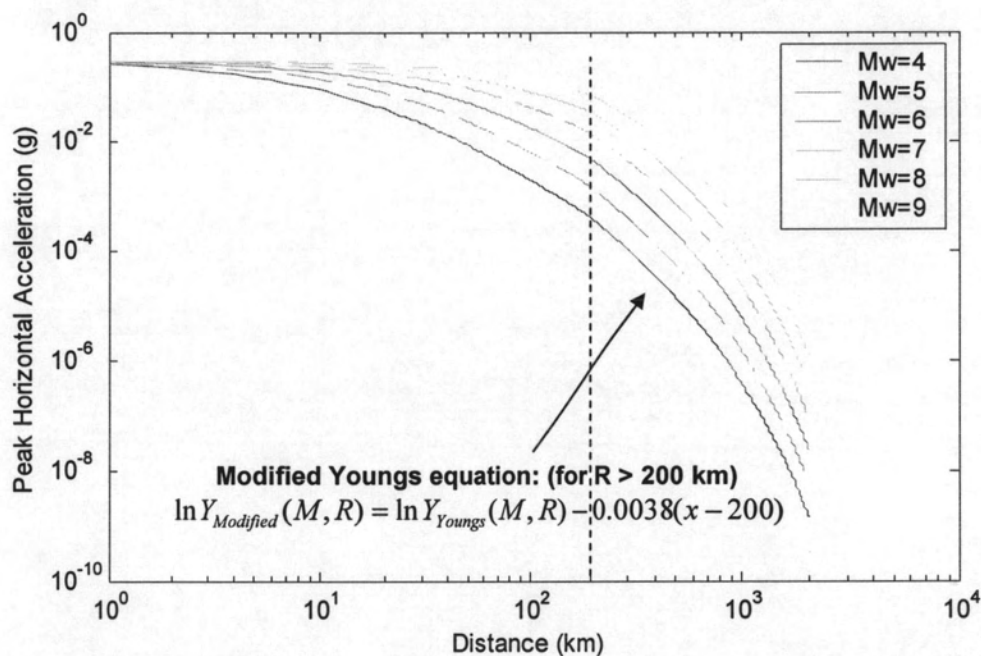
รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดของพื้นดินในระยะต่างๆ ที่ลดทอนลงจากแหล่งกำเนิดบริเวณรอยเลื่อน ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้สมการการลดทอนต่างๆ กับข้อมูลแผ่นดินไหวจาก IRIS DMC บริเวณเกาะสุมาตราและแหลมมาลายู (Petersen, 2004)



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดของพื้นดินในระยะต่างๆ ที่ลดทอนลงจากแหล่งกำเนิดบริเวณเขตแผ่นดินไหวที่เกิดจากการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้สมการการลดทอนต่างๆ กับข้อมูลแผ่นดินไหวจาก IRIS DMC บริเวณเกาะสุมาตราและแหลมมาลายู (Petersen, 2004)

ดังนั้นในเขตกำเนิดแผ่นดินไหวบริเวณฝั่งตะวันตกของประเทศไทย ซึ่งมีลักษณะเป็นเขตกำเนิดแผ่นดินไหวที่เกิดจากการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก จึงควรใช้สมการลดทอนแผ่นดินไหวของ Youngs และคณะ (1997) สำหรับระยะห่างไม่เกิน 200 กิโลเมตรจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว และสมการดัดแปลงของ Youngs สำหรับระยะห่างเกินกว่า 200 กิโลเมตรจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดดังรูปที่ 2.10

ส่วนเขตกำเนิดแผ่นดินไหวที่เกิดจากรอยเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกยังมีการเคลื่อนตัวอยู่ควรใช้สมการลดทอนแผ่นดินไหวของแถบตะวันตกของประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับทุก ๆ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว เนื่องจากบริเวณประเทศไทยและประเทศใกล้เคียงมีลักษณะทางธรณีวิทยาคล้ายคลึงกับแถบตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีลักษณะของการลดทอนแผ่นดินไหวใกล้เคียงกันตามคำแนะนำของ Ivan Wong (URS Corporation)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดตามสมการของ Youngs และคณะ (1997)