

สมการลดทอนเพื่อประมาณค่าการสั้นไหวของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย

นายนครินทร์ ดำเนินสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ATTENUATION EQUATIONS TO ESTIMATE GROUND MOTIONS FOR THAILAND

Mr. Nakarin Damnernsawat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมการลดทอนเพื่อประมาณค่าการสั่นไหวของพื้นดิน เนื่องจากแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย
โดย	นายนครินทร์ ดำเนินสวัสดิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนัทธวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ธีรพันธ์ อรรถธรรมรัตน์)

นครินทร์ ดำเนินสวัสดิ์ : สมการลดทอนเพื่อประมาณค่าการสั่นไหวของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย (ATTENUATION EQUATIONS TO ESTIMATE GROUND MOTIONS FOR THAILAND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี, 181 หน้า.

ในการสร้างแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทยที่ผ่านมา ยังไม่มีสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวที่พัฒนาไว้สำหรับพื้นที่บริเวณประเทศไทยโดยเฉพาะ เนื่องจากประเทศไทยยังขาดแคลนข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินจากแผ่นดินไหวที่มีขนาดมากกว่า 4.5 และมีระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดไม่เกิน 200 กิโลเมตร จึงต้องใช้สมการที่พัฒนาขึ้นจากต่างประเทศในการประมาณความรุนแรงของการสั่นไหวของพื้นดิน แต่เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.8 ที่ประเทศพม่า ซึ่งมีจุดกำเนิดค่อนข้างใกล้กับประเทศไทย ห่างจากอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย เพียง 30 กิโลเมตร ทำให้สถานีตรวจแผ่นดินไหว ของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา ประเทศไทยสามารถบันทึกข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่ค่อนข้างรุนแรงได้ที่อำเภอแม่สาย และบันทึกการสั่นไหวที่ไม่รุนแรงนักได้ที่หลายสถานี เป็นจำนวนมากพอสมควร จึงทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้ใหม่ ไปใช้ทำการศึกษาและทบทวนสมการลดทอนแผ่นดินไหวที่เหมาะสมกับประเทศไทยที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ในประเทศไทยจนถึงปัจจุบัน โดยการศึกษาแบ่งกลุ่มข้อมูลที่บันทึกได้ ตามลักษณะชั้นดินของที่ตั้งสถานีที่คลื่นถูกบันทึก และแบ่งกลุ่มข้อมูลตามบริเวณการแปรสัณฐานของเปลือกโลกแล้วนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อพัฒนาสมการการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย สำหรับใช้ในการประมาณความรุนแรงของการสั่นไหวของพื้นดิน ได้แก่ ความเร่งสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งสเปกตรัมสำหรับคาบธรรมชาติที่ 0.2 และ 1 วินาที ซึ่งคาดว่าจะทำให้สามารถค่าประมาณความรุนแรงของการสั่นไหวของพื้นดินได้อย่างน่าเชื่อถือมากขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา .....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา .....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา 2555 .....



## 5370549421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : EARTHQUAKE GROUND MOTIONS/ ATTENUATION EQUATIONS/  
GROUND MOTION ESTIMATION

NAKARIN DAMNERNSAWAT : ATTENUATION EQUATIONS TO ESTIMATE  
GROUND MOTIONS FOR THAILAND. ADVISOR : ASST. PROF. CHATPAN  
CHINTANAPAKDEE, Ph.D., 181 pp.

In the past, there was no attenuation relationship specifically developed for Thailand to be used in probabilistic seismic hazard analysis when the seismic hazard map was prepared for Thai seismic design code. It was primarily due to the lack of strong ground motion records, e.g., magnitude ( $M_w$ ) larger than 4.5 and site-to-source distance less than 200 km, in Thailand. Therefore, existing attenuation models developed from data in other regions had to be adopted. However, there was an earthquake with  $M_w=6.8$  occurred in Myanmar on March 24, 2011 and its epicenter was located only 30 km away from Mae Sai district in Chiang Rai province, Thailand. The seismic recording stations of Thai Meteorological Department (TMD) were able to record a strong ground motion at Mae Sai and several moderate ground motions at many stations through-out the country. These new data provide an opportunity to study and review the attenuation model that is appropriate for Thailand region. This research thus aims to collect all available recorded ground motions in the Thailand up to present, and use them to develop attenuation equations to estimate ground motions, e.g., peak ground acceleration and spectral acceleration, in Thailand region. The data are classified as being recorded on rock or soil site, and categorized according to the corresponding Plate tectonics. The spectral acceleration was calculated for natural period for 0.2 and 1 seconds. The results are expected to provide more reliable estimation of ground motion intensity for Thailand region.

Department : Civil Engineering..... Student's Signature.....

Field of Study : Civil Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic Year : 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ ลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์ ที่ให้คำแนะนำและความรู้ที่เป็นประโยชน์แก่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.ธีรพันธ์ อรรถธรรมรัตน์ ที่ช่วยให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ที่สำคัญที่สุดข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคือ บิดา มารดา ที่ช่วยอบรมสั่งสอนและให้กำลังใจ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.5.1 แบบจำลองการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศ	4
1.5.2 แบบจำลองการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศที่เหมาะสมกับประเทศไทย.....	7
บทที่ 2 ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่บันทึกได้ในประเทศไทย.....	11
2.1 พื้นฐานวิศวกรรมแผ่นดินไหว.....	11
2.1.1 แผ่นดินไหว.....	11
2.1.2 การเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก.....	11
2.1.3 ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว.....	16
2.2 ระบบเครือข่ายสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยา.....	19
2.2.1 ระบบเครือข่ายสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1.....	19
2.2.2 ระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2.....	22
2.3 ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว.....	27
2.3.1 รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหว.....	27
2.3.2 การคำนวณความเร่ง ความเร็ว และการกระจัดของพื้นดิน.....	30
2.3.3 การปรับแก้เส้นฐานและการกรองสัญญาณรบกวนของคลื่นแผ่นดินไหว....	33
2.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินโดยใช้โปรแกรมMatlab.....	36

	หน้า
2.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างฐานข้อมูล.....	41
2.4.1 บริเวณการแปรสัณฐานของเปลือกโลกของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้.....	41
2.4.2 ความรุนแรงการสั่นไหวของพื้นดิน.....	43
2.4.3 ขนาดของแผ่นดินไหว.....	43
2.4.4 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว.....	45
2.4.5 ประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว.....	47
2.4.6 กลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก.....	52
2.5 ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา.....	53
2.5.1 ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหว.....	53
2.5.2 ข้อมูลบันทึกการสั่นไหวของพื้นดิน.....	55
บทที่ 3 สเปคตรัมการตอบสนองและแบบจำลองการลดทอน.....	72
3.1 สเปคตรัมการตอบสนอง.....	72
3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของแบบจำลองการลดทอน.....	76
3.3 สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว.....	78
3.3.1 สมการของ Akkar and Bommer (2010) .....	79
3.3.2 สมการของ Ambraseys และคณะ (2005) .....	79
3.3.3 สมการของ Campbell และ Bozorgnia (2003) .....	80
3.3.4 สมการของ Idriss (2008) .....	82
3.3.5 สมการของ Sadigh และคณะ (1997) .....	82
3.3.6 สมการของ Atkinson และ Boore (2003) .....	83
3.3.7 สมการของ Lin และ Lee (2008) .....	84
3.3.8 สมการของ Youngs และคณะ (1997) .....	85
3.3.9 สมการของ Kanno และคณะ (2006) .....	85
3.3.10 สมการของ McVerry และคณะ (2006) .....	86
3.3.11 สมการของ Zhao และคณะ (2006) .....	88

	หน้า
บทที่ 4 สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย.....	90
4.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการลดทอนที่เหมาะสมสำหรับข้อมูล แผ่นดินไหวประเทศไทย.....	90
4.2 รูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและ ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม.....	91
4.2.1 สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง.....	97
4.2.2 สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก.....	110
4.3 สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดิน.....	124
4.4 สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน.....	129
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	134
รายการอ้างอิง.....	136
ภาคผนวก.....	140
ภาคผนวก กรายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา.....	141
ภาคผนวก ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบ.....	149
ภาคผนวก ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว.....	157
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	190

## สารบัญญัตราจ

ตารางที่	หน้า
2.1	ชนิดของเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1..... 20
2.2	สถานีหลักตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 1..... 20
2.3	สถานีย่อยตรวจวัดเฉพาะความเร่งระบบใหม่ระยะที่ 1..... 21
2.4	ชนิดของเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2..... 22
2.5	สถานีหลักตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 2..... 23
2.6	สถานีย่อยตรวจวัดเฉพาะความเร่งระบบใหม่ระยะที่ 2..... 24
2.7	สถานีย่อยตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบหลุมเจาะ..... 24
2.8	การแบ่งประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตามเกณฑ์ของ International Building Code (2003) ..... 49
2.9	ประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 1..... 50
2.10	ประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 2..... 51
2.11	ประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดเฉพาะความเร่งของพื้นดินระบบใหม่ระยะที่ 2.. 52
2.12	รูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก (I.M.Idriss 2008) ..... 53
2.13	จำนวนข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่แบ่งตามบริเวณการแปรสัณฐานและลักษณะชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว..... 56
3.1	สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศที่เลือกใช้ในการศึกษา..... 78
4.1	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งหิน รอยเลื่อนแนวระดับ (strike slip fault)..... 98
4.2	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งหิน รอยเลื่อนย้อน (reverse fault)..... 98
4.3	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งดิน รอยเลื่อนในแนวระดับ (strike slip fault)..... 99
4.4	ค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบสมการของYoungs และคณะ (1997) ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งหิน..... 111
4.5	ค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบสมการของYoungs และคณะ (1997) ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งดิน..... 111

4.7	ผลการวิเคราะห์สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังบนที่ตั้งหิน.....	130
4.8	ผลการวิเคราะห์สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังบนที่ตั้งหิน.....	131
4.9	ผลการวิเคราะห์สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกบนที่ตั้งหิน.....	132
4.10	ผลการวิเคราะห์สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกบนที่ตั้งหิน.....	133
ก.1	รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา.....	142
ข.1	ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่าย ตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2.....	149
ค.1	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน(Akkar and Bommer, 2010).....	158
ค.2	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Ambraseysและคณะ, 2005).....	161
ค.3	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Atkinson and Boore, 2003).....	167
ค.4	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Campbell and Bozorgnia, 2003).....	169
ค.5	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Idriss, 2008).....	171
ค.6	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Kanno และคณะ, 2006).....	174
ค.7	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งหิน (Lin และ Lee, 2008).....	177
ค.8	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งหิน (Lin และ Lee, 2008).....	178
ค.9	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งหิน (Mcverry และคณะ, 2006)....	180
ค.10	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งหิน (Sadigh และคณะ, 1997)....	182
ค.11	ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับพจน์คาดเคลื่อนมาตรฐาน (Sadighและคณะ, 1997).....	183
ค.12	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งหิน (Sadigh และคณะ, 1997)....	184
ค.13	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ (Youngs และคณะ, 1997).....	185
ค.14	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ (Zhao และคณะ, 2006).....	187

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟความเร่งที่ผิวดินที่สถานีตรวจวัดความเร่ง อ.แม่สาย จ.เชียงราย.....	9
1.2 สเปกตรัมความเร่งตอบสนองที่สถานีตรวจวัดความเร่งที่ อ.แม่สาย จ.เชียงราย .....	10
1.3 การลดทอนของความเร่งที่ผิวดินกับระยะทางจากข้อมูลแผ่นดินไหวที่ประเทศพม่า วันที่ 24 มีนาคม 2554 เปรียบเทียบกับสมการต่าง ๆ.....	10
2.1 แนวแผ่นดินไหวของโลกรวมทั้งทิศทางเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก.....	12
2.2 การเคลื่อนตัวของหินหลอมละลายภายในโลก.....	12
2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกและการเคลื่อนที่แบบกระแสพาความร้อน.	13
2.4 ลักษณะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน.....	15
2.5 จุดกำเนิดแผ่นดินไหวใต้พื้นโลก (hypocenter) และจุดกำเนิดแผ่นดินไหวบนพื้นผิว.	16
2.6 คลื่นแผ่นดินไหวประเภทต่างๆ.....	18
2.7 สถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 1 และระยะที่ 2.....	26
2.8 การค้นหาข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวในฐานข้อมูล Global CMT Catalog.....	27
2.9 ตัวอย่างรายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวในฐานข้อมูล Global CMT Catalog.....	28
2.10 หน้าจอแสดงโปรแกรม SeisGram2K.....	29
2.11 ตัวอย่างแฟ้มข้อความ ASCII format.....	29
2.12 การหาปริพันธ์โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบหลายช่วง.....	30
2.13 การปรับแก้เส้นฐานข้อมูลประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน (Hudson, 1979).....	33
2.14 กราฟข้อมูลประวัติเวลาความเร่ง ความเร็ว และการกระจัด สถานีตรวจวัดความเร่ง ตรัง (TRTT) เหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55 น. ระยะทาง จากจุดกำเนิดถึงสถานี 1426 กม. (ก) กรองความถี่สูงผ่านที่ 0.01 เฮิรตซ์ (ข) กรอง ความถี่สูงผ่านที่ 0.02 เฮิรตซ์.....	35
2.15 ข้อมูลประวัติเวลาความเร่ง ความเร็ว และการกระจัด สถานีตรวจวัดความเร่งแม่ สาย (MSAA) เหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55 น. ระยะทางจากจุดกำเนิดถึงสถานี 31 กม.....	37
2.16 กราฟข้อมูลสเปกตรัมผลตอบสนอง สถานีตรวจวัดความเร่งแม่สาย (MSAA) เหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55 น.ระยะทางจากจุด กำเนิดถึงสถานี 31 กม.....	38



2.17	กราฟเปรียบเทียบสเปกตรัมความเร่งเทียม ตรวจวัดได้โดยเครื่องมือวัดความเร่ง และเครื่องมือวัดความเร็ว ที่สถานีเชียงใหม่ (CMMT) เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด = 6.8 เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55 น. ระยะทางจากจุดกำเนิดถึงสถานี 235 กม.....	39
2.18	กราฟเปรียบเทียบความเร่ง ความเร็ว การกระจัดของพื้นดิน ตรวจวัดได้โดย เครื่องมือวัดความเร่ง และเครื่องมือวัดความเร็ว ที่สถานีเชียงใหม่ (CMMT) เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด = 6.8 เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55 น (ก) กราฟเปรียบเทียบช่วงเวลา 900 วินาที (ข) กราฟเปรียบเทียบช่วงเวลา 150 วินาที.	40
2.19	แผนที่แสดงบริเวณการแปรสัณฐานของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้.....	42
2.20	รูปแบบของระยะทางกับรอยเลื่อนตั้งฉาก.....	45
2.21	รูปแบบของระยะทางกับรอยเลื่อนเฉียง.....	46
2.22	ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา (สีแดง = เหตุการณ์แผ่นดินไหวตื่นใน แผ่นเปลือกโลก, สีเขียว = เหตุการณ์แผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก) .....	55
2.23	การกระจายของข้อมูลที่บันทึกได้ตามขนาดโมเมนต์กับระยะทางจากแหล่งกำเนิด ถึงสถานีแบ่งตามประเภทชั้นดินของสถานีตรวจวัด.....	58
2.24	การกระจายของข้อมูลที่บันทึกได้ตามขนาดโมเมนต์กับระยะทางจากแหล่งกำเนิด ถึงสถานีแบ่งตามบริเวณกาแปรสัณฐานของเปลือกโลก.....	58
2.25	การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง สถานีตรวจวัด.....	59
2.26	การกระจายของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง สถานีตรวจวัด.....	59
2.27	การกระจายของข้อมูลความเร็วสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง สถานีตรวจวัด.....	60
2.28	การกระจายของข้อมูลการกระจัดสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง สถานีตรวจวัด.....	61
2.29	การกระจายของข้อมูลการกระจัดสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง สถานีตรวจวัด.....	61





3.1	ระบบยึดหยุ่นระดับชั้นความเสถียรโดยฐานของโครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ (Chopra, 2001) .....	72
3.2	(ก) ความเร่งของพื้นดิน (ข) ผลตอบสนองการกระจัดของระบบที่มีระดับชั้นความเสถียรเดียว 3 ระบบ ที่มีค่าเท่ากับ 2% และเท่ากับ 0.5, 1, และ 2 วินาที (ค) สเปกตรัมผลตอบสนองการกระจัดที่มีค่าเท่ากับ 2% (Chopra, 2001).....	74
3.3	สเปกตรัมผลตอบสนองที่มีค่าเท่ากับ 0.02 ของคลื่นแผ่นดินไหวที่สถานี El Centro จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว Imperial Valley ปี 1940 (ก) สเปกตรัมผลตอบสนองการกระจัด (ข) สเปกตรัมผลตอบสนองความเร็วเทียบ (ค) สเปกตรัมผลตอบสนองความเร่งเทียบ (Chopra, 2001) .....	75
3.4	ขั้นตอนการสร้างสมการการลดทอน (วิษณุ ทัศน, 2008) .....	77
4.1	กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังที่ตั้งอยู่บนหิน.....	93
4.2	กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังที่ตั้งอยู่บนดิน.....	94
4.3	กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกที่ตั้งอยู่บนหิน.....	95
4.4	กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกที่ตั้งอยู่บนดิน.....	96
4.5	กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง สำหรับรอยเลื่อนแนวระดับ.....	100
4.6	กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง สำหรับรอยเลื่อนย้อน.....	101
4.7	กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานีที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง.....	102
4.8	กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง.....	103
4.9	กราฟความเร่งสูงสุดของพื้นดิน $\pm 1$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สถานีที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง.....	104
4.10	กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง สำหรับรอยเลื่อนแนวระดับ.....	105

4.11	กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง สำหรับรอยเลื่อนย้อน	106
4.12	กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานีที่ตั้งดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง.....	107
4.13	กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง.....	108
4.14	กราฟความเร่งสูงสุดของพื้นดิน $\pm 1$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สถานีที่ตั้งดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง.....	109
4.15	กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งหิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ผิวสัมผัส.....	112
4.16	กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานีที่ตั้งหินบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ผิวสัมผัส.....	113
4.17	กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งหิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ผิวสัมผัส.....	114
4.18	กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งหิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น.....	115
4.19	กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานีที่ตั้งหินบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น.....	116
4.20	กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งหิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น.....	117
4.21	กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ผิวสัมผัส.....	118
4.22	กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานีที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ผิวสัมผัส.....	119
4.23	กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ผิวสัมผัส.....	120

รูปที่	หน้า
4.24 กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น.....	121
4.25 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานีที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น.....	122
4.26 กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น.....	123
4.27 กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังที่ตั้งอยู่บนหิน.....	125
4.28 กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังที่ตั้งอยู่บนดิน.....	126
4.29 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Akkar และ Bommer, 2010).....	127
4.30 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Akkar และ Bommer, 2010).....	127
4.31 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Campbell, 1997).....	127
4.32 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Campbell, 1997).....	128
4.33 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Kanno และ คณะ, 2006).....	128
4.34 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Kanno และ คณะ, 2006).....	128
4.35 กราฟการลดทอนของการกระจัดสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง.....	130
4.36 กราฟการลดทอนของการกระจัดสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง.....	131
4.37 กราฟการลดทอนของการกระจัดสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก.....	132

รูปที่	กราฟการลดทอนของการกระจัดสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดินบริเวณเขตมุดตัวของ	หน้า
4.38	เปลือกโลก.....	133

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

ในการศึกษาประเมินระดับอันตรายและความเสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหว สามารถทำได้หลายแบบ การทำแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว (seismic hazard map) เป็นวิธีการสากลที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการศึกษาอันตรายจากแผ่นดินไหว ซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลในการคำนวณต่างๆ หลายอย่าง เช่น ข้อมูลความเร่งของพื้นดิน ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น (ขนาด ตำแหน่งและความลึกของแผ่นดินไหว) และ สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว

ในการสร้างแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทยที่ผ่านมานั้น ยังไม่มีสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวที่สร้างไว้สำหรับพื้นที่บริเวณประเทศไทยโดยเฉพาะ จึงต้องใช้สมการที่พัฒนาขึ้นในต่างประเทศ ในการประมาณความรุนแรงของการสั่นไหวของพื้นดิน ซึ่งพัฒนามาจากข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่ประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ไต้หวัน ตุรกี ซึ่งอาจมีสภาพทางธรณีวิทยาและบริเวณการแปรสัณฐานของเปลือกโลกที่แตกต่างจากบริเวณประเทศไทย สมการเหล่านั้นมีอยู่หลายสมการซึ่งเสนอโดยนักวิจัยหลายกลุ่ม ค่าจากแต่ละสมการก็แตกต่างกันมากพอสมควร ซึ่งการเลือกใช้สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวจากต่างประเทศมาประมาณความรุนแรงแผ่นดินไหวบริเวณประเทศไทยอาจมีความคลาดเคลื่อน ถ้าได้แผนที่เสี่ยงภัยที่ให้ค่าต่ำเกินไปอาจทำให้อาคารมีความแข็งแรงไม่เพียงพอและมีโอกาสที่จะเกิดภัยพิบัติร้ายแรง แต่ถ้าให้ค่าที่สูงเกินไปก็จะทำให้การออกแบบอาคารในประเทศไทยแข็งแรงเกินความจำเป็น เป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณและทรัพยากรของประเทศ จึงสมควรที่จะทำการศึกษาสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวที่เหมาะสมกับประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้จริงบริเวณประเทศไทย

### 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิจัยดังต่อไปนี้

1. เพื่อรวบรวมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว ที่บันทึกได้ในประเทศไทยตั้งแต่ มิถุนายน พ.ศ. 2549 ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2555 โดยรวมกับข้อมูลที่เคย



รวบรวมศึกษาตั้งแต่ ตุลาคม พ.ศ.2549 ถึง พฤษภาคม พ.ศ.2551 เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการหาความสัมพันธ์ของสมการการลดทอนที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

2. เพื่อศึกษาพัฒนาสมการการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย (attenuation equation) สำหรับใช้ในการประมาณความรุนแรงของการสั่นไหวของพื้นดิน ได้แก่ ความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (peak ground acceleration, PGA) ,ความเร็วสูงสุดของพื้นดิน (peak ground velocity, PGV) และ การกระจัดสูงสุดของพื้นดิน (peak ground displacement, PGD) และ ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (spectral acceleration, Sa) ที่ อัตราความหน่วง 5 %

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตในการวิจัยดังต่อไปนี้

1. การศึกษาครั้งนี้รวบรวมข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวที่สามารถบันทึกได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1 และระยะที่ 2 ของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยาตั้งแต่มีถุนายนพ.ศ. 2551 ถึง พฤศจิกายนพ.ศ.2555 โดยใช้รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวจาก Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) catalog และได้พิจารณาแผ่นดินไหวที่มีจุดกำเนิดอยู่ระหว่างพิคัดละติจูด 0 ถึง 25 องศาเหนือและลองจิจูด 90 ถึง 110 องศาตะวันออกซึ่งมีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 4 ขึ้นไป

2. พัฒนาสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว สำหรับใช้ในการประมาณค่า ความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ความเร็วสูงสุดของพื้นดิน การกระจัดสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม โดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้ในบริเวณประเทศไทย

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ทบทวนงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เป็นความรู้พื้นฐาน และก่อให้เกิดแนวความคิดในการทำงานวิจัย

2. รวบรวมข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับประเทศไทยและแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นระยะไกลจากสารบัญชั้พิมพ์ของ Global CMT

3. รวบรวมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1 และ ระยะที่ 2 จาก สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา โดยคัดเลือกข้อมูลตามวันที่เกิดแผ่นดินไหวจากสารบัญชั้พิมพ์ของโกลบอล

4. วิเคราะห์ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อหาค่า ความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (peak ground acceleration, PGA) ความเร็วสูงสุดของพื้นดิน (peak ground velocity, PGV) การกระจัดสูงสุดของพื้นดิน (peak ground displacement, PGD) และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (spectral acceleration, Sa)

4.1 แปลงไฟล์ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจากสัญญาณดิจิทัลของเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบความเร็ว (seismometer) ให้เป็นแฟ้มข้อความแบบ ASCII (text file)

4.1.1 แปลงข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจากสัญญาณดิจิทัลให้อยู่ในรูปของความเร็ของพื้นดิน โดยใช้โปรแกรม MATLAB

4.1.2 แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของความเร่งของพื้นดินโดยการหาอนุพันธ์ (differentiation) ความเร็วของพื้นดิน

4.1.3 แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของการกระจัดของพื้นดินโดยการหาปริพันธ์ (integration) ความเร็วของพื้นดิน

4.1.4 คำนวณความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่นไหว 0 ถึง 100วินาที

4.1.5 แสดงรูปภาพความเร่งของพื้นดิน ความเร็วของพื้นดิน การกระจัดของพื้นดิน และค่าความเร่งตอบสนองเชิงสถิติโดยใช้โปรแกรม MATLAB

4.2 แปลงไฟล์ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจากสัญญาณดิจิทัลของเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบความเร่ง (accelerometer) ให้เป็นแฟ้มข้อความแบบ ASCII (text file)

4.2.1 แปลงข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจากสัญญาณดิจิทัลให้อยู่ในรูปของความเร่งของพื้นดินโดยใช้โปรแกรม MATLAB

4.2.2 แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของความเร็วของพื้นดินโดยการหาปริพันธ์ (integration) ความเร่งของพื้นดิน

4.2.3 แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของการกระจัดของพื้นดินโดยการหาปริพันธ์ (integration) ความเร็วของพื้นดิน

4.2.4 คำนวณค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่นไหว 0 ถึง 100 วินาที

4.2.5 แสดงรูปภาพความเร่งของพื้นดิน ความเร็วของพื้นดิน การกระจัดของพื้นดิน และค่าความเร่งตอบสนองเชิงสถิติโดยใช้โปรแกรม MATLAB

5. หาระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวที่วัดได้

6. แยกแยะข้อมูลความเร็วของพื้นดินและความเร่งของพื้นดินที่บันทึกได้ ตามลักษณะชั้นดินของที่ตั้งสถานีที่คลื่นถูกบันทึกมา และคัดแยกข้อมูลตามบริเวณการแปรสัณฐานของเปลือกโลก

7. จัดทำฐานข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย

8. วิเคราะห์พัฒนาสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประมาณความรุนแรงของการสั่นไหว เช่น ความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA), ความเร็วสูงสุดของพื้นดิน (PGV), การกระจัดสูงสุดของพื้นดิน (PGD) และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $S_a$ ) ที่อัตราความหน่วงที่ 5 % สำหรับประเทศไทย

## 1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.5.1 แบบจำลองการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศ

ในปี 1997 The Seismological Society of America (SSA) มีการรวบรวมนำเสนอ งานวิจัยเกี่ยวกับข้อมูลและขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวโดยแบบจำลองการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวได้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม 1. แผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลกในบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (shallow crustal earthquakes in active tectonic regions) 2. แผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลกในบริเวณภาคพื้นทวีปที่มีเสถียรภาพ (shallow

crustal earthquakes in stable continental regions) 3.แผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก (subduction earthquakes)

แผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลกในบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (shallow crustal earthquakes in active tectonic regions) เป็นบริเวณที่มีข้อมูลแผ่นดินไหวมากที่สุด และมีจำนวนแบบจำลองการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวมากที่สุด โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแบบจำลองการลดทอนที่นอกเหนือจาก ขนาดโมเมนต์แผ่นดินไหว ระยะทาง และลักษณะชั้นดินของที่ตั้งสถานีตรวจวัด ได้แก่ รูปแบบของรอยเลื่อน โดยแบ่งเป็น รอยเลื่อนตามแนวระดับ (strike-slip fault) รอยเลื่อนปกติ (normal fault) และรอยเลื่อนย้อน (reverse fault) แต่เนื่องจากว่าฐานข้อมูลมีจำนวนแผ่นดินไหวจากรอยเลื่อนปกติที่น้อย ดังนั้นจึงรวมเอากลุ่ม รอยเลื่อนตามแนวระดับ และรอยเลื่อนปกติ รวมอยู่กลุ่มเดียวกัน

Sadigh และคณะ (1997) สร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่าความเร่งเทียม และค่าความเร่งสูงสุด สำหรับค่าเฉลี่ย 2 ทิศทางในแนวราบ โดยใช้ข้อมูลของเหตุการณ์แผ่นดินไหวตื้นในแคลิฟอร์เนีย ซึ่งเหตุการณ์แผ่นดินไหวเนื่องจากรอยเลื่อนจำแนกโดย มุมลาดเอียง (rake angle,  $\lambda$ ) แบ่งเป็น รอยเลื่อนในแนวระดับ ( $\lambda < 45^\circ$ , strike-slip fault) และรอยเลื่อนย้อน ( $\lambda > 45^\circ$ , reverse fault) โดยข้อมูลมีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 4 ถึง 8 และมีระยะทางที่ใกล้ที่สุดกับพื้นผิวการแตกร้าว (closest distance to the rupture surface,  $r_{rup}$ ) ตั้งแต่ 0 ถึง 100 กิโลเมตร โดยลักษณะชั้นดินของสถานีตรวจวัดแบ่งเป็น ดินลึก (deep soil) และหิน (rock) โดยค่าสัมประสิทธิ์ได้จากการวิเคราะห์ถดถอย 2 ขั้นตอน (two stage regression analysis)

แผ่นดินไหวในบริเวณที่เปลือกโลกมุดตัวเข้าไปใต้แผ่นเปลือกโลกอีกแผ่นหนึ่ง (subduction earthquakes) เป็นบริเวณที่มีข้อมูลแผ่นดินไหวไม่มากนักในประเทศอเมริกา ดังนั้นแบบจำลองการลดทอนส่วนมากใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่บันทึกได้จาก ญี่ปุ่น และ อเมริกาใต้ ซึ่งส่วนมากข้อมูลที่บันทึกได้จะมีระยะทางที่ห่างมาก

Youngs และคณะ (1997) สร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่าความเร่งเทียม และค่าความเร่งสูงสุด ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผิวหน้าสัมผัส (interface) โดยกำหนดให้เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีความลึกน้อยกว่า 50km และเหตุการณ์แผ่นดินไหวภายในแผ่น (intraslab) กำหนดให้เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีความลึกมากกว่า 50km ซึ่งเหตุการณ์แผ่นดินไหวมีขนาดโมเมนต์มากกว่า 5 และมีระยะทางที่ใกล้ที่สุดกับพื้นผิวการแตกร้าว (closest distance to the rupture surface,  $r_{rup}$ ) ตั้งแต่ 10 ถึง 500 กิโลเมตร โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองนี้

ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) โดยใช้วิธีผลกระทบแบบสุ่ม (random effects method) ซึ่งจากแบบจำลองพบว่า อัตราการลดทอนของการสั่นไหวสูงสุดจากแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก มีอัตราที่น้อยกว่าแผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลกในบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง

ปี 2008 Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), U.S. Geological Survey (USGS) และ Southern California Earthquake Center (SCEC) นำเสนอโครงการวิจัย การสร้างแบบจำลองการลดทอนรุ่นใหม่ (Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models, NGA) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับแผ่นดินไหวตื้นในอเมริกาตะวันตก และมีความคล้ายกับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง ซึ่งในโครงการนี้มีกลุ่มผู้สร้างแบบจำลองทั้งหมด 5 กลุ่มซึ่งประกอบด้วย Abrahamson และ Silva, Boore และ Atkinson, Campbell และ Bozorgnia, Chiou และ Youngs และ Idriss โดยแบบจำลองการลดทอนรุ่นใหม่มีข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดิน 3,551 บันทึก จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว 173 เหตุการณ์ ซึ่งบันทึกจากสภาพภาคสนามอิสระ (free-field conditions) และในฐานข้อมูลยังมีข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องดังนี้ รูปแบบของระยะทาง 6 ชนิด, ลักษณะชั้นดินของที่ตั้งสถานีตรวจวัด, ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยของแต่ละสถานี, ข้อมูลของหินเพดาน และหินพื้น ซึ่งแบบจำลองการลดทอนรุ่นใหม่ให้ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การสั่นไหวของพื้นดินกับระยะทาง (distance) ซึ่งได้แก่ การกระจัดสูงสุดของพื้นดิน (peak ground displacement), ความเร็วสูงสุดของพื้นดิน (peak ground velocity, PGV), ความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (peak ground acceleration, PGA) และความเร่งเทียม (pseudo acceleration) ซึ่งขอบเขตของการสร้างแบบจำลองได้พิจารณา คาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0 ถึง 10 วินาที โดยมีขนาดโมเมนต์ ( $M_w$ ) ตั้งแต่ 5 ถึง 8.5 และระยะทางจาก 0 ถึง 200 กิโลเมตร

Atkinson และ Boore (2008) สร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุด ความเร็วสูงสุด และความเร่งเทียม ซึ่งมีอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 5 เปอร์เซนต์ และมีคาบธรรมชาติ ตั้งแต่ 0.01 ถึง 10 วินาที ซึ่งในการสร้างแบบจำลองการลดทอนได้ใช้ข้อมูลในฐานข้อมูลของ PEER NGA จำนวน 1,574 บันทึก จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว 58 เหตุการณ์ โดยมีขนาดโมเมนต์ ตั้งแต่ 5 ถึง 8 และมีระยะทางในแนวราบที่สั้นที่สุดถึงบริเวณภาพถ่ายบนผิวดินของระนาบแตก ร้าว ตั้งแต่ 0 ถึง 200 กิโลเมตร รูปแบบของรอยเลื่อนจำแนกโดยมุมลาดเฉียง (rake angle,

$\lambda$ ) แบ่งเป็น รอยเลื่อนในแนวระดับ (strike-slip fault) รอยเลื่อนย้อน (reverse fault) และรอยเลื่อนปกติ (normal fault)

Idriss (2008) สร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่าความเร่งเทียมในแนวราบที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.02 ถึง 10 วินาที โดยใช้ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวตื้นของแผ่นเปลือกโลกในฐานข้อมูลของ PEER NGA โดยเหตุการณ์แผ่นดินไหวส่วนใหญ่จะอยู่ในแคลิฟอร์เนีย และข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวอื่นๆ ที่มีแหล่งกำเนิดในบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง ส่วนค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตร จากผิวดิน ( $V_{S,30}$ ) ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองมีค่าอยู่ในช่วง 450 ถึง 900 เมตร/วินาที ซึ่งมีข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหว 942 บันทึก จาก 72 เหตุการณ์ โดยมีขนาดโมเมนต์แผ่นดินไหวตั้งแต่ 4.7 ถึง 7.7 รูปแบบของรอยเลื่อนจำแนกโดยมุมลาดเอียง (rake angle,  $\lambda$ ) แบ่งเป็น รอยเลื่อนในแนวระดับ (strike-slip fault) และรอยเลื่อนย้อน (reverse fault) ซึ่งมีระยะทางที่ใกล้ที่สุดกับพื้นผิวการแตกร้าว (closest distance to the rupture surface,  $r_{rup}$ ) ตั้งแต่ 0 ถึง 200 กิโลเมตร โดยในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองได้แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ  $M_w < 6.75$  และ  $M_w \geq 6.75$

### 1.5.2 แบบจำลองการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศที่เหมาะสมกับประเทศไทย

Naguit (2007) ได้ทำการศึกษาหาแบบจำลองการลดทอน (attenuation model) ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยโดยได้เปรียบเทียบค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (peak ground acceleration, PGA) ที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลอง 18 ชุด กับข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA) ที่ตรวจวัดได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ได้ติดตั้งก่อนปี พ.ศ. 2549 โดยมีข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินทั้งหมด 557 บันทึก ซึ่งเกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว 430 เหตุการณ์ ซึ่งมีขนาดโมเมนต์ (moment magnitude,  $M_w$ ) ตั้งแต่ 4 ขึ้นไป และความเหมาะสมของแบบจำลองการลดทอนได้พิจารณาจากค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลต่างกำลังสอง (square root of mean square of error, RMS) ของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA) กับค่าที่ได้ประมาณจากแบบจำลอง ซึ่งผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่เสนอโดย Idriss (1993) ได้มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลต่างกำลังสอง (RMS) ต่ำที่สุด และแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับใช้ประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินสำหรับประเทศไทยในบริเวณแผ่นดินไหวตื้นในเปลือกโลก (shallow crustal zone) ได้แก่ แบบจำลองที่เสนอโดย

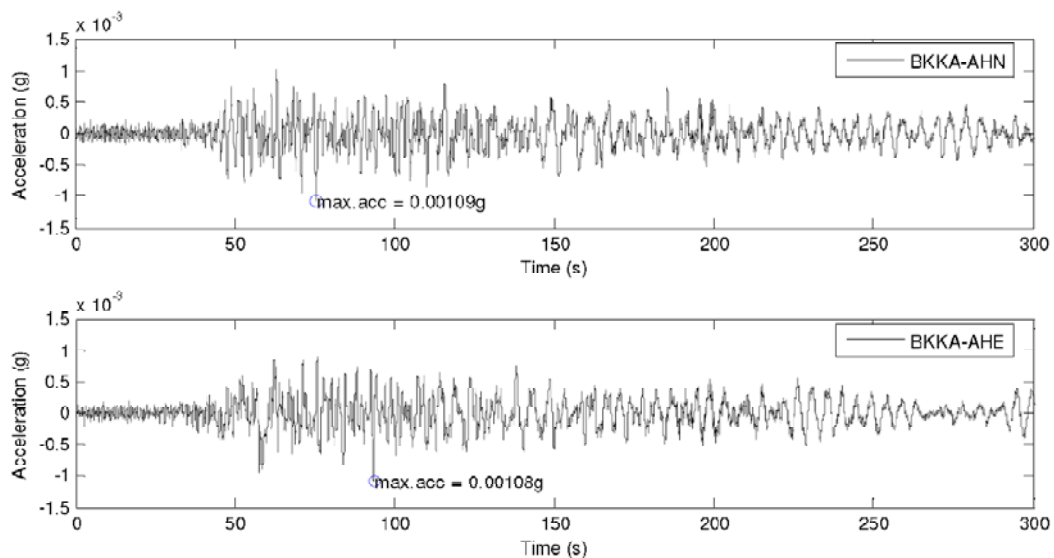
Idriss (1993), Sadighและคณะ (1997), Campbell (1997) ส่วนบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก (subduction zone) ได้แก่แบบจำลองที่เสนอโดย Crouse (1991)

มานพ เจริญยุทธ(2007) ได้รวบรวมและสร้างฐานข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่ตรวจวัดได้ในประเทศไทยโดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ได้ติดตั้งปี พ.ศ. 2549 รวมทั้งหมด 15 สถานี และได้นำข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินในฐานข้อมูลมาใช้หาความเหมาะสมของแบบจำลองการลดทอน (attenuation model) สำหรับใช้ประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (peak ground acceleration, PGA) โดยในฐานข้อมูลมีข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินทั้งหมด 163 บันทึก ซึ่งเกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว 45 เหตุการณ์ และนักวิจัยได้เลือกศึกษาแบบจำลองทั้งหมด 18 ชุด ซึ่งผลการศึกษาพบว่า สมการลดทอนที่เหมาะสมกับประเทศไทยบริเวณแผ่นดินไหวตื่นในแผ่นเปลือกโลกสำหรับสถานีที่ตั้งบนหิน คือ สมการที่เสนอโดย Idriss (1993), Sadighและคณะ (1997) และ Toro: Gulf Regions (2002) ส่วนสถานที่ที่ตั้งบนดิน คือ สมการที่เสนอโดยDahleและคณะ (1995), Ambraseysและคณะ (2005) และสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกสำหรับสถานีที่ตั้งบนหิน คือ Crouse (1991) สถานที่ที่ตั้งบนดิน คือ Petersen และคณะ (2004)

วิชญ์ หัตถา (2008) รวบรวมข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ในประเทศไทยได้รวบรวมข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2549 ถึงวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2551 ซึ่งข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลที่บันทึกได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบดิจิตอลระบบใหม่ระยะที่ 1 และระยะที่ 2 ของกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งมีข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินทั้งหมด 390 บันทึกจากแผ่นดินไหว 72 เหตุการณ์ แบ่งเป็นข้อมูลจากแหล่งกำเนิดในบริเวณที่ไม่ใช่เขตมุดตัวของเปลือกโลก 90 บันทึก และจากบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก 300 บันทึก แบบจำลองการลดทอนที่เลือกใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 13 ชุด โดยแบ่งเป็นแบบจำลองสำหรับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง 7 ชุด, แบบจำลองสำหรับบริเวณภาคพื้นที่มีเสถียรภาพ 3 ชุด และแบบจำลองสำหรับบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก 3 ชุด ซึ่งในการศึกษาได้พิจารณาความเร่งสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งเทียบเป็นพารามิเตอร์ที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลอง ซึ่งในการประมาณค่าความเร่งเทียบได้พิจารณาคาบธรรมชาติตั้งแต่ 0.05 ถึง 10 วินาที โดยมีอัตราส่วนความหน่วง 5 เปอร์เซ็นต์ และความสอดคล้องของสมการลดทอนกับข้อมูลที่บันทึกได้บ่งชี้โดยใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของผลต่างกำลังสอง (square-root-of-mean-of-square-of-errors, RMS) จากการศึกษาพบว่า สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับบริเวณแผ่นดินไหวตื่นในแผ่นเปลือกโลกที่สอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกได้ใน

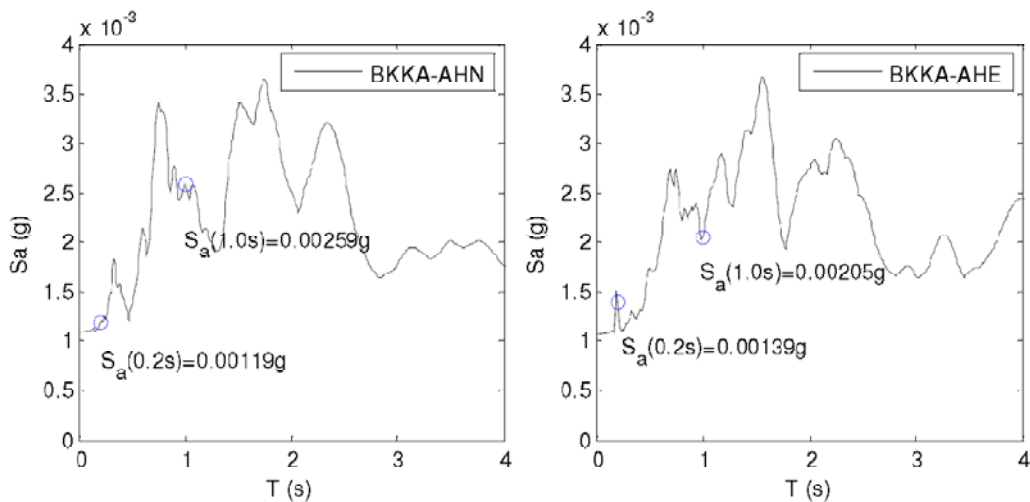
ประเทศไทยมากที่สุดสำหรับสถานีที่ตั้งบนหินได้แก่ สมการที่เสนอโดย Sadighและคณะ (1997) และ Toro (2002)และสำหรับสถานีที่ตั้งบนดินได้แก่ Ambraseys และคณะ (2005)และสมการลดทอนสำหรับบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกที่สอดคล้องกับข้อมูลที่บ้านทีกได้ในประเทศไทยมากที่สุดสำหรับสถานีที่ตั้งบนหินและดินได้แก่ สมการที่เสนอโดยYoungsและคณะ (1997)

ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหวและการสั่นสะเทือน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (RuangrassameeและPalasri 2011) ได้ทำการประมวลผลบันทึกอัตราเร่งที่ผิวดินของเมื่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศพม่าในวันที่ 24 มีนาคม 2554 โดยข้อมูลบันทึกอัตราเร่งจากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวจากสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว ได้ผลอัตราเร่งแรงในแนวราบและสเปกตรัมการตอบสนอง ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเร่งที่ผิวดินที่วัดได้นี้มีค่าสูงที่สุดเท่าที่เคยวัดได้ในประเทศไทย จากนั้นรูปที่ 4 ได้นำค่าที่ตรวจวัดได้มาเทียบกับสมการลดทอนที่ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้เสนอไว้ พบว่าค่าความเร่งสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับสมการของ Sadighและคณะ (1997) โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ วิชาญ หัตถา (2008)

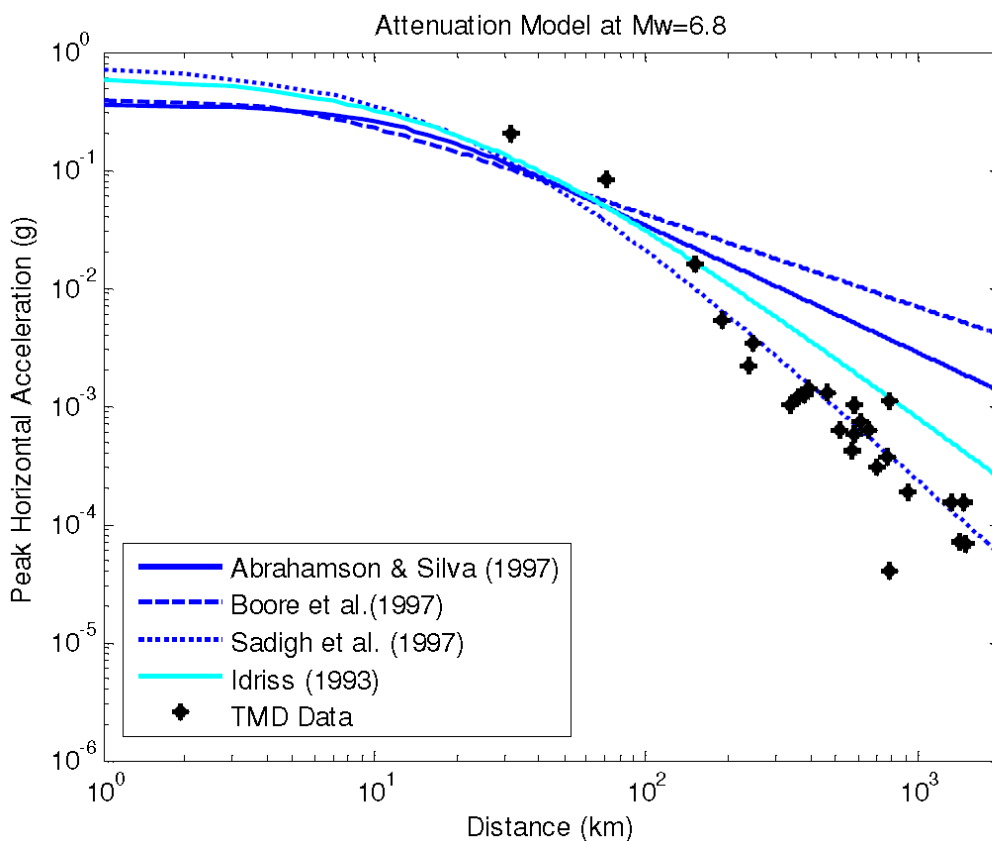


รูปที่ 1.1 กราฟความเร่งที่ผิวดินที่สถานีตรวจวัดความเร่งที่ อ.แม่สาย จ.เชียงราย  
(อาณัติ เรืองวัศมี และ จิตติ ปาลศรี, 2554)





รูปที่ 1.2 สเปกตรัมความเร่งตอบสนองของสถานีตรวจวัดความเร่งที่ อ.แม่สาย จ.เชียงราย (อาณัติ เรืองรัศมี และ จิตติ ปาลศรี, 2554)



รูปที่ 1.3 การลดทอนของความเร่งที่ผิวดินกับระยะทางจากข้อมูลแผ่นดินไหวที่ประเทศพม่า วันที่ 24 มีนาคม 2554 เปรียบเทียบกับสมการต่าง ๆ (อาณัติ เรืองรัศมี และ จิตติ ปาลศรี, 2554)

## บทที่ 2

### ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ในประเทศไทย

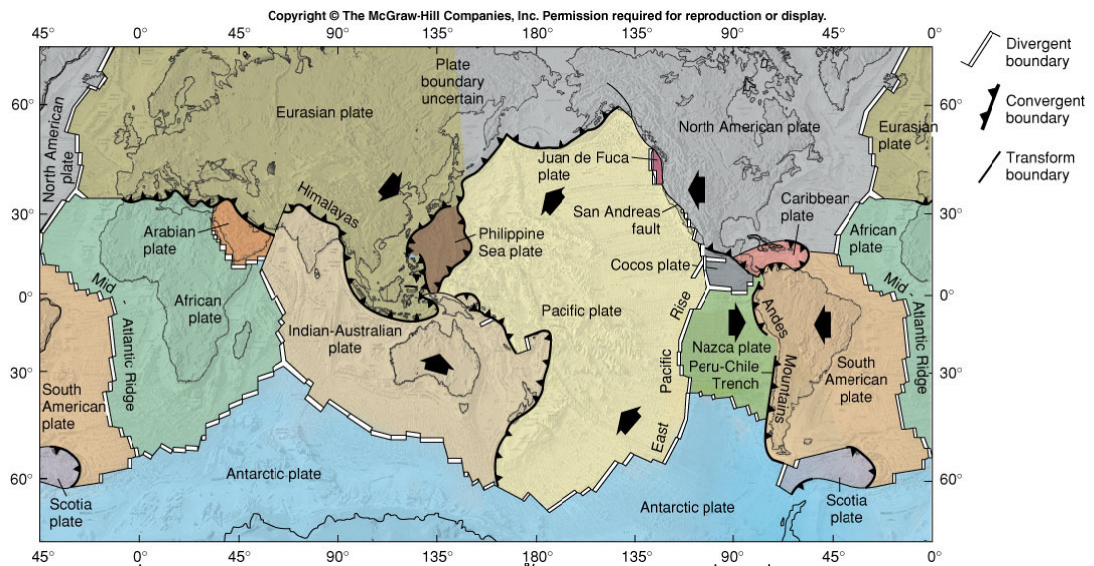
#### 2.1 พื้นฐานวิศวกรรมแผ่นดินไหว

##### 2.1.1 แผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่พื้นดินเกิดการสั่นไหวเนื่องจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกอย่างทันทีทันใด และปลดปล่อยพลังงานศักย์ที่สะสมไว้ ในรูปของ ความเครียด กลายเป็นพลังงานจลน์ และมีคลื่นความสั่นสะเทือนแผ่กระจายไปทุกทิศทาง สามารถก่อให้เกิดความเสียหายและภัยพิบัติต่อบ้านเมือง ที่อยู่อาศัย สิ่งมีชีวิต

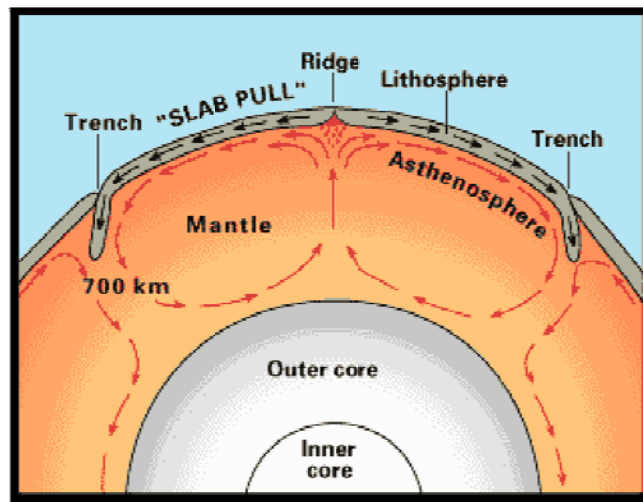
##### 2.1.2 การเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก

การเกิดแผ่นดินไหวนั้น ส่วนใหญ่จะเกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก โดยที่แผ่นเปลือกโลกไม่ได้เป็นชิ้นเดียวกันทั้งหมด แผ่นเปลือกโลกสามารถแบ่งได้เป็น 13 แผ่น คือ แผ่นยูเรเชีย (eurasian plate) แผ่นแปซิฟิก (pacific plate) แผ่นอินเดีย-ออสเตรเลีย (indian-australian plate) แผ่นฟิลิปปินส์ (philippines plate) แผ่นอเมริกาเหนือ (north american plate) แผ่นอเมริกาใต้ (south American plate) แผ่นแอฟริกา (African plate) แผ่นแอนตาร์กติก (antarctic plate) แผ่นนาซกา (nazca plate) แผ่นโคโคส (cocos plate) แผ่นแคริบเบียน (caribbean plate) แผ่นฮวนเดฟูคา (juan de fuca plate) และแผ่นอาหรับ (Arabian plate) แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยที่แผ่นเปลือกโลกแต่ละแผ่นนั้นมีการเคลื่อนตัวอยู่ตลอดเวลา เนื่องมาจากชั้นหินหลอมละลายได้รับพลังงานความร้อนจากแกนโลกและลอยตัวขึ้นผลักดันเปลือกโลกอยู่ตลอดเวลาแสดงดังรูปที่ 2.2 แผ่นเปลือกโลกแต่ละแผ่นจะมีทิศทางการเคลื่อนตัวต่าง ๆ กัน พร้อมกับสะสมพลังงานไว้ภายใน



รูปที่ 2.1 แนวแผ่นดินไหวของโลกรวมทั้งทิศทางการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก

(<http://www.indiana.edu/~geol116/week7/plates.jpg>)



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนตัวของหินหลอมละลายภายในโลก

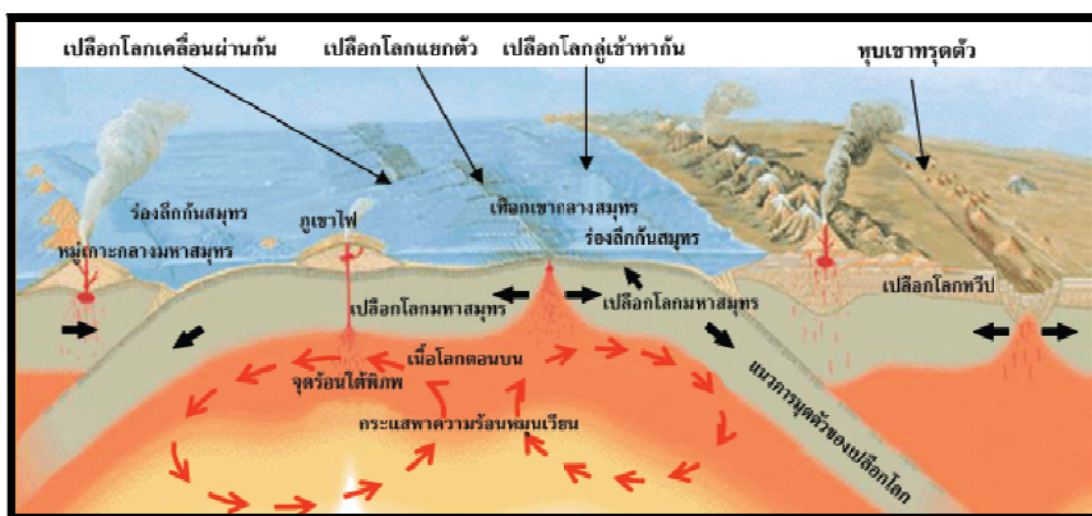
(สำนักแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา, 2547)

การเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก (plate motion) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ (รูปที่ 2.3)

1) เปลือกโลกแยกตัวกัน (divergent plate motion) เกิดจากการดันตัวของหินหนืดขึ้นมาจากชั้นเนื้อโลก เมื่อเย็นตัวลงและแข็งตัวกลายเป็นหินยืดติดกับขอบของแผ่นธรณี กลายเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นธรณีที่กำลังเคลื่อนที่

2) เปลือกโลกลู่เข้าหากัน (convergent plate motion) เป็นบริเวณที่แผ่นธรณีหนึ่งแผ่นมุดตัวลงใต้อีกแผ่นหนึ่ง ตามแนวบริเวณที่เรียกว่าเขตการมุดตัว (subduction zone) เมื่อเปลือกโลกจมตัวลงสู่เนื้อโลก จะร้อนขึ้นจนหลอมเหลวกลายเป็นหินหนืด จึงแทรกดันตัวขึ้นสู่ผิวโลกและอาจปะทุเป็นแนวภูเขาไฟได้

3) เปลือกโลกเคลื่อนที่ผ่านกัน (transform plate motion) เป็นบริเวณที่แผ่นธรณีหนึ่งแผ่นเคลื่อนที่ผ่านกันกับแผ่นหนึ่งทางด้านข้าง ซึ่งก่อให้เกิดแผ่นดินไหวบ่อยครั้ง



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกและการเคลื่อนที่แบบกระแสพาความร้อน (กรมทรัพยากรธรณี, 2554)

การเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกจะก่อให้เกิดแรงอัดมหาศาลสะสมบริเวณขอบของแผ่นเปลือกโลกแต่ละแผ่นเปลือกโลก เมื่อบริเวณขอบของแผ่นเปลือกโลกใดๆ ที่ไม่สามารถทนแรงอัดได้ก็จะเกิดการแตกหักและมีการเคลื่อนตัวโดยฉับพลัน หรือบางครั้งผลักดันให้เปลือกโลกอีกขึ้น คัดโค้งต้อจากนั้นเมื่อสะสมพลังงานมากก็จะดีดตัวกลับเพื่อรักษาสมดุล กระตุ้นให้เกิดความสั่นสะเทือนแผ่กระจายไปทุกทิศทางบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่มีแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ โดยบริเวณขอบของแผ่นเปลือกโลกเป็นบริเวณแนวแผ่นดินไหวของโลกแสดงดังรูปที่ 2.1 หากพาด

ผ่านหรืออยู่ใกล้กับประเทศใด ประเทศนั้นจะมีความเสี่ยงต่อกภัยแผ่นดินไหวค่อนข้างสูง เช่น ประเทศญี่ปุ่น ฟิลิปปินส์ ชิลี สหรัฐอเมริกา เป็นต้น นอกจากนั้นแรงที่สะสมในแผ่นเปลือกโลก ยังถูกส่งผ่านเข้าไปในพื้นที่บริเวณรอยร้าวของหินใต้พื้นโลกหรือที่เรียกว่า รอยเลื่อน (fault) ในกรณีที่รอยเลื่อนใดๆ ไม่สามารถทนแรงที่บดอัดได้ก็จะมีการเคลื่อนตัวอย่างฉับพลันเช่นกัน เพื่อปรับความสมดุลของแรง กระตุ้นให้เกิดแผ่นดินไหว กระจายคลื่นความสั่นสะเทือนไปทุกทิศทาง โดยที่ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวนี้มักจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของแผ่นดินไหวและขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน

ลักษณะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนแบ่งออกได้เป็น 5 แบบแสดงดังรูปที่ 2.4

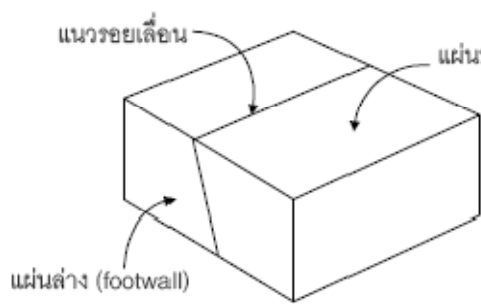
1) การเลื่อนด้านข้าง (Lateral Fault หรือ Strike-Slip Fault) เป็นลักษณะที่เปลือกแผ่นหินมีการเคลื่อนตัวไปทางด้านข้างอย่างเดียวโดยอาจเลื่อนไปทางด้านซ้ายหรือขวาขึ้นอยู่กับมุมมองจากแผ่นหินด้านใดด้านหนึ่ง

2) การเลื่อนปกติ (Normal Fault หรือ Dip-Slip Fault) เป็นลักษณะที่เปลือกแผ่นหินมีการเคลื่อนตัวไปในแนวลาดชันของรอยแตกโดยที่แผ่นบนเคลื่อนตัวลงต่ำกว่าเมื่อคิดสัมพันธ์กับแผ่นล่างลักษณะนี้เป็นการเคลื่อนตัวตามแรงโน้มถ่วงโลกโดยธรรมชาติ

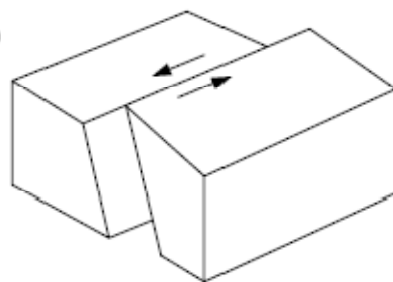
3) การเลื่อนแบบย้อนกลับ (Reverse Fault หรือ Thrust Fault) เป็นลักษณะที่เปลือกแผ่นหินมีการเคลื่อนตัวไปในแนวลาดชันของรอยแตกเช่นกันกับแบบปกติแต่เนื่องจากแผ่นล่างมีการมุดตัวลงทำให้เกิดแรงผลักแผ่นบนให้ดันเลื่อนตัวขึ้นสูงกว่าแผ่นล่าง

4) การเลื่อนแบบเอียงปกติ (Lateral Normal Fault หรือ Oblique Normal Fault) เป็นการรวมลักษณะการเคลื่อนตัวทั้งแบบปกติและการเคลื่อนตัวด้านข้างเข้าด้วยกันทำให้แผ่นหินส่วนบนเกิดการเคลื่อนตัวเอียงลงไปจากแนวเดิม

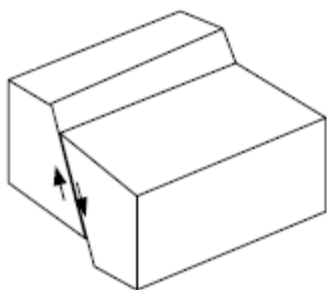
5) การเลื่อนแบบเอียงย้อนกลับ (Lateral Reverse Fault หรือ Oblique Reverse Fault) เป็นการรวมลักษณะการเคลื่อนตัวแบบด้านข้างและแบบกลับทิศเข้าด้วยกันทำให้เกิดการผลักดันเปลือกส่วนบนให้เอียงขึ้นไปจากแนวเดิม



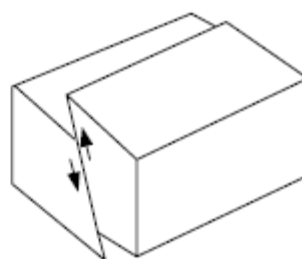
ก่อนแผ่นดินไหว



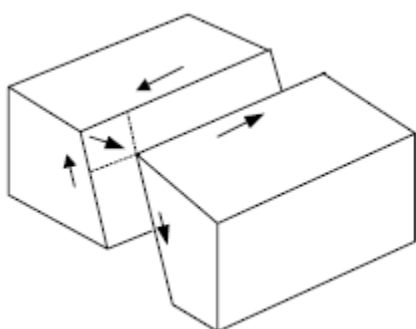
1) การเลื่อนด้านข้าง  
(Lateral Fault หรือ Strike-Slip Fault)



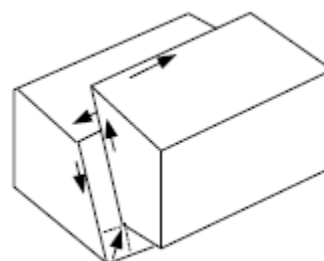
2) การเลื่อนแบบปกติ  
(Normal Fault หรือ Dip-Slip Fault)



3) การเลื่อนแบบกลับทิศ  
(Reverse Fault หรือ Thrust Fault)



4) การเลื่อนแบบเฉียงปกติ  
(Oblique Normal Fault)

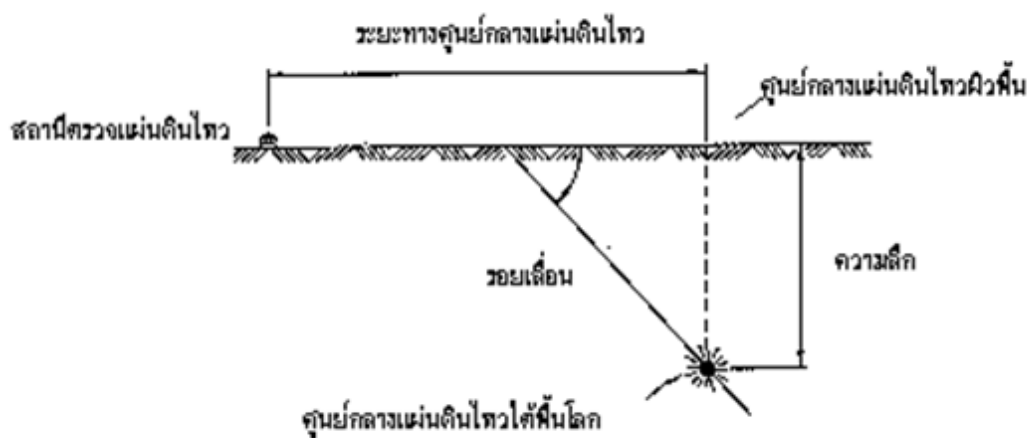


5) การเลื่อนแบบเฉียงกลับทิศ  
(Oblique Reverse Fault)

รูปที่ 2.4 ลักษณะการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน

ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวตามปกติทั่วไปซึ่งมีขนาดไม่รุนแรงมักเป็นการเลื่อนตัวแบบด้านข้าง หรือ การเลื่อนแบบปกติ สำหรับแผ่นดินไหวขนาดใหญ่มักเกิดจากการมุดตัวของแผ่นหินส่วนล่าง (subduction) ผลักดันแผ่นหินส่วนบนขึ้นไปในลักษณะการเลื่อนแบบกลับทิศ ดังเช่นแผ่นดินไหวที่ประเทศชิลีปีพ.ศ. 2538 ขนาด 7.8 และแผ่นดินไหวที่เกิดเหตุการณ์คลื่นยักษ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคมพ.ศ. 2547 ขนาด 9.0

เรียกบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวภายในเปลือกโลกใต้พื้นดินว่า ศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่แท้จริง (Hypocenter) และเรียกบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวตรงผิวพื้นข้างบนซึ่งสามารถกำหนดพิกัดเป็นค่าพิกัดที่ ละติจูดและลองจิจูด ว่าศูนย์กลางแผ่นดินไหวบนผิวพื้น (Epicenter) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 จุดกำเนิดแผ่นดินไหวใต้พื้นโลก (hypocenter) และจุดกำเนิดแผ่นดินไหวบนพื้นผิว (epicenter)(สำนักแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา, 2547)

### 2.1.3 ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว

การส่งผ่านพลังงานที่เปลือกโลกปลดปล่อยจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง เกิดจากการเคลื่อนตัวของอนุภาคในชั้นดินหรือหินการเคลื่อนตัวของอนุภาคดังที่กล่าวมานี้จะมีลักษณะเป็นคลื่นจึงเรียกว่า คลื่นแผ่นดินไหวซึ่งจะแพร่กระจายจากจุดกำเนิดในทุกทิศทุกทางคลื่นแผ่นดินไหวแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือคลื่นภายในตัวกลาง (body waves) และคลื่นผิวโลก (surface waves)

คลื่นภายในตัวกลาง (body waves) เป็นคลื่นความดันสะเทือนที่เดินทางอยู่ภายในโลก แบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิดดังแสดงรูปที่ 2.6

1) คลื่นตามยาวหรือคลื่นปฐมภูมิ (Longitudinal หรือ Primary waves: P-Wave) เป็นคลื่นความดันสะเทือนที่เคลื่อนที่ออกไปโดยที่อนุภาคถูกแรงอัด จนสั้นและขยายตัวไปมาเรื่อยๆ ในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของคลื่น เนื่องจากคลื่นเคลื่อนที่ได้เร็ว จึงเดินทางเข้าเครื่องบันทึกก่อนคลื่นอื่นจึงเรียกว่าคลื่นปฐมภูมิอนุภาคที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านคลื่นออกไป จะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอนุภาคแผ่รัศมีออกโดยรอบ คลื่นนี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1.5 – 8 กิโลเมตร / วินาที

2) คลื่นตามขวางหรือคลื่นทุติยภูมิ (Traverse หรือ Secondary waves: S-Wave) เป็นคลื่นความดันสะเทือนที่เคลื่อนที่ออกไปแล้วทำให้อนุภาคถูกแรงเฉือน เกิดการสั่นในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เนื่องจากไปคลื่นที่เคลื่อนที่ได้ช้า จึงเดินทางเข้าเครื่องบันทึกได้ช้ากว่าคลื่นปฐมภูมิ จึงเรียกว่า คลื่นทุติยภูมิ อนุภาคตัวกลางในการส่งผ่านคลื่นจะไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตร แต่จะเสียรูปไป คลื่นนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณร้อยละ 60 -70 ของคลื่นปฐมภูมิ

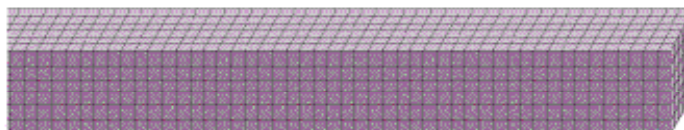
คลื่นผิวโลก (surface waves) เป็นคลื่นความไหวสะเทือนที่เคลื่อนที่ไปตามผิวโลกหรือขนานไปกับผิวโลก แบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิด ดังแสดงรูปที่ 2.6

1) คลื่นเรย์เลห์(Rayleigh: R-Wave) เป็นคลื่นความดันสะเทือนไปตามระนาบ ทำให้อนุภาคตัวกลางสั่นในลักษณะวงรี และค่อยๆ ลดลงเมื่อห่างจากจุดกำเนิด เป็นคลื่นที่ทำให้อนุภาคเกิดการสั่นในแนวตั้ง

2) คลื่นเลิฟ (Love Waves) เป็นคลื่นความดันสะเทือนตามขวางที่ไปตามผิวระนาบ ทำให้อนุภาคเกิดการสั่นในแนวราบ ในทิศทางตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ ความเร็วคลื่นขึ้นกับความหนาแน่นและความแกร่งของตัวกลาง

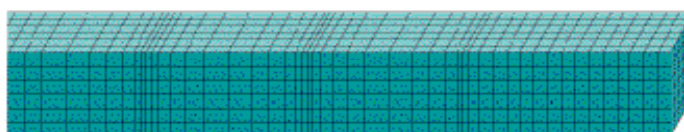


## Seismic Waves



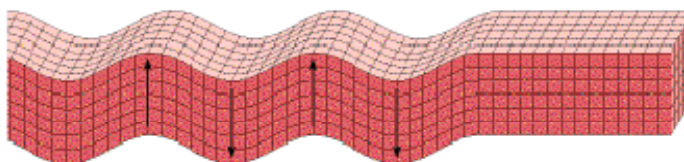
(a) Undisturbed material

Compression    Expansion    Compression    Undisturbed  
 |                    |                    |                    |  
 material                    material



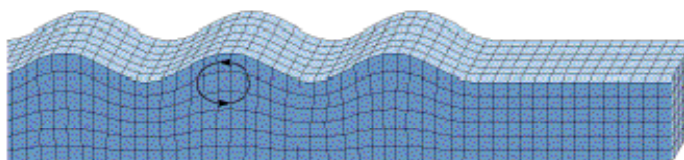
(b) Primary wave

Direction of wave movement →



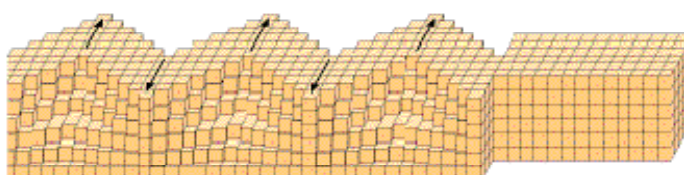
(c) Secondary wave

← Wavelength →  
 →



(d) Rayleigh wave

→



(e) Love wave

→

© 1995 West Publishing Company

รูปที่ 2.6 คลื่นแผ่นดินไหวประเภทต่างๆ (<http://www.darylscience.com>)

## 2.2 ระบบเครือข่ายสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยา

การรวบรวมข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลจากสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งเป็นข้อมูลที่ตรวจวัดได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1 และ สถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2 โดยการรวบรวมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจำเป็นต้องทราบ เวลาเกิด ตำแหน่ง และ ขนาดของเหตุการณ์แผ่นดินไหว โดยอ้างอิงจากแฟ้มเหตุการณ์แผ่นดินไหวของโกลบอล (Global Central Moment Tensor catalog)

หลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2547 ในมหาสมุทรอินเดีย บริเวณเกาะสุมาตรา ทำให้เกิดคลื่นสึนามิซัดเข้าหาชายฝั่งทะเลด้านตะวันตกของประเทศไทย ก่อให้เกิดความเสียหายจำนวนมากต่อชีวิตทรัพย์สินของประชาชนทั้งชาวไทยและนักท่องเที่ยวต่างประเทศจำนวนมากก่อให้เกิดการตื่นตัวอย่างมากในเรื่องของแผ่นดินไหว และคลื่นสึนามิ โดยสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา ได้ขยายและปรับปรุงเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวทั่วประเทศโดยแบ่งเป็น 2 โครงการ โครงการแรก พ.ศ.2548 ถึงพ.ศ.2549 เป็นระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวใหม่ระยะที่ 1 โครงการที่ 2 พ.ศ.2549 ถึงพ.ศ.2551 เป็นระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

### 2.2.1 ระบบเครือข่ายสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1

ระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1 ประกอบด้วยสถานีหลักตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1 และสถานีย่อยตรวจวัดเฉพาะความเร่งของพื้นดินระบบใหม่ระยะที่ 1 ซึ่งสถานีหลักตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 1 ประกอบด้วยเครื่องมือวัดความเร็วของพื้นดินแบบคาบสั้น (short period) 8 สถานี แบบช่วงความถี่กว้าง (broadband) 7 สถานี และติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร่งของพื้นดินควบคู่กับเครื่องตรวจวัดความเร็ว 15 สถานี ส่วนสถานีย่อยตรวจวัดเฉพาะความเร่งของพื้นดินระบบใหม่ระยะที่ 1 กรมอุตุนิยมวิทยาได้ทำการติดตั้งสถานีตรวจวัดความเร่งของพื้นดิน 6 สถานี โดยรายละเอียดชนิดเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหว และเครื่องมือตรวจวัดความเร่งของพื้นดินแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1, ตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 ชนิดของเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1 (วิษณุ ทัศน, 2551)

Instrument/System	Company/Model
8 Short Period Seismometers	Nanometrics Trillium 40
7 Broadband Seismometers	Nanometrics Trillium 120
15 Accelerometers	Metrozet-TSA100S
6 Accelerometers	Metrozet-TSA100S

ตารางที่ 2.2 สถานีหลักตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 1 (วิษณุ ทัศน, 2551)

Code	Station	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)
Short-period seismic stations (Nanometrics Trillium 40)				
KHLT	เขื่อนเขาแหลม	14.797	98.5893	164
MHMT	แม่สะเรียง	18.1764	97.931	164
KRDT	นครราชสีมา	14.5905	101.8442	266
PKDT	ภูเก็ต	7.892	98.335	53
RNTT	ระนอง	9.3904	98.4778	38
SKNT	สกลนคร	16.9742	103.9815	254
SURT	สุราษฎร์ธานี	8.6582	98.4098	20
TRTT	ตรัง	7.8362	99.6912	71
Broadband seismic stations (Nanometrics Trillium 120)				
CHBT	จันทบุรี	12.7526	102.3297	4
CMMT	เชียงใหม่	18.8128	98.9476	400
SRDT	กาญจนบุรี	14.3945	99.1212	122
MHIT	แม่ฮ่องสอน	19.3148	97.9632	270
PBKT	เพชรบูรณ์	16.5733	100.9687	8
SKLT	สงขลา	7.1735	100.6188	145
UBPT	อุบลราชธานี	15.2773	105.4695	120

ตารางที่ 2.3 สถานีย่อยตรวจวัดเฉพาะความเร่งระบบใหม่ระยะที่ 1 (วิษณุ ทัศน, 2551)

Code	Station	System	Latitude	Longitude
		sensitivity	(°N)	(°E)
BKKA	สถานีกรมอุตุฯนิยมหาวิทยาลัยบางนา	TSA 100S	13.664	101.61
SPBA	สถานีอุตุฯนิยมหาวิทยาสุพรรณบุรี	TSA 100S	14.475	100
KCBA	สถานีอุตุฯนิยมหาวิทยากาญจนบุรี	TSA 100S	14.022	99.536
CHLA	สถานีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	TSA 100S	13.737	100.53
PTNA	สถานีอุตุฯนิยมหาวิทยาปทุมธานี	TSA 100S	14.066	100.371
CMCA	ศูนย์อุตุฯนิยมหาวิทยาภาคเหนือ	TSA 100S	18.722	98.969

การส่งข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินจากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวระยะที่ 1 มายังสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุฯนิยมหาวิทยา ได้ใช้โปรแกรม Atlas Version 1.2 ซึ่งผลิตโดยบริษัท Nanometrics Inc. เชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหว ซึ่งโปรแกรม Atlas Version 1.2 สามารถที่จะแสดงรายการข้อมูลแผ่นดินไหวหลาย ๆ เหตุการณ์ในหน้าต่างการแสดงผลหลักโดยผู้ใช้สามารถที่จะเลือกดูข้อมูลประวัติเวลาการสั่นไหวของพื้นดินของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่แต่ละสถานีได้และสามารถที่จะเลือกช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลได้

System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบดิจิตอลในระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุฯนิยมหาวิทยาระบบใหม่ระยะที่ 1 แสดงในสมการ(2.1)และ (2.2)ซึ่งใช้ในการแปลงเพิ่มข้อมูลประวัติเวลาการสั่นไหวของพื้นดินที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวให้เป็นเพิ่มข้อมูลประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน และเพิ่มข้อมูลประวัติเวลาความเร็วของพื้นดิน

เครื่องมือตรวจวัดความเร่ง (Taurus+TSA100S) :

$$\begin{aligned} \text{System sensitivity} &= (8,388,608 \text{count} / 20 \text{volt}) \times (0.51 \text{volt} / (m / s^2)) \\ &= 213,909.504 (m / s^2) / \text{count} \end{aligned} \quad (2.1)$$

เครื่องมือตรวจวัดความเร็ว (Taurus + Trillium40):

$$\begin{aligned} \text{sensitivity} &= (8,388,608 \text{count} / 8 \text{volt}) \times (1500 \text{volt} / (m / s)) \\ &= 1,572,864,000 (m / s) / \text{count} \end{aligned} \quad (2.2)$$

System

เครื่องมือตรวจวัดความเร็ว(Taurus + Trillium120):

$$\begin{aligned} \text{System sensitivity} &= (8,388,608 \text{count} / 20 \text{volt}) \times (1200 \text{volt} / (\text{m} / \text{s})) \\ &= 503,316,480 (\text{m} / \text{s}) / \text{count} \end{aligned} \quad (2.3)$$

### 2.2.2 ระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

ระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2 ประกอบด้วย สถานีหลักตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2 มีทั้งหมด 25 สถานี ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ทั้งความเร็วของพื้นดินและความเร่งของพื้นดินโดยแบ่งเป็น เครื่องมือตรวจวัดความเร็วของพื้นดินแบบช่วงความถี่กว้าง (broadband) 10 สถานี และแบบคาบสั้น (short period) 15 สถานี , สถานีย่อยตรวจวัดเฉพาะความเร่งของพื้นดินระบบใหม่ระยะที่ 2 16 สถานี, สถานีตรวจวัดการเคลื่อนที่ของเปลือกโลก (global positioning system, GPS) 5 สถานี, สถานีตรวจวัดระดับน้ำทะเล (tide gauge) 9 สถานี, สถานีหลุมเจาะ (borehole) 2 สถานีที่สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร ซึ่งรายละเอียดของสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2 แสดงในตารางที่ 2.4 - 2.7

ตารางที่ 2.4 ชนิดของเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2 (วิษณุ หัตถา, 2551)

Instrument/System	Company/Model
15 Short Period Seismometers	Geotech (S-13)
10 Broadband Seismometers	Geotech (KS-2000M)
25 Accelerometers	Geotech (PA-23)
Borehole Seismometer	Geotech (KS-2000BH)
Borehole Accelerometer	Geotech (PA-23BH)
16 Accelerometers	Smart-24A
Data Acquisition	Smart-24R
Software	Smart Quake, SeisPlus
Telecommunication	5 VSAT and 20 ADSL networks

ตารางที่ 2.5 สถานีหลักตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2 (วิษณุ ทัศน, 2551)

Code	Station	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)
Short-period seismic stations (Geotech S-13) and Accelerometer (PA-23)				
PHIT	เขื่อนแควน้อยจ.พิษณุโลก	17.189	100.416	114
SUKH	อ่างเก็บน้ำห้วยท่าแพรจ.สุโขทัย	17.482	99.631	58
UTTA	เขื่อนสิริกิติ์จ.อุตรดิตถ์	17.744	100.554	63
LAMP	เขื่อนกักลมจ.ลำปาง	18.523	99.632	247
NAN	ฝายน้ำกอนจ.น่าน	19.284	100.912	262
PAYA	อ่างเก็บน้ำแม่ปืมจ.พะเยา	19.36	99.869	408
UMPA	สถานีอุตุนิยมวิทยาอุ้มผางจ.ตาก	16.206	98.86	403
UTHA	เขื่อนทับเสลาจ.อุทัยธานี	15.559	99.445	129
PHET	อ่างเก็บน้ำแก่งกระจานจ.เพชรบูรณ์	12.913	99.627	101
PATY	สถานีอุตุนิยมวิทยาพญาจ.ชลบุรี	12.923	100.866	39
CHAI	อ่างเก็บน้ำช่อระกาจ.ชัยภูมิ	15.902	101.986	199
KHON	สถานีอากาศเกษตรท่าพระจ.ขอนแก่น	16.338	102.823	135
SURI	อ่างเก็บน้ำอำปี้มจ.สุรินทร์	14.769	103.553	126
SRAK	อ่างเก็บน้ำห้วยยางจ.สระแก้ว	14.012	102.043	97
KRAB	อ่างเก็บน้ำบางก่าปรีจ.กระบี่	8.222	99.197	73
Broadband seismic stations (Geotech KS-2000M) and Accelerometer (PA-23)				
PHRA	อ่างเก็บน้ำสองแควจ.แพร่	18.499	100.229	187
CRAI	อ่างเก็บน้ำห้วยช้างจ.เชียงราย	20.229	100.373	357
CMAI	สถานีอุตุนิยมวิทยาดอยอ่างขางจ.เชียงใหม่	19.932	99.045	1,503
PRAC	เขื่อนปรางค์บุรีจ.ประจวบคีรีขันธ์	12.473	99.793	54
SRIT	อ่างเก็บน้ำคลองดินแดงจ.นครศรีธรรมราช	8.595	99.602	58
SURA	ฝายเก็บน้ำท่าทองจ.สุราษฎร์ธานี	9.166	99.629	-6
NONG	อ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดจ.หนองคาย	18.063	103.146	140
PANO	อ่างเก็บน้ำห้วยแคนจ.นครพนม	17.148	104.6121	136
NAYO	อ่างเก็บน้ำคลองท่าด่านจ.นครนายก	14.315	101.321	106
LOEI	อ่างเก็บน้ำห้วยน้ำหนามจ.เลย	17.509	101.264	306

ตารางที่ 2.6 สถานีย่อยตรวจวัดเฉพาะความเร่งระบบใหม่ระยะที่ 2 (วิษณุ รัตทา, 2551)

Code	Station	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)
Accelerometer (Smart-24A)				
HUAA	หัวหิน จ.ประจวบ	12.576	99.957	48
NANA	สถานีอุตุนิยมวิทยา	18.7658	100.7669	203
MSAA	ที่ว่าการอำเภอแม่สายจ.เชียงราย	20.4276	99.8865	416
MCHA	ที่ว่าการอำเภอแม่จันจ.เชียงราย	20.1447	99.8557	425
CRAA	สถานีอุตุนิยมวิทยาเชียงราย	19.9602	99.8847	392
LAMA	สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง	18.2768	99.5099	244
PHRA	สถานีอุตุนิยมวิทยาแพร่	18.1272	100.1656	167
SOOA	ที่ว่าการอำเภอสูงเม่น	18.0157	100.1149	160
MOOA	ดอยมูเซอร์	16.7507	98.9384	854
SODA	ที่ว่าการอำเภอแม่สอดจ.ตาก	16.7009	98.5448	223
TAKA	สถานีอุตุนิยมวิทยาทาก	16.8777	99.1432	111
DAOA	อ.เชียงดาวจ.เชียงใหม่	19.3612	98.9654	397
SANA	อ.สันทราย จ.เชียงใหม่	18.8479	99.0487	345
HONA	สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่ฮ่องสอน	19.2985	97.9759	256
KOOA	อ.ขุนยวม จ.แม่ฮ่องสอน	18.8296	97.9388	622
AYUA	จ.อุตรดิตถ์	14.3521	100.577	16

ตารางที่ 2.7 สถานีย่อยตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบหลุมเจาะ (วิษณุ รัตทา, 2551)

Code	Station	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)
Geotech (KS-200BH)				
TMDB	กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา	13.668	100.607	-6
Geotech (KS-23BH)				
TMDA	กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา	13.668	100.607	-26

การส่งข้อมูลการสั้นไหวของพื้นดินจากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวระยะที่ 2 มายังสำนัก  
เฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยาใช้ระบบดาวเทียม VSAT, IPSTAR และระบบโมเด็ม  
(ADSL telecommunications)

System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบดิจิทัลในระบบเครือข่าย  
ตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยา ระบบใหม่ระยะที่ 2 ได้แสดงในสมการที่ 2.4 และ 2.5  
ซึ่งใช้ในการแปลงเพิ่มข้อมูลประวัติเวลาการสั้นไหวของพื้นดินที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัด  
แผ่นดินไหวให้เป็นเพิ่มข้อมูลประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน และเพิ่มข้อมูลประวัติเวลา  
ความเร็วของพื้นดิน

เครื่องมือตรวจวัดความเร็ว:

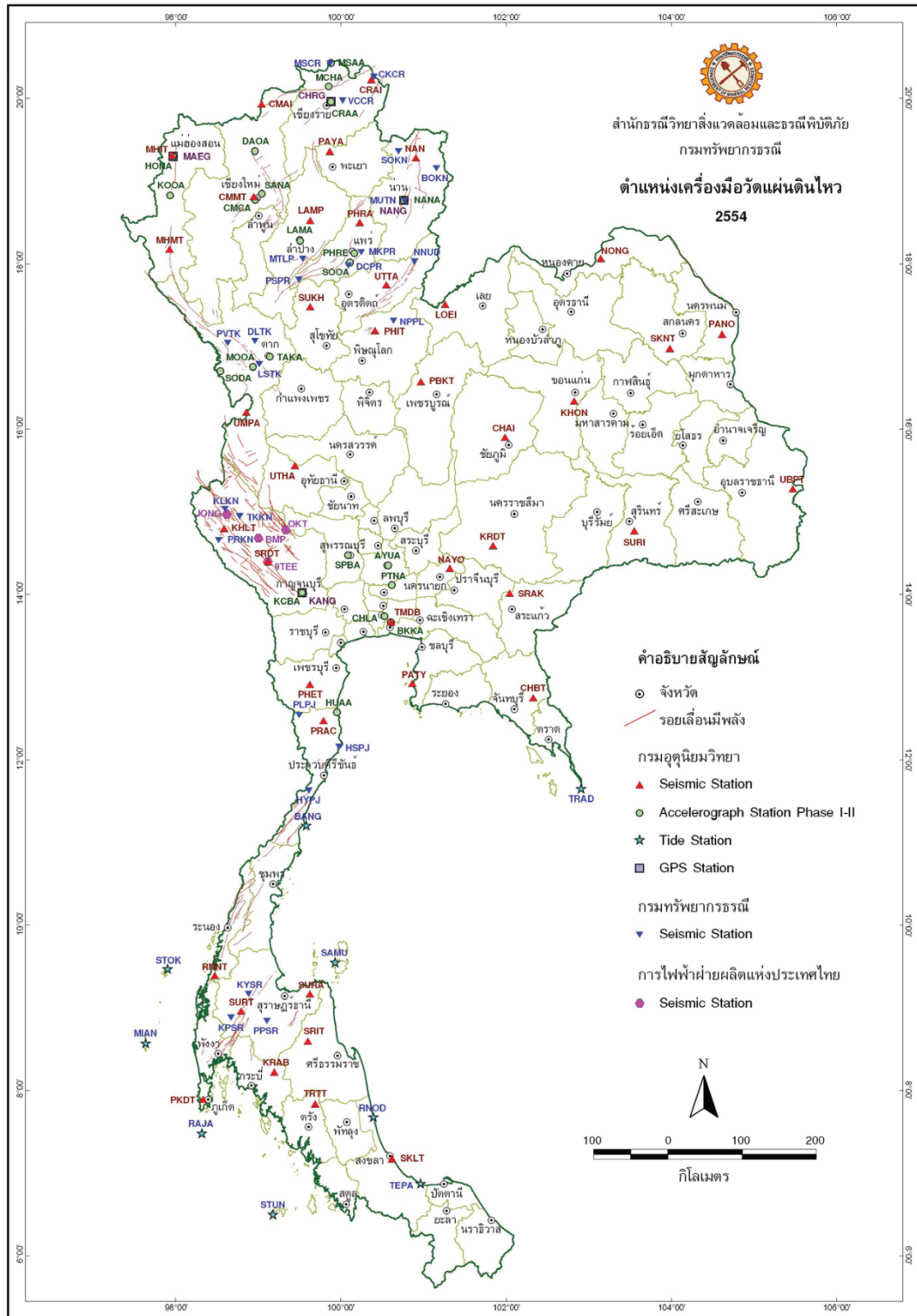
$$\text{System sensitivity} = \frac{\text{BitWeight}(LSB, \mu V / \text{count})}{\text{SensorSensitivity}(V_m / s)} \quad (2.4)$$

เครื่องมือตรวจวัดความเร่ง:

$$\text{System sensitivity} = \frac{\text{BitWeight}(LSB, \mu V / \text{count})}{\text{SensorSensitivity}(V_m / s^2)} \quad (2.5)$$

โดยค่า Sensor sensitivity, LSB และ System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัด  
แผ่นดินไหวในระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2 แสดงดังตารางใน  
ภาคผนวก






รูปที่ 2.7 สถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 1 และระยะที่ 2  
(สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย)

## 2.3 ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว

การพิจารณาช่วงเวลาในการดาวน์โหลดข้อมูลจากสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา ได้พิจารณาเวลาการเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวในแฟ้มเหตุการณ์แผ่นดินไหวของโกลด์บอล (Global Central Moment Tensor catalog) ซึ่งข้อมูลเหตุการณ์การเกิดแผ่นดินไหวของ Global CMT Catalog มีความสำคัญต่อการศึกษาในครั้งนี้เป็นอย่างมาก โดยฐานข้อมูล Global CMT Catalog ประกอบด้วย วันและเวลาของเหตุการณ์แผ่นดินไหว (date and time), ขนาดโมเมนต์ (moment magnitude,  $M_w$ ), ระนาบรอยเลื่อน (fault plane) ประกอบด้วยมุม strike, มุม dip และมุม slip, ศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว (epicenter), ความลึกศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว (focal depth)

### 2.3.1 รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหว

การค้นหาข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวในฐานข้อมูล Global CMT Catalog ได้ค้นหาจากระบบออนไลน์ โดยการกำหนดขอบเขตในการค้นหาข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวประกอบด้วยขอบเขตพิกัดฉาก ละติจูด  $0^\circ$  ถึง  $25^\circ$  และ ลองจิจูด  $90^\circ$  ถึง  $110^\circ$  ขนาดของแผ่นดินไหว (moment magnitude,  $M_w$ ) มากกว่า 4 ขึ้นไป และช่วงเวลาการเกิดแผ่นดินไหวที่ต้องการค้นหาได้กำหนดตั้งแต่ เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2551 ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2555 ซึ่งสืบค้นได้จาก [www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org) ดังแสดงรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9

 **Global CMT Catalog Search**

**Search form**

Enter parameters for CMT catalog search. All constraints are 'AND' logic.

**Date constraints:** catalog starts in 1976 and goes through present  
There are several methods to choose date ranges--use the radio buttons to select which method you want to use

Starting Date:			Ending Date:		
<input checked="" type="radio"/> Year:	2008	Month: 5	Day: 31	<input checked="" type="radio"/> Year:	2011
<input type="radio"/> Year:	1976	Julian Day:	1	<input type="radio"/> Year:	1976
			Julian Day:	1	
			Number of days:	1	Including starting day

**Magnitude constraints:** catalog includes moderate to large earthquakes only  
(see note on calculation of magnitudes)

Moment magnitude: 4  <= Mw <= 10

Surface wave magnitude: 0  <= Ms <= 10

Body wave magnitude: 0  <= mb <= 10

**Location constraints:**

Latitude: (degrees) from 0  to 25  Must be between -90 and 90

Longitude: (degrees) from 90  to 110  Must be between -180 and 180

Depth: (kilometers) from 0  to 1000

รูปที่ 2.8 การค้นหาข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวในฐานข้อมูล Global CMT Catalog

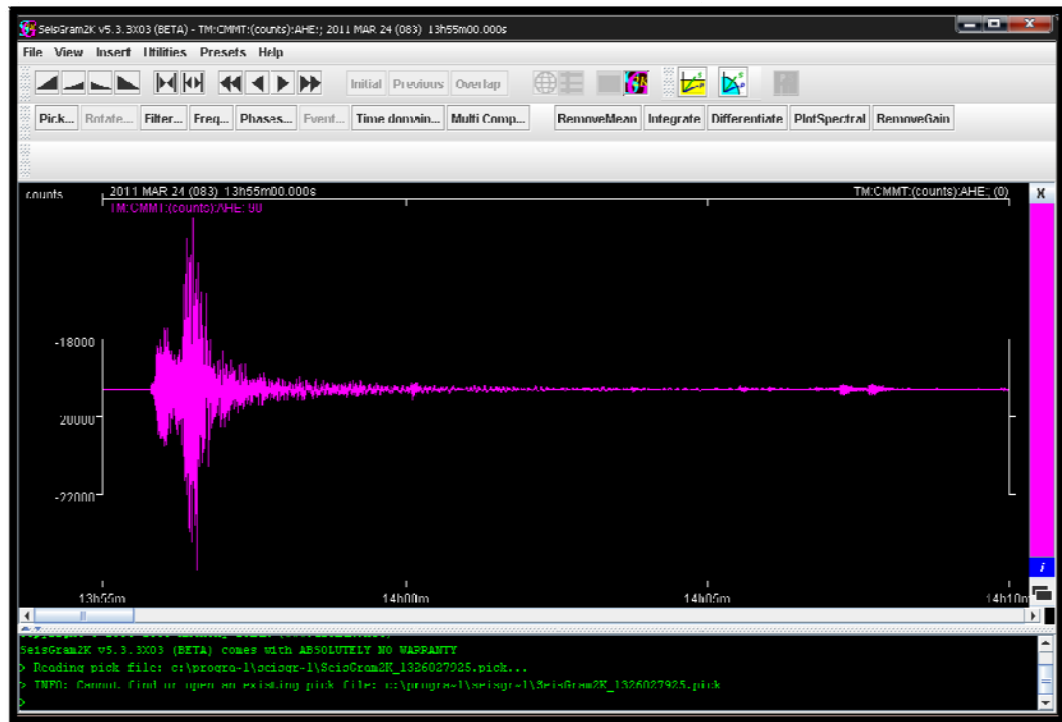
Global CMT Catalog	
<b>Search criteria:</b>	
Start date: 2008/5/31 End date: 2011/8/26	
U <=lat<= 20 W <=lon<= 110	
U <=depth<= 1000 -9999 <=time shift<= 9999	
0 <=mb<= 10 0<=Mw<= 10 4<=Mn<= 10	
0 <=revision plunger<= 90 0 <=null plunger<= 90	
<b>Results</b>	
200806051015A NORTHERN SUMATRA, INDONESIA	
Date: 2009/07/3	Centroid Time: 18:15:33.9 GMT
Lat = 0.10 Lon = 97.53	
Depth = 51.0 Mw = 1.1	
Centroid time minus hypocenter time: 0.4	
Moment Tensor: Expo=14 0.722 -0.450 -0.272 0.030 -0.467 0.225	
Mu = 5.8 nu = 5.1 Ms = 0.0 Scalar Moment = 1.15e124	
Fault plane: strike=310 dip=23 slip=30	
Fault plane: strike=127 dip=07 slip=00	
2008061015A NORTHERN SUMATRA, INDONESIA	
Date: 2009/07/13	Centroid Time: 16:13:25.1 GMT
Lat = 0.37 Lon = 97.28	
Depth = 33.0 Mw = 0.0	
Centroid time minus hypocenter time: 0.0	
Moment Tensor: Expo=23 4.020 -2.100 -0.910 2.900 -2.700 2.520	
Mu = 5.1 nu = 5.0 Ms = 0.0 Scalar Moment = 4.35e123	
Fault plane: strike=297 dip=28 slip=25	
Fault plane: strike=172 dip=65 slip=50	

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างรายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวในฐานข้อมูล Global CMT Catalog

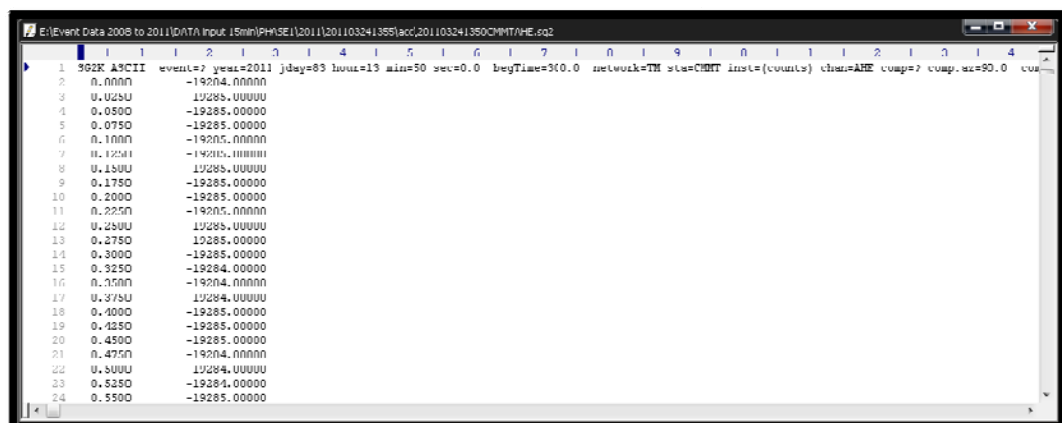
หลังจากรวบรวมรายการเหตุการณ์แผ่นดินไหว จากนั้นทำการรวบรวมข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่ตรวจวัดได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบดิจิตอลระบบใหม่ระยะที่ 1 และระยะที่ 2 ซึ่งสามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้โดยตรงกับสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา โดยข้อมูลข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่ตรวจวัดได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบดิจิตอลระบบใหม่ระยะที่ 1 อยู่ในรูปแบบของแฟ้มข้อมูลประวัติเวลาการเคลื่อนที่ของพื้นดิน (ground motion time history data) โดยชนิดของข้อมูลจะเป็น SEED format ซึ่งใช้โปรแกรม Atlas ในการอ่านข้อมูลชนิดนี้แต่โปรแกรมจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงชนิดของข้อมูลได้ จึงต้องทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของไฟล์ให้เป็น SAC format เพื่อสะดวกต่อการอ่านข้อมูลและเปลี่ยนแปลงชนิดข้อมูลเป็น ASCII format โดยใช้โปรแกรม SeisGram2K ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สำหรับข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่ตรวจวัดได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบดิจิตอลระบบใหม่ระยะที่ 2 ซึ่งข้อมูลจะเก็บเป็นแฟ้มข้อมูล Real Time อยู่ในรูปแฟ้มข้อมูล SUD format ซึ่งสามารถแปลงเป็น Waveform ที่อยู่ในรูปแฟ้มข้อมูล SUD format ได้ด้วยโปรแกรม Smart Extract และใช้โปรแกรม SeisPlusเปลี่ยนแปลงชนิดของแฟ้มข้อมูลจาก SUD format เป็น ASCII format หรือ SAC format ได้อย่างรวดเร็วซึ่งโปรแกรม Seisplusสามารถแยกแฟ้มข้อมูลประวัติเวลาการสั่นไหวของพื้นดินเป็นของแต่ละสถานีในแต่ละองค์ประกอบ (component) ให้อัตโนมัติ

หลังจากที่ทำการแปลงข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินทั้งหมดให้อยู่ในรูป ASCII format (text file) เรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.11มีส่วนหัวเรื่องอยู่ 1 บรรทัด ซึ่งบอกรายละเอียดของข้อมูล เช่น เวลาที่เริ่มต้นบันทึกข้อมูล ชื่อสถานีที่บันทึก ทิศทาง ระยะเวลาระหว่างการ

บันทึกข้อมูลแต่ละค่า และจำนวนข้อมูล เป็นต้น และบรรทัดถัดๆ ไปเป็นคู่ลำดับของเวลา และ คำนับ (count) ของข้อมูลตามลำดับ ซึ่งค่านับต้องถูกแปลงให้เป็นข้อมูลประวัติเวลาความเร็วของพื้นดิน (velocity time history) หรือข้อมูลประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน (acceleration time history) ตามประเภทและความไวของเครื่องมือตรวจวัดคลื่นแผ่นดินไหวซึ่งแล้วแต่กรณี



รูปที่ 2.10 หน้าจอแสดงโปรแกรมSeisGram2K



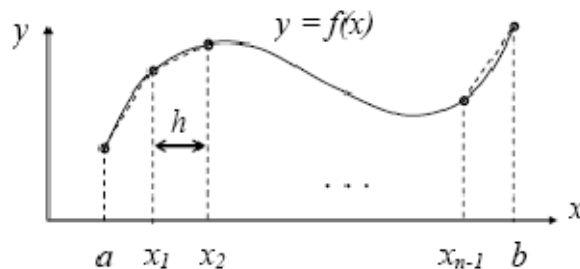
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างเพิ่มข้อความASCII format

### 2.3.2 การคำนวณความเร่ง ความเร็ว และการกระจัดของพื้นดิน

ในการศึกษาคลิ้นแผ่นดินไหวตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันโดยทั่วไปตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาและใช้ในการวิเคราะห์แผ่นดินไหวประกอบด้วย ข้อมูลความเร่งของพื้นดิน ข้อมูลความเร็วของพื้นดิน และข้อมูลการกระจัดของพื้นดินโดยตัวแปรทั้ง 3 ตัวมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเมื่อทราบค่าข้อมูลประวัติเวลาข้อมูลใดข้อมูลหนึ่งจะสามารถคำนวณหาค่าอื่นได้โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ โดยการหาปริพันธ์ (integration) ของข้อมูลประวัติเวลาความเร่งจะได้ค่าข้อมูลประวัติเวลาเร็วและหาปริพันธ์ข้อมูลประวัติเวลาความเร็วจะได้ข้อมูลประวัติเวลาการกระจัดของพื้นดิน และในทางกลับกันสามารถใช้การหาอนุพันธ์ (differentiation) ของข้อมูลประวัติเวลาการกระจัดของพื้นดินจะได้ค่าข้อมูลประวัติเวลาเร็ว และหาอนุพันธ์ข้อมูลประวัติเวลาเร็วจะได้ค่าข้อมูลประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน

#### 1) การหาปริพันธ์

การหาปริพันธ์ของข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่บันทึกค่าเป็นช่วงๆ ของเวลาสามารถทำได้โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule) ซึ่งสมมติว่าการเคลื่อนที่ระหว่างช่วงเวลาแปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 2.12 และสมการที่ (2.6)



รูปที่ 2.12 การหาปริพันธ์โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบหลายช่วง

$$I = \int_a^b f(x) dx \approx h \left[ \frac{1}{2} f(a) + f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_{n-1}) + \frac{1}{2} f(b) \right] \quad (2.6)$$

โดยที่

$I$  = พื้นที่ใต้กราฟระหว่างช่วง ถึง

$h$  =  $(b - a) / n$

$n$  = จำนวนช่วงย่อย

เมื่อนำมาประยุกต์สามารถใช้แปลงความเร่งให้เป็นความเร็วได้ดังสมการที่ (2.7) และแปลงความเร็วให้เป็นการกระจัดดังสมการที่ (2.8)

$$\dot{x}_n = \dot{x}_{n-1} + \frac{h}{2}(\ddot{x}_n + \ddot{x}_{n-1}) \quad (2.7)$$

$$x_n = x_{n-1} + \frac{h}{2}(\dot{x}_n + \dot{x}_{n-1}) \quad (2.8)$$

โดยที่

- $h$  = ช่วงเวลาของการบันทึกข้อมูลแต่ละค่า (time step, ) =  $1 / Fs$
- $Fs$  = ความถี่ของการบันทึกข้อมูล (sampling frequency)
- $x$  = การกระจัดของพื้นดิน (ground displacement)
- $\dot{x}$  = ความเร็วของพื้นดิน (ground velocity)
- $\ddot{x}$  = ความเร่งของพื้นดิน (ground acceleration)
- $n$  = ลำดับที่  $n$  ของข้อมูล

## 2) การหาอนุพันธ์

การหาอนุพันธ์ที่นิยมใช้ได้แก่ วิธีผลต่างกลาง (central difference method) เพราะสามารถให้ค่าประมาณที่มีความถูกต้องมากกว่า วิธีผลต่างจากการแบ่งย่อยไปข้างหน้า (forward difference) และ วิธีผลต่างจากการแบ่งย่อยย้อนหลัง (backward difference) โดยวิธีผลต่างกลางนี้มีหลักการโดยการใช้สมการพหุนามลากรางจ์ (lagrange polynomial) ดังสมการที่ (2.9)

$$f(x) = L_{i-1}(x)f(x_{i-1}) + L_i(x)f(x_i) + L_{i+1}(x)f(x_{i+1}) \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(x-x_i)(x-x_{i+1})}{(x_{i-1}-x_i)(x_{i-1}-x_{i+1})} f(x_{i-1}) + \frac{(x-x_{i-1})(x-x_{i+1})}{(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})} f(x_i) \\ &+ \frac{(x-x_{i-1})(x-x_i)}{(x_{i+1}-x_{i-1})(x_{i+1}-x_i)} f(x_{i+1}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

ซึ่งสามารถหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งและจัดรูปสมการจะได้

$$f'(x) = \frac{2x - x_i - x_{i+1}}{2h^2} f(x_{i-1}) - \frac{2x - x_{i-1} - x_{i+1}}{h^2} f(x_i) - \frac{2x - x_{i-1} - x_i}{2h^2} f(x_{i+1}) \quad (2.11)$$

เมื่อแทนค่า  $x$  ด้วย  $x_i$  จะได้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งผลต่างกลางที่ให้ค่าความผิดพลาดอันดับ 2

$$f'(x_i) = \frac{1}{2h} (-f(x_{i-1}) + f(x_{i+1})) \quad (2.12)$$

เราสามารถเพิ่มความเที่ยงตรงของสมการ (2.12) โดยหลักการเดียวกันด้วยการประยุกต์ใช้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งผลต่างกลาง ที่ให้ค่าความผิดพลาดอันดับ 4 ดังสมการที่ (2.13)

$$f'(x_i) = \frac{1}{12h} (f(x_{i-2}) - 8f(x_{i-1}) + 8f(x_{i+1}) - f(x_{i+2})) \quad (2.13)$$

สมการที่ (2.13) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแปลงข้อมูลค่าการกระจัดให้เป็นความเร็วดังสมการที่ (2.14) และข้อมูลค่าความเร็วให้เป็นความเร่งดังสมการที่ (2.15)

$$\dot{x}_n = \frac{1}{12h} (x_{n-2} - 8x_{n-1} + 8x_{n+1} - x_{n+2}) \quad (2.14)$$

$$\ddot{x}_n = \frac{1}{12h} (\dot{x}_{n-2} - 8\dot{x}_{n-1} + 8\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_{n+2}) \quad (2.15)$$

โดยที่

$$h = \text{ช่วงเวลาในการบันทึกข้อมูลในแต่ละค่า (time step, )} = \frac{1}{Fs}$$

$$Fs = \text{ความถี่ในการบันทึกข้อมูล}$$

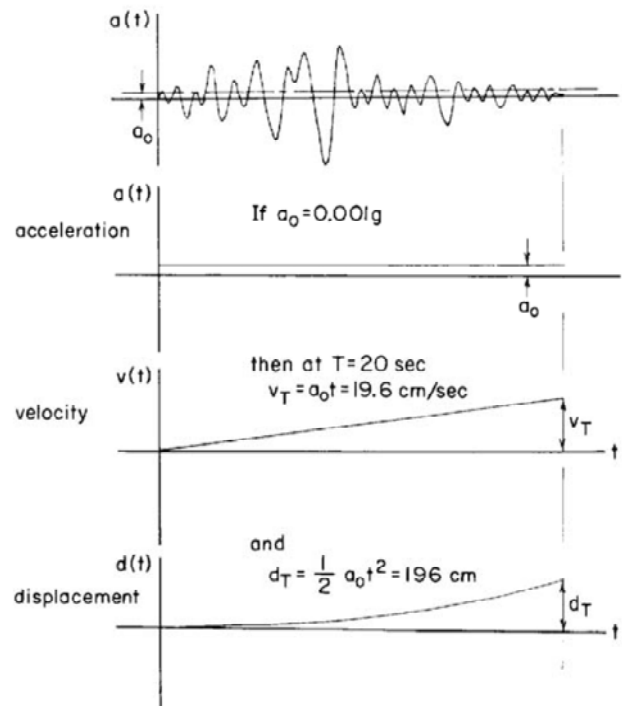
$$\ddot{x} = \text{ความเร่งของพื้นดิน}$$

$$\dot{x} = \text{ความเร็วของพื้นดิน}$$

$$x = \text{การกระจัดของพื้นดิน}$$

### 2.3.3 การปรับแก้เส้นฐานและการกรองสัญญาณรบกวนของคลื่นแผ่นดินไหว

#### 1) การปรับแก้เส้นฐาน



รูปที่ 2.13 การปรับแก้เส้นฐานข้อมูลประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน (Hudson, 1979)

การปรับแก้เส้นฐานของข้อมูลประวัติเวลาการสั่นไหวของพื้นดินมีความจำเป็นในกระบวนการสร้างฐานข้อมูล เนื่องจากข้อมูลประวัติเวลาการสั่นไหวของพื้นดินที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวมีทั้งค่าบวก และค่าลบซึ่งเส้นฐานของข้อมูลอาจจะไม่ได้อยู่ที่พิคตศูนย์ โดยความเร็วของพื้นดินและการกระจัดของพื้นดินที่ได้จากการหาปริพันธ์ความเร่งของพื้นดินจะไม่แกว่งรอบแกนศูนย์รูปที่ 2.13 ซึ่งถ้าไม่มีการปรับแก้เส้นฐานข้อมูลอาจจะมีความไม่ถูกต้อง

การปรับแก้เส้นฐานของการศึกษานี้ได้อ้างอิงจาก Hudson (1979) ซึ่งได้อธิบายไว้ว่า หากมีความคลาดเคลื่อนคงที่  $a_0$  ในประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน เมื่อนำไปหาค่าปริพันธ์จะทำให้ข้อมูลความเร็วของพื้นดินมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เมื่อความสั่นสะเทือนของพื้นดินสิ้นสุดลง ซึ่งไม่สมเหตุสมผลกับความเป็นจริงดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับแก้เส้นฐานของประวัติเวลาความเร่งของพื้นดิน ดังสมการที่ (2.16)

$$a^*(t) = a(t) - a_0 \quad (2.16)$$



โดยที่

$a^*(t)$  = ความเร่งของพื้นดินที่ได้ปรับแก้เส้นฐาน ณ เวลา

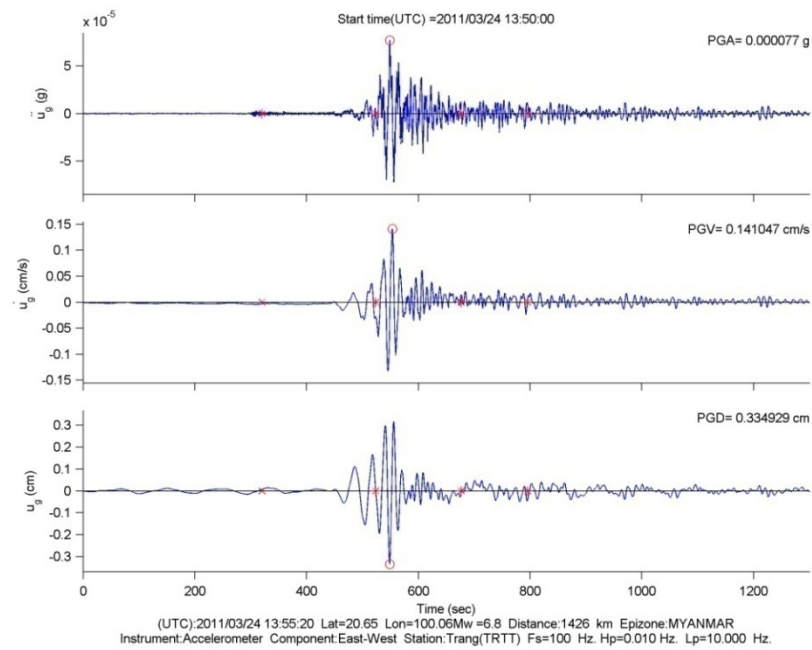
$a(t)$  = ความเร่งของพื้นดินที่ไม่ได้ปรับแก้เส้นฐาน ณ เวลา

$a_0$  = ค่าปรับแก้เส้นฐานของความเร่งของพื้นดิน ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของความเร่งของพื้นดินที่เวลาตั้งแต่ 0 ถึง

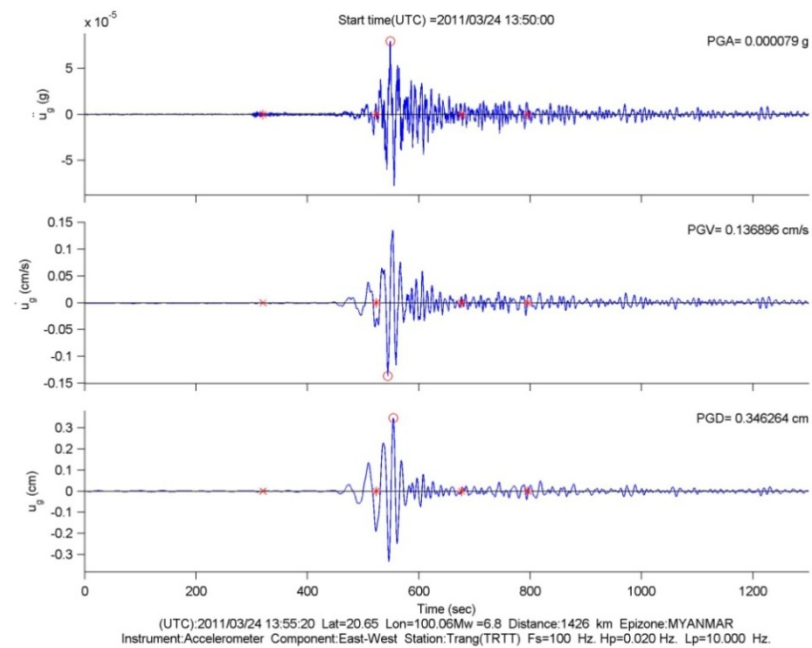
## 2) การกรองสัญญาณรบกวนของคลื่นแผ่นดินไหว

การกรองสัญญาณรบกวนของคลื่นแผ่นดินไหวได้ใช้วิธี Butterworth filter ซึ่งอันดับของวิธี Butterworth filter ได้ใช้อันดับที่ 4 ตามกระบวนการ United States Geological Survey (USGS) โดยความถี่ที่เหมาะสมในการกรองสัญญาณรบกวนของคลื่นแผ่นดินไหวได้อ้างอิงจากการศึกษาของ Charoenyuth (2007) ซึ่งการศึกษาดังกล่าวใช้ข้อมูลประวัติเวลาการสั่นไหวของพื้นดินจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว 4 เหตุการณ์ ซึ่งพิจารณาหาความถี่ที่เหมาะสมในการกรองสัญญาณรบกวนโดยการศึกษานั้นได้สรุปไว้ว่า ถ้าระยะทางจากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวถึงจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (epicenter) มากกว่า 1,000 กิโลเมตร และค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (peak ground acceleration, PGA) มีค่าน้อยกว่า 0.0003g ให้กรองสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำผ่าน (low pass, LP) ที่ 10 เฮิรตซ์ และการกรองความถี่สูงผ่านให้กรองความถี่สูงผ่าน (high pass, HP) ที่ 0.01 เฮิรตซ์

เมื่อทำการกรองสัญญาณโดยการกำจัดสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงเกิน LP = 10 Hz และที่ความถี่ต่ำกว่า HP = 0.01 Hz ทิ้งไป ซึ่งเรียกว่าความถี่ผ่านเป็นช่วง (band pass) จะได้คลื่นแผ่นดินไหวที่ผ่านการกรองสัญญาณแล้วดังเช่นรูปที่ 2.1 (ก) ซึ่งสังเกตได้ว่าความเร็วและการกระจัดช่วงต้นก่อนเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงลองทำการเปลี่ยนความถี่สูงผ่านให้กรองความถี่สูงผ่าน (high pass, HP) ที่ 0.02 และ 0.05 เฮิรตซ์ โดยจากรูปที่ 2.1 (ข) พบว่าข้อมูลที่ถูกรองสัญญาณรบกวนให้ความถี่เป็นช่วงผ่านแล้วนี้น่าจะมีความถูกต้องสมเหตุสมผลมากกว่าข้อมูลที่กรองความถี่สูงผ่านที่ 0.01 เฮิรตซ์ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้พยายามกรองสัญญาณทิ้งไปให้น้อยที่สุด และพบว่าการกรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน ด้วยตัวกรองบัตเทอร์เวิร์ทอันดับที่ 4 HP = 0.02 Hz ให้ความเร็วและการกระจัดของคลื่นแผ่นดินไหวช่วงต้นที่ยอมรับได้ จึงเห็นว่าควรที่จะกำหนดตัวกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter) Hp = 0.02 Hz



(ก) กรองความถี่สูงผ่านที่ 0.01 เฮิรตซ์



(ข) กรองความถี่สูงผ่านที่ 0.02 เฮิรตซ์

รูปที่ 2.14 กราฟข้อมูลประวัติเวลาความเร่ง ความเร็ว และการกระจัดสถานีตรวจวัดความเร่ง  
 ตรัง(TRTT) เหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55 น. ระยะทางจากจุดกำเนิด  
 ถึงสถานี 1426 กม. (ก) กรองความถี่สูงผ่านที่ 0.01 เฮิรตซ์ (ข) กรองความถี่สูงผ่านที่ 0.02 เฮิรตซ์

### 2.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินโดยใช้โปรแกรม Matlab

1) โปรแกรมทำการอ่านข้อมูลประวัติเวลาความเร่งจาก ASCII format

1.1) กรองสัญญาณรบกวนออกด้วยตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทที่ 4 ในกรณีที่ว่า PGA น้อยกว่า 0.0003g และระยะห่างจากจุดกำเนิดมากกว่า 1,000 กิโลเมตร สัญญาณรบกวนสามารถตัดออกได้โดยใช้ ค่าตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน LP = 10 Hz และค่าตัวกรองความถี่สูงผ่าน HP = 0.02 Hz ซึ่งถ้าไม่อยู่ในกรณีนี้ ใช้ค่าตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน LP =  $F_s/2$  โดยที่  $F_s$  = ค่าความถี่ในการบันทึกข้อมูลมีหน่วยเป็น จำนวนข้อมูลต่อวินาที (sampling frequency) และค่าตัวกรองความถี่สูงผ่าน HP = 0.02 Hz

1.2) ปรับแก้เส้นฐาน โดยหากลบค่าเฉลี่ยของความเร่ง

1.3) หาปริพันธ์ของความเร่งได้ความเร็ว

1.4) ปรับแก้เส้นฐาน โดยหากลบค่าเฉลี่ยของความเร็ว

1.5) หาปริพันธ์ของความเร็วได้การกระจัด

1.6) กรองสัญญาณรบกวนออกด้วยตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทที่ 4 และปรับแก้เส้นฐานโดยหากลบค่าเฉลี่ยของการกระจัด

2) โปรแกรมทำการอ่านข้อมูลประวัติเวลาความเร็วจาก ASCII format

2.1) กรองสัญญาณรบกวนออกด้วยตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทที่ 4 ในกรณีที่ว่า PGA น้อยกว่า 0.0003g และระยะห่างจากจุดกำเนิดมากกว่า 1,000 กิโลเมตร สัญญาณรบกวนสามารถตัดออกได้โดยใช้ ค่าตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน LP = 10 Hz และค่าตัวกรองความถี่สูงผ่าน HP = 0.02 Hz ซึ่งถ้าไม่อยู่ในกรณีนี้ ใช้ค่าตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน LP =  $F_s/2$  โดยที่  $F_s$  = ค่าความถี่ในการบันทึกข้อมูลมีหน่วยเป็น จำนวนข้อมูลต่อวินาที (sampling frequency) และค่าตัวกรองความถี่สูงผ่าน HP = 0.02 Hz

2.2) ปรับแก้เส้นฐาน โดยหากลบค่าเฉลี่ยของความเร็ว

2.3) หาอนุพันธ์ของความเร็วได้ความเร่ง

2.4) ปรับแก้เส้นฐาน โดยหากลบค่าเฉลี่ยของความเร่ง

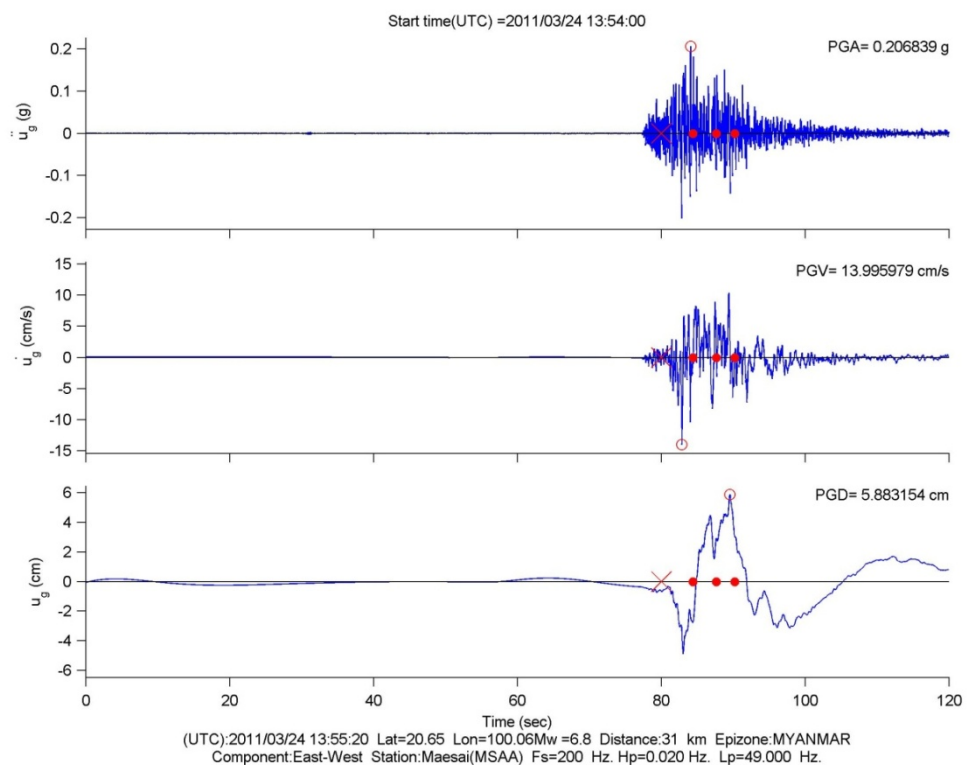
2.5) หาปริพันธ์ของความเร็วได้การกระจัด

2.6) ปรับแก้เส้นฐาน โดยหากลบค่าเฉลี่ยของการกระจัด

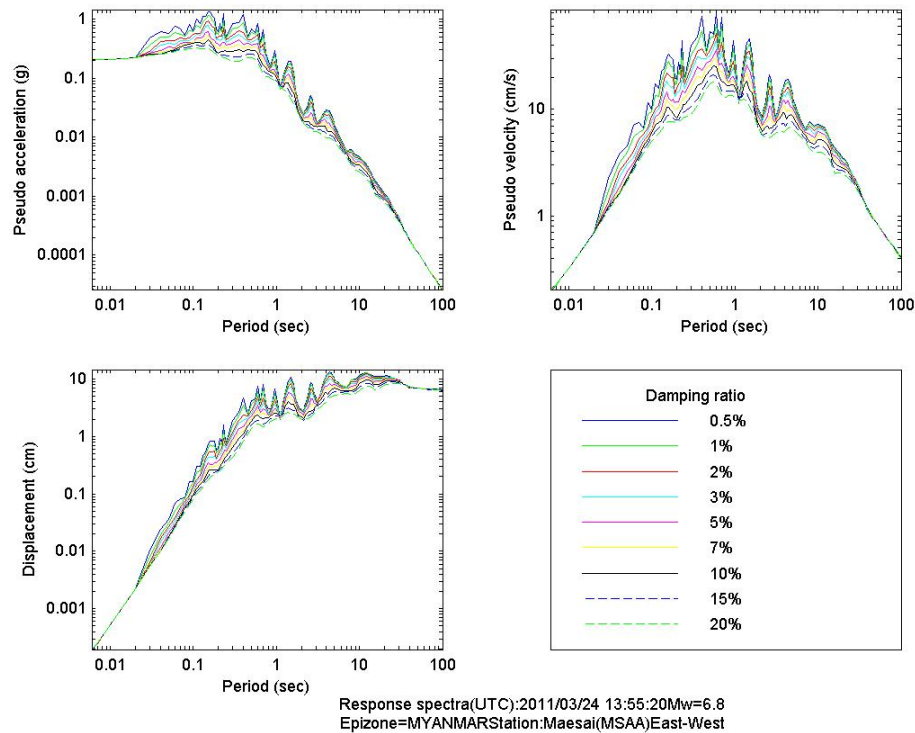
3) โปรแกรมทำการค่าความเร่งสูงสุด ความเร็วสูงสุด และการกระจัดสูงสุด

4) คำนวณสเปกตรัมผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหว โดยใช้โปรแกรม speceq ช่วยในการคำนวณ โดยกำหนดค่าอัตราความหน่วงเท่ากับ 0.5%, 1%, 2%, 3%, 5%, 7%, 10%, 15%, และ 20%

5) โปรแกรมทำการบันทึกข้อมูลในรูปแบบรูปภาพ และเพิ่มข้อมูล (text file) โดยข้อมูลรูปภาพแสดง ข้อมูลประวัติเวลาความเร่ง ความเร็ว การกระจัดของพื้นดิน และ สเปกตรัมผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหว ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 ข้อมูลประวัติเวลาความเร่ง ความเร็ว และการกระจัด สถานีตรวจวัดความเร่งแม่สาย (MSAA) เหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55 น.  
ระยะทางจากจุดกำเนิดถึงสถานี 31 กม.



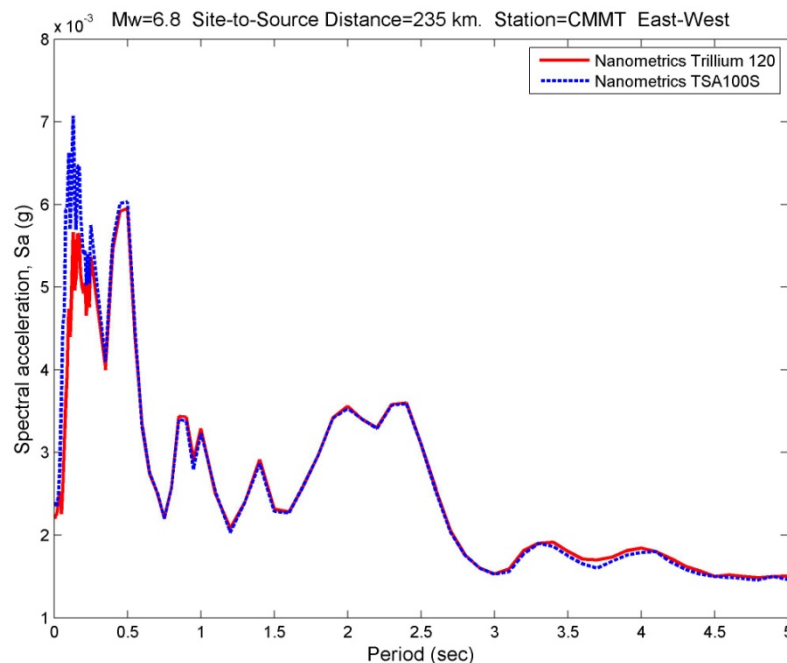
รูปที่ 2.16 กราฟข้อมูลสเปกตรัมผลตอบสนอง สถานีตรวจวัดความเร่งแม่สาย (MSAA)

เหตุการณ์แผ่นดินไหววันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55 น.

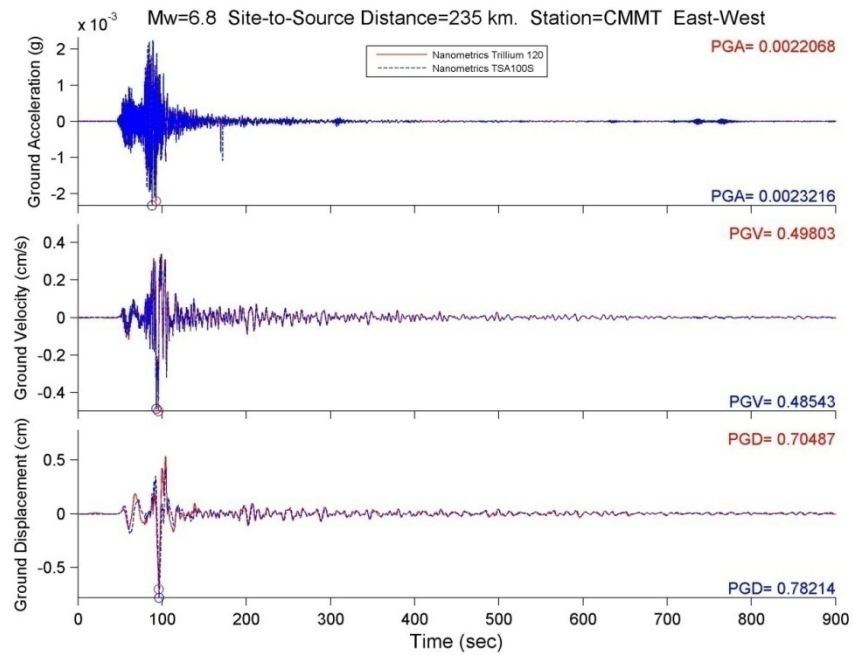
ระยะทางจากจุดกำเนิดถึงสถานี 31 กม.

การสร้างฐานข้อมูลสำหรับพัฒนาสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว สำหรับประมาณอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (peak ground acceleration, PGA) และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (spectral acceleration, Sa) ได้เลือกข้อมูลประวัติเวลาการสั่นไหวของพื้นดินที่บันทึกได้โดยเครื่องมือตรวจวัดความเร่งของพื้นดินเป็นข้อมูลหลัก ซึ่งถ้าหากเครื่องมือตรวจวัดความเร่งของพื้นดินไม่สามารถบันทึกการสั่นไหวของพื้นดินได้ จึงจะเลือกใช้ข้อมูลที่บันทึกได้โดยเครื่องมือตรวจวัดความเร็วส่วนการศึกษาพัฒนาสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว สำหรับประมาณอัตราเร็วสูงสุดของพื้นดิน (peak ground velocity, PGV) และการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน (peak ground displacement, PGD) ได้เลือกข้อมูลประวัติเวลาการสั่นไหวของพื้นดินที่บันทึกได้โดยเครื่องมือตรวจวัดความเร็วของพื้นดินเป็นข้อมูลหลัก ซึ่งถ้าหากเครื่องมือตรวจวัดความเร็วของพื้นดินไม่สามารถบันทึกการสั่นไหวของพื้นดินได้ จึงจะเลือกใช้ข้อมูลที่บันทึกได้โดยเครื่องมือตรวจวัดความเร่ง

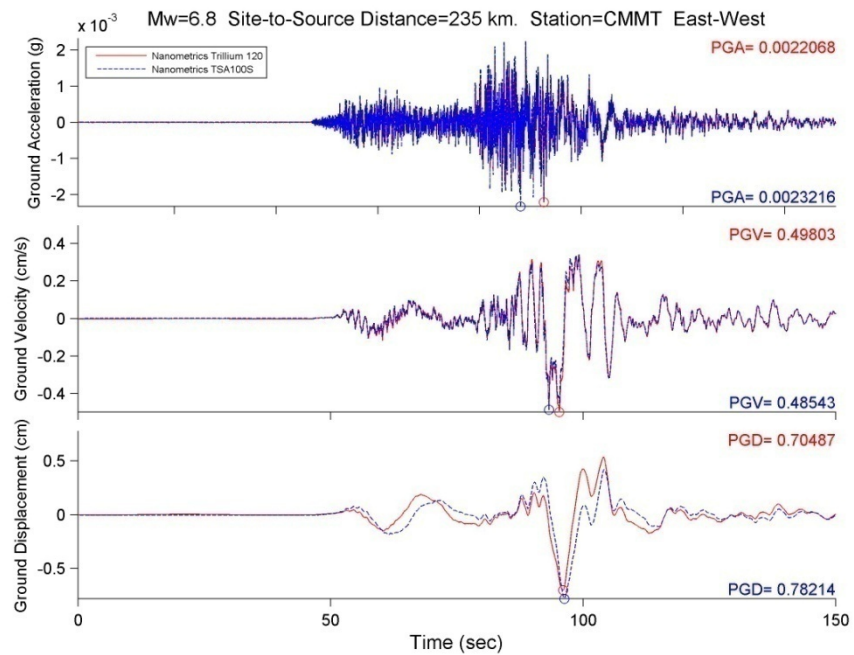
การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีนำคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้โดยเครื่องมือตรวจวัดความเร่งของพื้นดิน (TSA100S) และเครื่องมือตรวจวัดความเร็วของพื้นดิน (Trillium 120) มาทำการเปรียบเทียบค่าความเร่งของพื้นดิน (ground acceleration) ความเร็วของพื้นดิน (ground velocity) และการกระจัดของพื้นดิน (ground displacement) ที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองประเภท ซึ่งคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาเปรียบเทียบเป็นคลื่นที่บันทึกได้โดยสถานีตรวจวัดจังหวัดเชียงใหม่ (CMMT) ซึ่งเป็นเหตุการณ์เมื่อวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ.2554 เวลา 13:55 น. โดยมีจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ที่ประเทศพม่า ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่าค่าความเร่ง ความเร็ว และการกระจัดของพื้นดินที่บันทึกได้จากเครื่องมือทั้งสองประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน และมีรูปร่างการแกว่งของคลื่นรอบแกนศูนย์คล้ายคลึงกัน (รูปที่ 2.18) จากนั้นนำข้อมูลประวัติเวลาความเร่งของพื้นดินของเครื่องมือทั้งสองประเภทคำนวณหาสเปกตรัมความเร่งเทียม (pseudo acceleration) ซึ่งพบว่าสเปกตรัมความเร่งเทียมของเครื่องมือทั้งสองประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.17 กราฟเปรียบเทียบสเปกตรัมความเร่งเทียม ตรวจวัดได้โดยเครื่องมือวัดความเร่ง และเครื่องมือวัดความเร็ว ที่สถานีเชียงใหม่ (CMMT) เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด  $M_w = 6.8$  เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55 น. ระยะทางจากจุดกำเนิดถึงสถานี 235 กม.



(ก) กราฟเปรียบเทียบช่วงเวลา 900 วินาที



(ข) กราฟช่วงเวลาเปรียบเทียบ 150 วินาที

รูปที่ 2.18 กราฟเปรียบเทียบความเร่ง ความเร็ว การกระจัดของพื้นดิน ตรวจวัดได้โดยเครื่องมือวัดความเร่ง และเครื่องมือวัดความเร็ว ที่สถานีเชียงใหม่ (CMMT) เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด

$$M_w = 6.8 \text{ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 เวลา 13:55น.}$$

## 2.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างฐานข้อมูล

### 2.4.1 บริเวณการแปรสัณฐานของเปลือกโลกของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

บริเวณการแปรสัณฐานของเปลือกโลกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ (1) บริเวณแผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลก (shallow crustal earthquakes) ซึ่งแบ่งเป็น (1.1) บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (active tectonic regions) (1.2) บริเวณภาคพื้นทวีปที่มีเสถียรภาพ (stable continental regions) และ (2) บริเวณเขตหมุดตัวของเปลือกโลก (subduction zones) ซึ่งบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (active tectonic regions) เป็นบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวบ่อยครั้งและมีระยะทางค่อนข้างใกล้กับที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว แต่บริเวณเขตหมุดตัวของเปลือกโลก (subduction zones) จะมีระยะทางค่อนข้างไกล ซึ่งการสร้างแบบจำลองสำหรับทั้งสองบริเวณนี้นักวิจัยนิยมใช้ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริงเป็นข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองส่วนบริเวณภาคพื้นทวีปที่มีเสถียรภาพ (stable continental region) เป็นบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวน้อยกว่าบริเวณอื่น ซึ่งการสร้างแบบจำลองสำหรับบริเวณนี้นักวิจัยมักจะใช้วิธีการจำลองคลื่นแผ่นดินไหว (simulations) ควบคู่กับการใช้ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดิน

บริเวณการแปรสัณฐานของบริเวณภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นย่านแผ่นดินไหวที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก โดยมีแผ่นเปลือกโลกใกล้เคียงรวมกัน 4 แผ่น ได้แก่ แผ่นยูเรเชีย แผ่นแปซิฟิก แผ่นอินเดีย - ออสเตรเลีย และแผ่นฟิลิปปินส์ อีกทั้งเป็นที่บรรจบกันของแนวแผ่นดินไหว 2 แนวคือ แนวล้อมมหาสมุทรแปซิฟิก และแนวแอลป์ - หิมาลัย จึงทำให้เกิดแผ่นดินไหวเป็นจำนวนมาก (รูปที่ 2.1)

ประเทศไทยตั้งอยู่บนแผ่นยูเรเชีย รูปที่ 2.19 ใกล้รอยต่อระหว่างแผ่นยูเรเชียกับแผ่นอินเดีย - ออสเตรเลีย มีรอยเลื่อน (fault) อยู่ทางภาคตะวันตกและภาคเหนือ ส่วนใหญ่อยู่ในเขตสภาพพม่า ทะเลอันดามัน และหมู่เกาะสุมาตรา





รูปที่ 2.19 แผนที่แสดงบริเวณการแปรสัณฐานของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย)

จากรูปที่ 2.19 จะพบว่ารอยเลื่อนที่มีผลกระทบกับประเทศไทยหลัก ๆ แบ่งออกเป็น 3 บริเวณรอยเลื่อน

1) บริเวณรอยเลื่อนตามแนวรอยต่อระหว่างแผ่นเปลือกโลกอินเดีย - ออสเตรเลีย และแผ่นเปลือกโลกยูเรเชีย บริเวณนี้เป็นแนวรอยต่อระหว่างแผ่นเปลือกโลกอินเดีย - ออสเตรเลีย ที่มุดตัวเข้าไปใน แผ่นเปลือกโลกยูเรเชีย (subduction zone) ฆาตผ่านประเทศพม่า ทะเลอันดามัน

มัน และเกาะสุมาตรา ซึ่งทำให้เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ เช่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว 26 มีนาคม พ.ศ.2547 เกิดแผ่นดินไหวขนาดโมเมนต์ 9.0 ที่เกิดบริเวณนอกชายฝั่งทางตะวันตกทางตอนเหนือของหมู่เกาะสุมาตรา

2) บริเวณรอยเลื่อนประเทศพม่า รอยเลื่อนสะแกงเป็นรอยเลื่อนตามแนวระดับขนาดใหญ่ที่มีการเลื่อนไปทางขวา (right lateral strike – slip fault) วางตัวในแนวเหนือ – ใต้ จัดเป็นรอยเลื่อนที่มีพลัง เช่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว 11 พฤศจิกายนพ.ศ.2555 เกิดแผ่นดินไหวขนาดโมเมนต์ 6.8 โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่บริเวณประเทศพม่า

3) บริเวณรอยเลื่อนจินตอนใต้พม่า และลาว บริเวณนี้มีรอยเลื่อนขนาดใหญ่ รอยเลื่อนแม่น้ำแดง (red river fault) ซึ่งทำให้เกิดรอยเลื่อนขนาดเล็กแตกย่อยออกเป็นจำนวนมาก หนึ่งในจำนวนนั้นคือ รอยเลื่อนน้ำมา (nam ma fault) ซึ่งทำให้เกิดแผ่นดินไหว 24 มีนาคม พ.ศ.2554 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.8 เป็นรอยเลื่อนตามแนวระดับ (Strike slip) โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่บริเวณประเทศพม่าใกล้กับประเทศไทย และประเทศลาว ซึ่งอยู่ห่างจาก อ.แม่สาย ระยะทางประมาณ 30 กิโลเมตร ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายเป็นจำนวนมากทางฝั่งประเทศพม่า และทางตอนเหนือของประเทศไทย

#### 2.4.2 ความรุนแรงการสั่นไหวของพื้นดิน

ความรุนแรงการสั่นไหวของพื้นดิน ได้แก่ ความเร่งสูงสุด (peak ground acceleration, PGA), ความเร็วสูงสุด (peak ground velocity, PGV), การกระจัดสูงสุด (peak ground displacement, PGD) และ ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (spectral acceleration, Sa) ค่าความรุนแรงการสั่นไหวของพื้นดินในแนวราบค่าที่บันทึกได้จริงที่สถานีหนึ่ง ๆ จะประกอบด้วยสองทิศทางในแนวราบ สมการลดทอนคลื่นในต่างประเทศนิยมที่จะพิจารณาค่าโดยเฉลี่ยของสองทิศทางนั้นเพราะมีสมมติฐานว่าความไม่แน่นอนจะมีการกระจายแบบลึกลับ ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (geometric mean) ของสองทิศทาง เท่ากับรากที่สองของผลคูณของค่าความรุนแรงการสั่นไหวของพื้นดินในสองทิศทางนั้น

#### 2.4.3 ขนาดของแผ่นดินไหว

ขนาดของแผ่นดินไหว (magnitude) เกี่ยวข้องกับปริมาณของพลังงานซึ่งถูกปลดปล่อยออกมา ณ ตำแหน่งจุดกำเนิดแผ่นดินไหว ค่าขนาดของแผ่นดินไหวนี้ขึ้นอยู่กับความสูงของคลื่นแผ่นดินไหว ที่บันทึกได้ด้วยเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหว ขนาดของแผ่นดินไหวแต่ละครั้งจึงมีได้ค่าเดียว ค่าที่บันทึกจากเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหว ไม่ได้เป็นหน่วยวัดเพื่อแสดงผล

ของความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งการตรวจวัดขนาดแผ่นดินไหวเป็นการวัดกำลังหรือพลังงานที่ปลดปล่อยในการเกิดแผ่นดินไหว

ขนาดของแผ่นดินไหวที่ใช้วัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น ขนาดท้องถิ่น (local magnitude,  $M_l$ ), ขนาดคลื่นพื้นผิว (surface wave magnitude,  $M_s$ ), ขนาดคลื่นหลัก (body wave magnitude,  $M_b$ ) และขนาดโมเมนต์ (moment magnitude,  $M_w$ ) ซึ่งในการสร้างแบบจำลองการลดทอน (attenuation model) มาตรฐานที่นิยมใช้ คือ ขนาดโมเมนต์ (moment magnitude,  $M_w$ ) เนื่องจากมาตรฐานชนิดนี้สามารถวัดขนาดของแผ่นดินไหวที่มีระดับความรุนแรงมากได้โดยไม่เกิดสภาวะการอิ่มตัว (magnitude saturation) ซึ่งเป็นปัญหาของมาตรฐานวัดขนาดแผ่นดินไหวชนิดอื่นที่ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของแผ่นดินไหวขนาดใหญ่มาก ๆ ได้

ขนาดโมเมนต์ (moment magnitude,  $M_w$ ) เป็นมาตรวัดขนาดของแผ่นดินไหวชนิดหนึ่งโดยขนาดโมเมนต์จะเป็นขนาดที่เกี่ยวข้องกับพลังงานศักย์ที่ปลดปล่อยออกมาเป็นพลังงานจลน์ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่การแตกร้าวของรอยเลื่อนและระยะการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกและค่าโมดูลัสการเฉือนของหินที่รอยเลื่อนไกลของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในแต่ละครั้งซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$M_w = \log M_o - 10.7 \quad (2.17)$$

เมื่อ

$M_w$  = ขนาดโมเมนต์ (moment magnitude)

$M_o$  = โมเมนต์แผ่นดินไหว (seismic moment) (ดาเยน – เซนติเมตร)

โดยโมเมนต์แผ่นดินไหว (seismic moment) มีค่าเท่ากับ

$$M_o = \mu A \bar{D} \quad (2.18)$$

เมื่อ

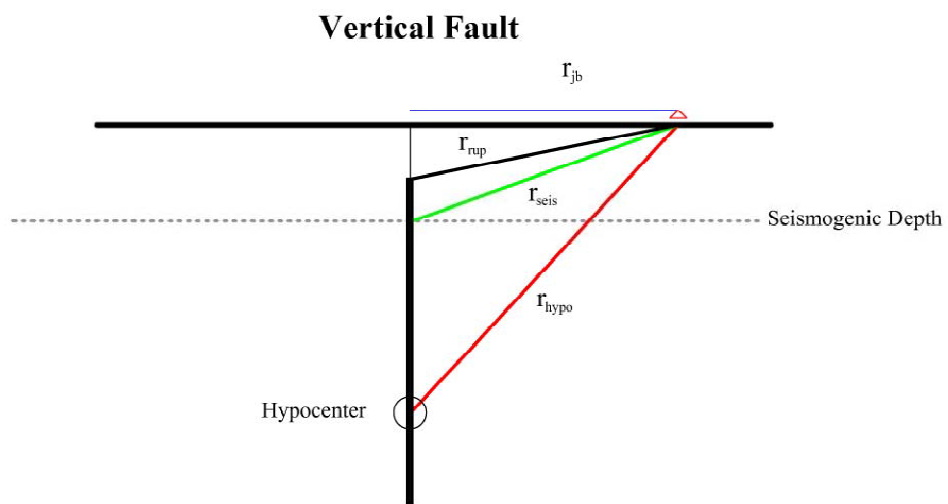
$\mu$  = กำลังการแตกร้าว (rupture strength) ของวัสดุตามแนวรอยเลื่อน (fault) (ดาเยน – เซนติเมตร<sup>2</sup>)

$A$  = พื้นที่การแตกร้าว (rupture area) (เซนติเมตร<sup>2</sup>)

$\bar{D}$  = การกระจัดของรอยเลื่อน (เซนติเมตร<sup>2</sup>)

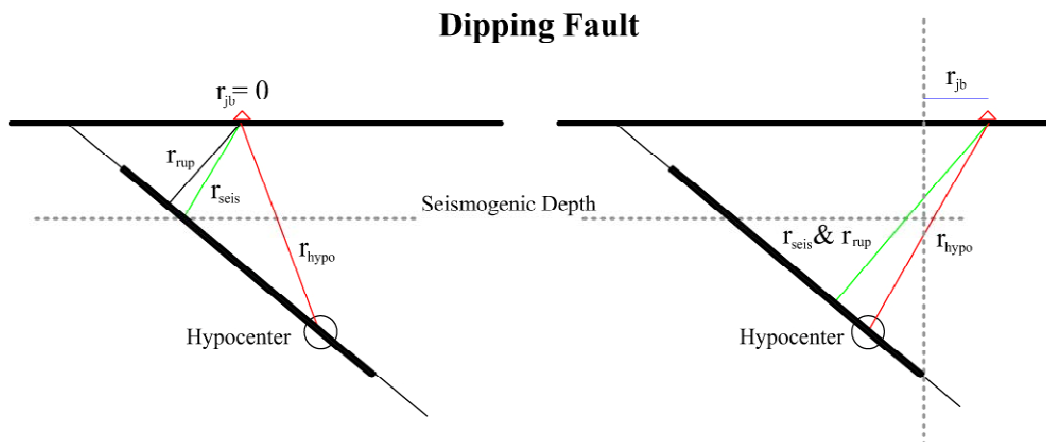
#### 2.4.4 ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว

การวัดระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานี (site-to-source distance) มีรูปแบบในการวัดหลายรูปแบบ ซึ่งรูปแบบของระยะทางที่นักวิจัยมักนิยมใช้ในการสร้างสมการการลดทอนสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ระยะทางที่ขึ้นอยู่กับจุดกำเนิดแผ่นดินไหวจุดเดียว และระยะทางที่ขึ้นอยู่กับ การแตกตัวของรอยเลื่อน (finite fault rupture) โดยรูปแบบของระยะทางที่ขึ้นอยู่กับจุดกำเนิดแผ่นดินไหวจุดเดียวสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ ระยะทางจุดเกิดแผ่นดินไหว (hypocenter distance,  $r_{hypo}$ ) และระยะทางจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (epicenter distance,  $r_{epi}$ ) ซึ่งระยะทางจุดเกิดแผ่นดินไหวเป็นการวัดระยะจากสถานีถึงจุดเกิดแผ่นดินไหวที่เริ่มมีการแตกตัวของรอยเลื่อน และระยะทางจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหวเป็นการวัดระยะจากสถานีถึงภาพฉายแนวตั้งของจุดเกิดแผ่นดินไหวบนพื้นผิวโลก ส่วนรูปแบบของระยะทางที่ขึ้นอยู่กับ การแตกตัวของรอยเลื่อน (finite fault rupture) จะประกอบด้วยรูปแบบของระยะทาง ดังนี้คือ ระยะทางในแนวราบที่สั้นที่สุดถึงบริเวณภาพฉายบนผิวดินของระนาบแตกตัวของรอยเลื่อน (Joyner-Boore distance,  $r_{jb}$ ), ระยะทางที่ใกล้ที่สุดกับพื้นผิวการแตกตัวของรอยเลื่อน (closest distance to the rupture surface,  $r_{rup}$ ) และระยะทางที่ใกล้ที่สุดกับส่วนที่ก่อให้เกิดแผ่นดินไหวของระนาบแตกตัวของรอยเลื่อน (closest distance to the seismogenic rupture surface,  $r_{seis}$ ) ซึ่งรูปแบบของระยะทางได้แสดงในรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 รูปแบบของระยะทางกับรอยเลื่อนตั้งฉาก

(seismological research letters volume 68, number 1january/February 1997)



รูปที่ 2.21 รูปแบบของระยะทางกับรอยเลื่อนเฉียง

(seismological research letters volume 68, number 1january/February 1997)

ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นระยะทางจากจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (epicenter distance) ซึ่งหมายถึงระยะที่สั้นที่สุดตามผิวโค้งของโลกที่ระดับน้ำทะเลระหว่างจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (epicenter) กับสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว ซึ่งในการคำนวณระยะทางจากจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัดใช้สูตรระยะทางของวงกลมใหญ่ (great circle distance formula) ซึ่งเมื่อทราบค่าละติจูดและลองจิจูดของจุดกำเนิดแผ่นดินไหว และสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว สามารถหาระยะทางระหว่างจุด 2 จุดบนผิวโลก จากสมการที่ (2.19)

$$d = \left\{ \cos^{-1} \left[ \sin(A) \cdot \sin(B) + \cos(A) \cdot \cos(B) \cdot \cos(|\Delta_{long}|) \right] \right\} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 111.23 \text{ km} \quad (2.19)$$

โดยที่

- |                 |   |
|-----------------|---|
| $d$             | = ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร)   |
| $A$             | = ละติจูดของสถานี   |
| $B$             | = ละติจูดของจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว                       |
| $\Delta_{long}$ | = (ลองจิจูดของสถานี - ลองจิจูดของจุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว) |
| 111.23 km       | = ความยาวบนผิวโลกของมุมลองจิจูดหนึ่งองศา ณ เส้นศูนย์สูตร      |

#### 2.4.5 ประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว

การสร้างสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวจำเป็นต้องพิจารณาความแตกต่างของประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวที่เดินทางมาถึงสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวมีระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันโดยมีสาเหตุมาจากประเภทชั้นดิน ซึ่งในการแยกประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวของแต่ละสถานีขึ้นอยู่กับความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ 30 เมตร

การแบ่งประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวควรจะใช้ข้อมูลสำรวจดิน ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว แต่เนื่องจากในเบื้องต้นยังไม่มีข้อมูลดังกล่าว จึงอ้างอิงข้อมูลการขุดเจาะสำรวจชั้นดินของบริเวณใกล้เคียงเป็นตัวแทนข้อมูลการขุดเจาะสำรวจชั้นดินของแต่ละสถานี ซึ่งข้อมูลการขุดเจาะสำรวจชั้นดินได้จากเว็บไซต์ของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ซึ่งมีข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดินทั่วประเทศไทย และในการศึกษานี้ได้แบ่งประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวออกเป็นสองประเภทคือ สถานีที่ตั้งอยู่บนหิน (rock site) และ สถานีที่ตั้งอยู่บนดิน (soil site)

ข้อมูลเจาะสำรวจชั้นดินจะใช้ประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ 30 เมตร (shear wave velocity,  $V_s$ ) ในแต่ละชั้นดินโดยใช้สมการเชิงประสพการณ์ (empirical equations) ซึ่งเป็นสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N$  - values ของการทดสอบการทะลวงมาตรฐาน (standard penetration test, SPT) กับความเร็วคลื่นเฉือน (shear wave velocity,  $V_s$ ) ซึ่งการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือน (shear wave velocity,  $V_s$ ) สำหรับชั้นดินทรายได้ใช้สมการดังนี้

$$\text{Dickenson (1994) : } V_s = 88.392(N + 1)^{0.3} \quad (2.20)$$

$$\text{Seed, Idriss and Arango (1983) : } V_s = 56.388N^{0.5} \quad (2.21)$$

$$\text{Sykora and Stokoe (1983) : } V_s = 100.583N^{-0.29} \quad (2.22)$$

สำหรับการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือน (shear wave velocity,  $V_s$ ) สำหรับชั้นดินเหนียวได้ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{Imai and Tonouchi (1982) : } V_s = 96.926N^{-0.314} \quad (2.23)$$

$$\text{Ohsaki and Iwasaki (1973) : } V_s = 81.686N^{-0.39} \quad (2.24)$$

$$\text{Ohta and Goto (1978) : } V_s = 85.344N^{-0.341} \quad (2.25)$$

โดยที่

$$V_s = \text{ความเร็วคลื่นเฉือน (shear wave velocity, ) (เมตร/วินาที)}$$

$$N = \text{ค่า blow count ที่นับได้จากการทดสอบการทะลวงมาตรฐาน (standard penetration test, SPT) (ครั้ง/ฟุต)}$$

การประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนในบริเวณที่มีสภาพดินเป็นดินเหนียวอ่อนซึ่งได้แก่ บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนต้องเปลี่ยนไปเนื่องจากไม่สามารถหาค่า blow count ของการทดสอบการทะลวงมาตรฐาน (standard penetration test, SPT) ได้ จึงประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วคลื่นเฉือนกับกำลังเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำโดยใช้สมการ 2.26

$$\text{Dickenson (1994) : } V_s = 68.7 S_u^{0.475} \quad (2.26)$$

โดยที่

$$V_s = \text{ความเร็วคลื่นเฉือน (shear wave velocity, ) (เมตร/วินาที)}$$

$$S_u = \text{ค่า undrained shear strength (ตัน/เมตร<sup>2</sup>)}$$

การแบ่งประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีได้แบ่งตามเกณฑ์ของ International Building Code (IBC) แสดงในตารางที่ 3.1 โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 330 เมตร จากผิวดิน ซึ่งการหาค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงความลึก 30 เมตรจากผิวดินได้แสดงในสมการที่ 2.27

$$\bar{V}_{s,30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (2.27)$$

โดยที่

$$\bar{V}_{s,30} = \text{ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตร จากผิวดิน (เมตร/วินาที)}$$

$$n = \text{จำนวนชั้นดินในช่วงความลึก 30 เมตร จากผิวดิน}$$

- $d_i$  = ความหนาของชั้นดิน  $i$  (เมตร)
- $V_{si}$  = ความเร็วคลื่นเฉือนในชั้นดิน  $i$  (เมตร/วินาที)

ตารางที่ 2.8 การแบ่งประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตามเกณฑ์ของ International Building Code (2003)

Site Class	Soil Type	Average Shear Wave Velocity (m/s)
A	หินแข็ง	$\bar{V}_{S,30} > 1500$
B	หิน	$760 < \bar{V}_{S,30} \leq 1500$
C	ดินแน่นมากและหินผุ	$360 < \bar{V}_{S,30} \leq 760$
D	ดินแข็ง	$180 < \bar{V}_{S,30} \leq 360$
E	ดินอ่อน	$\bar{V}_{S,30} < 180$

การศึกษานี้ได้แบ่งประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวออกเป็นสองประเภท คือ สถานีที่ตั้งอยู่บนหิน (rock site) โดยมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยมากกว่า 360 m/s และ สถานีที่ตั้งอยู่บนดิน (soil site) มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยน้อยกว่าเท่ากับ 360 m/s ซึ่งประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวและค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย (average shear wave velocity, ) ของสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 1 และระยะที่ 2 ได้อ้างอิงจากการศึกษาของ วิษณุ หัตถา, 2551 ได้แสดงในตารางที่ 2.9 – ตารางที่ 2.11



ตารางที่ 2.9 ประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 1  
(วิษณุ ทัศน, 2551)

Code	Station	Soil type	Average shear
			wave velocity
Soil site ( $\bar{V}_{s,30} \leq 360$ )			
KRDT	นครราชสีมา	ดินแข็ง	348
SKNT	สกลนคร	ดินแข็ง	254
PBKT	เพชรบูรณ์	ดินแข็ง	245
UBPT	อุบลราชธานี	ดินแข็ง	294
MHMT	แม่สะเรียง	ดินแข็ง	330
SURT	สุราษฎร์ธานี	ดินแข็ง	290
TRTT	ตรัง	ดินแข็ง	340
PKDT	ภูเก็ต	ดินแข็ง	215
SKLT	สงขลา	ดินแข็ง	340
Rock site ( $\bar{V}_{s,30} > 360$ )			
KHLT	เขื่อนเขาแหลม	ดินแน่นมากและหินผุ	387
SRDT	กาญจนบุรี	ดินแน่นมากและหินผุ	387
CHBT	จันทบุรี	ดินแน่นมากและหินผุ	487
CMMT	เชียงใหม่	หิน	-
MHIT	แม่ฮ่องสอน	ดินแน่นมากและหินผุ	379
RNTT	ระนอง	ดินแน่นมากและหินผุ	417

ตารางที่ 2.10 ประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวหลักระบบใหม่ระยะที่ 2 (วิษณุ ทัศน, 2551)

Code	Station	Soil type	Average shear wave velocity
Soil site ( $\bar{V}_{s,30} \leq 360$ )			
PHIT	เขื่อนแควน้อยจ.พิษณุโลก	ดินแข็ง	254
SUKH	อ่างเก็บน้ำห้วยท่าแพรจ.สุโขทัย	ดินแข็ง	321
UTTA	เขื่อนสิริกิติ์จ.อุตรดิตถ์	ดินแข็ง	278
LAMP	เขื่อนกวิมลจ.ลำปาง	ดินแข็ง	321
PAYA	อ่างเก็บน้ำแม่ปืมจ.พะเยา	ดินแข็ง	327
UMPA	สถานีอุตุนิยมวิทยาอุ้มผางจ.ตาก	ดินแข็ง	307
UTHA	เขื่อนทับเสลาจ.อุทัยธานี	ดินแข็ง	249
PATY	สถานีอุตุนิยมวิทยาพัทธยาจ.ชลบุรี	ดินแข็ง	300
CHAI	อ่างเก็บน้ำช่อระกาจ.ชัยภูมิ	ดินแข็ง	338
KHON	สถานีอากาศเกษตรท่าพระ	ดินแข็ง	281
SURI	อ่างเก็บน้ำอำปืมจ.สุรินทร์	ดินแข็ง	312
CMAI	สถานีอุตุนิยมวิทยาดอยอ่างขาง	ดินแข็ง	351
SRIT	อ่างเก็บน้ำคลองดินแดง	ดินแข็ง	270
SURA	ฝายเก็บน้ำท่าทอง	ดินแข็ง	254
NONG	อ่างเก็บน้ำห้วยเปลวเหือง	ดินแข็ง	266
PANO	อ่างเก็บน้ำห้วยแคนจ.นครพนม	ดินแข็ง	296
NAYO	อ่างเก็บน้ำคลองท่าด่าน	ดินแข็ง	258
LOEI	อ่างเก็บน้ำห้วยน้ำหนามจ.เลย	ดินแข็ง	355
Rock site ( $\bar{V}_{s,30} > 360$ )			
NAN	ฝายน้ำกอน จ.น่าน	ดินแน่นมากและหินผุ	454
PHET	อ่างเก็บน้ำแก่งกระจาน	ดินแน่นมากและหินผุ	382
SRAK	อ่างเก็บน้ำห้วยยางจ.สระแก้ว	ดินแน่นมากและหินผุ	395
KRAB	อ่างเก็บน้ำบางก่าปรัดจ.กระบี่	ดินแน่นมากและหินผุ	540
CRAI	อ่างเก็บน้ำสอง จ.แพร่	ดินแน่นมากและหินผุ	362
PRAC	อ่างเก็บน้ำห้วยช้างจ.เชียงราย	ดินแน่นมากและหินผุ	387

ตาราง 2.11 ประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดเฉพาะความเร่งของพื้นดินระบบใหม่ระยะที่ 1  
(วิษณุ ทัศน, 2551)

Code	Station	Soil type	Average shear wave velocity
Soil site ( $\bar{V}_{S,30} \leq 360$ )			
BKKA	สถานีกรมอุตุฯ มวิททยา บางนา	ดินอ่อน	139
SPBA	สถานีอุตุฯ มวิททยาสุพรรณบุรี	ดินแข็ง	291
CHLA	สถานีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ดินอ่อน	160
PTNA	สถานีอุตุฯ มวิททยาปทุมธานี	ดินอ่อน	161
Rock site ( $\bar{V}_{S,30} > 360$ )			
KCBA	สถานีอุตุฯ มวิททยากาญจนบุรี	ดินแน่นมากและหินผุ	368
CMCA	ศูนย์อุตุฯ มวิททยาภาคเหนือ	ดินแน่นมากและหินผุ	392

#### 2.4.6 กลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก

การเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวในแต่ละครั้งจะมีรูปแบบการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกที่แตกต่างกัน โดยความแตกต่างของรูปแบบการเลื่อนจะมีผลต่อระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว และการแบ่งแยกเหตุการณ์แผ่นดินไหว ดังนั้นในการรวบรวมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวควรที่จะต้องมีการแยกรูปแบบกลไกการเลื่อน (fault mechanism) ของแผ่นเปลือกโลก โดยการจำแนกจะใช้มุมลาดเอียง (slip or rake,  $\lambda$ ) และมุมแนวระดับ (strike) เป็นเครื่องมือในการแยกประเภท ซึ่งมุมลาดเอียงคือมุมระหว่างทิศทางการเลื่อนบนระนาบรอยเลื่อนและมุมแนวระดับคือมุมที่แสดงทิศทางการเลื่อนเทียบกับทิศเหนือ ซึ่งรูปแบบของรอยเลื่อนจำแนกเป็น 3 ประเภท (1) รอยเลื่อนตามแนวระดับ (strike-slip fault), (2) รอยเลื่อนตามแนวมุมเท (dip-slip fault) แบ่งได้เป็น (2.1) normal fault กับ (2.2) reverse fault และ (3) รอยเลื่อนตามแนวเฉียง (oblique-slip fault) แบ่งได้เป็น (3.1) normal oblique fault กับ (3.2) reverse oblique fault ซึ่งการศึกษานี้จะรวมกลุ่มของ normal fault กับ normal oblique fault และ กลุ่มของ reverse fault กับ reverse oblique fault เป็นกลุ่มเดียวกันโดยกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกอ้างอิงการจำแนกตาม Idriss 2008

ตาราง 2.12 รูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก (Irriss, 2008)

Fault Mechanism	Rake Angle (degrees)		
Strike slip	-180	<Rake<	-150
	-30	<Rake<	30
	150	<Rake<	180
Normal	-120	<Rake<	-60
	60	<Rake<	120
Reverse Oblique	30	<Rake<	60
	120	<Rake<	150
Normal Oblique	-150	<Rake<	-120
	-60	<Rake<	-30

## 2.5 ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

### 2.5.1 ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหว

การรวบรวมข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ในประเทศไทยที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลตั้งแต่ มิถุนายน พ.ศ. 2549 ถึง พฤศจิกายน พ.ศ.2555 แล้วนำไปรวบรวมกับข้อมูลเก่าตั้งแต่ ตุลาคม พ.ศ.2549 ถึง พฤษภาคม พ.ศ.2551 ซึ่งมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทยทั้งหมด 189 เหตุการณ์ แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ (1) ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวตั้งแต่ ตุลาคม 2549 ถึง วันที่ พฤษภาคม 2551 ได้พิจารณาแผ่นดินไหวที่มีจุดกำเนิดอยู่ระหว่างพิกัดละติจูด -8 ถึง 32 องศาเหนือ และลองจิจูด 90 ถึง 110 องศาตะวันออก โดยมีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 4.8 ถึง 8.5 ได้มีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทยทั้งหมด 72 เหตุการณ์ และ (2) ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวตั้งแต่ มิถุนายน พ.ศ. 2551 ถึง พฤศจิกายน 2555 ได้พิจารณาแผ่นดินไหวที่มีจุดกำเนิดอยู่ระหว่างพิกัดละติจูด 0 ถึง 25 องศาเหนือ และลองจิจูด 90 ถึง 110 องศาตะวันออก โดยมีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 4.3 ถึง 8.6 ได้มีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทยทั้งหมด 117 เหตุการณ์ ซึ่งข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลที่บันทึกได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบดิจิทัลระบบใหม่ระยะที่ 1 และระยะที่ 2 ของกรมอุตุนิยมวิทยา

การแบ่งแยกเหตุการณ์แผ่นดินไหวตามบริเวณการแปรสัณฐานของเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกของการศึกษานี้ แบ่งออกเป็น 3 องค์ประกอบ

1) ตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหว (event location)

ตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหว สามารถบ่งบอกบริเวณการแปรสัณฐานได้ในเบื้องต้น ถ้าเหตุการณ์เกิดบริเวณรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกที่มุดตัวเข้าหากันสันนิษฐานว่าเป็น บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก และถ้าเหตุการณ์เกิดบริเวณรอยเลื่อนตามแนวระดับสันนิษฐานว่าเป็น แผ่นดินไหวตื่นในแผ่นเปลือกโลก

2) ความลึกของเหตุการณ์แผ่นดินไหว (focal depth)

การแบ่งแยกเหตุการณ์แผ่นดินไหวตามบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก อ้างอิงตาม Atkinson และBoore2003 โดยที่ความลึกของของเหตุการณ์แผ่นดินไหวน้อยกว่า 50 กิโลเมตร จัดเป็นแผ่นดินไหวเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก ประเภทเหตุการณ์ที่ผิวหน้า (interface events) และถ้าความลึกของเหตุการณ์แผ่นดินไหวมากกว่า 50 กิโลเมตร จัดเป็นประเภทเหตุการณ์ภายในแผ่น (intraslab) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกด้วย

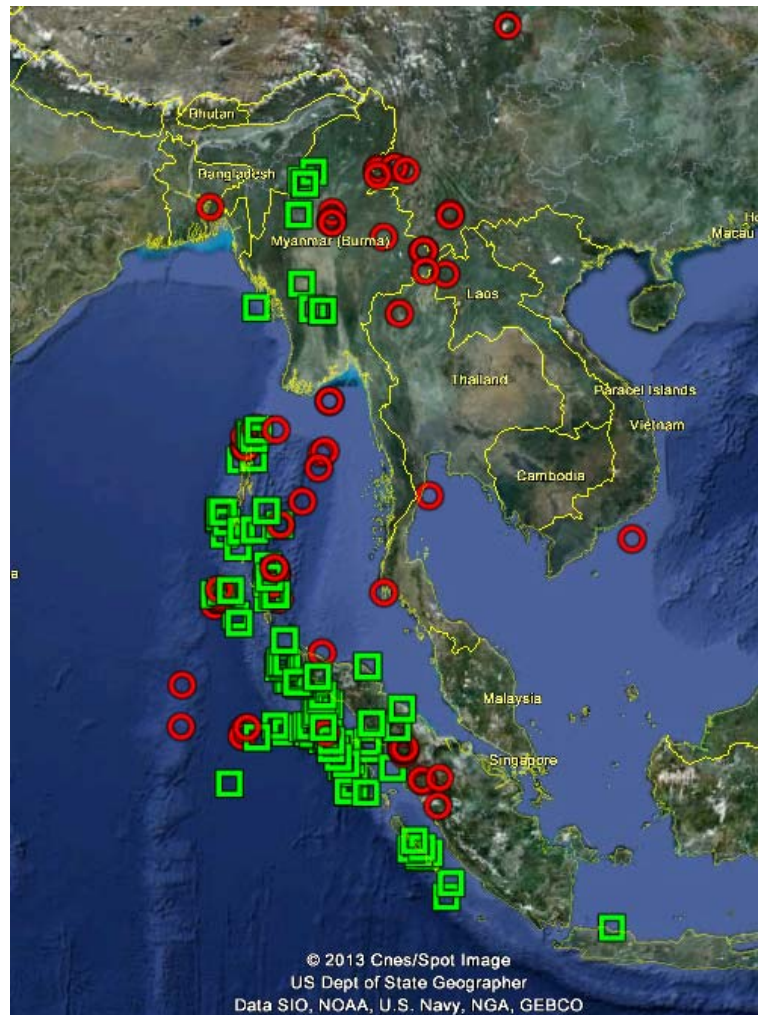
3) กลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก (focal mechanism)

กลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก อ้างอิงตาม Atkinson และBoore 2003 โดยที่

3.1) เหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกแล้วเป็นรอยเลื่อนประเภท การเลื่อนปกติ (normal fault) จัดเป็นเหตุการณ์ภายในแผ่น (intraslab)

3.2) ที่ความลึกน้อยกว่า 50 กิโลเมตร เป็นรอยเลื่อนย้อน (reverse fault) จัดเป็นเหตุการณ์ที่ผิวหน้า (interface events)

การจัดกลุ่มข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวตามบริเวณการแปรสัณฐานแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ แผ่นดินไหวตื่นในแผ่นเปลือกโลก (shallow crustal earthquakes) ซึ่งมีเหตุการณ์แผ่นดินไหว 70 เหตุการณ์ และแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก (subduction earthquakes) มีเหตุการณ์แผ่นดินไหว 119 เหตุการณ์ แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา (สีแดง = เหตุการณ์แผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลก, สีเขียว = เหตุการณ์แผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก)

### 2.5.2 ข้อมูลบันทึกการสั่นไหวของพื้นดิน

ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินในการศึกษานี้มีข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินทั้งหมด 1335 บันทึก โดยช่วงเวลา ตุลาคม ค.ศ. 2549 ถึง วันที่ พฤษภาคม 2551 มีข้อมูลการสั่นไหวของแผ่นดินทั้งหมด 389 บันทึกและช่วงเวลา มิถุนายน พ.ศ. 2551 ถึง พฤศจิกายน 2555 มีข้อมูลการสั่นไหวของแผ่นดินทั้งหมด 946 บันทึกโดยแบ่งกลุ่มข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่มีแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลก (shallow crustal earthquakes) มีข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินทั้งหมด 560 บันทึก และแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก (subduction earthquakes) มีข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินทั้งหมด 775บันทึก ซึ่งในแต่ละบริเวณได้จัดกลุ่มข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินตามลักษณะชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว โดยแบ่งออกเป็น

สองกลุ่มคือ ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่บันทึกได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวที่ตั้งอยู่บนหิน (rock site) และที่ตั้งอยู่บนดิน (soil site) ซึ่งรายละเอียดแสดงในตารางที่ตาราง 2.13

ตาราง 2.13 จำนวนข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่แบ่งตามบริเวณการแปรสัณฐานและลักษณะชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว

Seismic source EQ	Site category		Total
	Rock	Soil	
Shallow crustal earthquake	192	368	560
Subduction earthquake	259	516	775
Total	451	884	1335

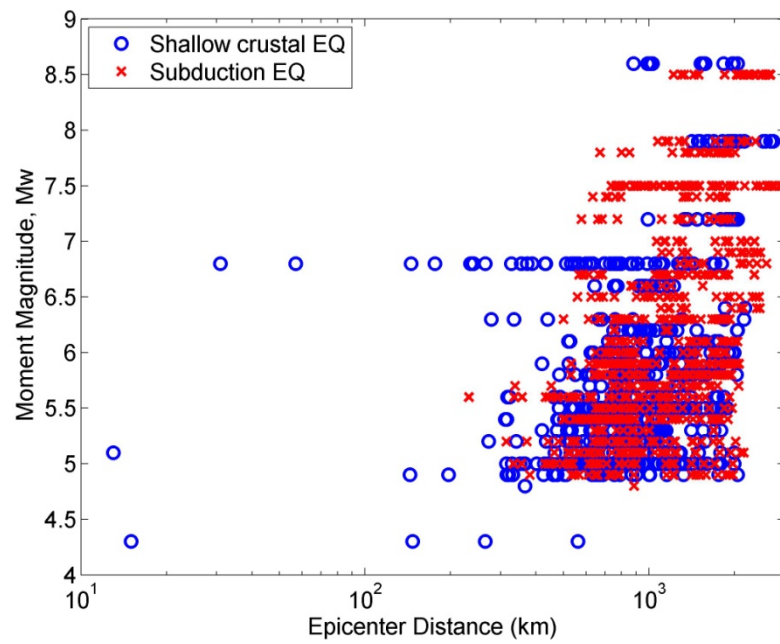
ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ในประเทศไทยโดยมีการกระจายตามขนาดโมเมนต์และระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัดแบ่งตามบริเวณการแปรสัณฐานและประเภทชั้นดินของสถานีตรวจวัดได้แสดงในรูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24 ซึ่งข้อมูลที่ตรวจวัด มีระยะทางตั้งแต่ 13 ถึง 2,948 กิโลเมตร และมีขนาดโมเมนต์ระหว่าง 4.3 ถึง 8.6 ซึ่งแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงส่วนมากจะมีแหล่งกำเนิดอยู่ในบริเวณเกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งมีระยะทางค่อนข้างไกลจากสถานีตรวจวัด ส่วนข้อมูลที่มีระยะทางใกล้ในช่วง 500 กิโลเมตร เป็นข้อมูลที่มีแหล่งกำเนิดในประเทศและประเทศเพื่อนบ้านทางภาคเหนือของประเทศไทยโดยมีขนาดโมเมนต์น้อยกว่า 7 รูปที่ 2.25 แสดงการกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัดแบ่งตามบริเวณการแปรสัณฐานรูปที่ 2.6 ถึง 2.9 แสดงการกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดิน, ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม, ความเร็วสูงสุดของพื้นดิน และการกระจัดสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัดแบ่งตามประเภทชั้นดินของสถานีตรวจวัด

รูปที่ 2.30 และรูปที่ 2.33 แสดงการกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัด โดยแบ่งตามบริเวณการแปรสัณฐาน, ประเภทชั้นดินของสถานีตรวจวัดและขนาดโมเมนต์ซึ่งสังเกตได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบ่งชั้นตามขนาดโมเมนต์อย่างเห็นได้ชัดแสดงว่าขนาดโมเมนต์เป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการประมาณความรุนแรงการสั่นไหว

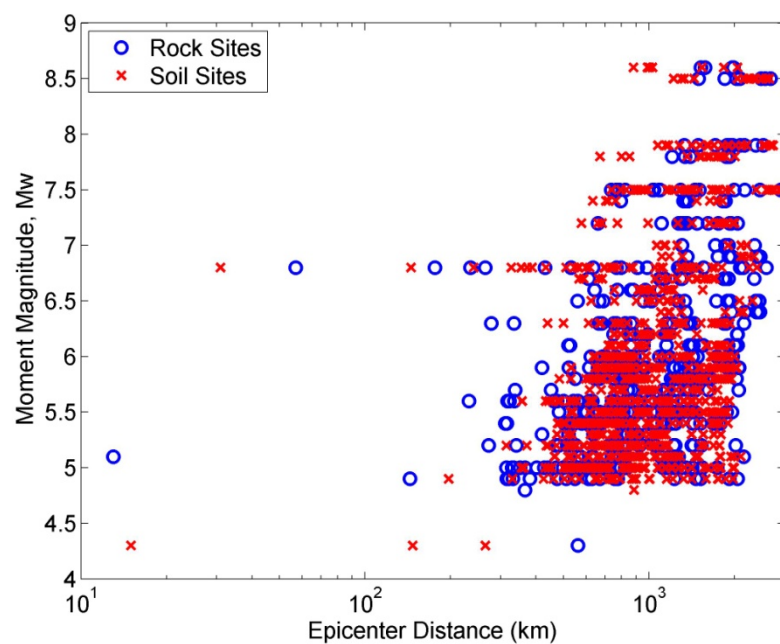
รูปที่ 2.34 ถึง 2.41 แสดงการกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัด สำหรับบริเวณแผ่นดินไหวต้นของแผ่นเปลือกโลก โดยแบ่งตามประเภทชั้นดินของสถานีตรวจวัด, ขนาดโมเมนต์ และรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกซึ่งพบว่าตัวแปรรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก สำหรับบริเวณแผ่นดินไหวต้นของแผ่นเปลือกโลกยังขาดข้อมูลอีกเป็นจำนวนมากเพื่อบ่งชี้ความแตกต่างของรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกระหว่างรอยเลื่อนแนวระดับ (strike slip fault), รอยเลื่อนปกติ (normal fault) และรอยเลื่อนย้อน (reverse fault) ดังนั้นการศึกษานี้จึงรวมรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลกทั้ง 3 รูปแบบ สำหรับสร้างสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย บริเวณแผ่นดินไหวต้นของแผ่นเปลือกโลก

รูปที่ 2.42 ถึง 2.49 แสดงการกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัด สำหรับบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก โดยแบ่งตามประเภทชั้นดินของสถานีตรวจวัด, ขนาดโมเมนต์ และรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก ข้อมูลยังมีการกระจายเพื่อบ่งชี้ความแตกต่างที่ยังไม่ชัดเจน และยังขาดข้อมูลเหตุการณ์ภายในแผ่น (intraslab) ที่ขนาดโมเมนต์เท่ากับ 8 แต่การศึกษานี้แบ่งรูปแบบเหตุการณ์ออกเป็น เหตุการณ์ที่ผิวสัมผัส (interface) และเหตุการณ์ภายในแผ่น สำหรับสร้างสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก

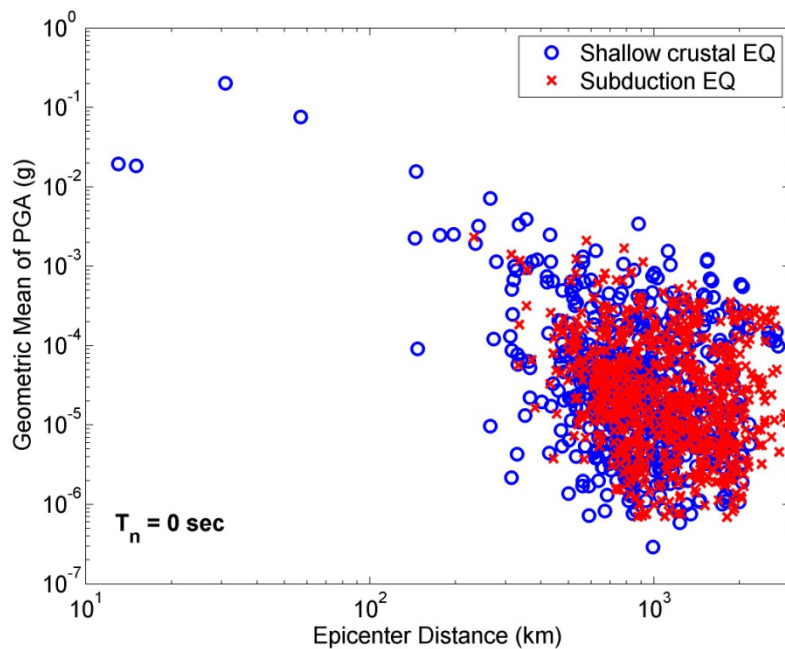




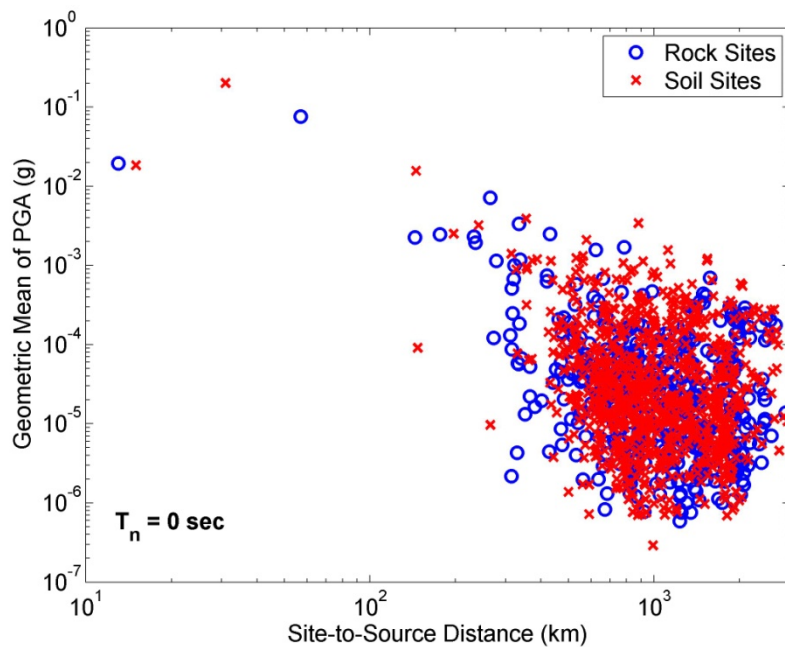
รูปที่ 2.23 การกระจายของข้อมูลที่ดินที่กได้ตามขนาดโมเมนต์กับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง  
สถานีแบ่งตามบริเวณกาแปรสัณฐานของโลก



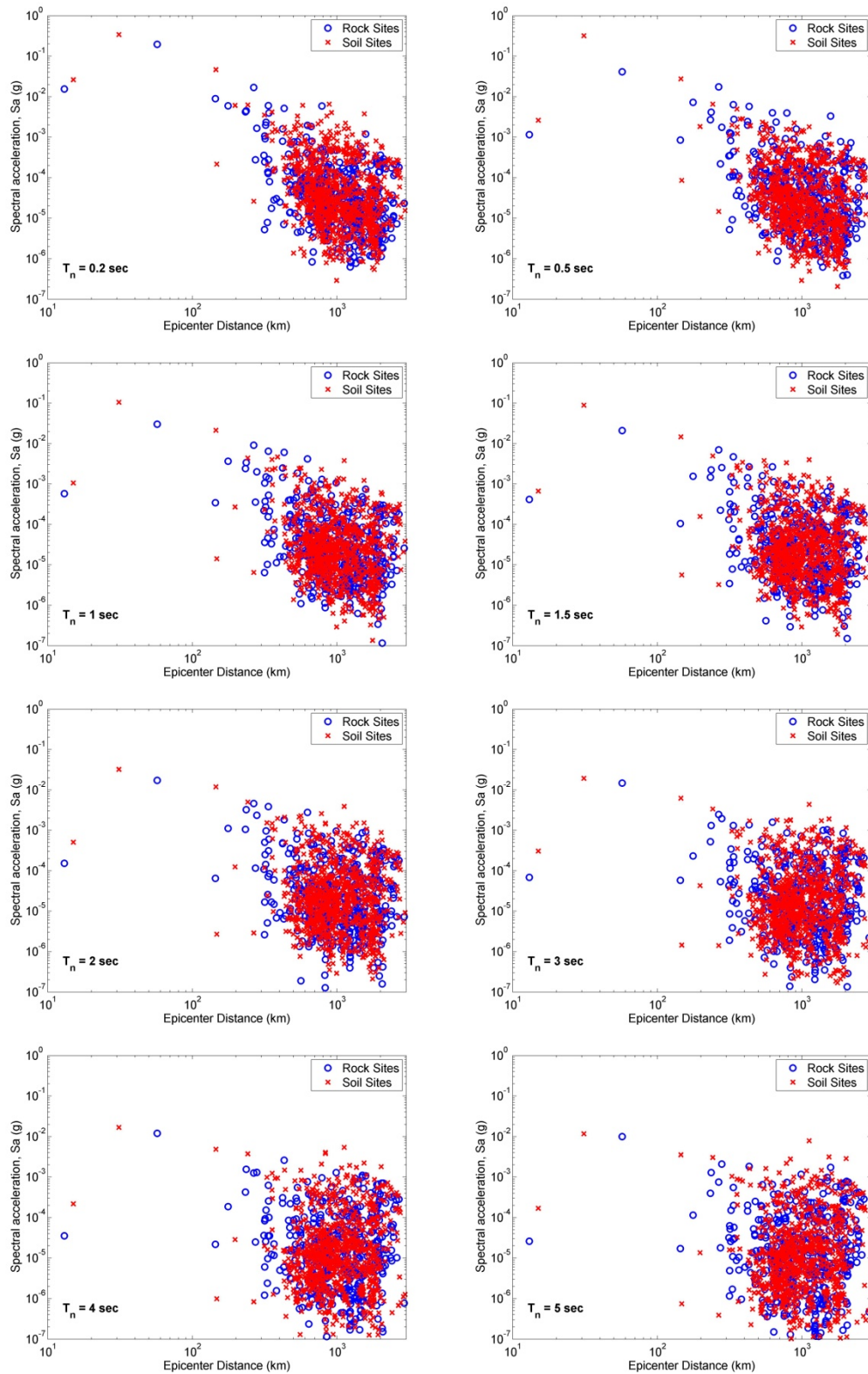
รูปที่ 2.24 การกระจายของข้อมูลที่ดินที่กได้ตามขนาดโมเมนต์กับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง  
สถานีแบ่งตามประเภทชั้นดินของสถานีตรวจวัด



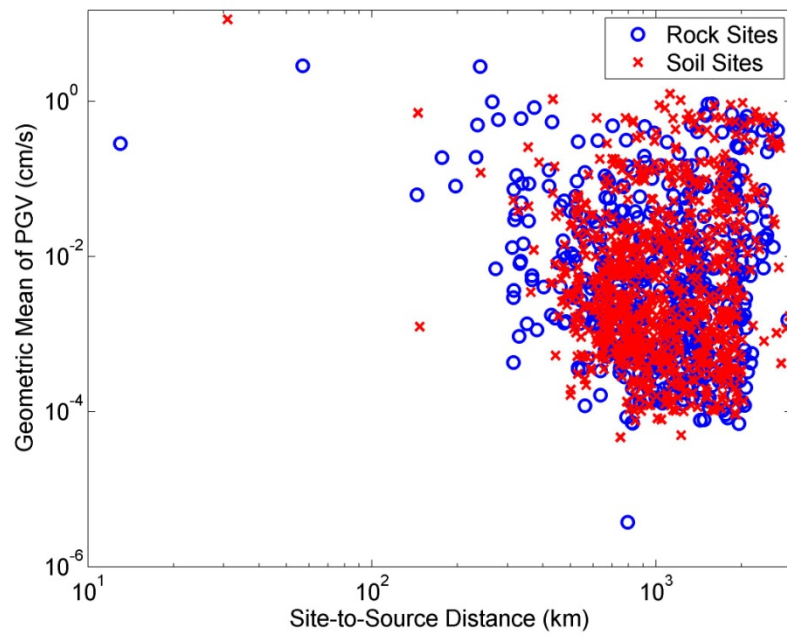
รูปที่ 2.25 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง  
สถานีตรวจวัดแบ่งตามบริเวณกาแปรสัณฐานของโลก



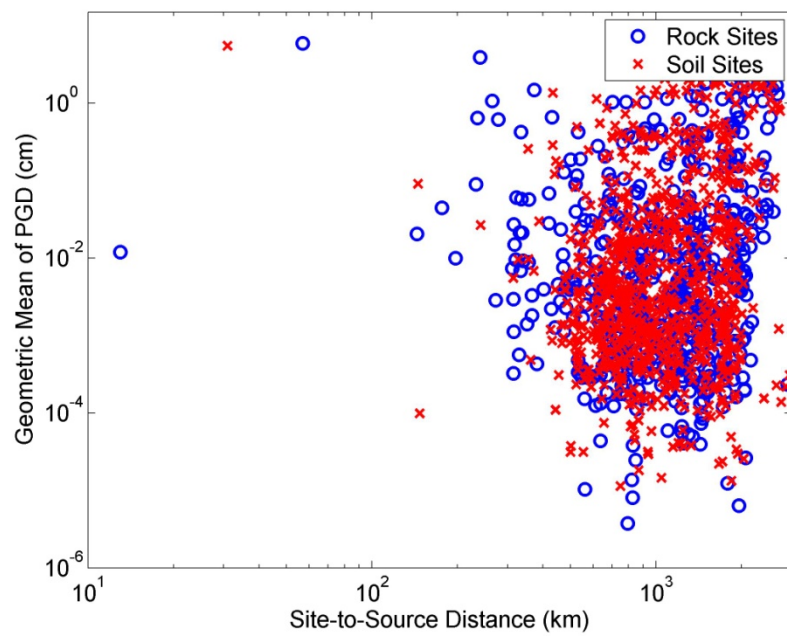
รูปที่ 2.26 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง  
สถานีตรวจวัดแบ่งตามประเภทชั้นดินของสถานีตรวจวัด



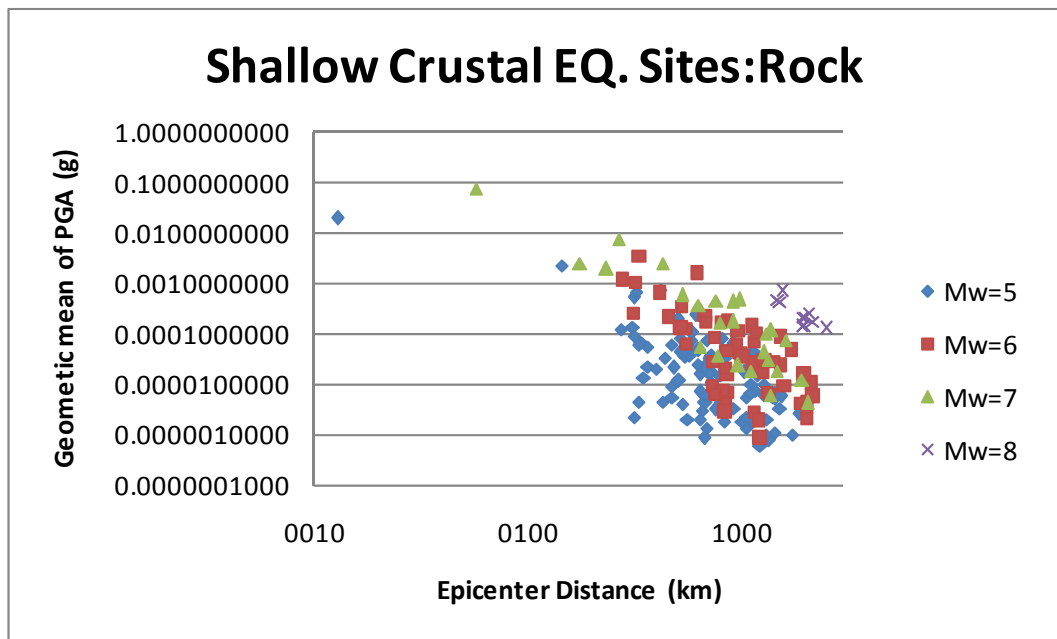
รูปที่ 2.27 การกระจายของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง  
สถานีตรวจวัด



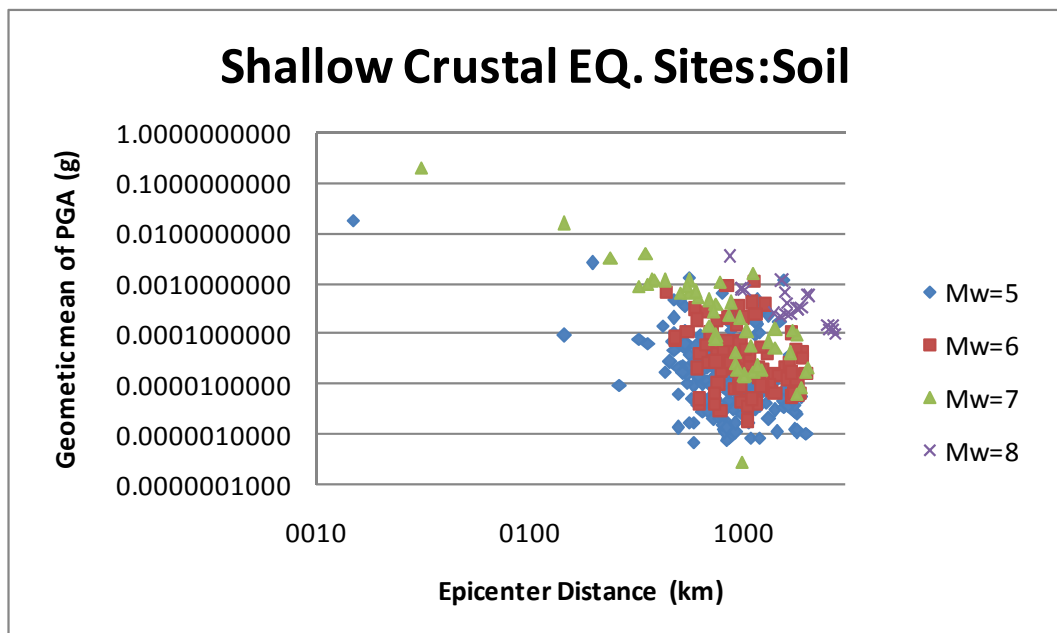
รูปที่ 2.28 การกระจายของข้อมูลความเร็วสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง  
สถานีตรวจวัด



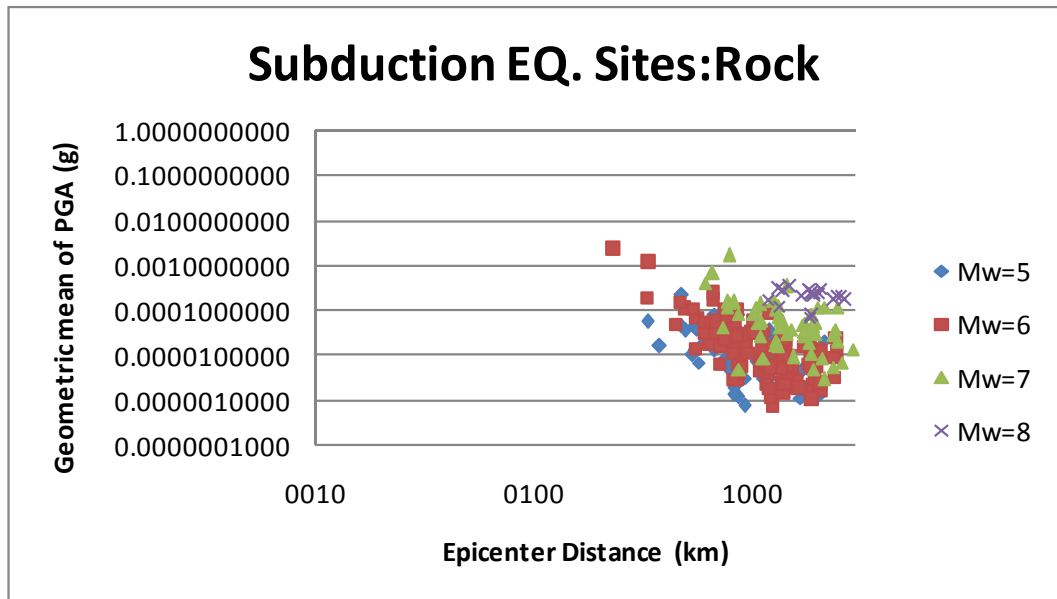
รูปที่ 2.29 การกระจายของข้อมูลการกระจัดสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง  
สถานีตรวจวัด



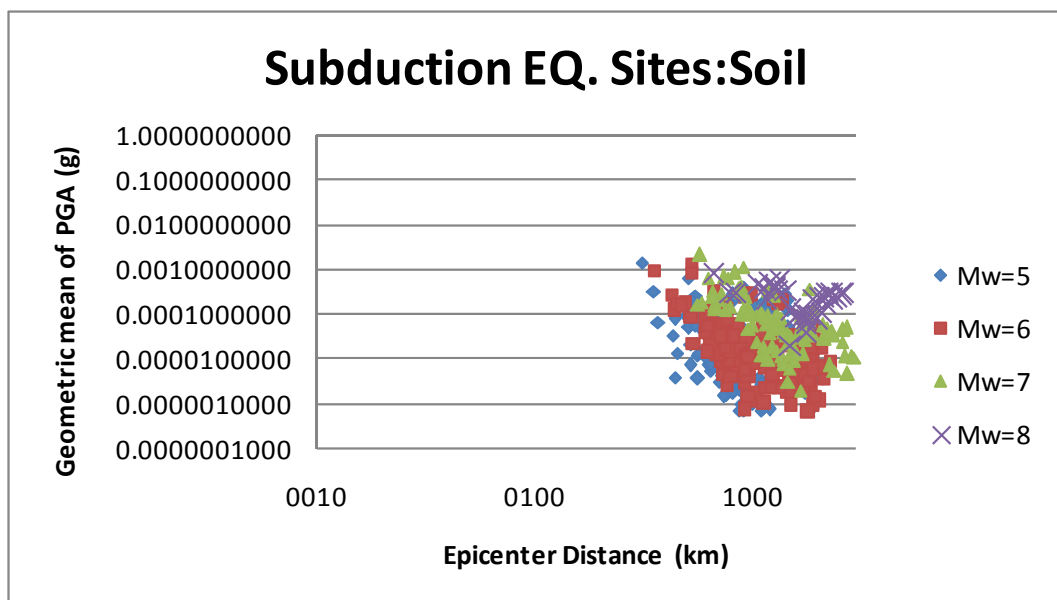
รูปที่ 2.30 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณแผ่นดินไหวตื้น สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน แบ่งตามขนาดโมเมนต์



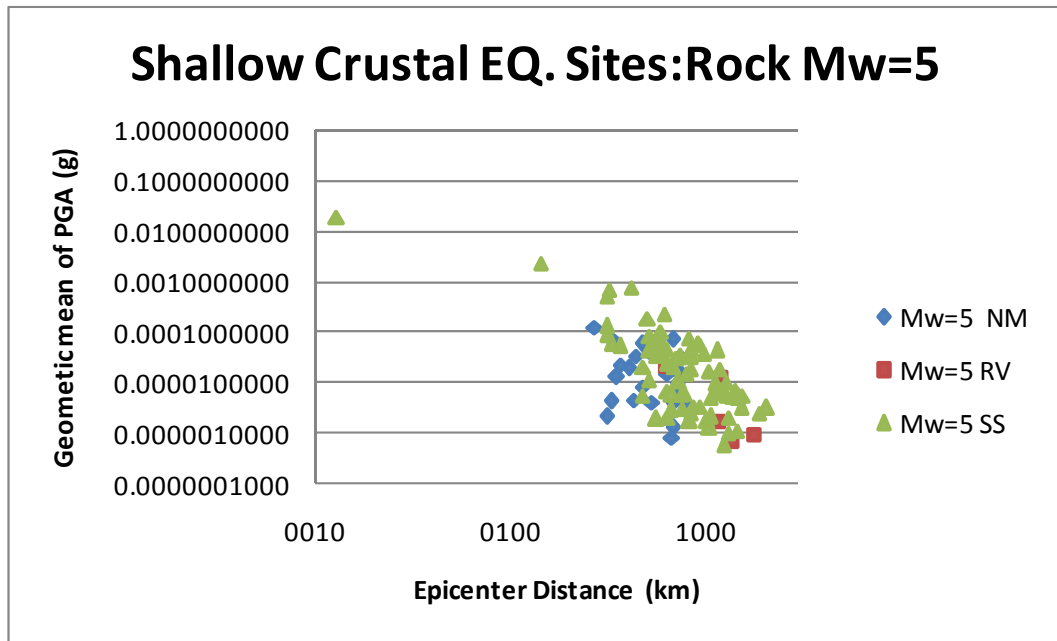
รูปที่ 2.31 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดบริเวณแผ่นดินไหวตื้น สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน แบ่งตามขนาดโมเมนต์



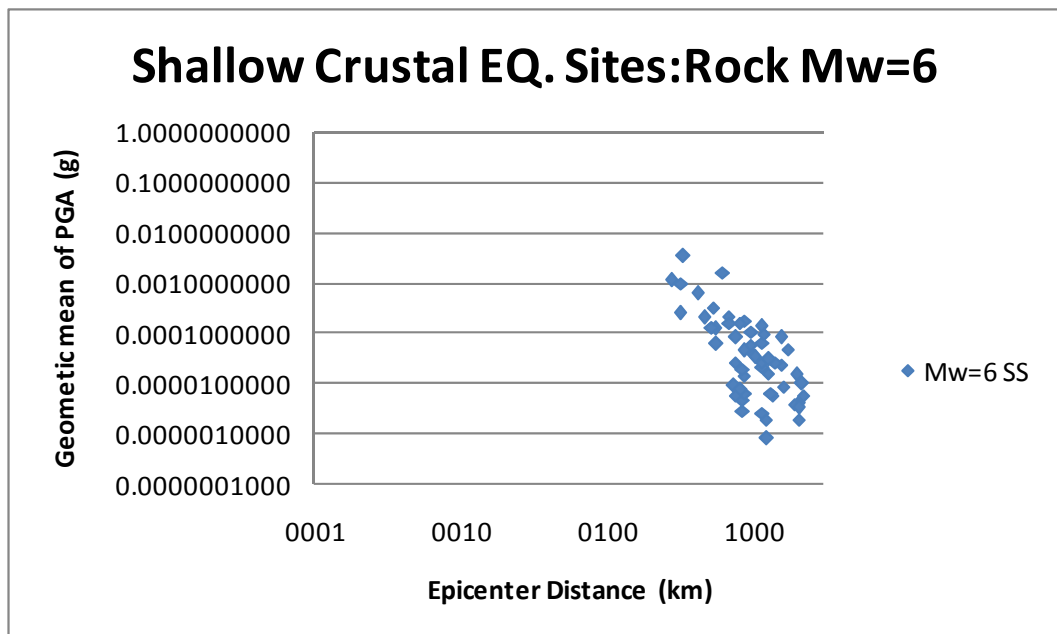
รูปที่ 2.32 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง  
สถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน  
แบ่งตามขนาดโมเมนต์



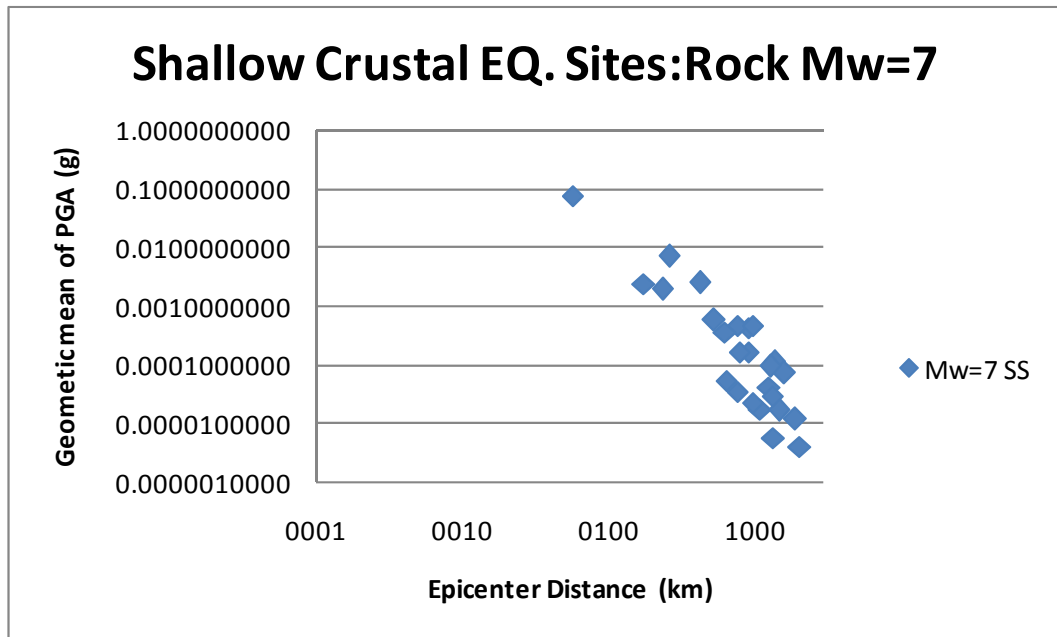
รูปที่ 2.33 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง  
สถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน  
แบ่งตามขนาดโมเมนต์



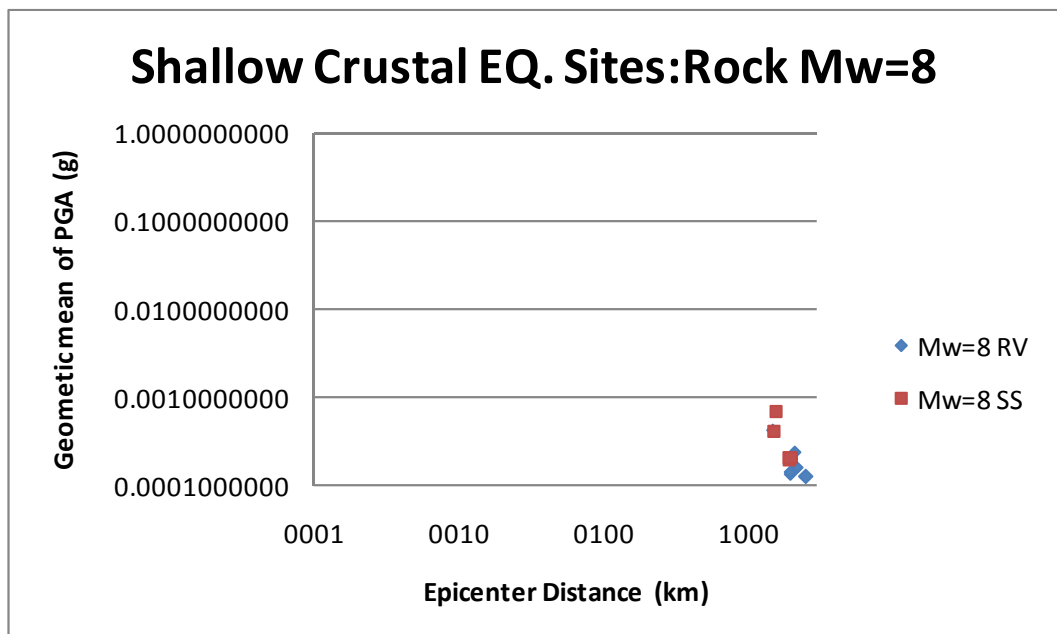
รูปที่ 2.34 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณแผ่นดินไหวต้นของแผ่นดินโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเคลื่อนของแผ่นดินโลก  $M_w = 5$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน



รูปที่ 2.35 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณแผ่นดินไหวต้นของแผ่นดินโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเคลื่อนของแผ่นดินโลก  $M_w = 6$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน

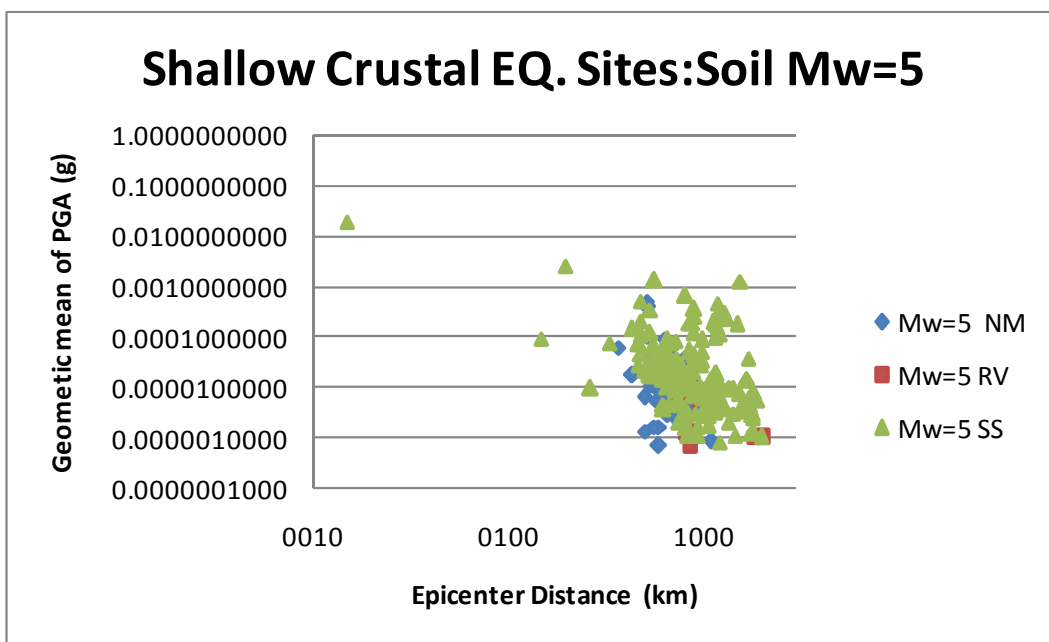


รูปที่ 2.36 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง สถานีตรวจวัด บริเวณแผ่นดินไหวต้นของแผ่นดินโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเคลื่อนของ แผ่นเปลือกโลก  $M_w = 7$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน

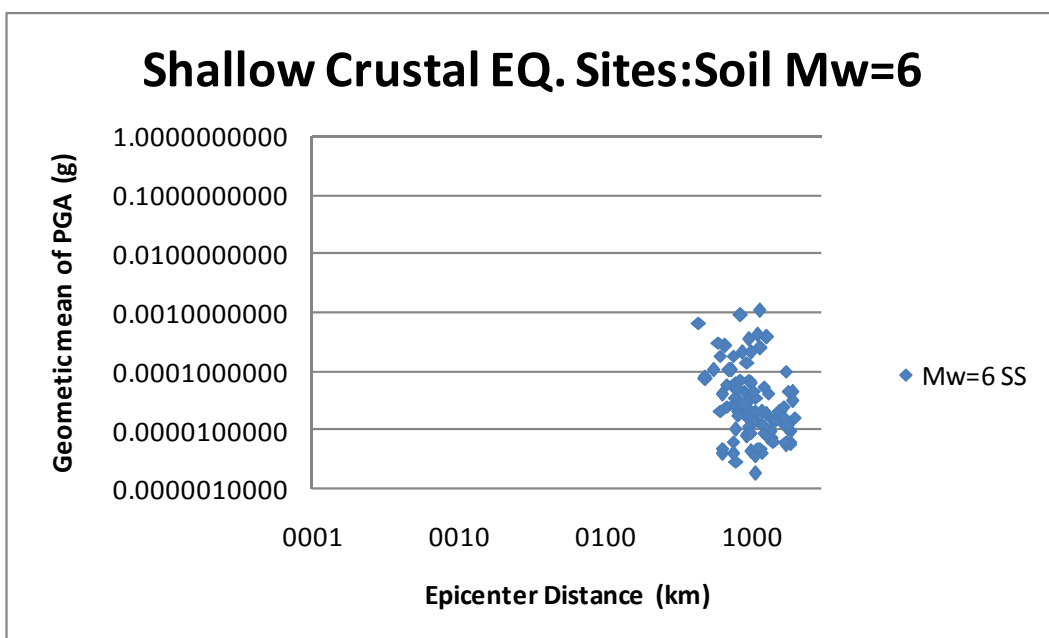


รูปที่ 2.37 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึง สถานีตรวจวัด บริเวณแผ่นดินไหวต้นของแผ่นดินโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเคลื่อนของ แผ่นเปลือกโลก  $M_w = 8$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน

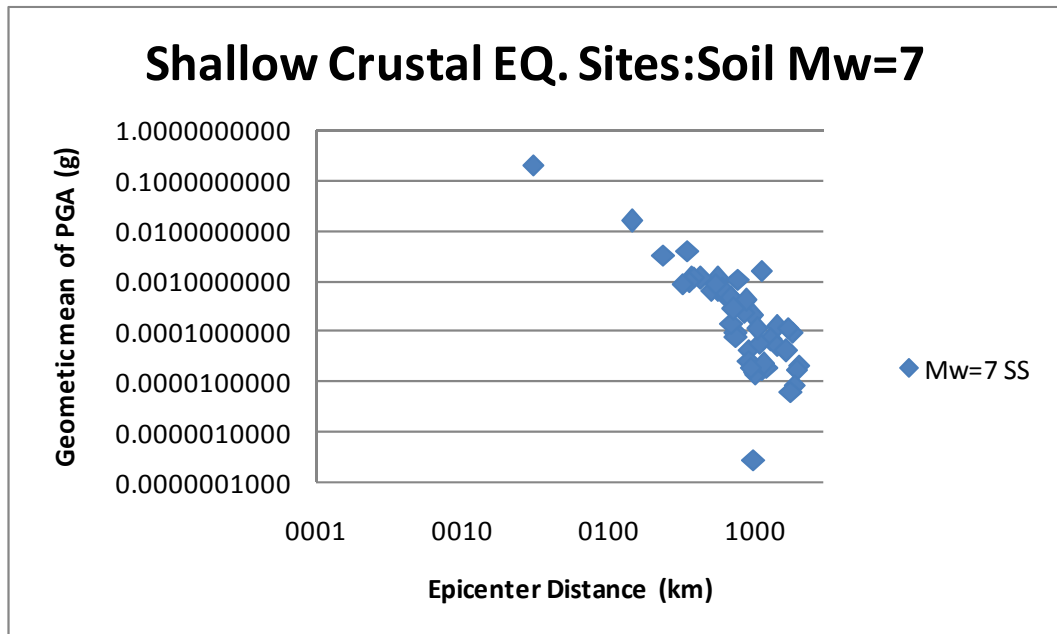




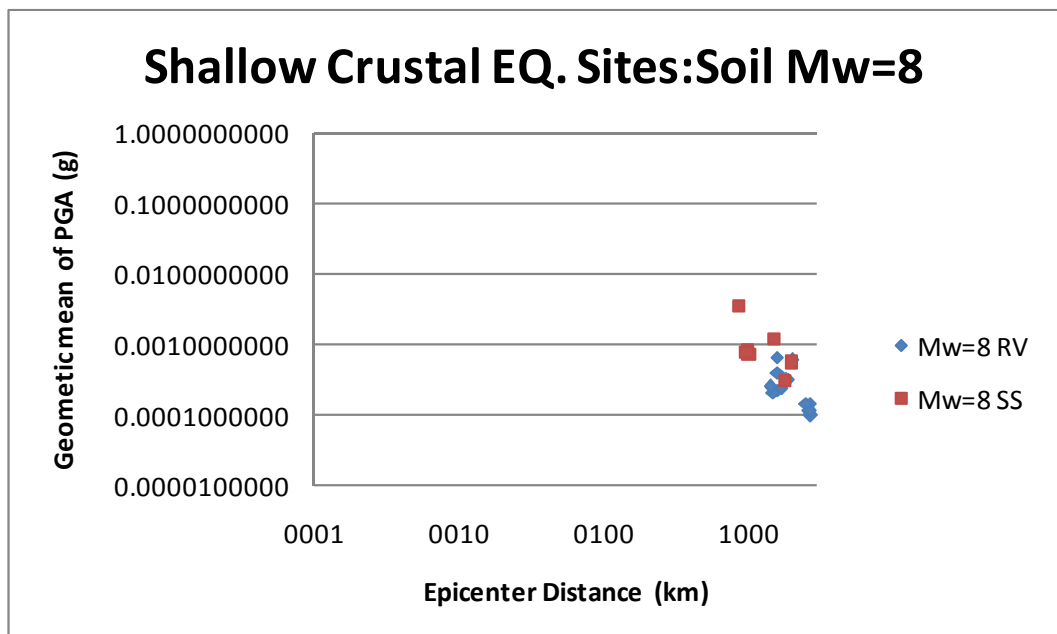
รูปที่ 2.38 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณแผ่นดินไหวต้นของแผ่นดินโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเคลื่อนของแผ่นดินโลก  $M_w = 5$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน



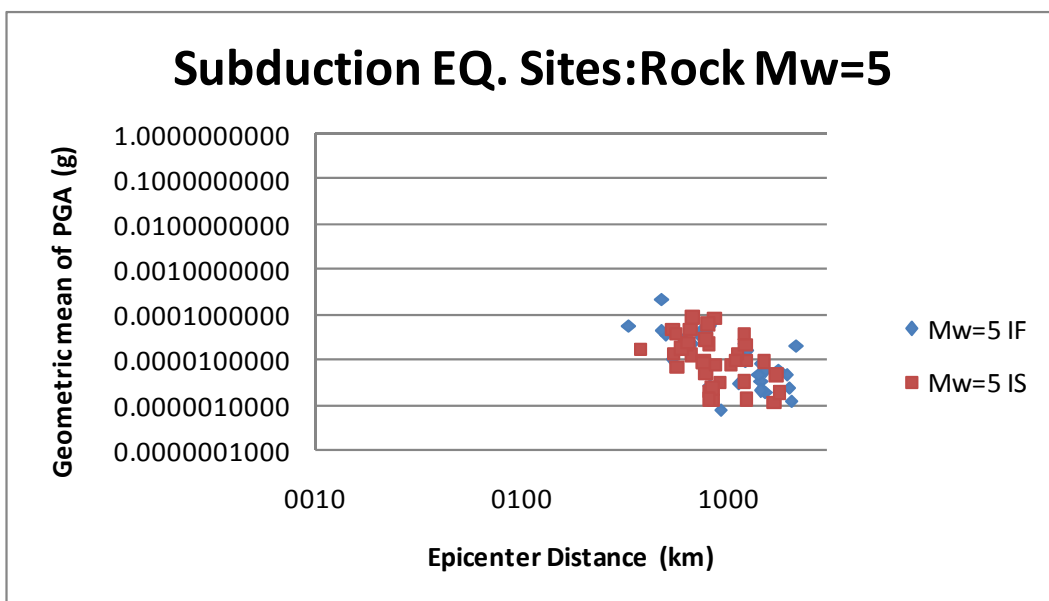
รูปที่ 2.39 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณแผ่นดินไหวต้นของแผ่นดินโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเคลื่อนของแผ่นดินโลก  $M_w = 6$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน



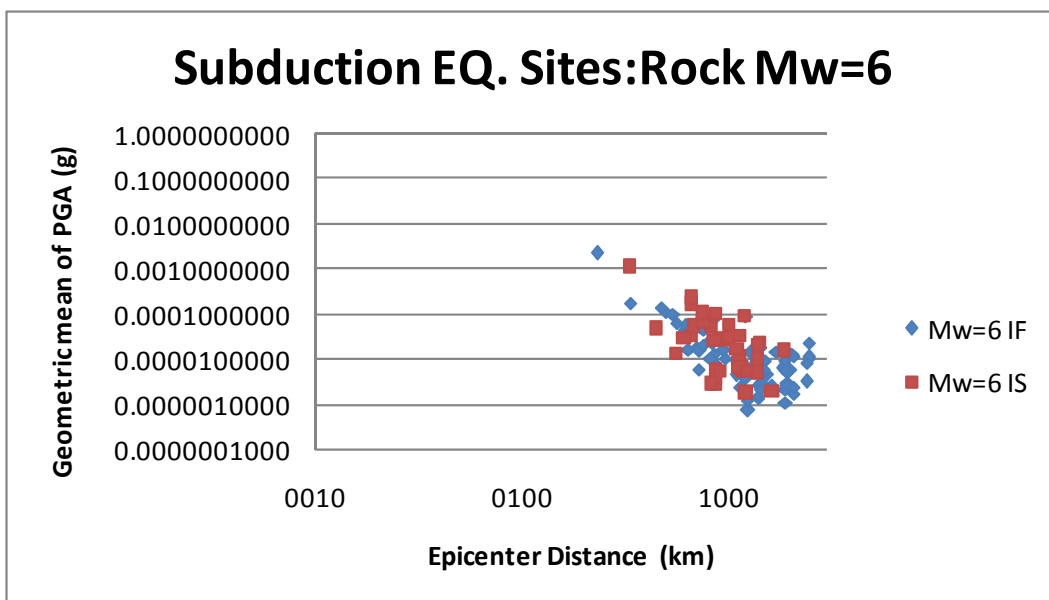
รูปที่ 2.40 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณแผ่นดินไหวตื้นของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 7$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน



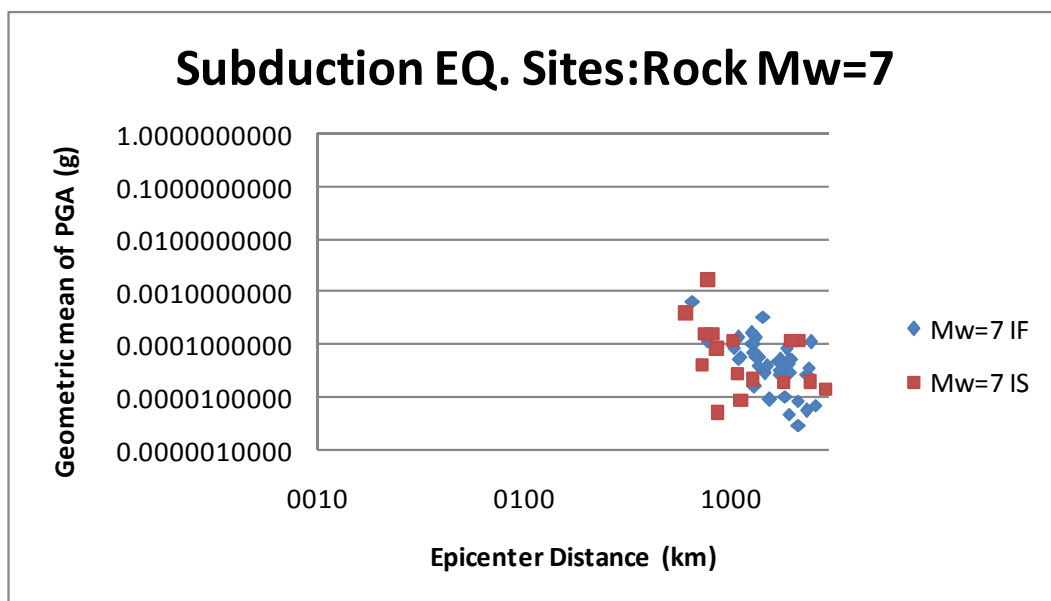
รูปที่ 2.41 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณแผ่นดินไหวตื้นของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 8$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน



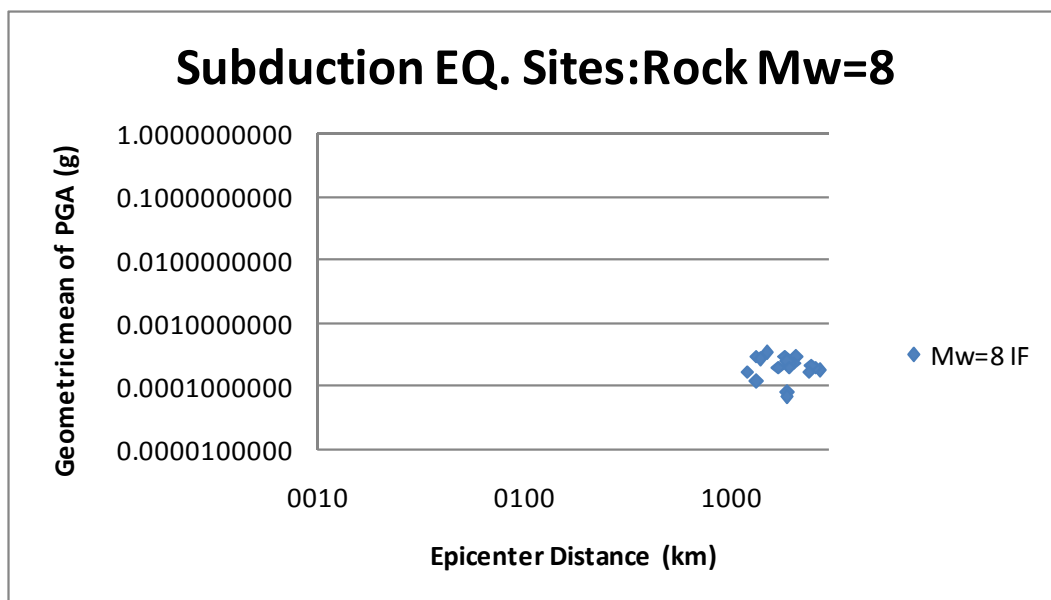
รูปที่ 2.42 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 5$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน



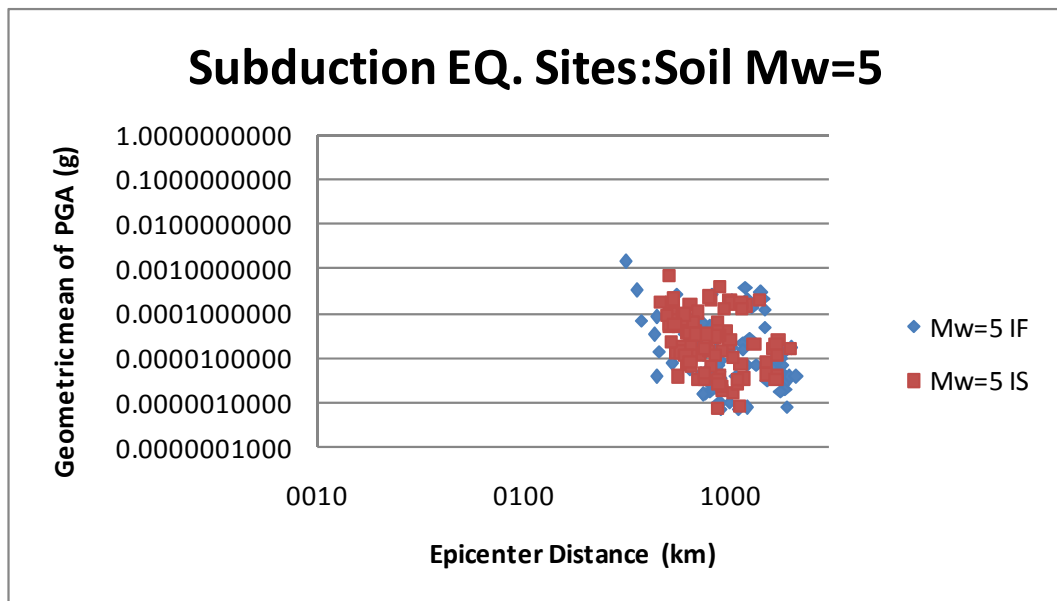
รูปที่ 2.43 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 6$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน



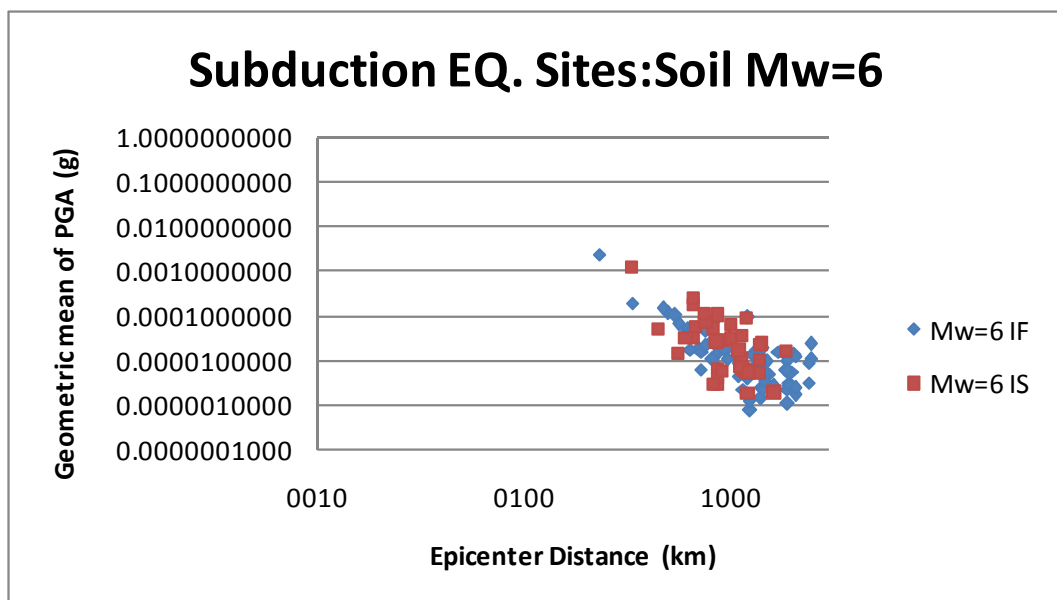
รูปที่ 2.44 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 7$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน



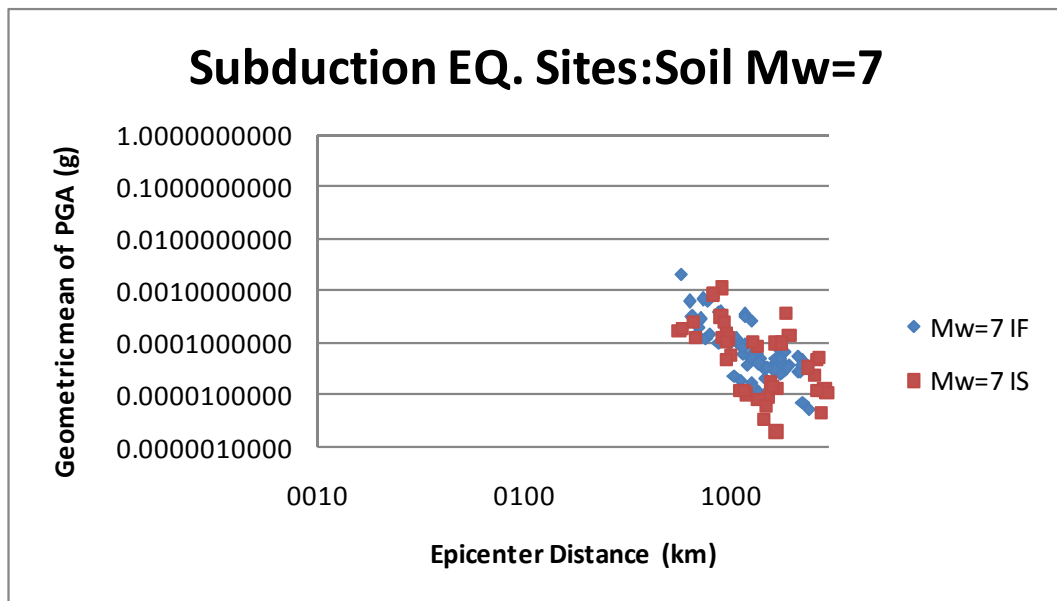
รูปที่ 2.45 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 8$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนหิน



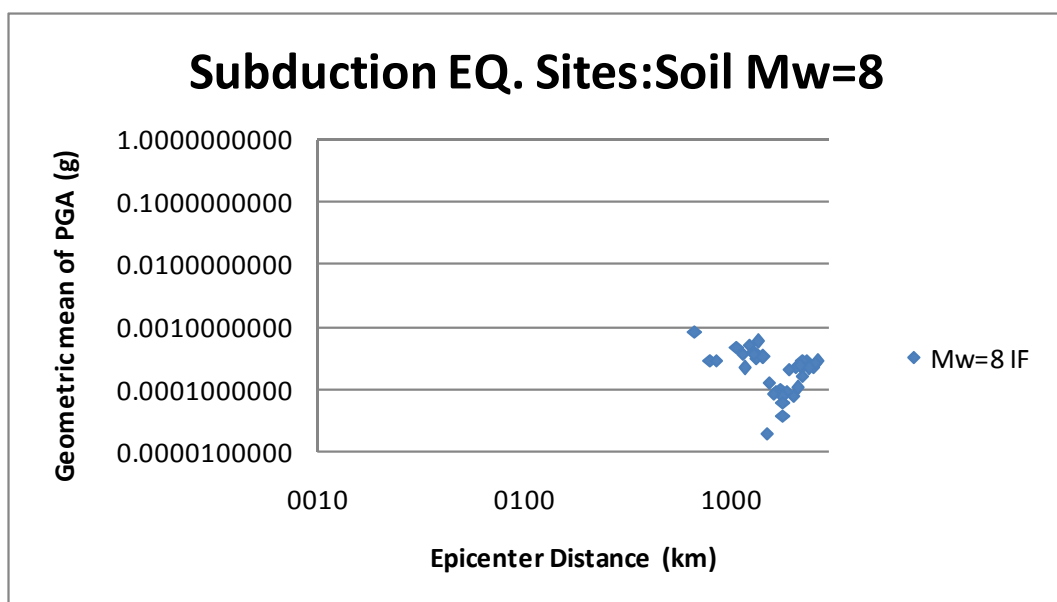
รูปที่ 2.46 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 5$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน



รูปที่ 2.47 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 6$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน



รูปที่ 2.48 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 7$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน



รูปที่ 2.49 การกระจายของข้อมูลความเร่งสูงสุดของพื้นดินกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด บริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก แบ่งตามรูปแบบกลไกการเลื่อนของแผ่นเปลือกโลก  $M_w = 8$  สถานีตรวจวัดที่ตั้งบนดิน

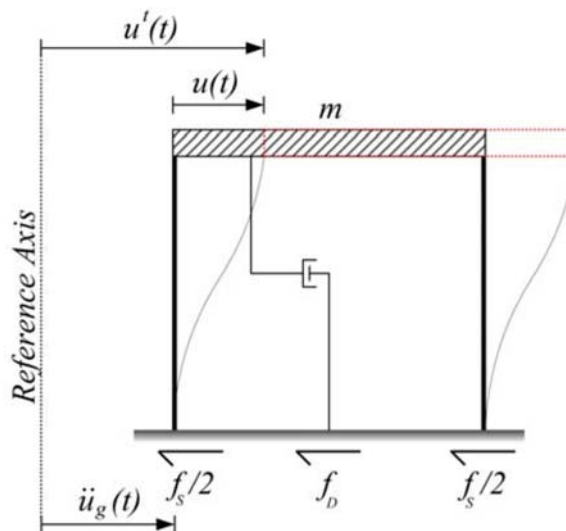
### บทที่ 3

## สเปกตรัมการตอบสนองและแบบจำลองการลดทอน

### 3.1 สเปกตรัมการตอบสนอง

สเปกตรัมผลตอบสนองเป็นหลักการแสดงความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวโดยการแสดงค่าการตอบสนองสูงสุดของระบบยึดหยุ่นที่มีระดับชั้นความเสรีเดียว (single degree of freedom, SDF) ภายใต้แผ่นดินไหวที่พิจารณา ซึ่งเป็นฟังก์ชันของคาบการสั่นไหวธรรมชาติ (natural vibration period, ) หรือความถี่ธรรมชาติเชิงมุม (circular natural frequency, ) โดยแสดงสำหรับค่าอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio, ) คงที่

สเปกตรัมผลตอบสนองแบบยึดหยุ่นของโครงสร้างสามารถคำนวณหาได้โดยวิธีพลศาสตร์โครงสร้าง ซึ่งพิจารณาในระบบยึดหยุ่นระดับชั้นความเสรีเดียว รูปที่ 3.1 โดยที่ฐานของโครงสร้างเกิดการสั่นเนื่องจากการสั่นไหวของพื้นดิน ซึ่งทำให้มวลของโครงสร้างเกิดการกระจัดโดยมีความสัมพันธ์กับฐานของโครงสร้าง ซึ่งสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของระบบได้ดังสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบยึดหยุ่นระดับชั้นความเสรีเดียวโดยฐานของโครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ (Chopra, 2001)

$$m\ddot{u}' + 2\zeta m\omega_n \dot{u} + ku = 0 \quad (3.1)$$

โดยที่

$u$  = การกระจัดสัมพัทธ์ของมวลเทียบกับพื้นดิน

$u'$  = การกระจัดรวม =  $u_g(t) + u(t)$

$\ddot{u}'$  = ความเร่งรวม =  $\ddot{u}_g(t) + \ddot{u}(t)$

$u_g$  = การกระจัดของพื้นดิน

$\ddot{u}_g$  = ความเร่งของพื้นดิน

$\zeta$  = อัตราส่วนความหน่วง

$\omega_n$  = ความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของระบบ SDF โดยปราศจากความหน่วง =  $\frac{2\pi}{T_n}$

$k$  = สติฟเนสของโครงสร้าง =  $\omega_n^2 m$

เมื่อหารด้วย  $m$  ตลอดทั้งสมการที่ 3.1 จะได้

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = -\ddot{u}_g(t) \quad (3.2)$$

เมื่อโครงสร้างถูกกระทำด้วยความเร่งแผ่นดินไหว ใดๆ ค่าการกระจัดตอบสนอง (deformation response, ) คำนวณได้จากสมการ 3.2 โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) นำค่าสูงสุดของการกระจัดที่ตอบสนองมาเขียนบนแกนของคาบการสั่นไหวธรรมชาติ จะได้กราฟของ Deformation Response Spectrum ดังสมการที่ 3.3 และ รูปที่ 3.2

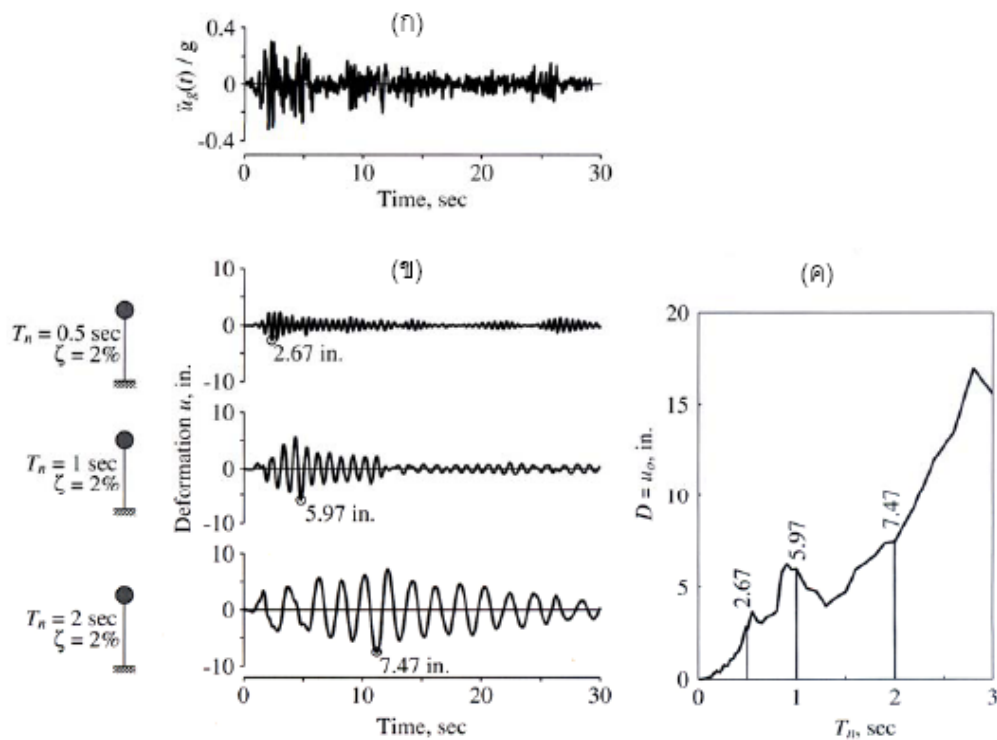
$$D = u_o = \max_t |u(t)| \quad (3.3)$$

โดยที่

$u_o$  = การกระจัดสูงสุดตลอดเวลาของช่วงการตอบสนอง

$D$  = ผลตอบสนองการกระจัดสูงสุด





รูปที่ 3.2(ก) ความเร่งของพื้นดิน (ข) ผลตอบสนองการกระจัดของระบบที่มีระดับชั้นความเสียดีเดียว 3 ระบบ ที่มีค่า  $\zeta = 2\%$  และ  $T_n = 0.5, 1$ , และ 2 วินาที(ค) สเปคตรัมผลตอบสนองการกระจัดที่มีค่า  $\zeta = 2\%$  (Chopra, 2001)

สเปคตรัมผลตอบสนองความเร็วเทียม (pseudo – velocity response spectrum) หาได้จากสมการที่ 3.4

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \tag{3.4}$$

โดยที่

$V$  = ผลตอบสนองความเร็วเทียม (pseudo – velocity)

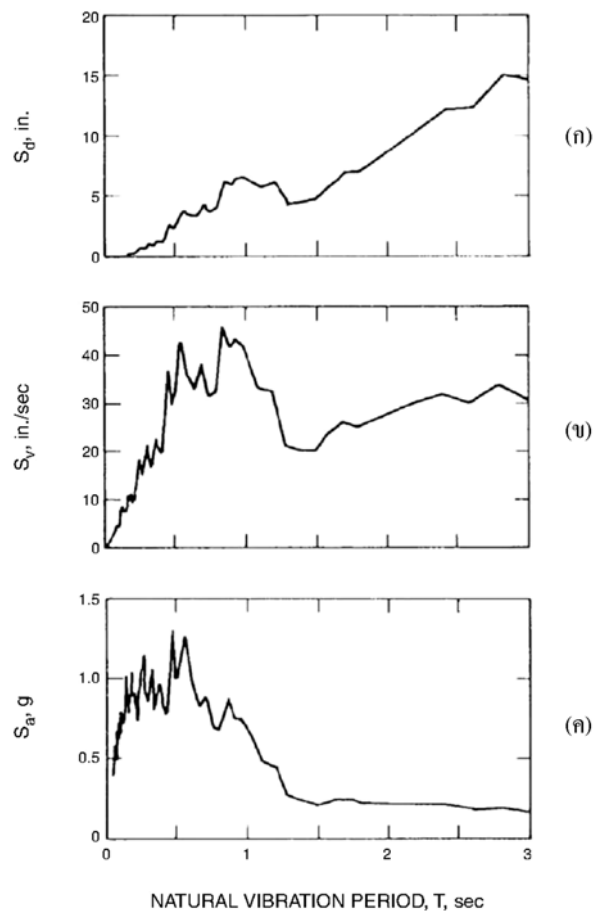
สเปคตรัมผลตอบสนองความเร่งเทียม (pseudo – acceleration response spectrum) หาได้จากความเร็วเทียมหรือการเสียรูปสูงสุดดังสมการที่ 3.5

$$A = \omega_n^2 D = \left( \frac{2\pi}{T_n} \right)^2 D \quad (3.5)$$

โดยที่

$A$  = ผลตอบสนองของความเร่งเทียม (pseudo - acceleration)

จาก รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมผลตอบสนอง (response spectrum) ที่มี  $\zeta = 0.02$  ของคลื่นแผ่นดินไหวที่สถานี El Centro จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว Imperial Valley เมื่อปี 1940 รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.3 สเปกตรัมผลตอบสนอง ที่มีค่า  $\zeta = 0.02$  ของคลื่นแผ่นดินไหวที่สถานี El Centro จาก เหตุการณ์แผ่นดินไหว Imperial Valley ปี 1940 (ก) สเปกตรัมผลตอบสนองการกระจัด (ข) สเปกตรัมผลตอบสนองความเร็วเทียม (ค) สเปกตรัมผลตอบสนองความเร่งเทียม

(Chopra, 2001)

### 3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของแบบจำลองการลดทอน

สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวเป็นสมการที่ใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์การสั่นไหวของพื้นดิน เช่น ความเร่งสูงสุดของพื้นดินความเร็วสูงสุดของพื้นดิน การกระจัดสูงสุดของพื้นดินและความเร่งเทียมซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักได้แก่ ขนาดของแผ่นดินไหว (magnitude) ระยะห่างจากจุดกำเนิด (distance) คาบธรรมชาติ (natural period) กลไกการเลื่อน (faulting mechanism) และอาจรวมถึงผลจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ความลึกของจุดกำเนิด (depth) ซึ่งสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวได้มีรูปแบบฟังก์ชันโดยทั่วไปดังสมการที่ 3.6 และขั้นตอนการสร้างสมการการลดทอนโดยใช้ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินแสดงในรูปที่ 3.4

$$\ln(Y) = \ln(b_1) + \ln f_1(M) + \ln f_2(R) + \ln f_3(M, R) + \ln f_4(P_i) + \ln(\varepsilon) \quad (3.6)$$

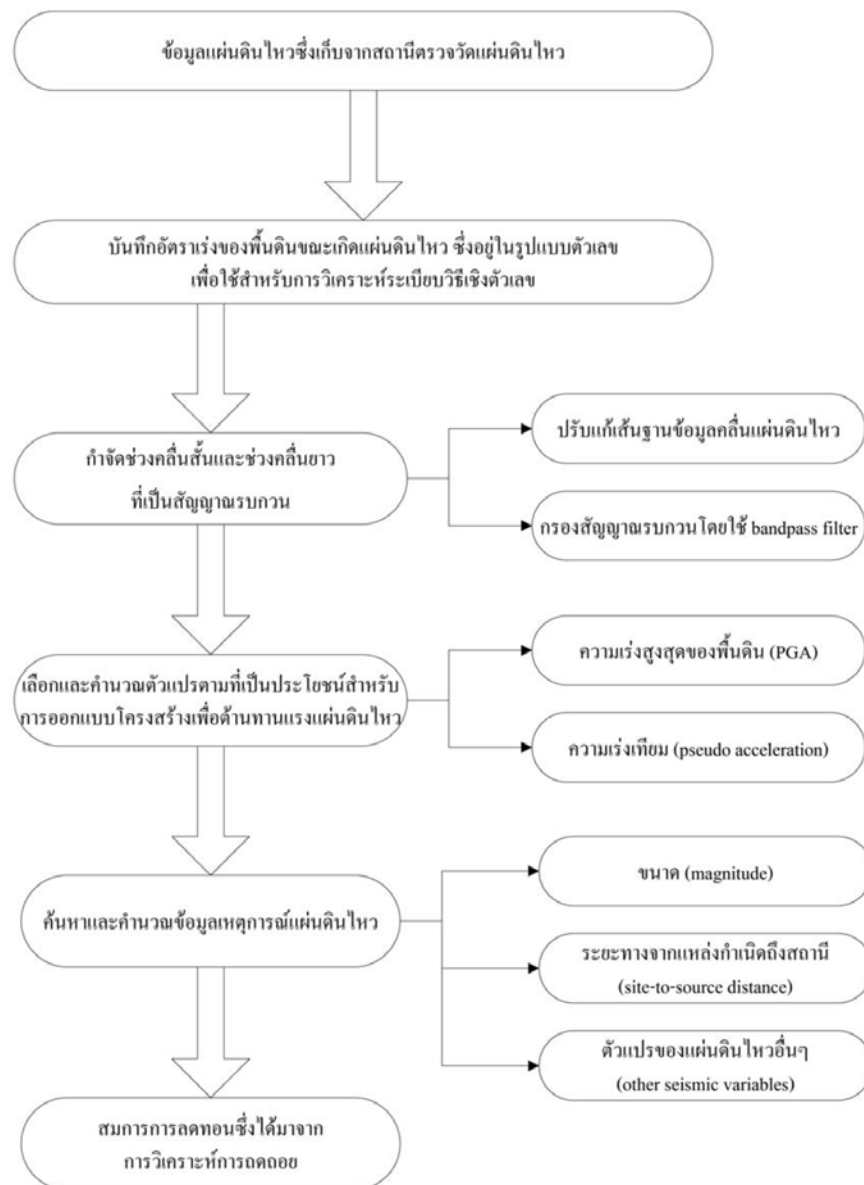
โดย

$Y$	= พารามิเตอร์การสั่นไหวของพื้นดิน
$b_1$	= ตัวประกอบมาตราส่วน
$f_1(M)$	= ฟังก์ชันของขนาดแผ่นดินไหว (magnitude)
$f_2(R)$	= ฟังก์ชันของระยะทาง (distance)
$f_3(M, R)$	= ฟังก์ชันขนาดแผ่นดินไหว (magnitude) และระยะทาง (distance)
$f_4(P_i)$	= ตัวแปรอื่นๆของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (source) และผลกระทบของชั้นดินที่ตั้งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว
$\varepsilon$	= ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากความไม่แน่นอน

สมการการลดทอน อาจจะมีรูปแบบแตกต่างจากสมการที่ 3.6 ขึ้นอยู่กับนักวิจัยผู้พัฒนา ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) ข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดิน ซึ่งวิธีการวิเคราะห์การถดถอยที่นิยมใช้มีดังนี้คือ วิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักไม่เชิงเส้น (weighted nonlinear least squares regression), วิธีการถดถอยสองขั้นตอน (two-step regression) และวิธีผลกระทบแบบสุ่ม (random-effects method)

สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวที่มีอยู่แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ (1) สำหรับแผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลก (shallow crustal earthquakes) และ (2) สำหรับแผ่นดินไหวในบริเวณที่เปลือกโลกมุดตัวเข้าไปใต้แผ่นเปลือกโลกอีกแผ่นหนึ่ง (subduction earthquakes)

ซึ่งกลุ่มแรกแบ่งออกได้เป็นสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับ (1.1) บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (active tectonic regions) เช่น ในภาคตะวันตกของสหรัฐอเมริกา รัฐแคลิฟอร์เนีย และ (1.2) บริเวณภาคพื้นทวีปที่มีเสถียรภาพ (stable continental regions) เช่น ในภาคตะวันออกของสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้างสมการการลดทอน (วิษณุ หัตถา, 2551)

### 3.3 สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว

จากประวัติข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณประเทศไทยส่วนใหญ่แผ่นดินไหวจะมีระยะทางที่ค่อนข้างไกลจากประเทศไทย เพราะว่าประเทศไทยตั้งอยู่ห่างจากรอยต่อแผ่นเปลือก

โลก ซึ่งยังไม่มีสมการลดทอนที่สร้างไว้สำหรับพื้นที่บริเวณประเทศไทยโดยเฉพาะ จึงต้องใช้สมการลดทอนที่พัฒนาขึ้นในต่างประเทศ ซึ่งพัฒนามาจากข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่ประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ไต้หวัน ตุรกี มาประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้ซึ่งในการศึกษานี้เลือกศึกษาสมการลดทอนทั้งหมด 11 สมการ โดยแบ่งเป็นสมการลดทอนสำหรับแผ่นดินไหวต้นของแผ่นเปลือกโลกในบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (active tectonic region) 5 สมการ, บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก (subduction zones) 3 สมการ และสมการสำหรับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังกับบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก 3 สมการแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศที่เลือกใช้ในการศึกษา

Attenuation model	Distance range (km)	Magnitude range	Periods (s)
<b>Active Tectonic Region</b>			
Akkar&Bommer (2010)	0-100	5.0-7.6	0.05-3.0
Ambraseysและคณะ (2005)	0-100	5.0-7.6	0.05-2.5
Campbell &Bozorgnia (2003)	0-60	4.7-7.7	0.05-4.0
Idriss (2008)	0-200	4.6-7.4	0.01-10.0
Kannoและคณะ (2006)	1-300	5.5-8.0	0.05-5.0
Mcverryและคณะ (2006)	1-400	5.0-7.2	0.075-3.0
Sadighและคณะ (1997)	0-100	4.0-8.0	0.03-4.0
Zhao และคณะ (2006)	0-300	5.0-8.3	0.05-5.0
<b>Subduction Zone</b>			
Atkinson &Boore (2003)	10-500	5.0-8.3	0.04-3.0
Kannoและคณะ (2006)	30-300	5.5-8.0	0.05-5.0
Lin and Lee (2008)	10-400	5.5-8.1	0.01-5.0
Mcverryและคณะ (2006)	30-400	5.1-6.8	0.075-3.0
Youngsและคณะ (1997)	10-500	5.0-8.2	0.075-3.0
Zhao และคณะ (2006)	0-300	5.0-8.3	0.05-5.0

### 3.3.1 สมการของAkkar and Bommer (2010)

Akkar and Bommer (2010) สร้างสมการลดทอนเพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ความเร็วสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหว

ธรรมชาติตั้งแต่ 0.05 ถึง 3 วินาที สร้างจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวต้นของแผ่นเปลือกโลกในบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (active tectonic region) ใช้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณยุโรป ตะวันออกกลางและเมดิเตอร์เรเนียน ซึ่งมีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 5.0 ถึง 7.6 และระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีไม่เกิน 100 กิโลเมตร

$$\log(S_a) = b_1 + b_2 M + b_3 M^2 + (b_4 + b_5 M) \log \sqrt{R_{jb}^2 + b_6^2} + b_7 S_s + b_8 S_A + b_9 F_N + b_{10} F_R \quad (3.7)$$

$$\log(PGV) = -2.12833 + 1.21448 M_w - 0.08137 M_w^2 + (2.46942 - 0.22349 M_w) \log \sqrt{R_{jb}^2 + 6.41443^2} + 0.20354 S_s + 0.08484 S_A - 0.05856 F_N + 0.01305 F_R \quad (3.8)$$

โดย

$S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม(เซนติเมตร/วินาที<sup>2</sup>)

$PGV$  = ความเร็ว (เซนติเมตร/วินาที)

$M_w$  = ขนาดโมเมนต์

$R_{jb}$  = ระยะทางในแนวราบที่สั้นที่สุดถึงบริเวณภาพถ่ายบนผิวดินของระนาว  
แตกร้าว (Joyner-Boore distance) (กิโลเมตร)

$S_s$  = 1 สำหรับที่ตั้งชั้นดินอ่อน และ 0 สำหรับที่ตั้งแบบอื่น ( $V_{s30} < 360$ )

$S_A$  = 1 สำหรับที่ตั้งชั้นดินแข็ง และ 0 สำหรับที่ตั้งแบบอื่น ( $360 < V_{s30} \leq 760$ )

$F_N$  = 1 สำหรับการเลื่อนแบบปกติ (normal slip) และ 0 สำหรับการเลื่อนแบบอื่น

$F_R$  = 1 สำหรับการเลื่อนแบบย้อน (reverse) และ 0 สำหรับการเลื่อนแบบอื่น

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตารางค.1

### 3.3.2 สมการของAmbraseysและคณะ(2005)

Ambraseys และคณะ (2005) สร้างสมการลดทอนเพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.05 ถึง 2.5 วินาทีสร้างจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวต้นของแผ่นเปลือกโลก โดยใช้ข้อมูลจาก ยุโรป และ ตะวันออกกลาง ซึ่งมีขนาดโมเมนต์มากกว่า 5 และมีระยะทางน้อยกว่า 100 กิโลเมตร

$$\log(S_a) = a_1 + a_2 M_w + (a_3 + a_4 M_w) \log \sqrt{r_{jb}^2 + a_5^2} + a_6 S_s + a_7 S_A + a_8 F_N + a_9 F_T + a_{10} F_O \quad (3.9)$$

โดย

- $S_a$  = ความเร่งตอบสนองของเชิงสเปกตรัม(เมตร/วินาที<sup>2</sup>)
- $M_w$  = ขนาดโมเมนต์
- $R_{jb}$  = ระยะทางในแนวราบที่สั้นที่สุดถึงบริเวณภาพถ่ายบนผิวดินของระนาบ  
แตกร้าว (Joyner-Boore distance) (กิโลเมตร)
- $S_s$  = 1 สำหรับที่ตั้งชั้นดินอ่อน และ 0 สำหรับที่ตั้งแบบอื่น ( $180 < V_{s30} \leq 360$ )
- $S_A$  = 1 สำหรับที่ตั้งชั้นดินแข็ง และ 0 สำหรับที่ตั้งแบบอื่น ( $360 < V_{s30} \leq 760$ )
- $F_N$  = 1 สำหรับการเลื่อนแบบปกติ (normal slip) และ 0 สำหรับการเลื่อนแบบอื่น
- $F_T$  = 1 สำหรับการเลื่อนแบบย้อน (reverse) และ 0 สำหรับการเลื่อนแบบอื่น
- $F_O$  = 1 สำหรับการเลื่อนแบบเฉียง (oblique) และ 0 สำหรับการเลื่อนแบบอื่น
- ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตาราง ค.2

### 3.3.3 สมการของ Campbell และ Bozorgnia (2003)

Campbell และ Bozorgnia (2003) สร้างสมการลดทอนเพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งตอบสนองของเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.05 ถึง 4 วินาที สำหรับทางตะวันตกของประเทศสหรัฐอเมริกา และแคลิฟอร์เนีย ซึ่งเป็นบริเวณแผ่นดินไหวตื่นของแผ่นเปลือกโลก ซึ่งมีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 4.7 ถึง 7.7 และมีระยะทางน้อยกว่า 60 กิโลเมตร

$$\ln(S_a) = c_1 + f_1(M_w) + c_4 \ln \sqrt{f_2(M_w, r_{seis}, S)} + f_3(F) + f_4(S) + f_5(HW, F, M_w, r_{seis}) \quad (3.10)$$

$$f_1(M_w) = c_2 M_w + c_3 (8.5 - M_w)^2$$

$$f_2(M_w, r_{seis}, S) = r_{seis}^2 + g(S)^2 \left( \exp \left[ c_8 M_w + c_9 (8.5 - M_w)^2 \right] \right)^2$$

$$f_3(F) = c_{10}F_{RV} + c_{11}F_{TH}$$

$$f_4(S) = c_{12}S_{VFS} + c_{13}S_{SR} + c_{14}S_{FR}$$

$$f_5(HW, F, M_W, r_{seis}) = HWf_{HW}(M_W)f_{HW}(r_{seis})(F_{RV} + F_{TH})$$

$$HW = \begin{cases} 0 & \text{for } r_{jb} \geq 5 \text{ km or } \delta > 70^\circ \\ (S_{VFS} + S_{SR} + S_{FR})(5 - r_{jb})/5 & \text{for } r_{jb} < 5 \text{ km or } \delta \leq 70^\circ \end{cases}$$

$$f_{HW}(M_W) = \begin{cases} 0 & \text{for } M_W < 5.5 \\ M_W - 5.5 & \text{for } 5.5 \leq M_W \leq 6.5 \\ 1 & \text{for } M_W > 6.5 \end{cases}$$

$$f_{HW}(M_W) = \begin{cases} c_{15}(r_{seis}/8) & \text{for } r_{seis} < 8 \text{ km} \\ c_{15} & \text{for } r_{seis} \geq 8 \text{ km} \end{cases}$$

โดย

$S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $g$ )

$M_W$  = ขนาดโมเมนต์

$R_{SEIS}$  = ระยะทางที่ใกล้ที่สุดกับส่วนที่ก่อให้เกิดแผ่นดินไหวของระนาบแตกร้าว (กิโลเมตร)

$F$  = 1 สำหรับการเลื่อนย้อน (reverse)

= 0 สำหรับการเลื่อนในแนวระดับ (strike slip)

$S_{VFS} = 1, S_{SR} = 0, S_{FR} = 0$  สำหรับที่ตั้งหิน ( $V_{S30} = 368 \pm 80$  m/s)

$S_{VFS} = 0, S_{SR} = 0, S_{FR} = 0$  สำหรับที่ตั้งดิน ( $V_{S30} = 298 \pm 92$  m/s)

$F_{RV} = 0, F_{TH} = 0$ , สำหรับการเลื่อนในแนวระดับ (strike slip)

$F_{RV} = 1, F_{TH} = 0$ , สำหรับการเลื่อนย้อน (reverse)

$F_{RV} = 0, F_{TH} = 1$ , สำหรับการเลื่อนย้อนมุดต่ำ (thrust)

ค ๑

สัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตาราง ค.4



### 3.3.4 สมการของ Idriss (2008)

Idriss (2008) สร้างสมการลดทอนเพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.02 ถึง 10 วินาที โดยใช้ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวตื้นของแผ่นเปลือกโลก (shallow crustal earthquakes) ในฐานข้อมูลของ PEER NGA ซึ่งข้อมูลแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาส่วนใหญ่จะอยู่ในแคลิฟอร์เนียและข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวอื่นๆ ที่มีแหล่งกำเนิดในบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (active tectonic regions) ส่วนค่าความเร็วเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตรจากผิวดิน ( $V_{S,30}$ ) ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองมีค่าอยู่ในช่วง 450 ถึง 900 เมตร/วินาที และมีระยะทางตั้งแต่ 0 ถึง 200 กิโลเมตร ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ  $M_w < 6.75$  และ  $M_w \geq 6.75$

$$\ln(S_a) = (\alpha_1 + \alpha_2 M_w) - (\beta_1 + \beta_2 M_w) \ln(r_{rup} + 10) + \gamma r_{rup} + F \varphi \quad (3.11)$$

โดย

- $S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $g$ )
  - $M_w$  = ขนาดโมเมนต์
  - $r_{rup}$  = ระยะทางที่ใกล้ที่สุดถึงระนาบแตกร้าว (กิโลเมตร)
  - $F$  = 1 สำหรับการเลื่อนย้อน (reverse)  
0 สำหรับการเลื่อนในแนวระดับ (strike slip)
  - $\gamma$  = ตัวประกอบของการปรับระยะทาง
- ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตารางค.5

### 3.3.5 สมการของ Sadigh และคณะ (1997)

Sadigh และคณะ (1997) สร้างสมการลดทอนเพื่อประมาณค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.07 ถึง 4 วินาที โดยใช้ข้อมูลของเหตุการณ์แผ่นดินไหวตื้นในแคลิฟอร์เนีย ซึ่งเป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวเนื่องจากการเลื่อนในแนวระดับ (strike slip) และเหตุการณ์แผ่นดินไหวเนื่องจากการเลื่อนย้อน (reverse) โดยมีขนาดโมเมนต์ในช่วง 4 ถึง 8 และมีระยะทางตั้งแต่ 0 ถึง 100 กิโลเมตร

$$\ln(S_a) = c_1 + c_2 M_w + c_3 (8.5 - M_w)^{2.5} + c_4 \ln(r_{rup} + e^{(c_5 + c_6 M_w)}) + c_7 \ln(r_{rup} + 2) \quad (3.12)$$

โดย

$S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $g$ )

$M_w$  = ขนาดโมเมนต์

$r_{rup}$  = ระยะทางที่ใกล้ที่สุดถึงระนาบแตกร้าว (กิโลเมตร)

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตาราง ค.10,11 และ 12

### 3.3.6 สมการของAtkinsonและBoore (2003)

Atkinson และBoore (2003) สร้างสมการลดทอนเพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.04 ถึง 3 วินาที ใช้ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวบริเวณ Cascadia, Japan, Mexico, Central America ซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับเหตุการณ์ที่ผิวหน้าสัมผัส (interface) และเหตุการณ์ภายในแผ่น (intraslab) ซึ่งมีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 5 – 8.3 และมีระยะทางตั้งแต่ 10 ถึง 500 กิโลเมตร

$$\log Sa = c_1 + c_2 M + c_3 h + c_4 R - g \log R + c_5 sI_{S_C} + c_6 sI_{S_D} + c_7 sI_{S_E} \quad (3.13)$$

โดย

$S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $g$ )

$M_w$  = ขนาดโมเมนต์

$h$  = ความลึกศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร) ( $h = 100$  กิโลเมตร สำหรับเหตุการณ์ที่  $h > 100$  กิโลเมตร)

$R$  =  $\sqrt{(D_{fault})^2 + \Delta^2}$  ซึ่ง  $D_{fault}$  คือ ระยะทางที่ใกล้ที่สุดกับพื้นผิวการแตกร้าว (กิโลเมตร),  $\Delta = 0.00724 \times 10^{0.507M}$

$S_C$  = 1 สำหรับ NEHRP C Soils ( $360 < V_{S30} \leq 760$  m/sec), = 0 สำหรับอื่นๆ

$S_D$  = 1 สำหรับ NEHRP D Soils ( $180 < V_{S30} \leq 360$  m/sec), = 0 สำหรับอื่นๆ

$S_E$  = 1 สำหรับ NEHRP E Soils ( $V_{S30} < 180$  m/sec), = 0 สำหรับอื่นๆ

$g = 10^{(1.2-0.18M)}$  สำหรับเหตุการณ์ที่ผิวสัมผัส,  $10^{(0.301-0.01M)}$  สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น

$sl = 1$  สำหรับ  $PGA_{rx} \leq 100 \text{ cm/sec}^2$  หรือ frequencies  $\leq 1 \text{ Hz}$

$sl = 1 - (f - 1) (PGA_{rx} - 100) / 400$  สำหรับ  $100 < PGA_{rx} \leq 500 \text{ cm/sec}^2$   
( $1 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$ )

$sl = 1 - (f - 1) (PGA_{rx} - 100) / 400$  สำหรับ  $PGA_{rx} \geq 500 \text{ cm/sec}^2$   
( $1 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$ )

$sl = 1 - (PGA_{rx} - 100) / 400$  สำหรับ  $100 < PGA_{rx} < 500 \text{ cm/sec}^2$   
( $f \geq 2 \text{ Hz}$  และ PGA)

$sl = 0$  สำหรับ  $PGA_{rx} \geq 500 \text{ cm/sec}^2$  ( $f \geq 2 \text{ Hz}$  และ PGA)

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตาราง ค.3

### 3.3.7 สมการของLin และ Lee(2008)

Lin และLee(2008) สร้างแบบจำลองบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกสำหรับสถานีตรวจวัดบนหินและสำหรับบนดินเพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.01 ถึง 5 วินาที แผ่นดินไหวเขตมุดตัวของเปลือกโลกแบ่งเป็นแผ่นดินไหวที่ผิวหน้าสัมผัส (interface) ( $3.94 \leq H \leq 30$ ) และแผ่นดินไหวภายในแผ่น (intraslab) ( $43.39 \leq H \leq 161$ ) เหตุการณ์แผ่นดินไหวส่วนใหญ่เกิดจากบริเวณตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไต้หวัน มีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 5.5 ถึง 8.1 และมีระยะทางตั้งแต่ 10 ถึง 400 กิโลเมตร

$$\ln(S_a) = C_1 + C_2 M_w + C_3 (R + C_4 e^{C_5 M_w}) + C_6 H + c_7 Z_T \quad (3.14)$$

โดย

$S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $g$ )

$M_w$  = ขนาดโมเมนต์

$R$  = ระยะทางจุดเกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร)

$H$  = ความลึกศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร)

$Z_T$  = 0 สำหรับเหตุการณ์ที่ผิวหน้าสัมผัส (interface events)

$Z_T$  = 1 สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น (intraslab events)

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตารางค.7 และ 8

### 3.3.8 สมการของYoungsและคณะ(1997)

Youngs และคณะ (1997) สร้างสมการลดทอนเพื่อใช้ประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน และค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.075 ถึง 4 วินาที ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผิวหน้าสัมผัส (interface) และเหตุการณ์แผ่นดินไหวภายในแผ่น (intraslab) ในบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก (subduction zone) ซึ่งมีขนาดโมเมนต์มากกว่า 5 และมีระยะทางตั้งแต่ 10 ถึง 500 กิโลเมตร ซึ่งแบบจำลองแสดงในสมการที่ 3.29 สำหรับสถานีที่ตั้งบนหิน และสมการที่ 3.30 สำหรับสถานีที่ตั้งบนดิน

$$\ln(S_a) = 0.2418 + 1.414M_w + C_1 + C_2(10 - M_w)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M_w}) + 0.00607H + 0.3846Z_T \quad (3.15)$$

$$\ln(S_a) = -0.6687 + 1.438M_w + C_1 + C_2(10 - M_w)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.097e^{0.617M_w}) + 0.00648H + 0.3643Z_T \quad (3.16)$$

โดย

$S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $g$ )

$M_w$  = ขนาดโมเมนต์

$r_{rup}$  = ระยะทางที่ใกล้ที่สุดถึงระนาบแตกร้าว (กิโลเมตร)

$H$  = ความลึกศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร)

$Z_T$  = 0 สำหรับเหตุการณ์ที่ผิวหน้าสัมผัส (interface events)(บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก Cascadis)

$Z_T$  = 1 สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น (intraslab events)(บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก Juan de Fuca)

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตารางค.13

### 3.3.9 สมการของKanno และคณะ(2006)

Kanno และคณะ (2006) สร้างสมการลดทอนเพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ความเร็วสูงสุดของพื้นดิน และค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.05 ถึง 5 วินาที โดยใช้ข้อมูลทั้งหมด 91,731 บันทึก จาก 4,967 เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศญี่ปุ่น รวมกับข้อมูล 788 บันทึก จาก 12 เหตุการณ์แผ่นดินไหวของ

แคลิฟอร์เนีย และประเทศตุรกี สมการลดทอนแบ่งเป็นสำหรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวตื้น ( $0 \leq D \leq 30$ ) มีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 5.2 ถึง 8.2 ระยะทางตั้งแต่ 1 ถึง 400 กิโลเมตร และสำหรับแผ่นดินไหวลึก ( $30 \leq D \leq 180$ ) มีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 5.5 ถึง 8 ระยะทางตั้งแต่ 30 ถึง 500 กิโลเมตร

สมการลดทอนสำหรับ  $D \leq 30$  กิโลเมตร

$$\log(S_a) = a_1 M_w + b_1 X - \log(X + d_1 10^{0.5 M_w}) + c_1 + G \quad (3.17)$$

สมการลดทอนสำหรับ  $D > 30$  กิโลเมตร

$$\log(S_a) = a_2 M_w + b_2 X - \log(X) + c_2 + G \quad (3.18)$$

โดย

- $D$  = ความลึกศูนย์กลางเกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร)
- $S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $cm/s^2$ )
- $M_w$  = ขนาดโมเมนต์
- $r_{hypo}$  = ระยะทางจุดเกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{R_0^2 + h^2}$  เมื่อ  $R_0$  คือ ระยะทางในแนวราบที่สั้นที่สุดถึงบริเวณภาพฉายบนผิวดินของระนาบแตก ร้าว (กิโลเมตร) และ  $h$  คือ ความลึกศูนย์กลางเกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร)
- $G$  = ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของประเภทชั้นดินที่ตั้งสถานี ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $p \log + V_{s,30} + q$  เมื่อ  $V_{s,30}$  คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงความลึก 30 เมตร

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตารางค.6

### 3.3.10 สมการของ Mcverry และคณะ (2006)

Mcverry และคณะ (2006) สร้างสมการลดทอน เพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน และความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.075 ถึง 3 วินาที ใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวจากประเทศนิวซีแลนด์ โดยสมการลดทอนแบ่งเป็นสำหรับแผ่นดินไหวตื้น (shallow crustal) มีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 5 ถึง 7.2 และมีระยะทางตั้งแต่ 1 ถึง 400 กิโลเมตร และแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก (subduction zone) มีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 5.1 ถึง 6.8 และมีระยะทางตั้งแต่ 30 ถึง 400 กิโลเมตร

สมการลดทอนสำหรับบริเวณแผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลก :

$$\begin{aligned} \ln(SA'_{A/B}) = & C'_1 + C'_{4AS}(M_W - 6) + C'_{3AS}(8.5 - M_W)^2 + C'_5 r \\ & + [C'_8 + C'_{6AS}(M - 6)] \ln \sqrt{r^2 + C'_{10AS}} + C'_{46} r_{VOL} \\ & + C'_{32} CN + C'_{33AS} CR + F_{HW} \end{aligned} \quad (3.19)$$

สมการลดทอนสำหรับบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก :

$$\begin{aligned} \ln(SA'_{A/B}) = & C'_{11} + \{C'_{12Y} + [C'_{15} - C'_{17}]C'_{19Y}\}(M_W - 6) \\ & + C'_{13Y}(10 - M_W)^3 + C'_{17} \ln[r + C'_{18Y} \exp(C'_{19Y} M_W)] + C'_{20} H_C \\ & + C'_{24} SI + C'_{46} r_{VOL}(1 - DS) \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\text{เมื่อ } C'_{15} = C'_{17Y}$$

สำหรับทั้ง 2 สมการ :

$$\ln(SA'_{C,D}) = \ln(SA'_{A/B}) + C'_{29} \delta_C + [C'_{30AS} \ln(PGA'_{A/B} + 0.03) + C'_{43}] \delta_D \quad (3.21)$$

$$\text{เมื่อ } PGA'_{A/B} = SA'_{A/B}(T = 0)$$

$$SA'_{A/B,C,D} = SA'_{A/B,C,C} (PGA'_{A/B,C,D} / PGA'_{A/B,C,C}) \quad (3.22)$$

โดย

$$S_a = \text{ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (g)}$$

$$M_W = \text{ขนาดโมเมนต์}$$

$$r = \text{ระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดเกิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัด (กิโลเมตร)}$$

$$r_{VOL} = \text{ความยาวของระยะทางจากจุดเกิดแผ่นดินไหวถึงสถานีตรวจวัดไปยัง} \\ \text{เส้นทางในเขตภูเขาไฟ (กิโลเมตร)}$$

$$H_C = \text{ความลึกของจุดเซนทรอยด์ (กิโลเมตร)}$$

$$CN = -1 \text{ สำหรับการเลื่อนแบบปกติ (normal mechanism crustal earthquakes)} \\ 0 \text{ สำหรับการเลื่อนแบบอื่น}$$

- $CR$  = 0.5 สำหรับการเลื่อนแบบย้อนและเฉียง (reverse/oblique mechanism crustal earthquakes), 1 สำหรับการเลื่อนแบบย้อน (reverse mechanism crustal earthquakes), 0 สำหรับการเลื่อนแบบอื่น
- $F_{HW}$  = 1 สำหรับบริเวณหินเพดาน (hanging wall) และ 0 สำหรับบริเวณอื่น
- $SI$  = 1 สำหรับแผ่นดินไหวที่ผิวหน้าสัมผัสบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก (subduction interface earthquakes), 0 สำหรับแผ่นดินไหวแบบอื่น
- $DS$  = 1 สำหรับแผ่นดินไหวลึก (deep slab earthquakes), 0 สำหรับแผ่นดินไหวแบบอื่น
- $\delta_C$  = 1 สำหรับประเภทชั้นดิน C
- $\delta_D$  = 1 สำหรับประเภทชั้นดิน D
- ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตาราง ค.9

### 3.3.11 สมการของZhao และคณะ(2006)

Zhao และคณะ (2006) สร้างสมการลดทอนเพื่อประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีคาบการสั่นไหวธรรมชาติตั้งแต่ 0.05 ถึง 5 วินาที โดยใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวของประเทศญี่ปุ่น อิหร่าน และทางตะวันตกของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยสมการลดทอนสร้างสำหรับแผ่นดินไหวตื้น (shallow crustal) และแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก (subduction zone) มีขนาดโมเมนต์ตั้งแต่ 5 ถึง 8.3 และมีระยะทางตั้งแต่ 0 ถึง 300 กิโลเมตร

$$\ln(S_a) = aM_w + bx - \ln(r) + e(h - h_c)\delta_h + F_R + S_I + S_S + S_{SL} \ln(x) + C_k + \zeta + \eta \quad (3.23)$$

$$r = x + c \exp(dM_w) \quad (3.24)$$

โดย

- $S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (เซนติเมตร/วินาที<sup>2</sup>)
- $M_w$  = ขนาดโมเมนต์
- $x$  = ระยะทางจุดเกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร)
- $h$  = ความลึกศูนย์กลางเกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร)

$F_R$  = สำหรับรอยเลื่อนย้อน (reverse faulting) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวตั้งใน  
แผ่นเปลือกโลก, 0 สำหรับเหตุการณ์อื่น

$S_I$  = สำหรับเหตุการณ์ที่ผิวหน้าสัมผัส (interface events), 0 สำหรับเหตุการณ์  
อื่น

$S_S$  = สำหรับเหตุการณ์ที่แผ่นเปลือกโลกมุดตัว (subduction slab events), 0  
สำหรับเหตุการณ์อื่น

$C_1$  = หิน ( $V_{S30} > 360$ )

$C_2$  = ดินแข็ง ( $300 < V_{S30} \leq 600$ )

$C_3$  = ดินปานกลาง ( $200 < V_{S30} \leq 300$ )

$C_4$  = ดินอ่อน ( $V_{S30} = 200$ )

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนได้แสดงในตาราง ค.14



## บทที่ 4

### สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย

การรวบรวมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวของพื้นที่ที่บันทึกได้ในประเทศไทยที่ใช้ในการศึกษานี้ตั้งแต่ ตุลาคม 2549 ถึง พฤศจิกายน 2555 ซึ่งข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวของพื้นที่ทั้งหมดเป็นข้อมูลที่บันทึกได้โดยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวแบบดิจิทัลของระบบใหม่ระยะที่ 1 และระยะที่ 2 ของ สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งพบว่าข้อมูลแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ในประเทศไทยในช่วงระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด 0 ถึง 200 กิโลเมตร มีปริมาณไม่เพียงพอต่อการสร้างสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทยดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลเสริมในช่วงระยะทางที่ไม่มีข้อมูลบันทึก ร่วมกับข้อมูลที่บันทึกได้ในประเทศไทย เพื่อพิจารณารูปแบบของสมการลดทอนของต่างประเทศ ที่มีค่าพารามิเตอร์สอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกได้ในประเทศไทยและข้อมูลจากค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศ เพื่อนำไปประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ความเร็วสูงสุดของพื้นดิน และการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน

#### 4.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบสมการลดทอนที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลแผ่นดินไหวประเทศไทย

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศที่สอดคล้องกับข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ในประเทศไทยและข้อมูลจากค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศ เพื่อให้ค่าคงเหลือ (residual) มีค่าต่ำสุด (minimum) ผลบวกกำลังสองของค่าคงเหลือ (residual sum of square) แสดงดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์นี้เรียกว่า วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

$$RSS = \sum_{i=1}^n e_i^2 = e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2 \quad (4.1)$$

$$e = Y - \hat{Y} \quad (4.2)$$

โดยที่

$RSS$  = ผลรวมกำลังสองของส่วนเหลือ

$e$  = ความแตกต่างระหว่างค่าของข้อมูลที่ตรวจวัดได้โดยสถานีตรวจวัดคลื่นแผ่นดินไหว  $y$  และค่าที่คำนวณจากสมการ  $\hat{y}$  เรียกว่าส่วนเหลือ

(Residual)

การพิจารณาหาความเหมาะสมของรูปแบบสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศที่มีค่าพารามิเตอร์สอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกได้ในประเทศไทย ได้ใช้วิธีการพิจารณาความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ประมาณโดยการคำนวณหาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลต่างกำลังสอง (square root of mean of square of error, RMS) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.3

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (\ln y - \ln \hat{y})^2}{n}} \quad (4.3)$$

โดย

$y$  = จุดข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริง

$\hat{y}$  = ข้อมูลที่ประมาณค่าจากสมการลดทอน

$n$  = จำนวนของจุดข้อมูล

#### 4.2 รูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

การศึกษานี้เลือกพิจารณาสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศทั้งหมด 14 สมการ แบ่งเป็น 8 สมการ สำหรับแผ่นดินไหวบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง และ 6 สมการ สำหรับแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก

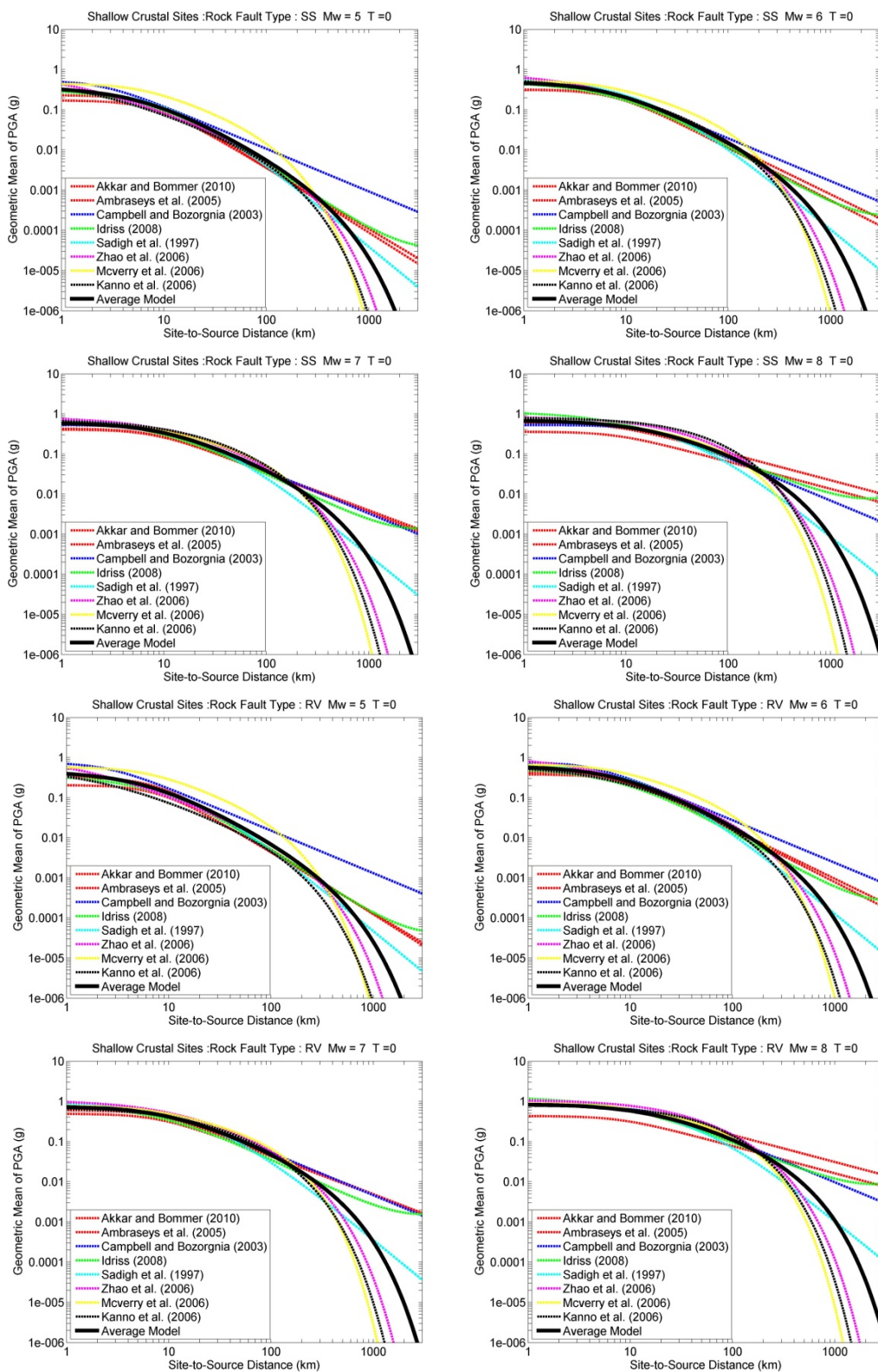
โดยที่สมการที่เลือกใช้ในการศึกษานี้โดยส่วนหนึ่งเป็นสมการที่ Douglas (2012) นำมาเลือกพิจารณาสำหรับคัดเลือกในโครงการ Global Earthquake Model (GEM) – PEER Global Ground – motion prediction equations (GMPEs) เช่นสมการของ Akkar และ Bommer (2010) สำหรับแผ่นดินไหวตื้นบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง Atkinson และ Boore (2003), Lin และ Lee (2008), Youngs และคณะ (1997) สำหรับแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก และ Kanno และคณะ (2006), McVerry และคณะ (2006), Zhao และคณะ (2006) เป็น

สมการสำหรับทั้งแผ่นดินไหวที่บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง และบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก

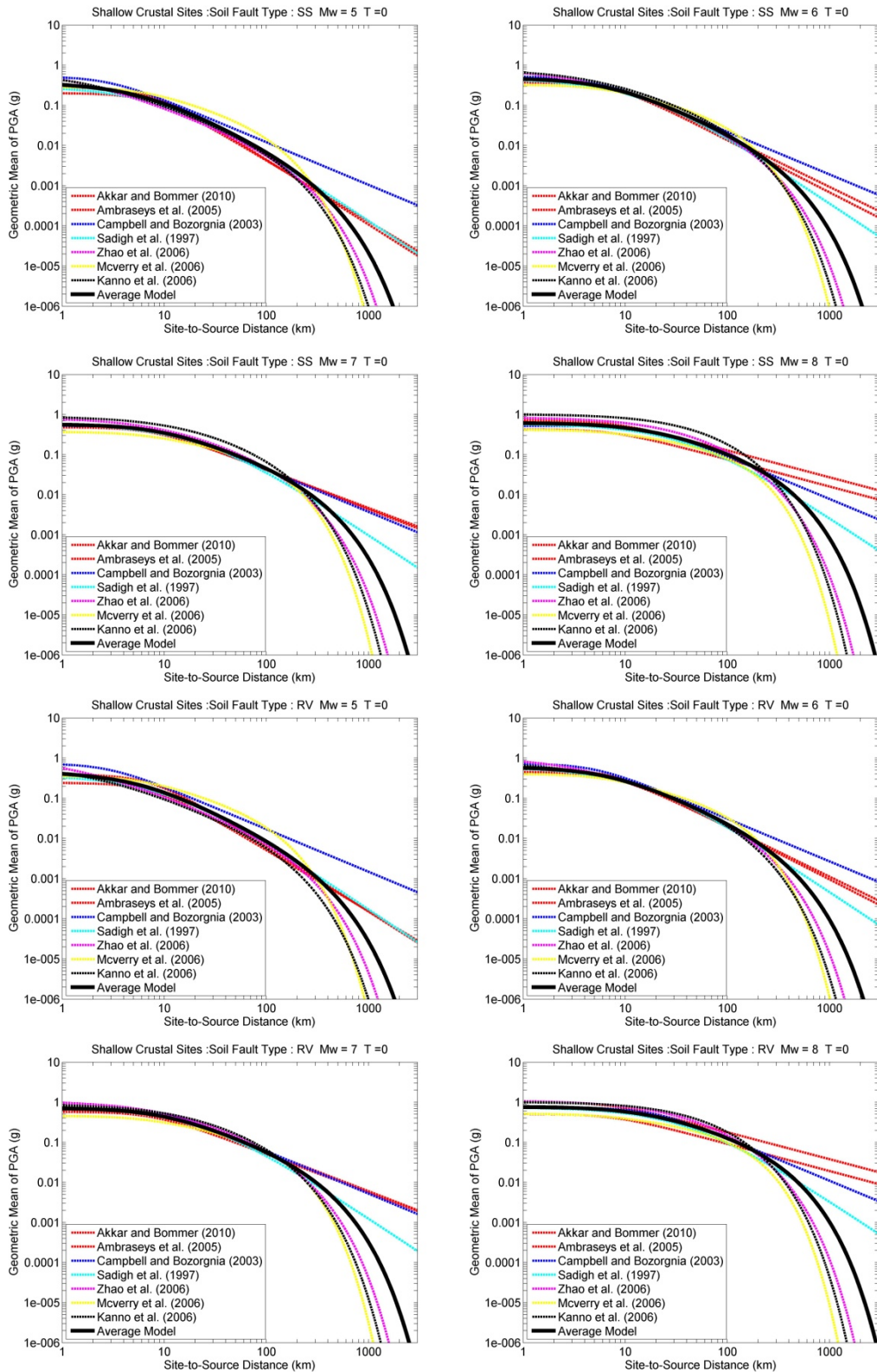
สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศที่ใช้ในการศึกษานี้ สำหรับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ช่วงระยะทางตั้งแต่ 1 ถึง 100 มีค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ใกล้เคียงกันทุกสมการที่เลือกใช้ในการศึกษา ส่วนระยะทางที่มากกว่า 300 กิโลเมตร เริ่มมีความแตกต่างกันมากขึ้นอย่างชัดเจน

สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศที่ใช้ในการศึกษานี้ สำหรับบริเวณเขตมุดตัวของโลกรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ช่วงระยะทางตั้งแต่ 50 ถึง 200 มีค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ใกล้เคียงกัน ส่วนระยะทางที่มากกว่า 500 เริ่มมีความแตกต่างกันมากขึ้นอย่างชัดเจน

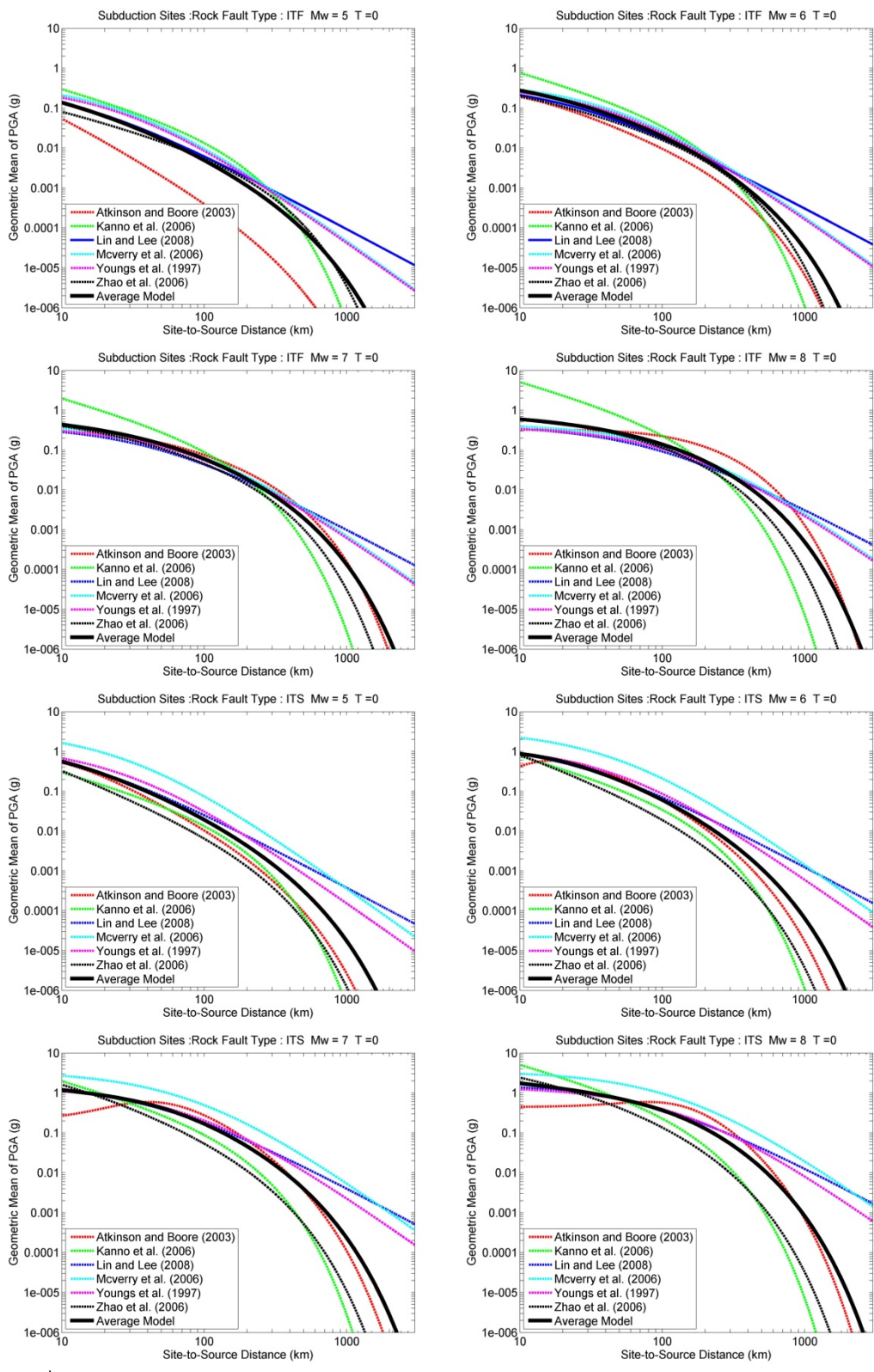
การศึกษานี้เลือกใช้ค่าเฉลี่ยของความเร่งสูงสุดของพื้นดินและความเร่งสเปกตรัมจากสมการลดทอนของต่างประเทศที่ใช้ในการศึกษา ตั้งแต่ ระยะทางที่ 1 ถึง 100 กิโลเมตร เป็นข้อมูลเสริมสำหรับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง ส่วนระยะทางที่ 50 ถึง 200 สำหรับบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นดินเปลือกโลก สำหรับที่ระยะทางไกล ๆ ใช้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้จริงในประเทศไทยเพื่อพิจารณารูปแบบของสมการลดทอนของต่างประเทศที่มีค่าพารามิเตอร์สอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกได้ในประเทศไทยและข้อมูลจากค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศ



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังที่ตั้งอยู่บนหิน

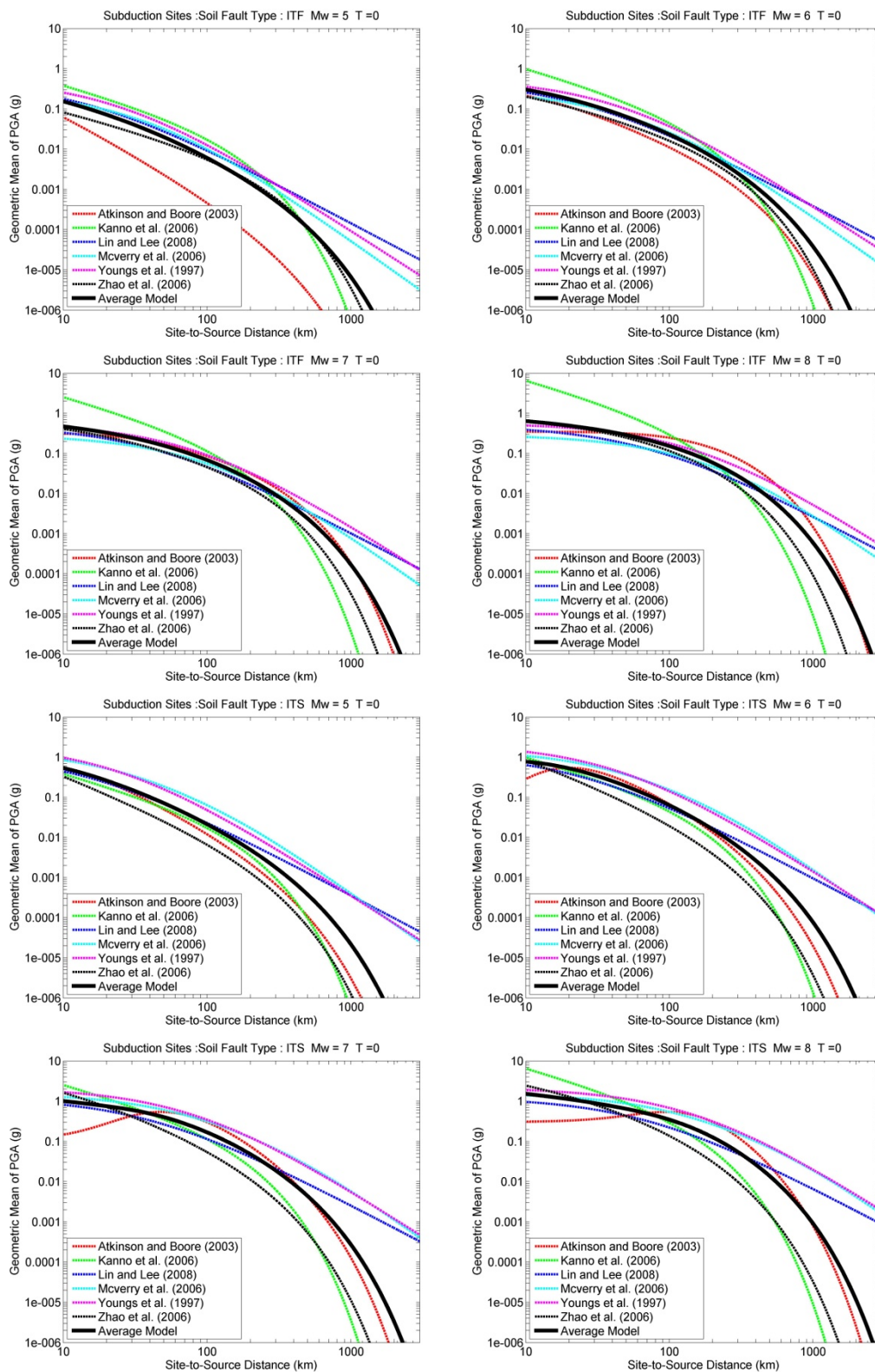


รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังที่ตั้งอยู่บนดิน



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกที่ตั้งอยู่บนหิน





รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกที่ตั้งอยู่บนดิน

### 2.4.1 สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง

จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบสมการลดทอนของต่างประเทศที่ใช้ในการศึกษาเพื่อหารูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทยพบว่า รูปแบบสมการลดทอนของต่างประเทศ สำหรับแผ่นดินไหวตื้น บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังที่มีค่า RMS น้อยที่สุด และกราฟมีความสอดคล้องกับข้อมูลค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศในระยะทางใกล้ และสอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกได้ในประเทศไทยในระยะทางไกล สำหรับสถานีที่ตั้งบนหินและบนดิน ได้แก่ รูปแบบสมการลดทอนของ Sadigh และคณะ 1997 สมการที่ 4.1 สำหรับสถานีที่ตั้งบนหิน และสมการที่ 4.2 สำหรับสถานีที่ตั้งบนดิน โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงสำหรับสถานีที่ตั้งบนหินได้แก่ ตาราง 4.1 และ 4.2 สำหรับรอยเลื่อนตามแนวระดับ (strike slip fault) และรอยเลื่อนย้อน (reverse fault) ตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสถานีที่ตั้งบนดินได้แก่ ตาราง 4.3 สำหรับรอยเลื่อนตามแนวระดับ (strike slip fault) และตาราง 4.4 สำหรับรอยเลื่อนย้อน (reverse fault)

$$\ln(S_a) = c_1 + c_2 M_w + c_3 (8.5 - M_w)^{2.5} + c_4 \ln(r_{rup} + e^{(c_5 + c_6 M_w)}) + c_7 \ln(r_{rup} + 2) \quad (4.4)$$

$$\ln(S_a) = c_1 + c_2 M_w - c_3 \ln(r_{rup} + c_4 e^{c_5 M_w}) + c_6 + c_7 (8.5 - M_w)^{2.5} \quad (4.5)$$

โดยที่

$S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $g$ )

$M_w$  = ขนาดโมเมนต์

$r_{rup}$  = ระยะทางที่ใกล้ที่สุดถึงระนาบแตกร้าว (กิโลเมตร)



ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งหิน รอยเลื่อนแนวระดับ (strike slip fault)

T(s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
0	-1.851	1.655	-0.011	-2.670	-0.256	0.582	0.003
0.1	-1.031	1.606	-0.001	-2.741	-0.148	0.554	0.025
0.2	1.113	1.632	-0.019	-3.027	0.456	0.511	0.010
0.5	1.127	1.563	-0.039	-2.646	0.899	0.498	-0.256
1	0.741	1.257	-0.065	-2.550	1.125	0.391	-0.004
1.5	-0.913	1.219	-0.070	-2.260	1.104	0.362	-0.032
2	-1.486	1.242	-0.075	-1.936	1.212	0.407	-0.299
3	-4.922	1.356	-0.069	-1.904	0.093	0.456	0.005
4	-6.375	1.472	-0.069	-1.825	-0.073	0.481	0.003

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งหิน รอยเลื่อนย้อน (reverse fault)

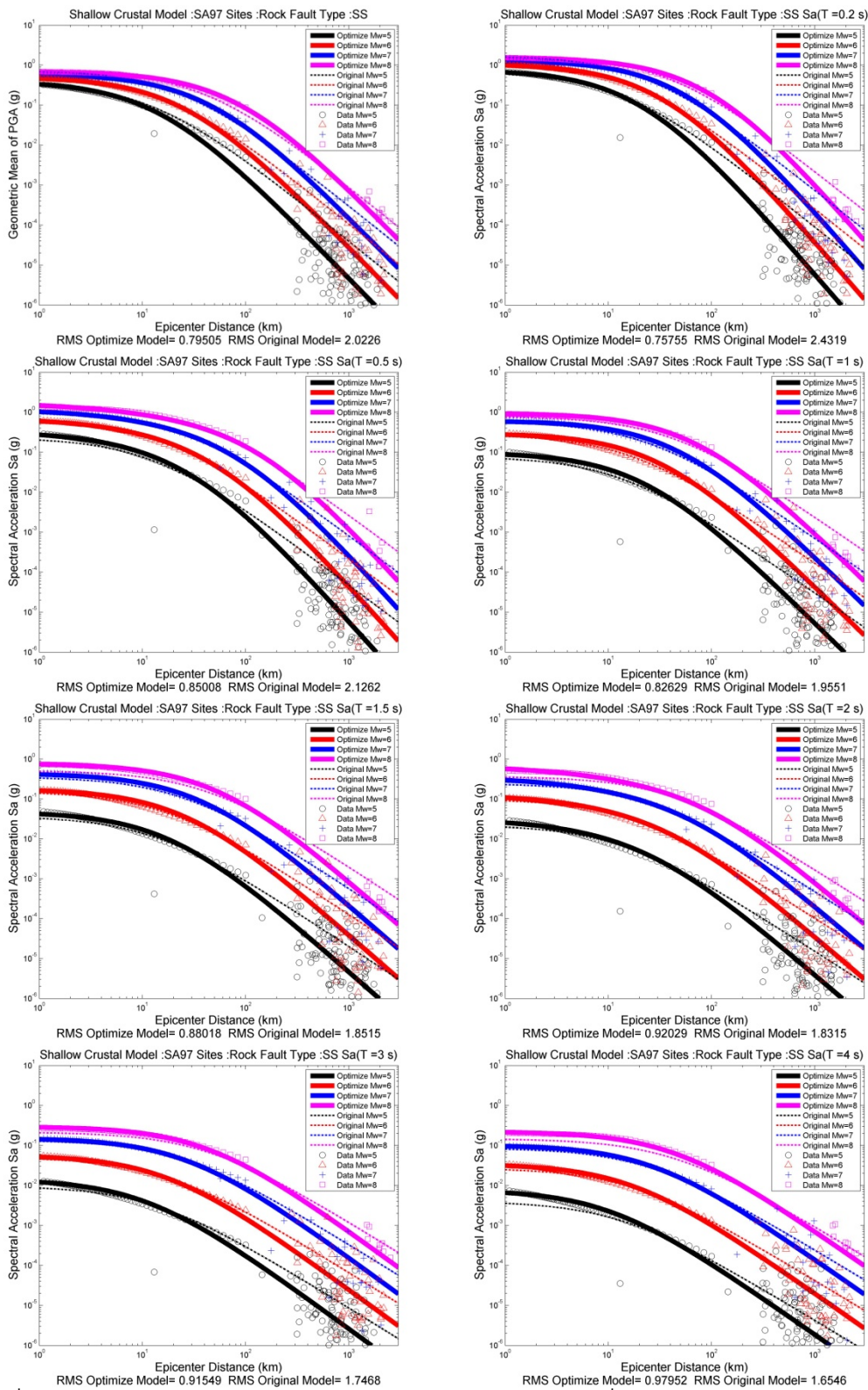
T(s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
0	-1.818	1.673	-0.010	-2.716	-0.201	0.571	0.001
0.1	-0.699	1.596	-0.005	-2.746	-0.115	0.556	-0.028
0.2	1.016	1.697	-0.013	-2.999	0.520	0.518	-0.096
0.5	0.666	1.520	-0.040	-2.821	0.712	0.463	-0.009
1	0.479	1.281	-0.062	-2.595	1.147	0.378	0.026
1.5	-1.298	1.253	-0.064	-2.314	1.186	0.340	0.012
2	-2.231	1.222	-0.072	-2.139	0.939	0.363	-0.005
3	-4.960	1.353	-0.070	-1.916	0.080	0.461	0.000
4	-6.151	1.444	-0.075	-1.844	-0.261	0.507	-0.003

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งดิน รอยเลื่อนในแนวระดับ (strike slip fault)

T(s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
0	-3.111	1.629	2.439	0.466	0.626	-0.007	-0.002
0.1	1.694	1.652	2.468	0.591	0.582	-4.613	0.023
0.2	-2.883	1.655	2.696	0.970	0.539	1.641	0.005
0.5	1.085	1.526	2.646	1.186	0.498	-1.704	-0.029
1	-0.957	1.303	2.356	1.255	0.453	-0.019	-0.059
1.5	-1.351	1.199	2.132	1.291	0.416	-0.376	-0.075
2	-3.017	1.191	1.947	0.911	0.436	0.001	-0.077
3	-4.873	1.216	1.761	0.552	0.483	0.246	-0.085
4	-5.276	1.324	1.700	0.347	0.557	-0.596	-0.087

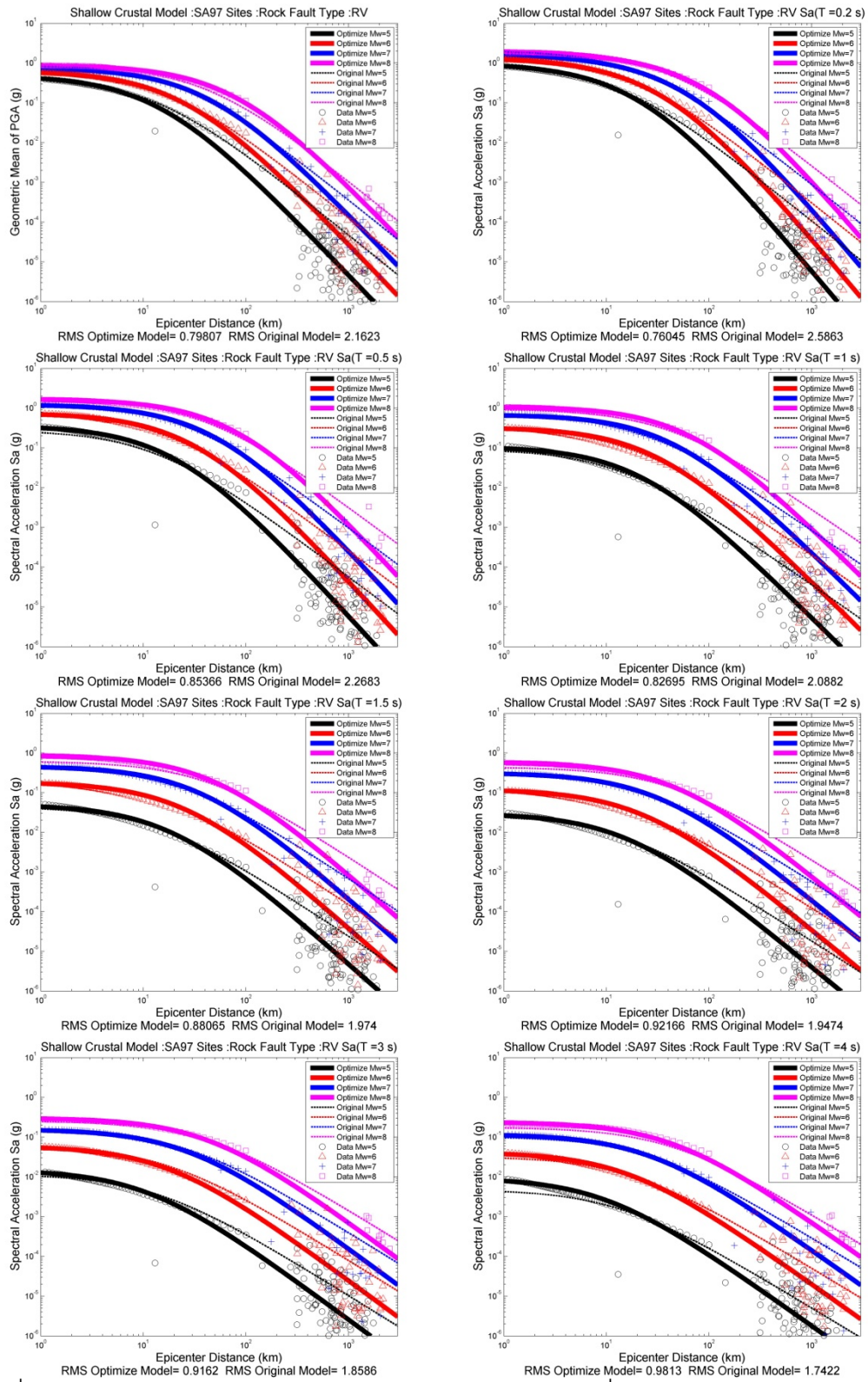
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งดิน รอยเลื่อนย้อน (reverse fault)

T(s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
0	-2.765	1.642	2.501	0.526	0.606	-0.008	-0.001
0.1	-0.903	1.664	2.522	0.640	0.567	-1.712	0.024
0.2	-0.954	1.659	2.749	0.999	0.531	0.060	0.005
0.5	2.251	1.527	2.709	1.287	0.486	-2.421	-0.030
1	0.139	1.321	2.403	1.403	0.439	-0.906	-0.058
1.5	-2.459	1.218	2.159	1.469	0.399	0.776	-0.073
2	-2.976	1.199	1.965	0.953	0.429	0.023	-0.076
3	-4.109	1.203	1.772	0.534	0.491	-0.338	-0.087
4	-4.055	1.271	1.706	0.264	0.590	-1.352	-0.096



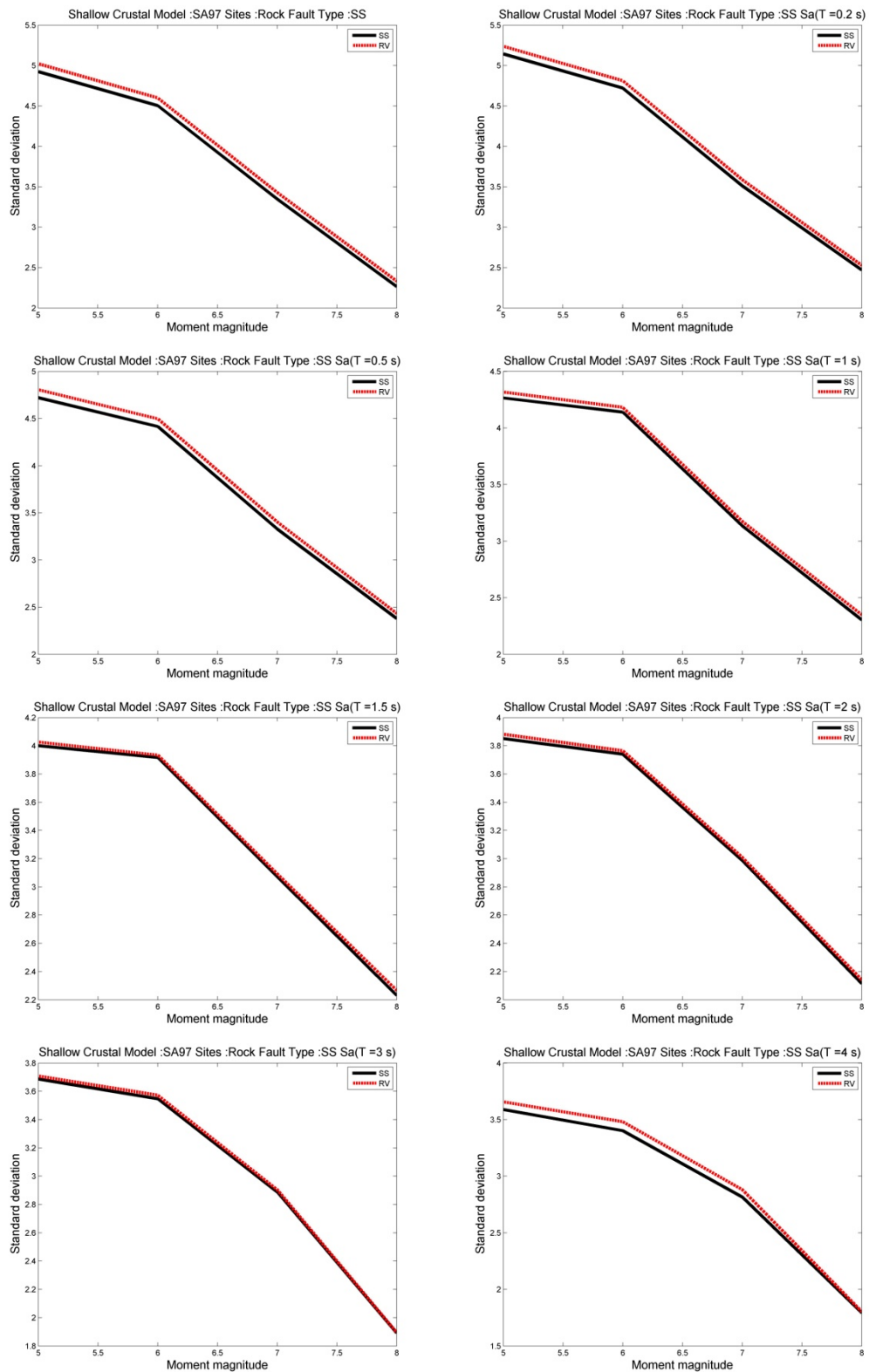
รูปที่ 4.5 กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองของเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

สถานที่ที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง สำหรับรอยเลื่อนแนวระดับ

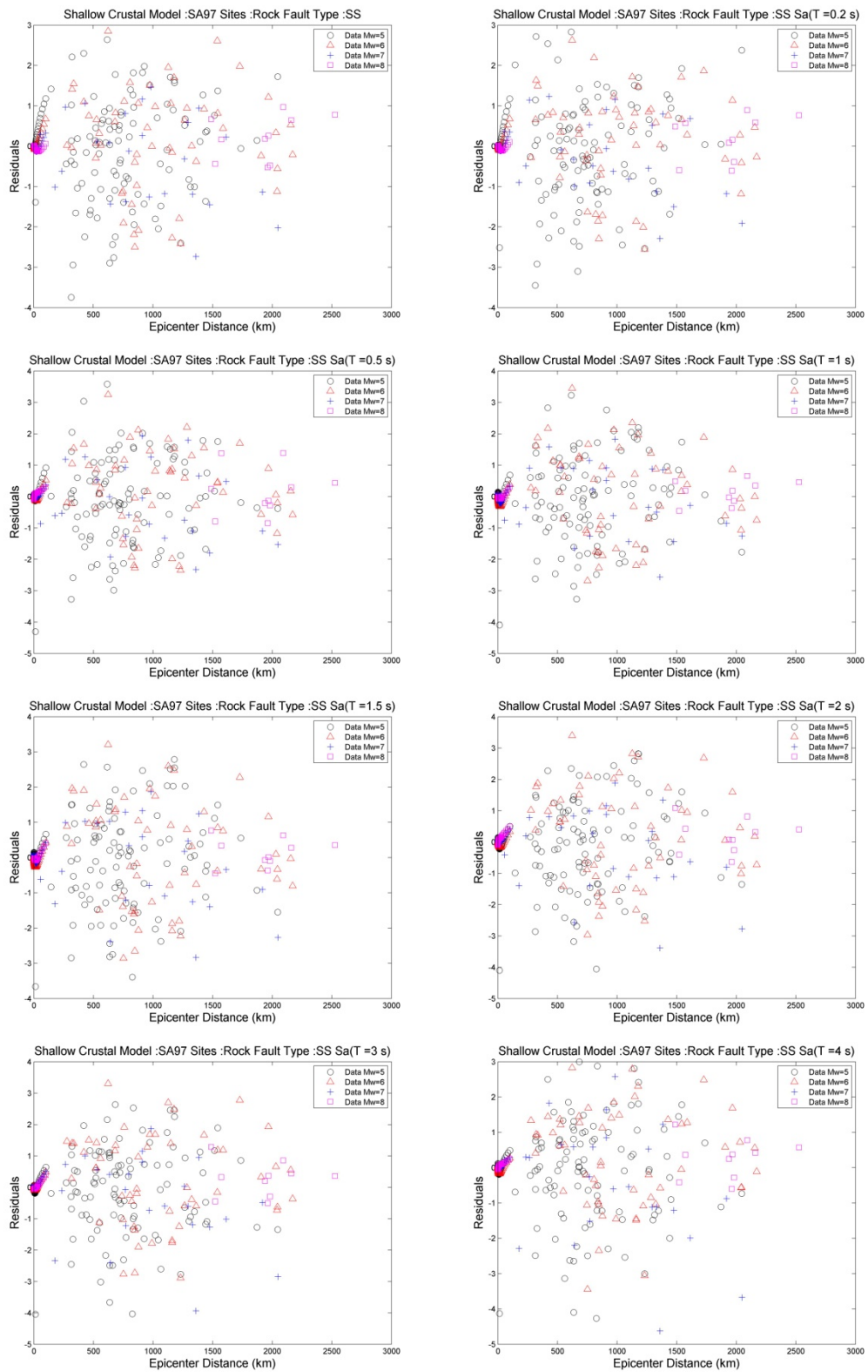


รูปที่ 4.6กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

สถานที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง สำหรับรอยเลื่อนย้อน

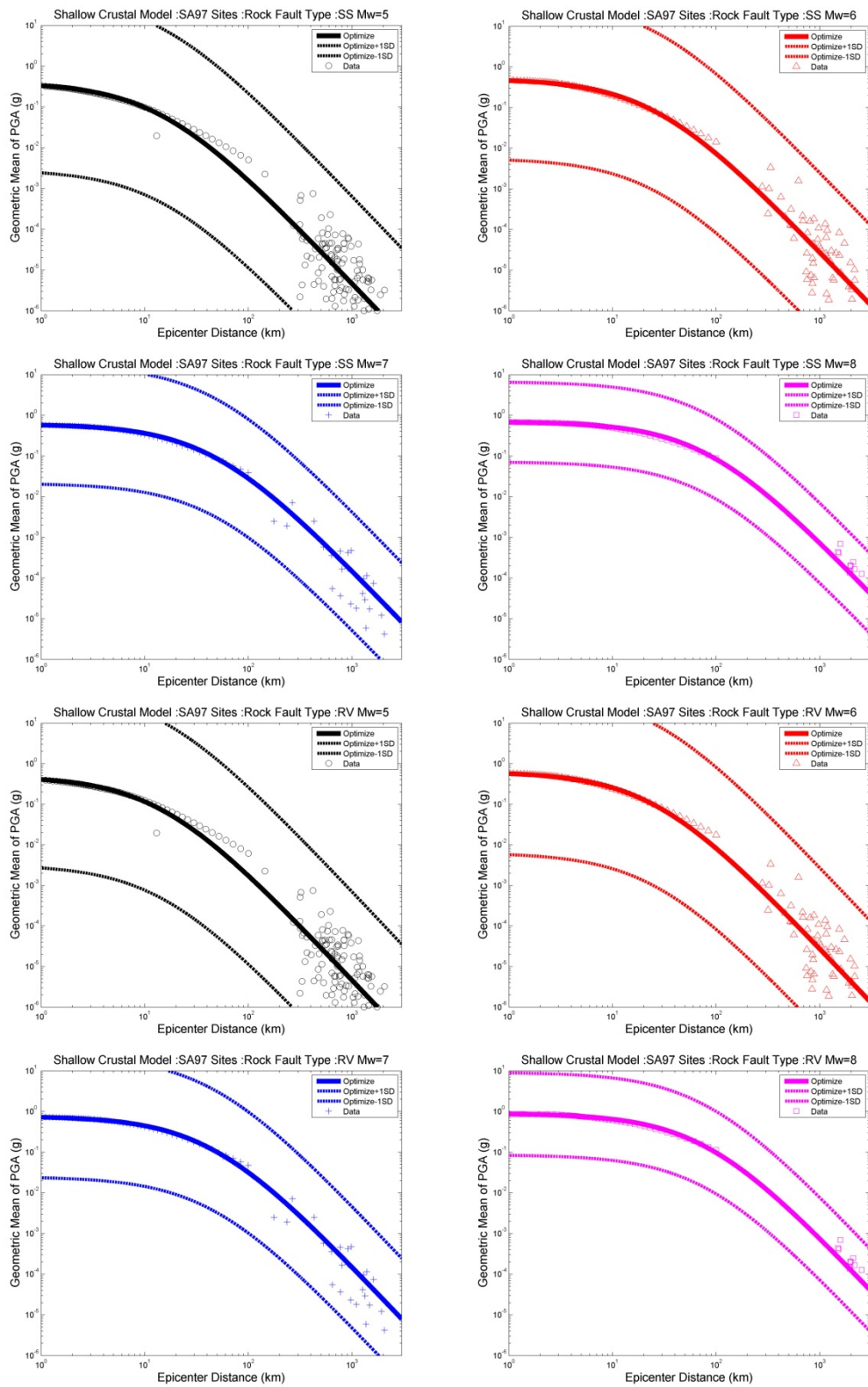


รูปที่ 4.7 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานีที่ตั้งหิน  
บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง

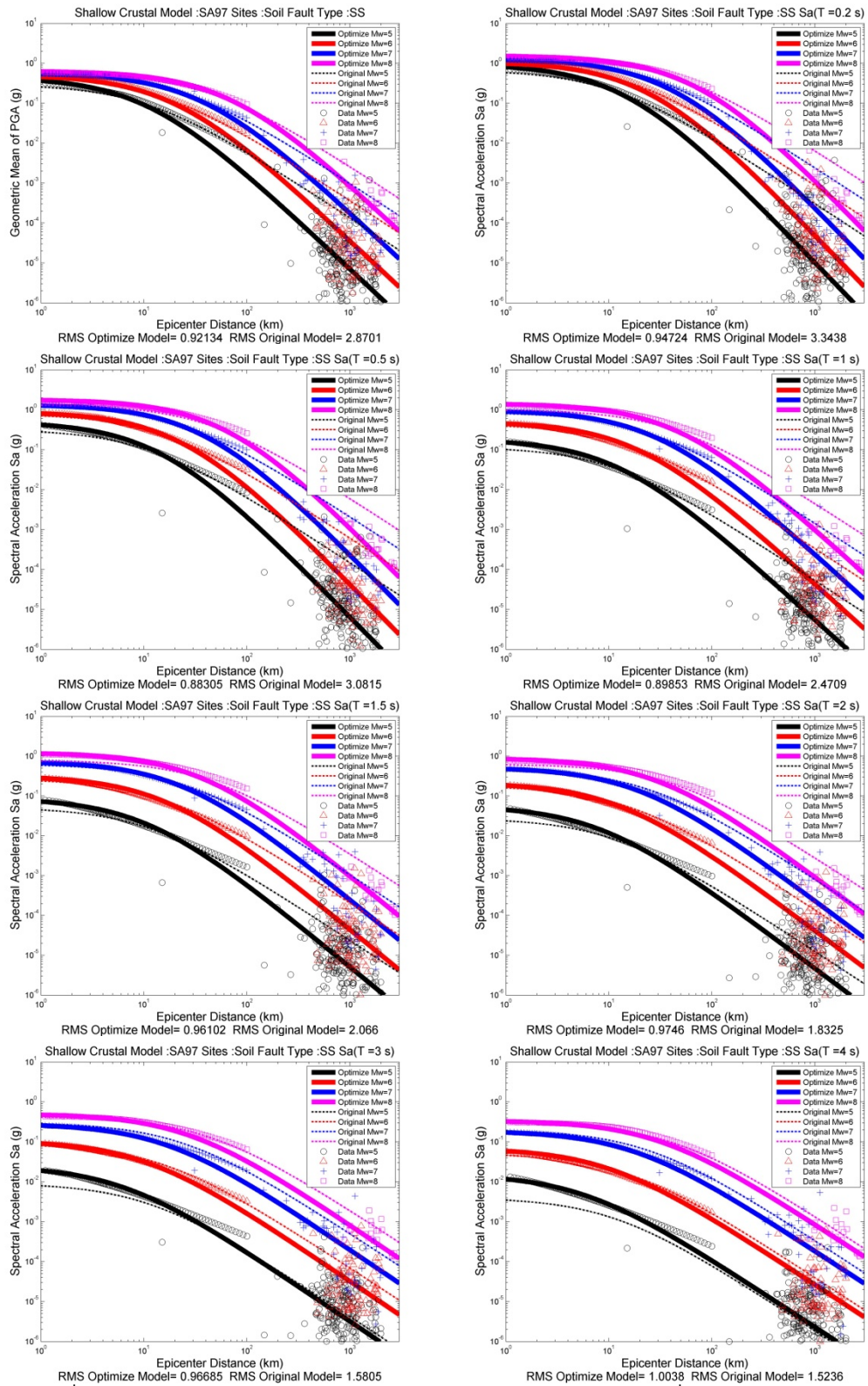


รูปที่ 4.8 กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งหิน  
บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง



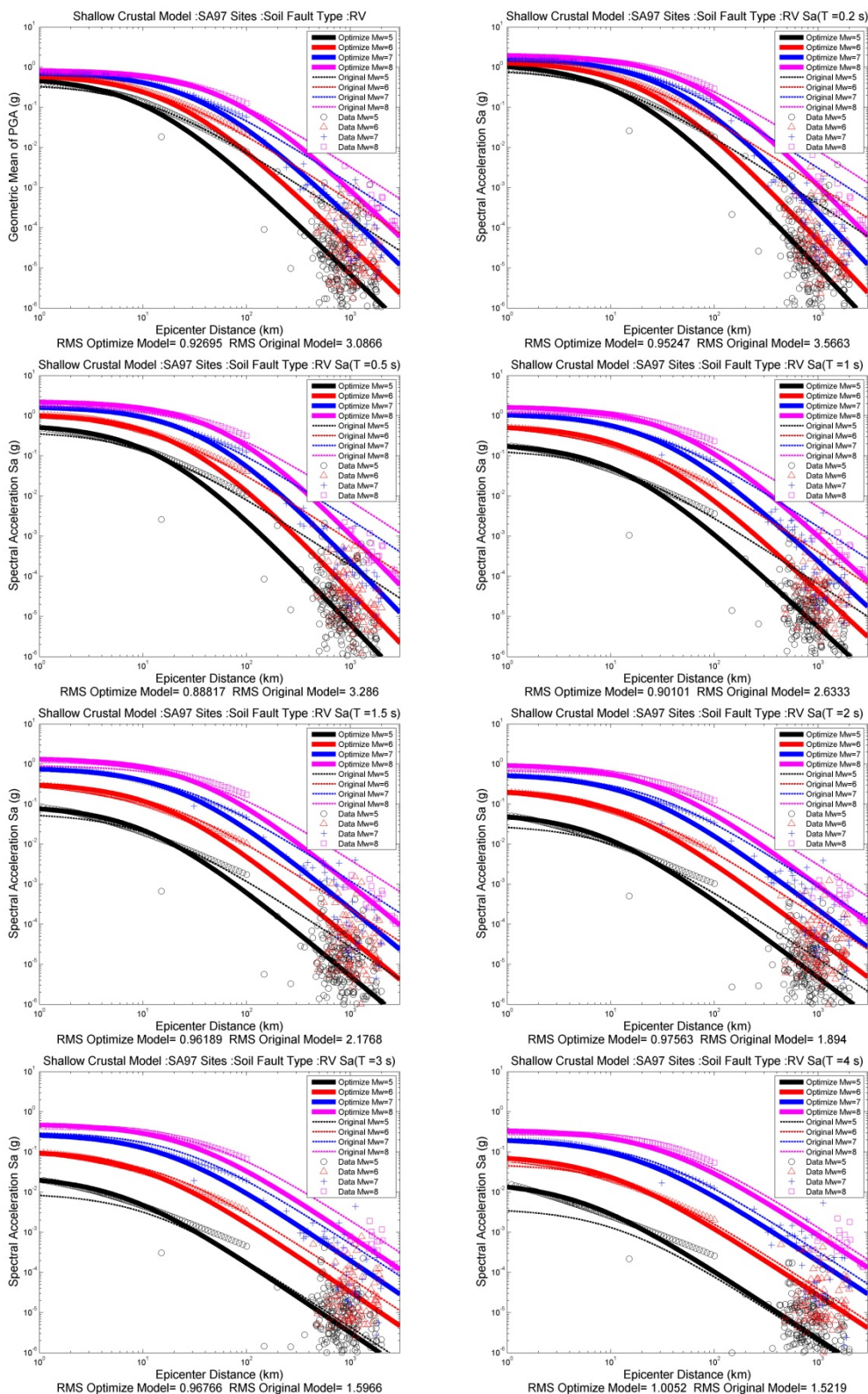


รูปที่ 4.9กราฟความเร่งสูงสุดของพื้นดิน  $\pm 1$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สถานที่ที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง

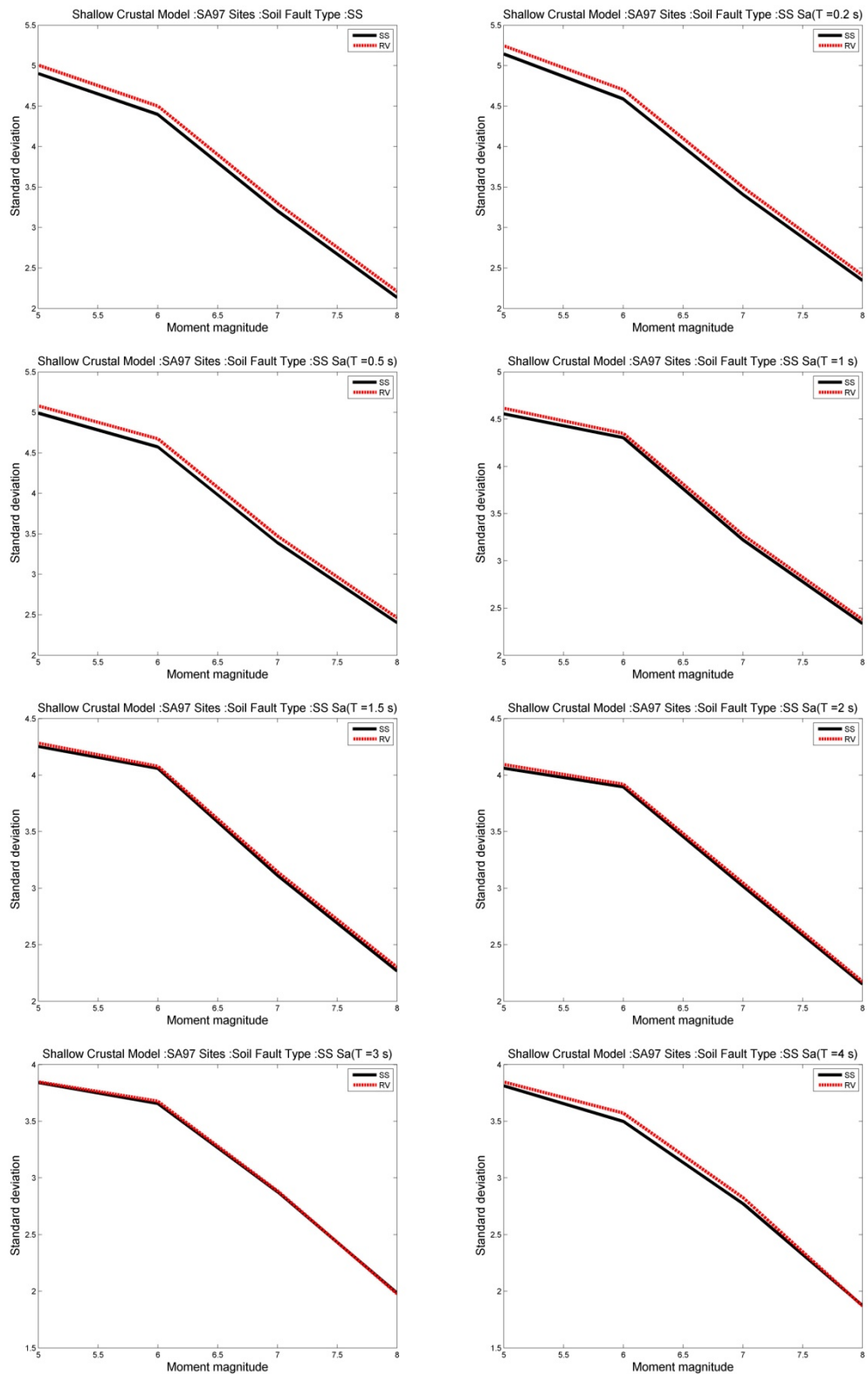


รูปที่ 4.10 กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง สำหรับรอยเลื่อนแนวระดับ

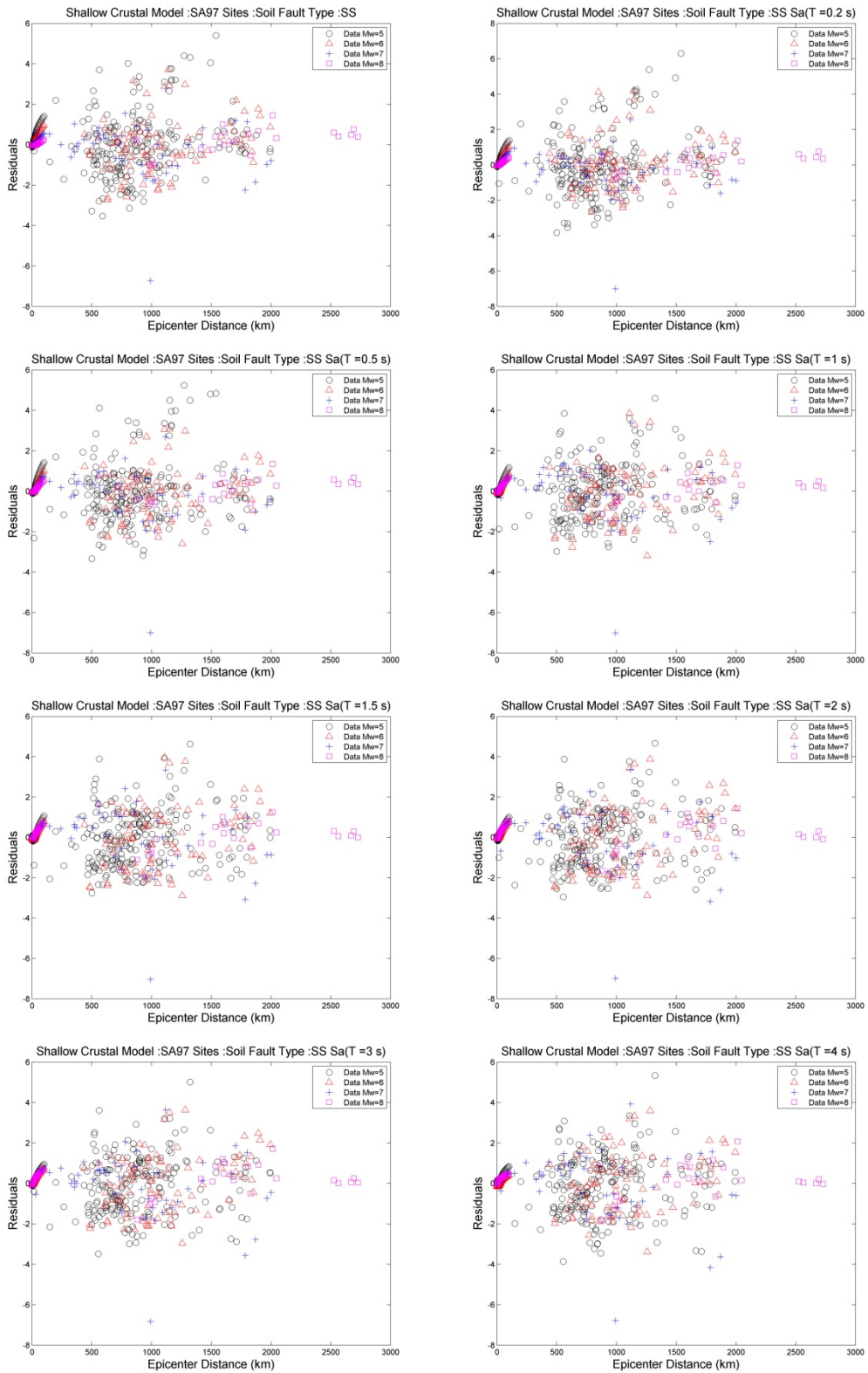




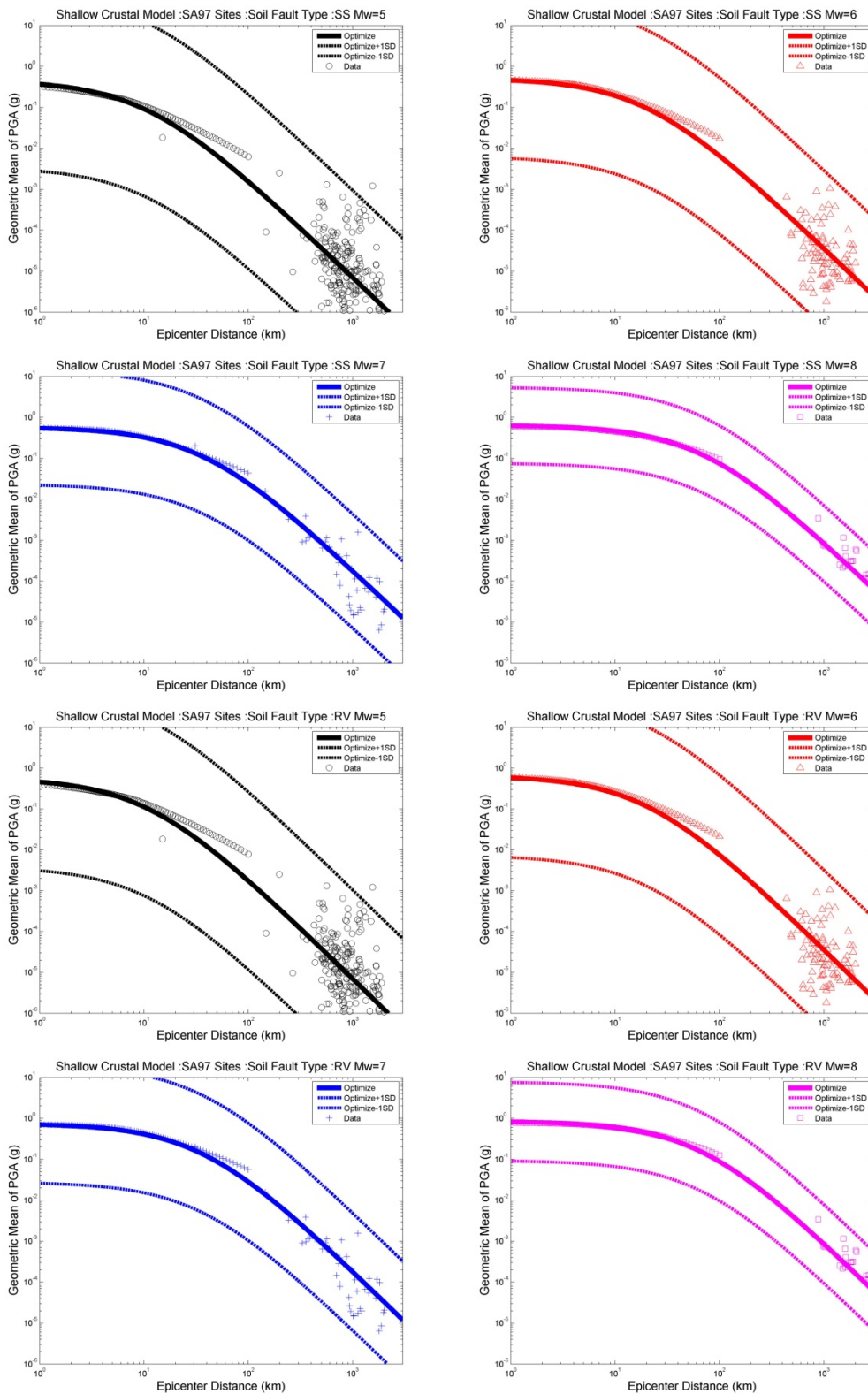
รูปที่ 4.11 กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานีที่ตั้งดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง สำหรับรอยเลื่อนย้อน



รูปที่ 4.12 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานที่ที่ตั้งดิน  
บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง



รูปที่ 4.13



รูปที่ 4.14 กราฟความเร่งสูงสุดของพื้นดิน  $\pm 1$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สถานีที่ตั้งดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง

## 2.4.2 สมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของรูปสมการลดทอนของต่างประเทศที่ใช้ในการศึกษา เพื่อหารูปแบบสมการที่มีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทยพบว่า รูปแบบสมการลดทอนของต่างประเทศบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกที่มีค่า RMS น้อยที่สุด และกราฟมีความสอดคล้องกับข้อมูลค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศในระยะทางไกล และสอดคล้องกับข้อมูลที่บ้านทีกได้ในประเทศไทยในระยะทางไกล สำหรับสถานีที่ตั้งบนหินและบนดินได้แก่ รูปแบบสมการของYoungs และคณะ (1997) สมการที่ 4.6 สำหรับสถานีที่ตั้งบนหินและ 4.7 สำหรับสถานีที่ตั้งบนดิน โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสถานีที่ตั้งบนหินได้แก่ ตาราง 4.5 และสำหรับสถานีที่ตั้งบนดิน ตาราง 4.6

$$\ln(S_a) = 0.2418 + 1.414M_w + C_1 + C_2(10 - M_w)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M_w}) + 0.00607H + 0.3846Z_T \quad (4.6)$$

$$\ln(S_a) = -0.6687 + 1.438M_w + C_1 + C_2(10 - M_w)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.097e^{0.617M_w}) + 0.00648H + 0.3643Z_T \quad (4.7)$$

โดย

- $S_a$  = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ( $g$ )
- $M_w$  = ขนาดโมเมนต์
- $r_{rup}$  = ระยะทางที่ไกลที่สุดถึงระนาบแตกร้าว (กิโลเมตร)
- $H$  = ความลึกศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (กิโลเมตร)
- $Z_T$  = 0 สำหรับเหตุการณ์ที่ผิวหน้าสัมผัส (interface events)
- $Z_T$  = 1 สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น (intraslab events)

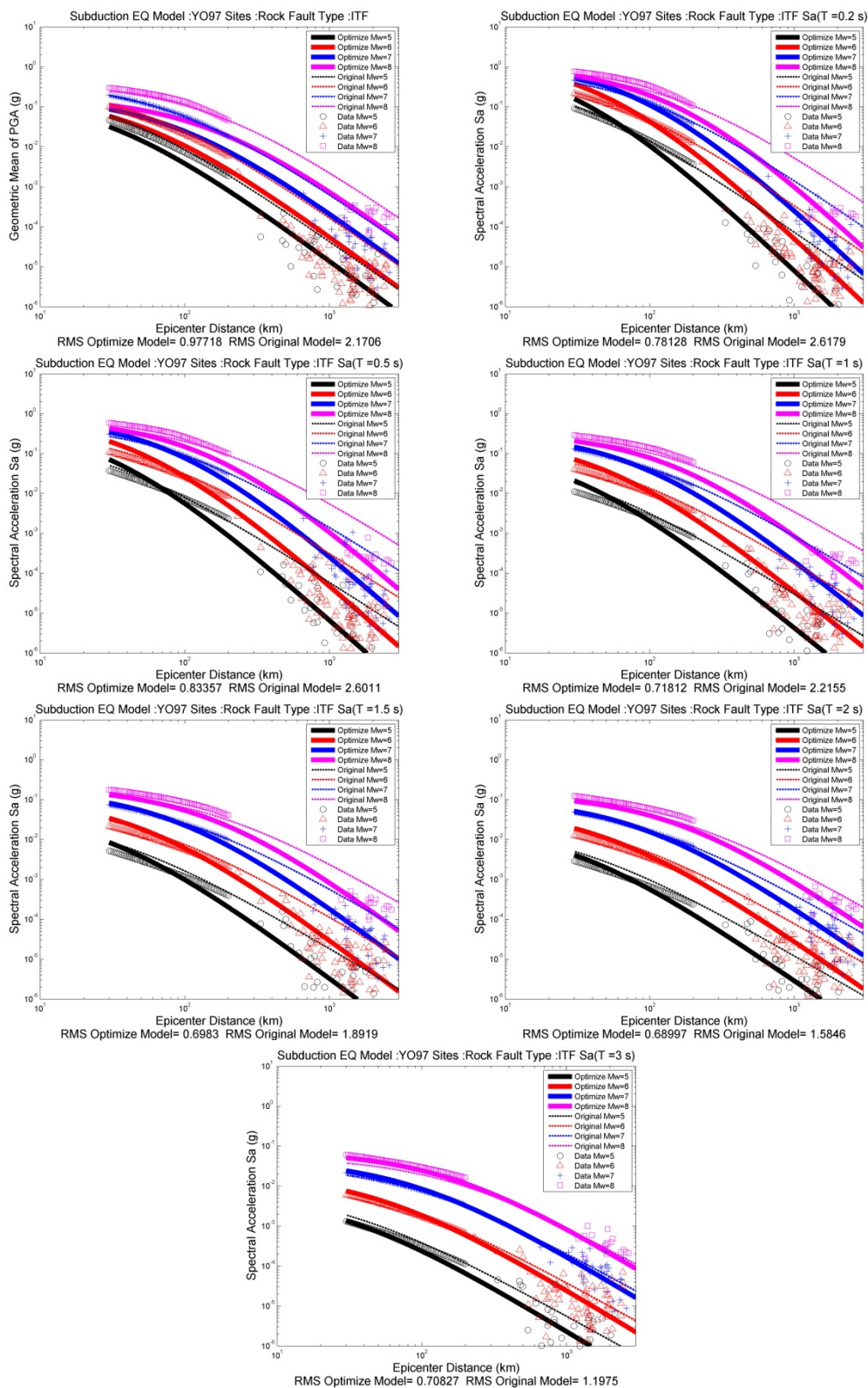
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบสมการของ Youngs และคณะ (1997) ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งหิน

T(s)	Interface			Intraslab		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0	0.000	0.000	-2.708	6.554	-0.008	-3.887
0.1	4.546	-0.005	-3.321	7.320	-0.005	-3.956
0.2	5.640	-0.008	-3.457	7.193	-0.008	-3.908
0.5	4.227	-0.010	-3.245	5.278	-0.012	-3.593
1	2.067	-0.012	-2.967	3.677	-0.015	-3.401
1.5	0.483	-0.014	-2.745	2.342	-0.017	-3.225
2	-0.942	-0.015	-2.539	1.420	-0.018	-3.118
3	-3.141	-0.016	-2.228	-0.451	-0.020	-2.887

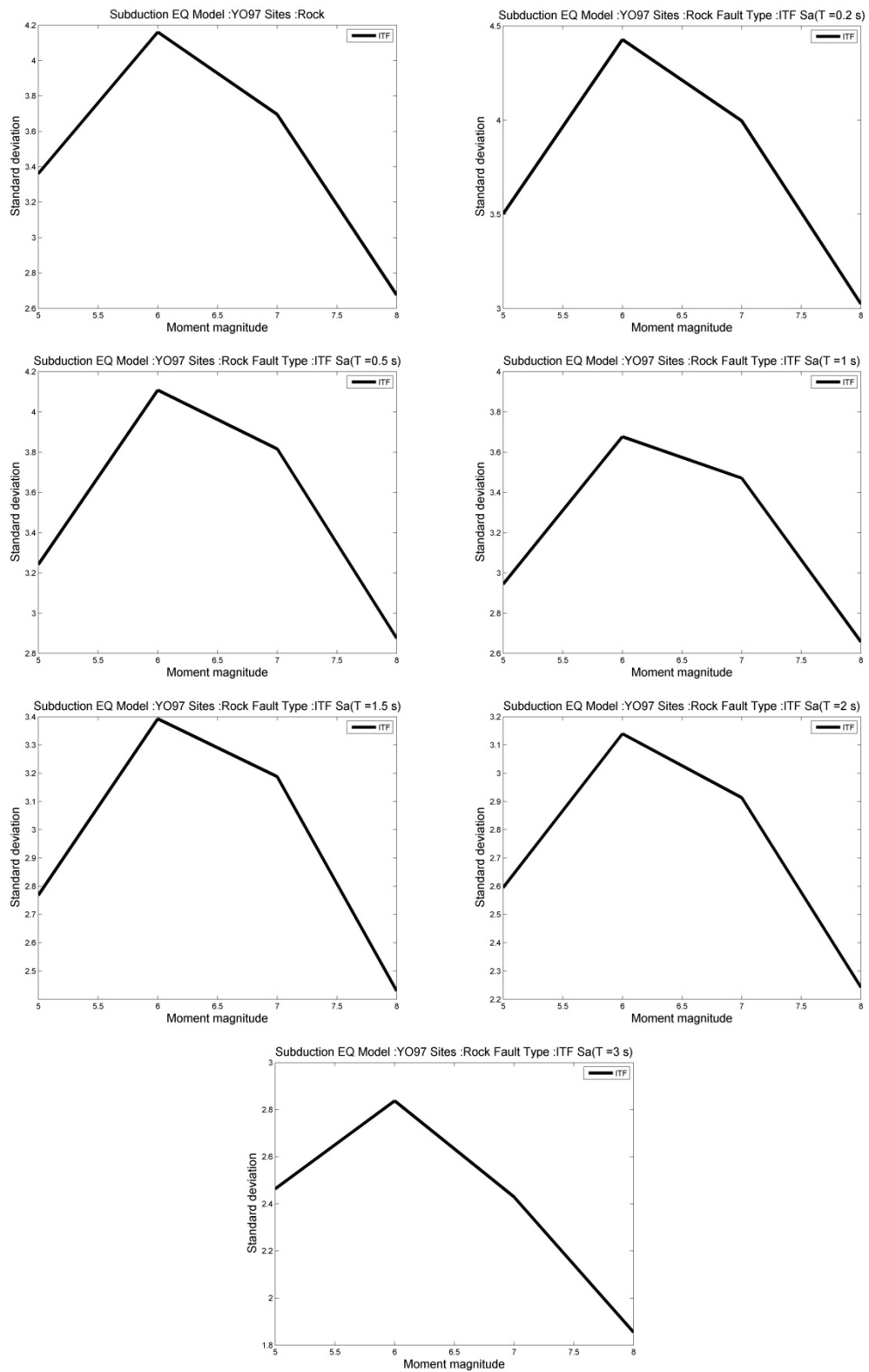
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบสมการของ Youngs และคณะ (1997) ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลประเทศไทย สำหรับสถานีที่ตั้งดิน

T(s)	Interface			Intraslab		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0	4.277	-0.005	-3.235	6.241	-0.005	-3.726
0.1	4.825	-0.002	-3.278	6.832	-0.002	-3.772
0.2	6.526	-0.006	-3.504	7.110	-0.004	-3.780
0.5	6.330	-0.010	-3.472	6.422	-0.010	-3.673
1	4.162	-0.013	-3.164	4.435	-0.014	-3.395
1.5	2.264	-0.016	-2.887	2.792	-0.017	-3.152
2	0.575	-0.017	-2.641	1.440	-0.018	-2.974
3	-1.683	-0.019	-2.320	-0.598	-0.018	-2.731
4	-3.107	-0.020	-2.125	-1.692	-0.019	-2.603



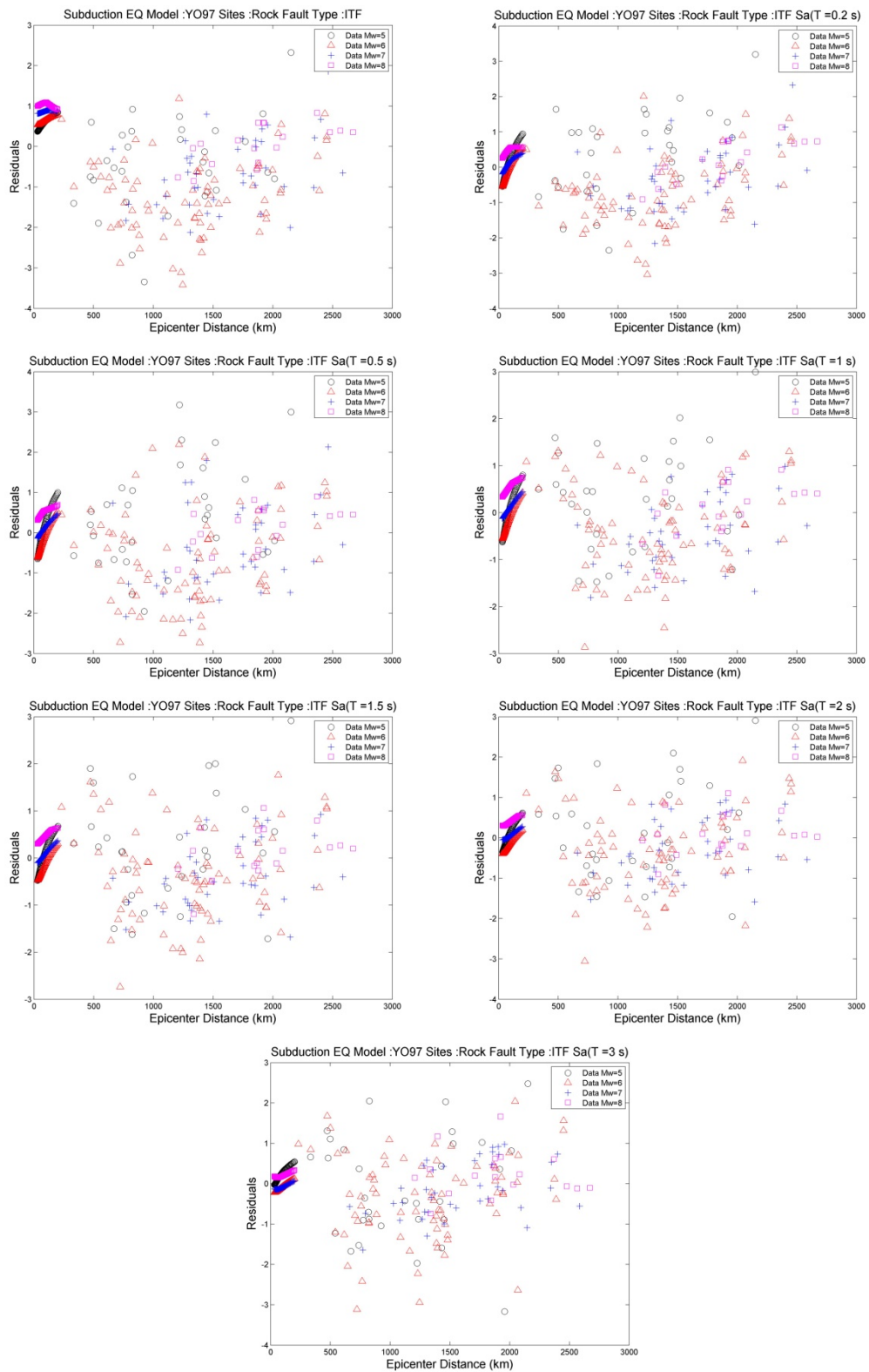


รูปที่ 4.15 กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานที่ที่ตั้งหิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์นิวซีแลนด์

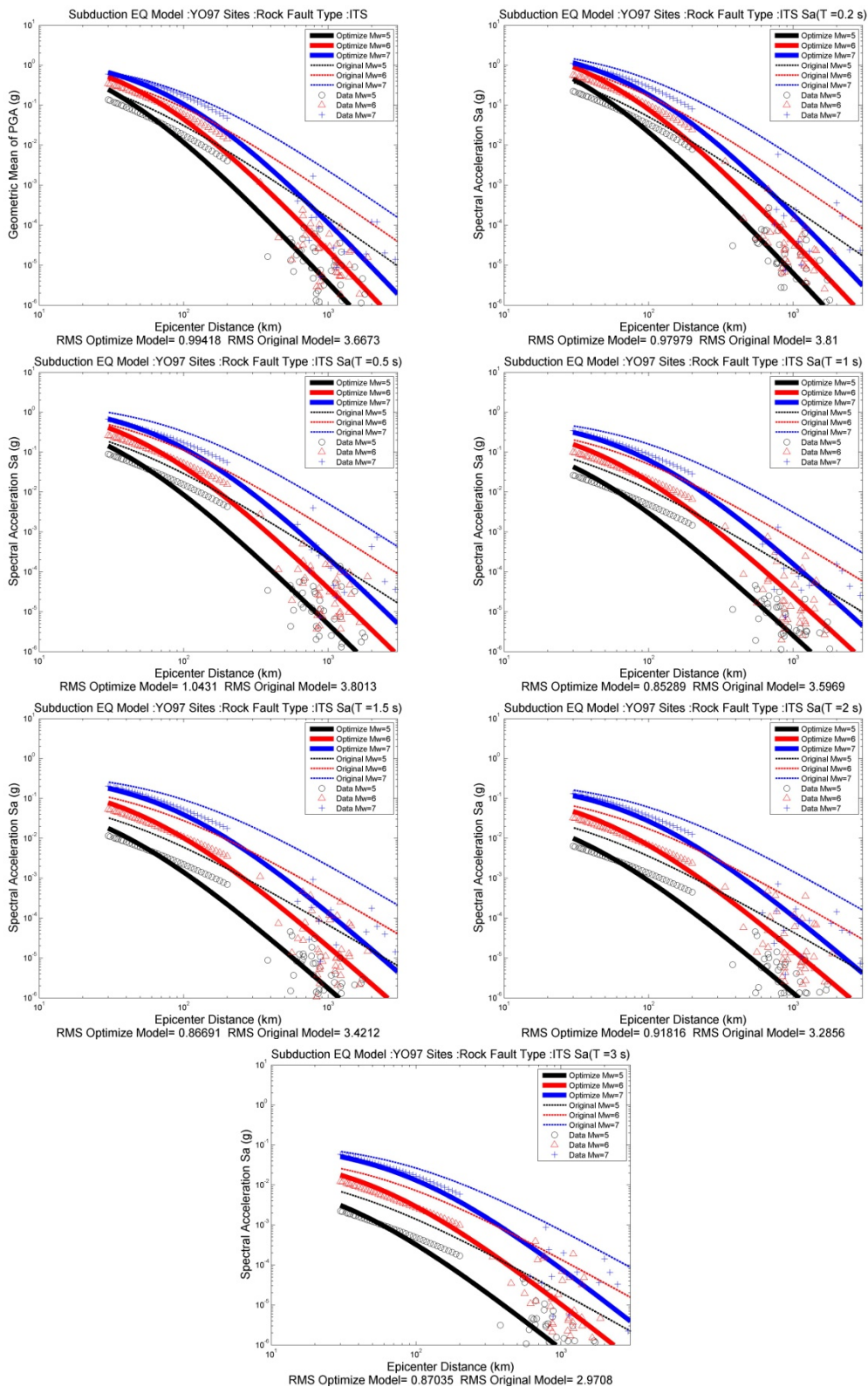


รูปที่ 4.16 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานที่ที่ตั้งหิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ผิวสัมผัส

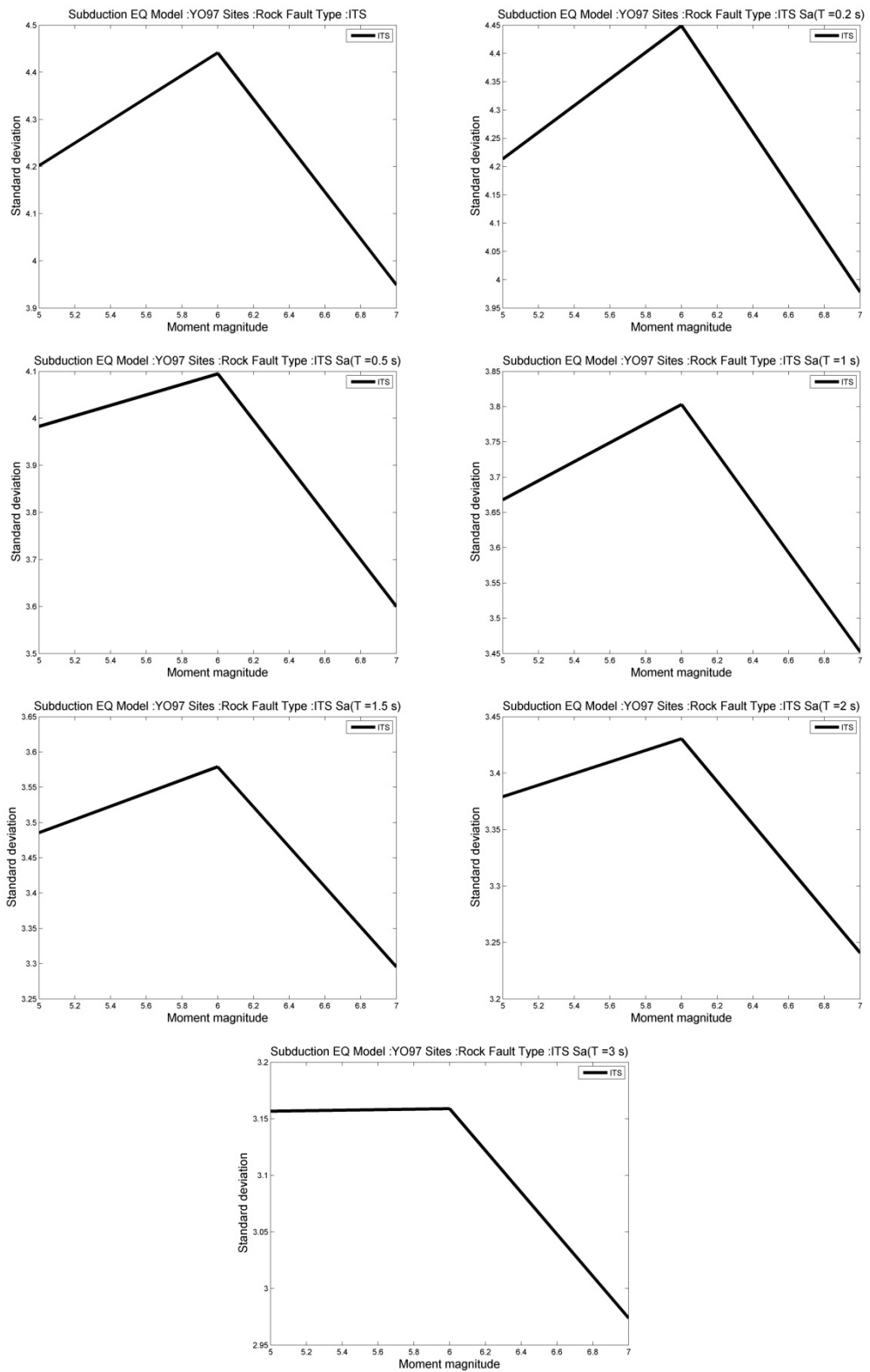




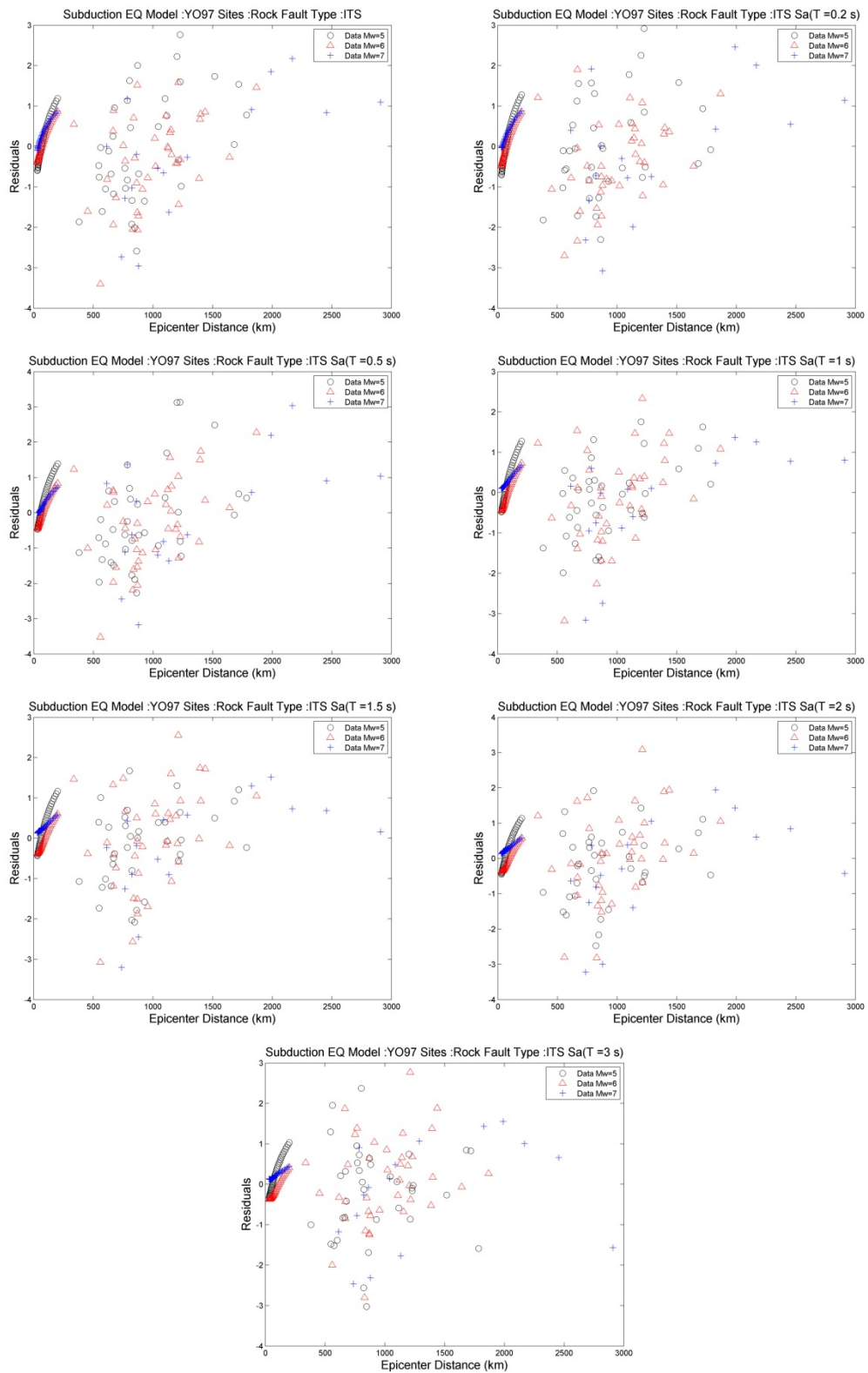
รูปที่ 4.17กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งหิน  
บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์นิวซีแลนด์



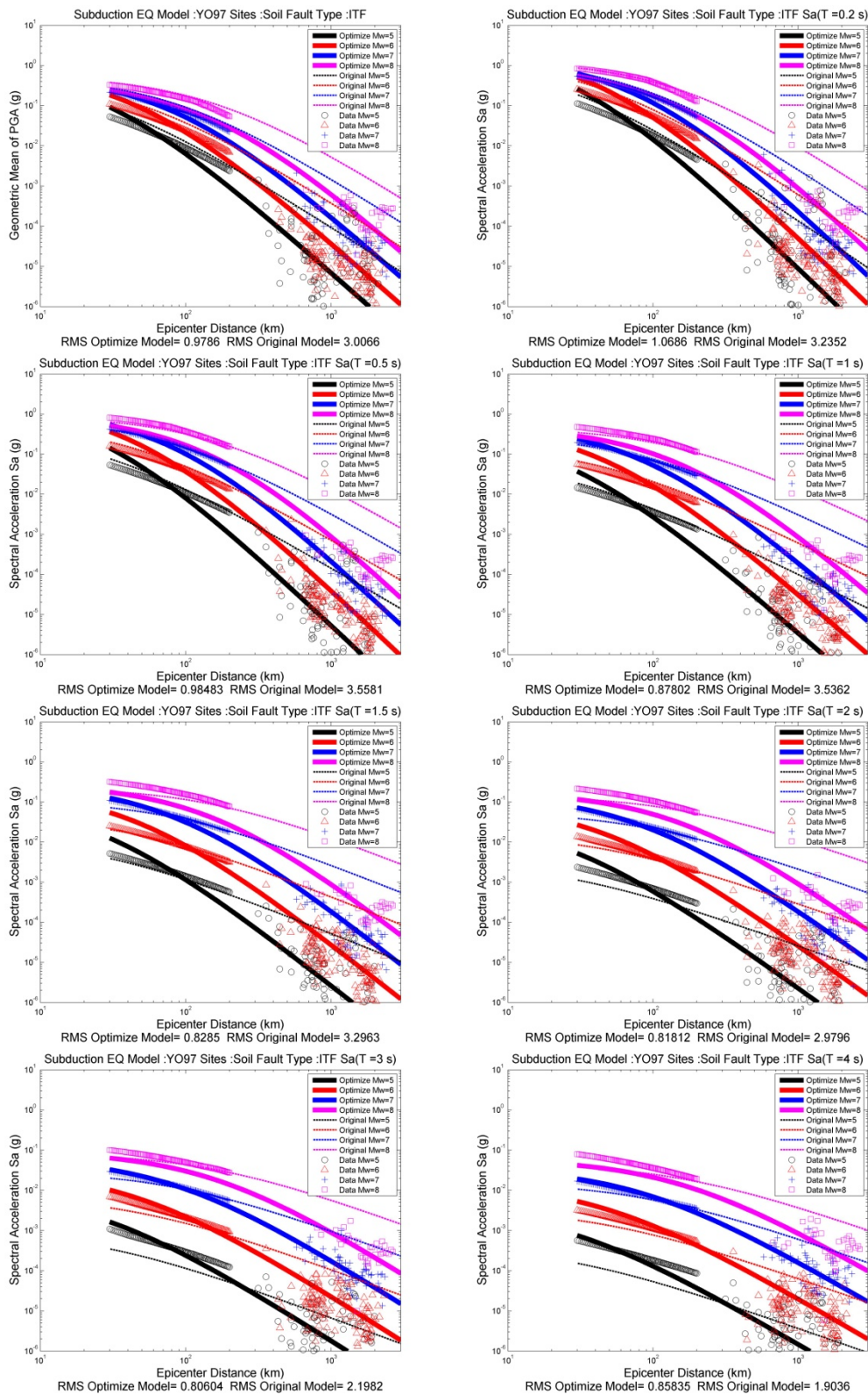
รูปที่ 4.18 กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานที่ตั้งหิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น



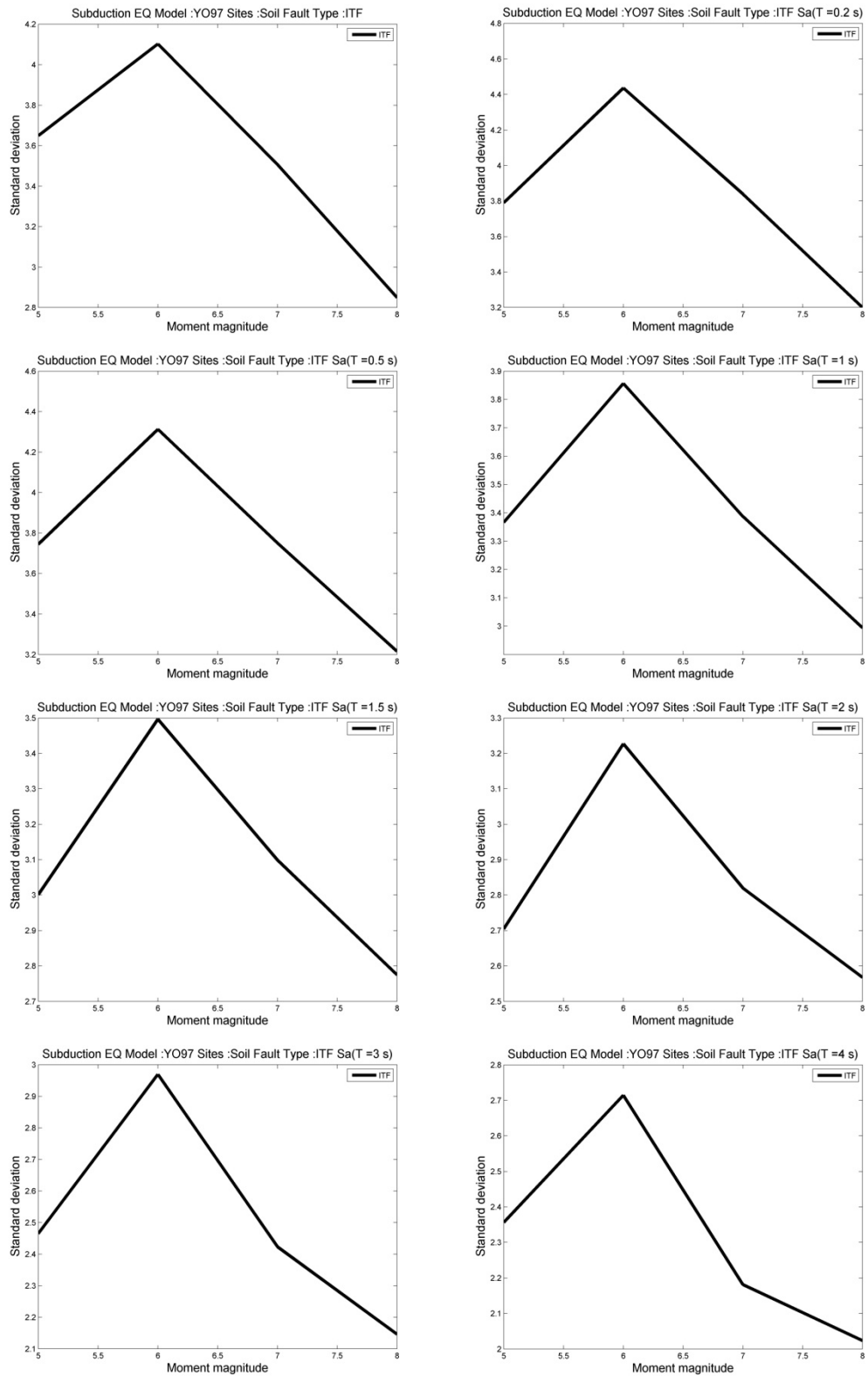
รูปที่ 4.19 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานที่ที่ตั้งหิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น



รูปที่ 4.20 กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งหิน  
บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น

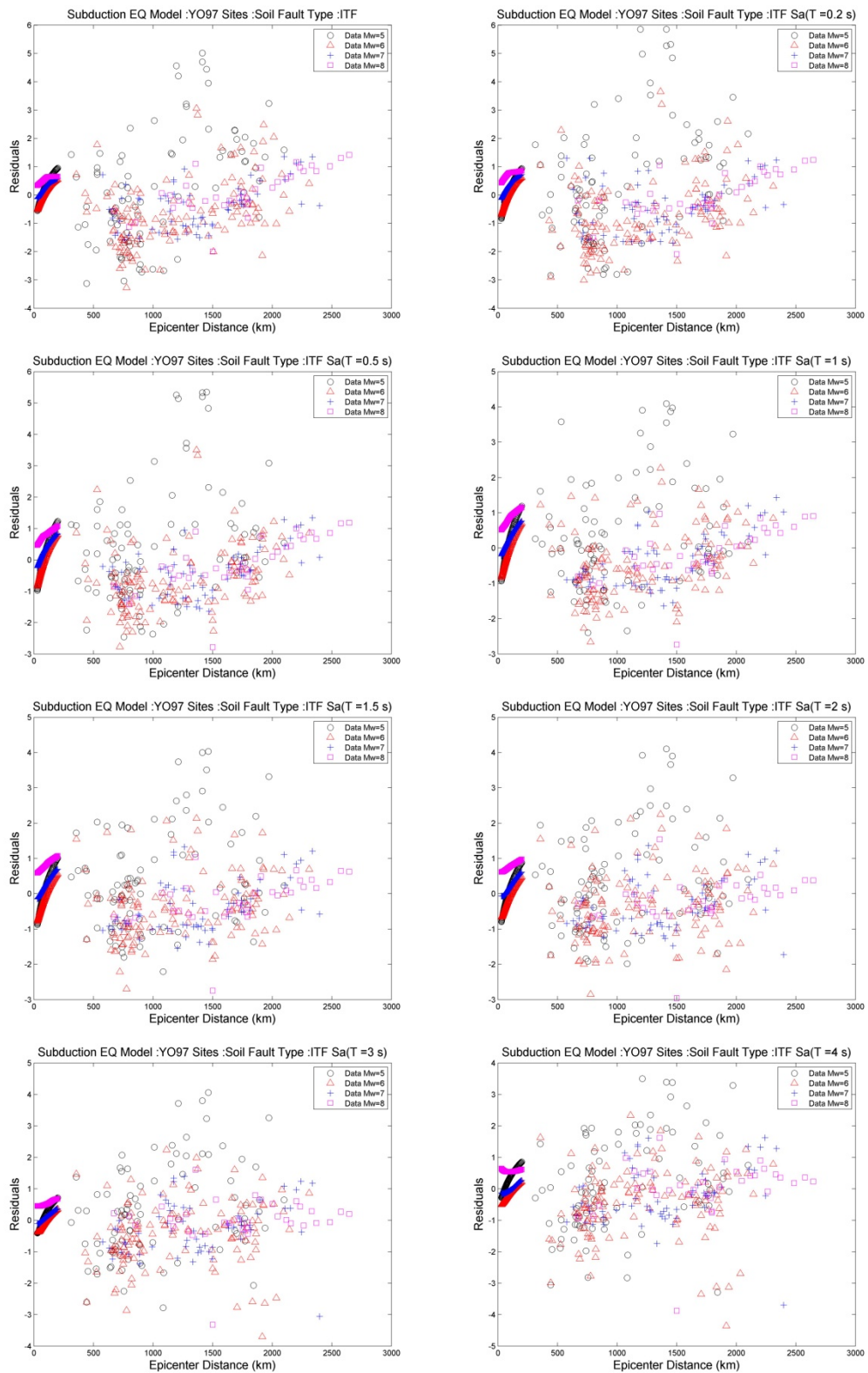


รูปที่ 4.21 กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานที่ที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ผิวสัมผัส

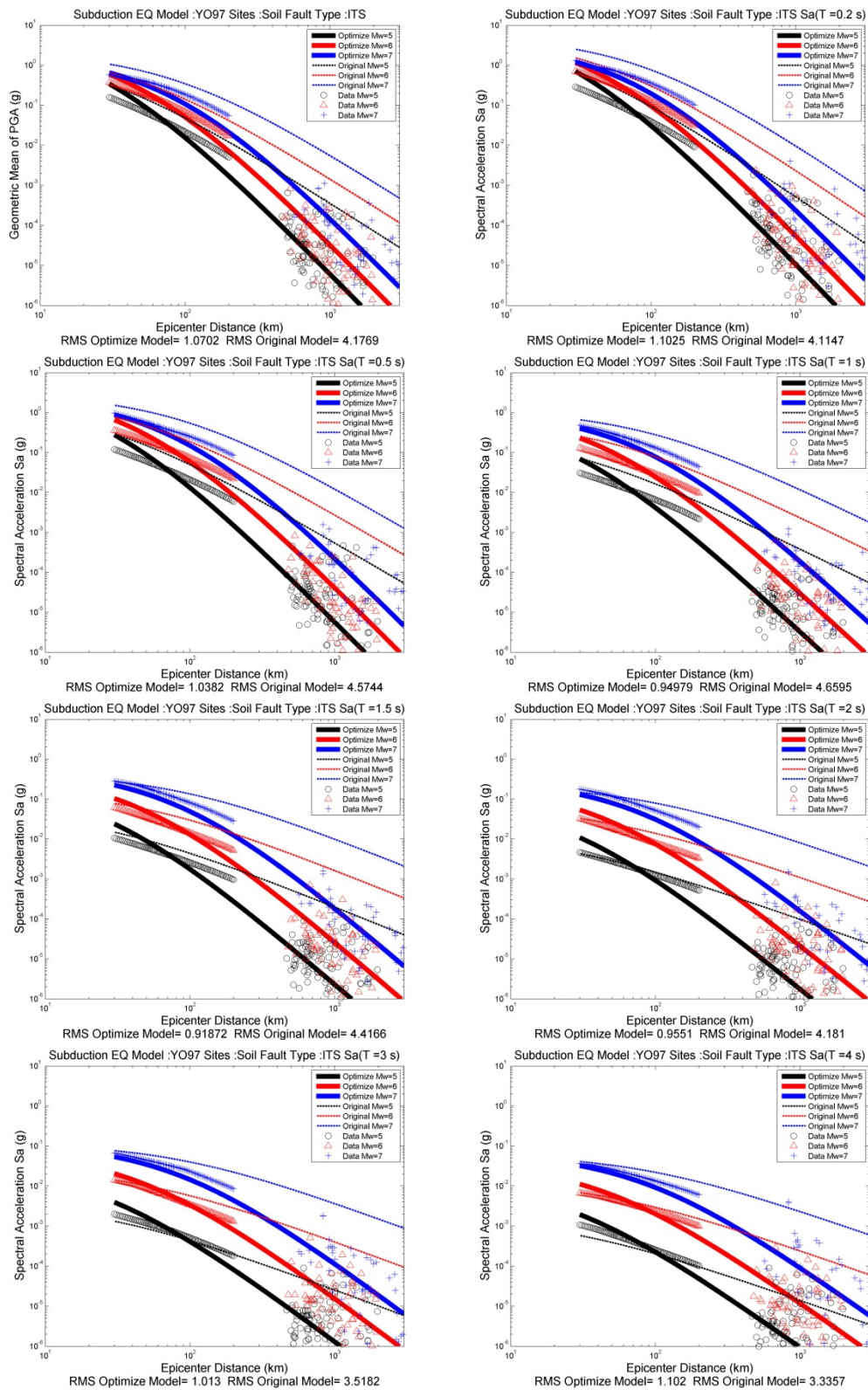


รูปที่ 4.22 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานีที่ตั้งดินบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์นิวซีแลนด์



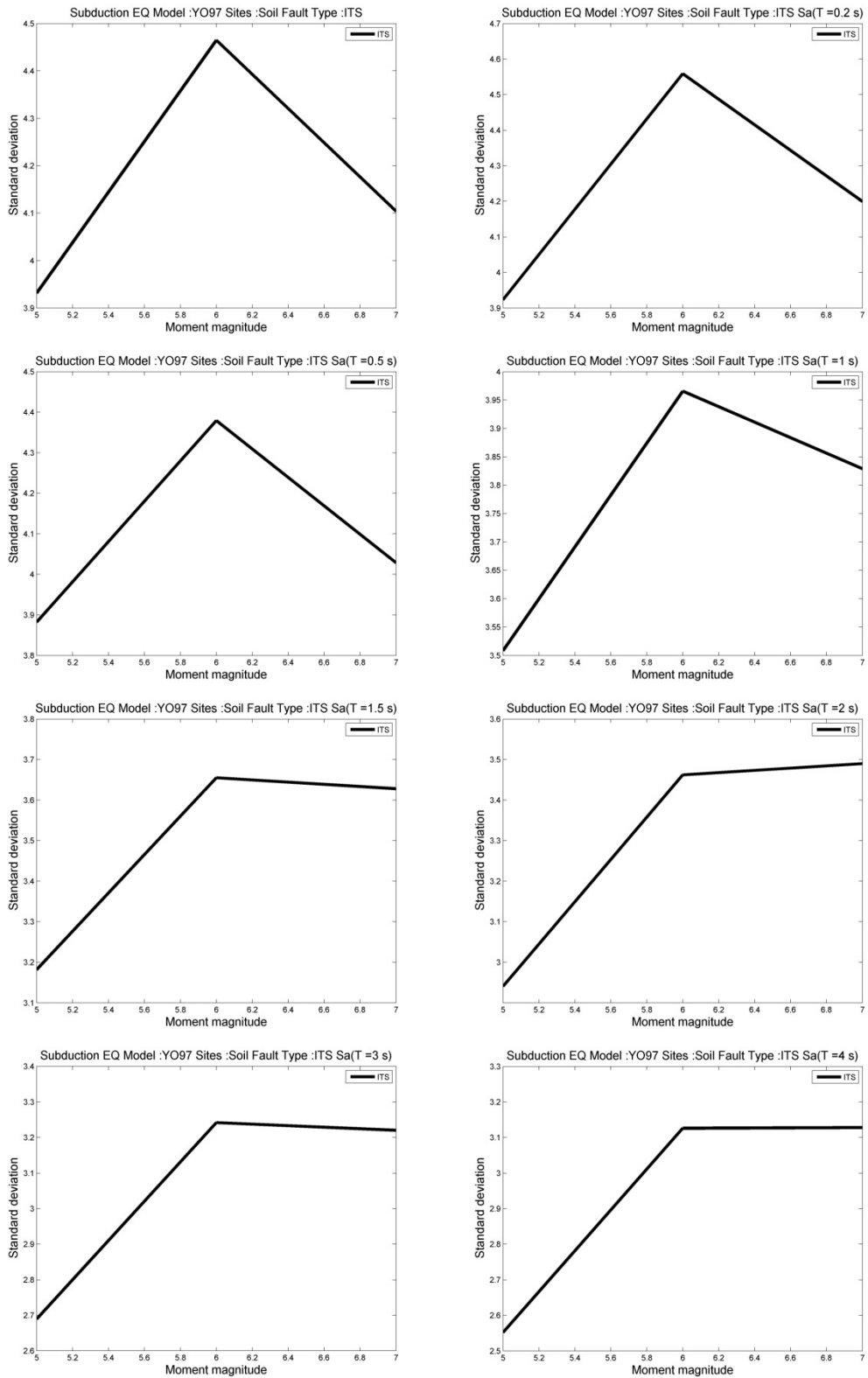


รูปที่ 4.23 กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์นิวซีแลนด์

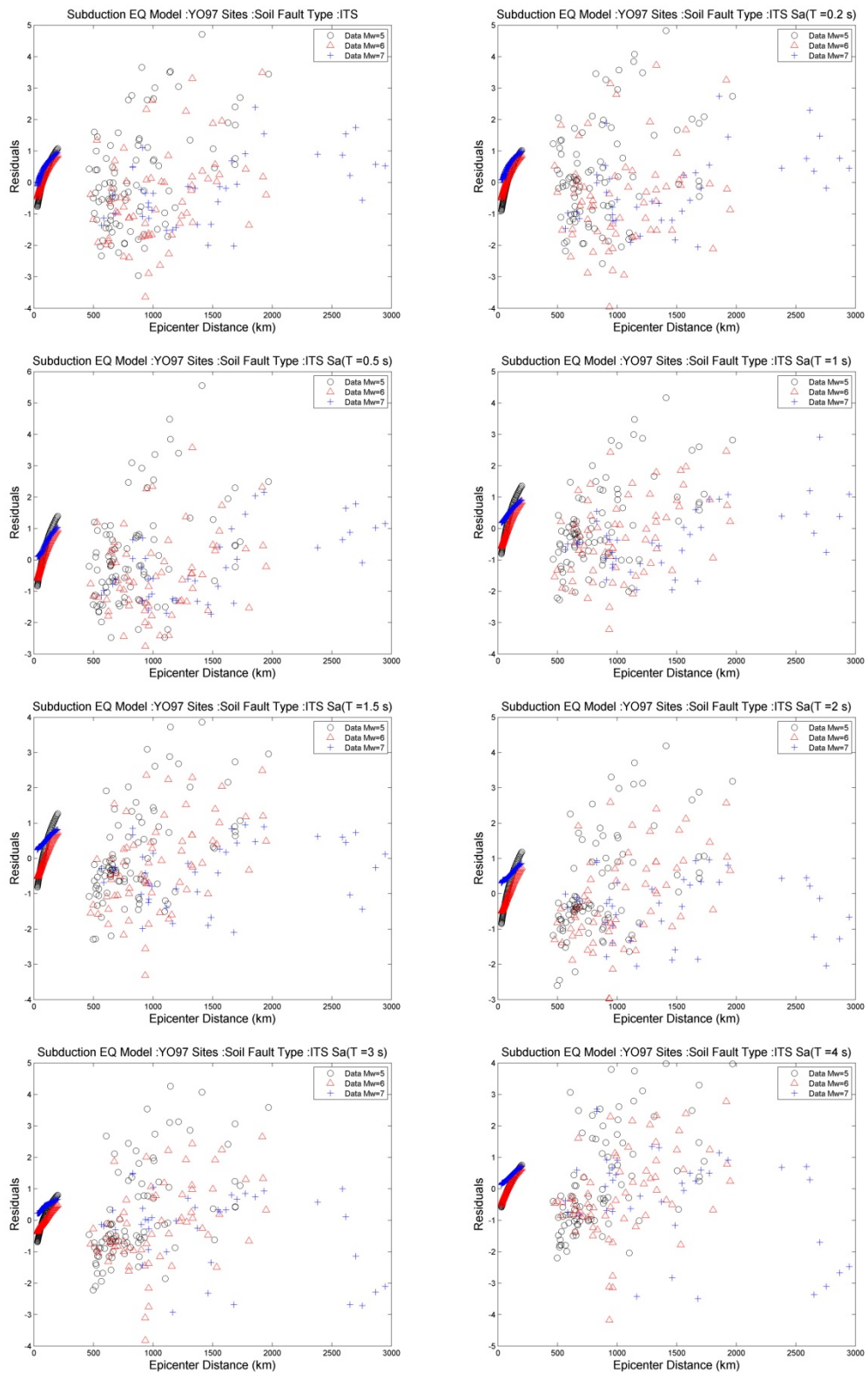


รูปที่ 4.24กราฟการลดทอนของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย สถานที่ที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น





รูปที่ 4.25 กราฟค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับขนาดโมเมนต์ สถานที่ที่ตั้งดิน  
บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น



รูปที่ 4.26กราฟค่าคงเหลือกับระยะทาง สถานีที่ตั้งหิน  
บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับเหตุการณ์ภายในแผ่น

#### 4.3 สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดิน

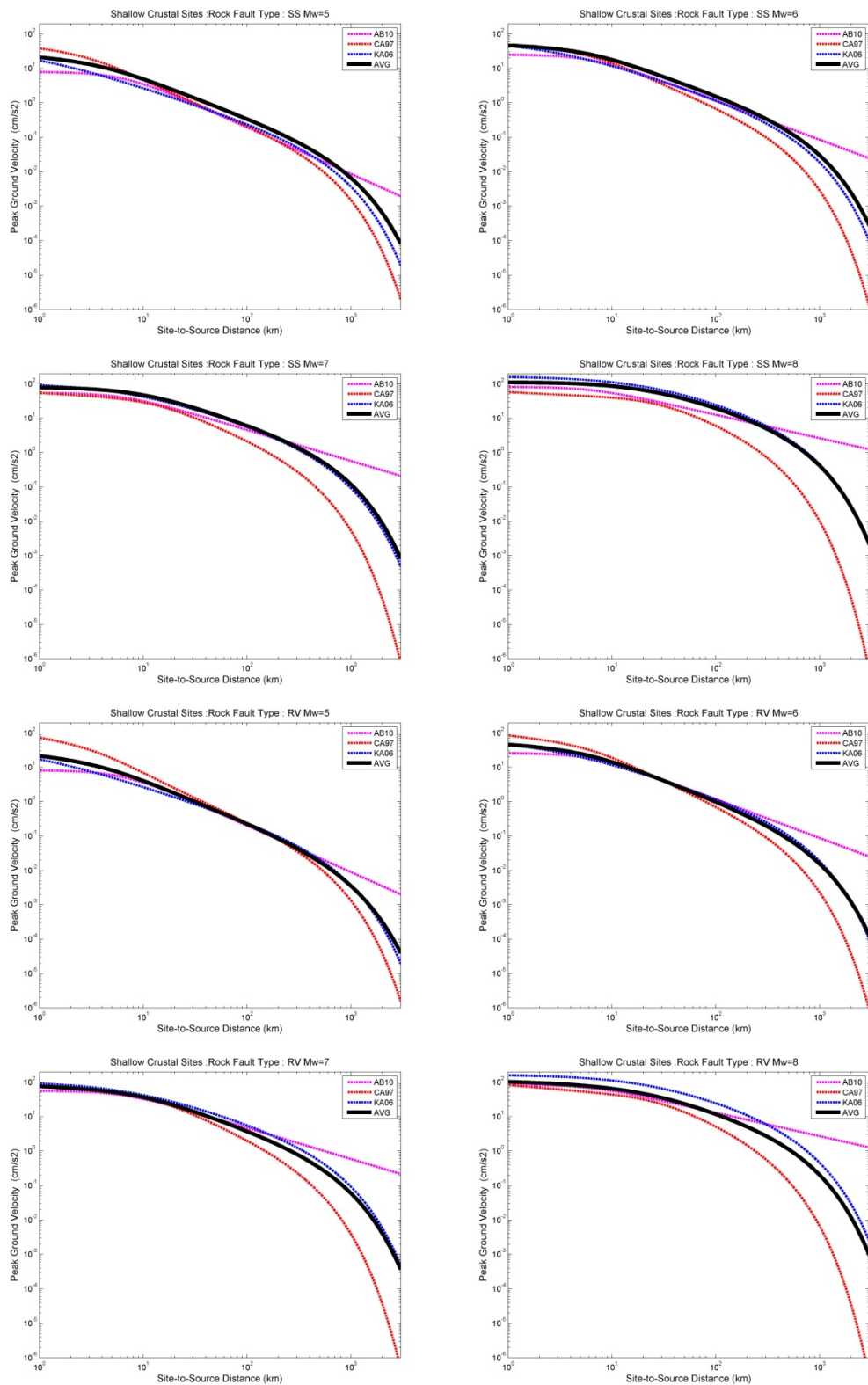
การศึกษานี้เลือกพิจารณาสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศทั้งหมด 3 สมการ ได้แก่ Akkar และ Bommer 2010, Campbell 1997 สมการสำหรับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง และสมการของ Kanno และคณะ 2006 สมการสำหรับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังและสำหรับบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก

การศึกษานี้เลือกใช้ข้อมูลเสริมในระยะทางใกล้ๆ สำหรับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของพื้นดินดังแสดงรูปที่ และรูปที่ ตั้งแต่ ระยะทางที่ 1 ถึง 100 กิโลเมตรสำหรับที่ระยะทางไกลๆ ใช้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้จริงในประเทศไทยเพื่อพิจารณาหารูปแบบของสมการลดทอนของต่างประเทศ ที่มีค่าพารามิเตอร์สอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกได้ในประเทศไทยและข้อมูลเสริมในระยะทางใกล้

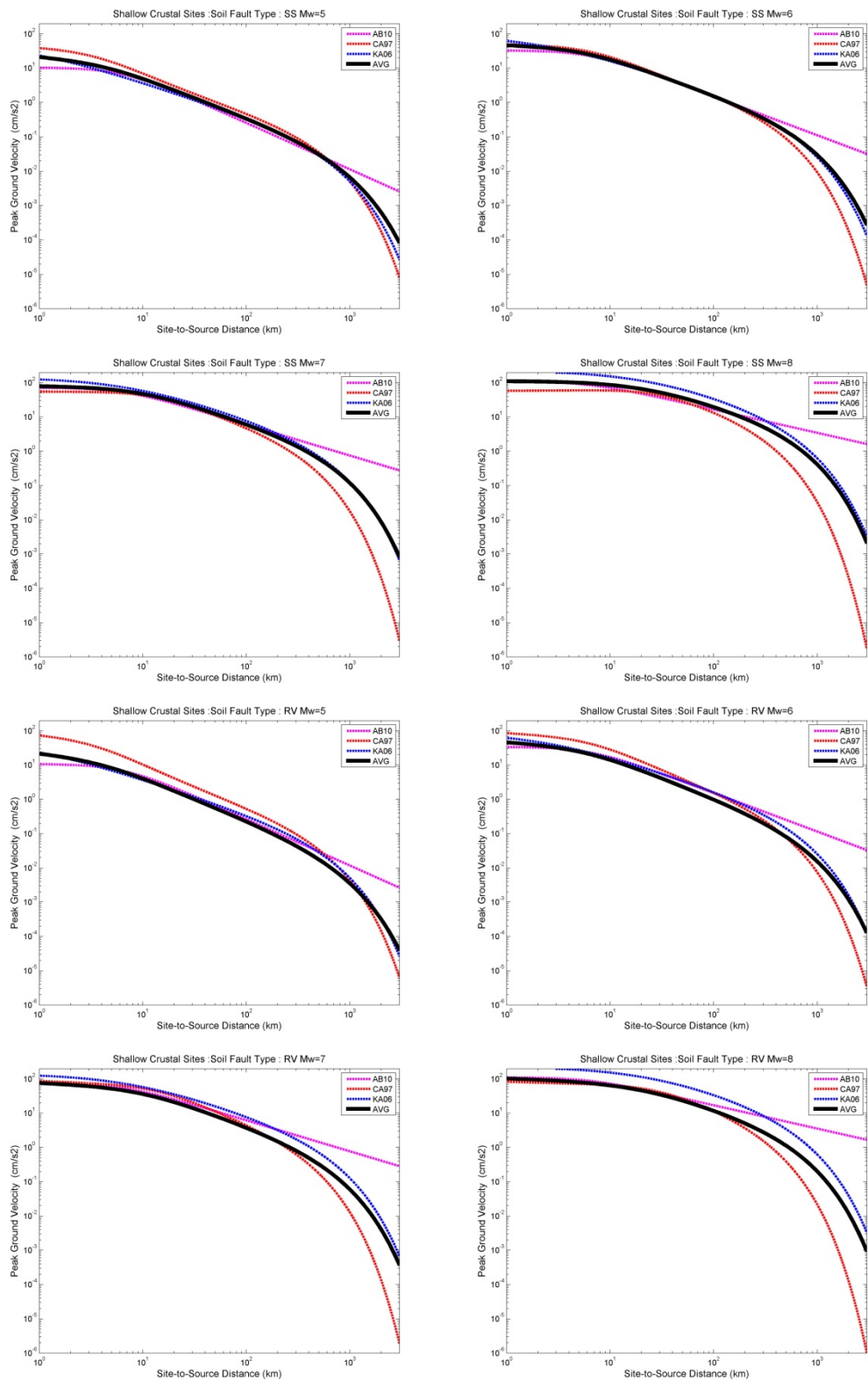
จากการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อหารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดินพบว่า รูปแบบสมการบริเวณการแปรสัณฐาน สมการของ Akkar และ Bommer 2010 มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกได้ในประเทศไทยที่ระยะทางไกล และมีความสอดคล้องกับข้อมูลจากค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศในช่วงระยะทางใกล้ แต่ให้ค่าการระจัดสูงสุดของพื้นดินที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของสมการลดทอนของต่างประเทศในช่วงระยะทาง 50 ถึง 100 กิโลเมตร ทั้งสถานีที่ตั้งบนหิน และบนดิน ดังแสดงรูปที่ 4.29 และ 4.30 รูปแบบสมการของ Campbell 1997 มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกได้ในประเทศไทยที่ระยะทางไกล และมีความสอดคล้องกับข้อมูลจากค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศในช่วงระยะทางใกล้เฉพาะสถานีที่ตั้งหิน รอยเลื่อนแนวระดับ นอกจากนั้นรูปแบบสมการยังไม่มีความสอดคล้องกับข้อมูลระยะทางใกล้ และระยะทางไกลเท่าที่ควร สำหรับสถานีที่ตั้งบนหิน รอยเลื่อนย้อน และสถานีที่ตั้งดิน ทั้งรอยเลื่อนแนวระดับ และรอยเลื่อนย้อน ดังแสดงรูปที่ 4.31 และ 4.32

รูปแบบสมการของ Kanno และคณะ 2006 สำหรับที่ตั้งสถานีบนหินและบนดิน สมการการประมาณค่าได้ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศในช่วงระยะทางใกล้ที่ขนาดโมเมนต์ 5 และ 6 ที่ระยะทาง 1 ถึง 100 กิโลเมตร ที่ขนาดโมเมนต์ 7 ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศ และที่ขนาดโมเมนต์ 8 ให้ค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศ

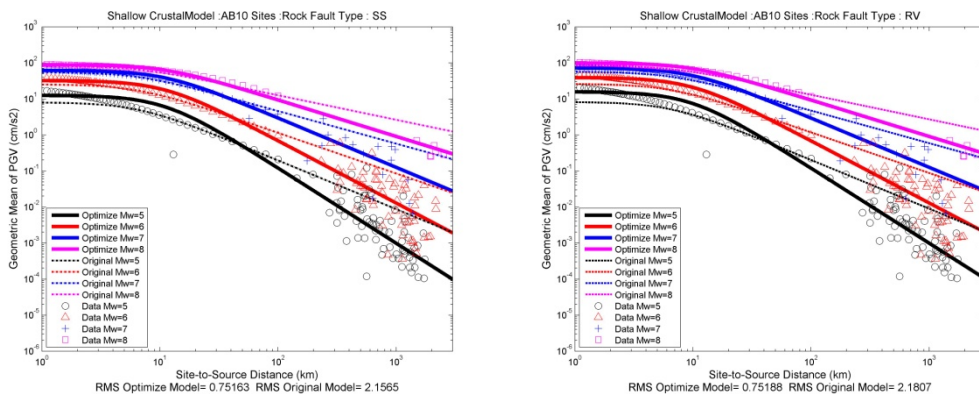
รูปแบบสมการลดทอนที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดินทั้งสถานีที่ตั้งบนหินและดิน ได้แก่ รูปแบบสมการของ Akkar และ Bommer 2010



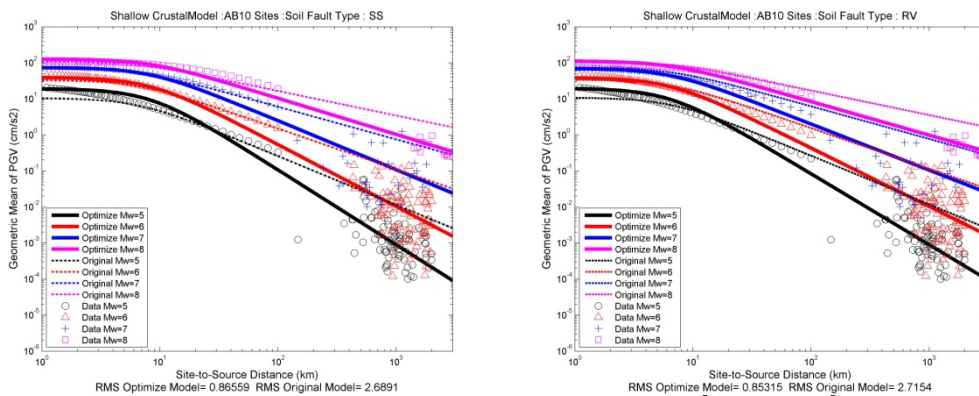
รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังที่ตั้งอยู่บนหิน



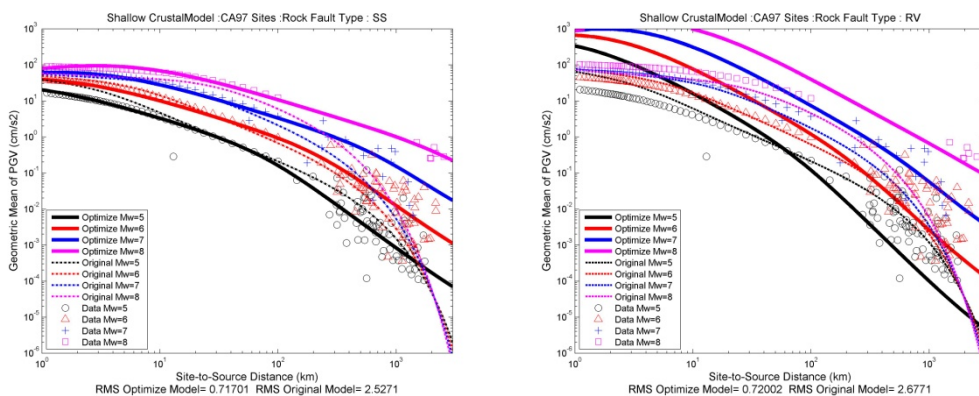
รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบสมการลดทอนของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังที่ตั้งอยู่บนดิน



รูปที่ 4.29 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Akkar และ Bommer, 2010)

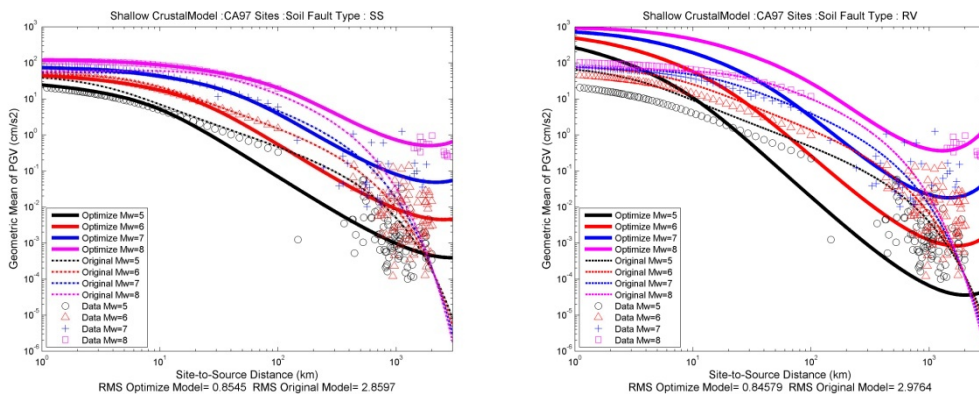


รูปที่ 4.30 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Akkar และ Bommer, 2010)

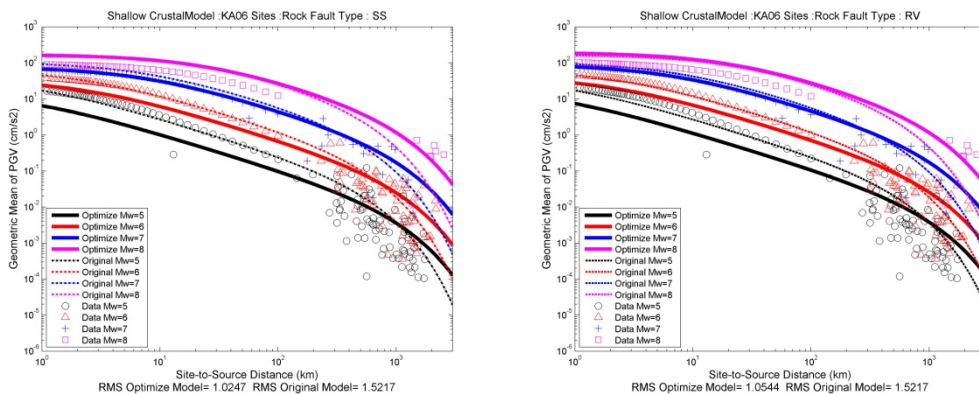


รูปที่ 4.31 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งหิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Campbell, 1997)

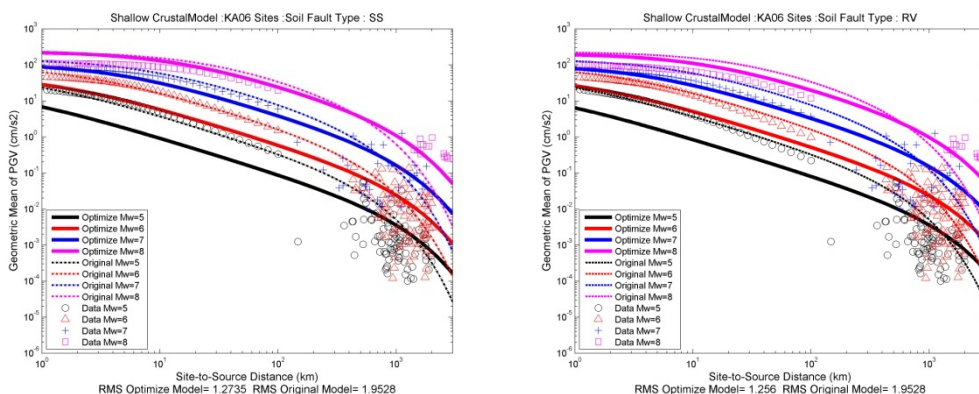




รูปที่ 4.32 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดิน  
บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Campbell, 1997)



รูปที่ 4.33 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งหิน  
บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Kannoและคณะ, 2006)



รูปที่ 4.34 กราฟการลดทอนของความเร็วสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดิน  
บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง (Kannoและคณะ, 2006)

### 4.3 สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน

การศึกษานี้พิจารณาหารูปแบบสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดินที่มีค่าพารามิเตอร์สอดคล้องเฉพาะกับข้อมูลที่บ้านที่กได้ในประเทศไทย ในระยะทางไกลเนื่องจากยังไม่มีสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดินเพียงพอต่อการนำมาเป็นข้อมูลเสริมในช่วงระยะทางไกล

การสร้างสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดินนั้นใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนาม (multiple regression analysis) สำหรับการลดทอนการกระจัดสูงสุดของพื้นดินตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดและขนาดโมเมนต์ โดยพิจารณารูปแบบสมการอย่างง่ายดังสมการที่ 4.4

$$\ln(PGD) = C_0 + C_1 \ln(Dis) + C_2 \ln(M_w) \quad (4.4)$$

โดย

$PGD$  = การกระจัดสูงสุดของพื้นดิน (เซนติเมตร)

$Dis$  = ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด (กิโลเมตร)

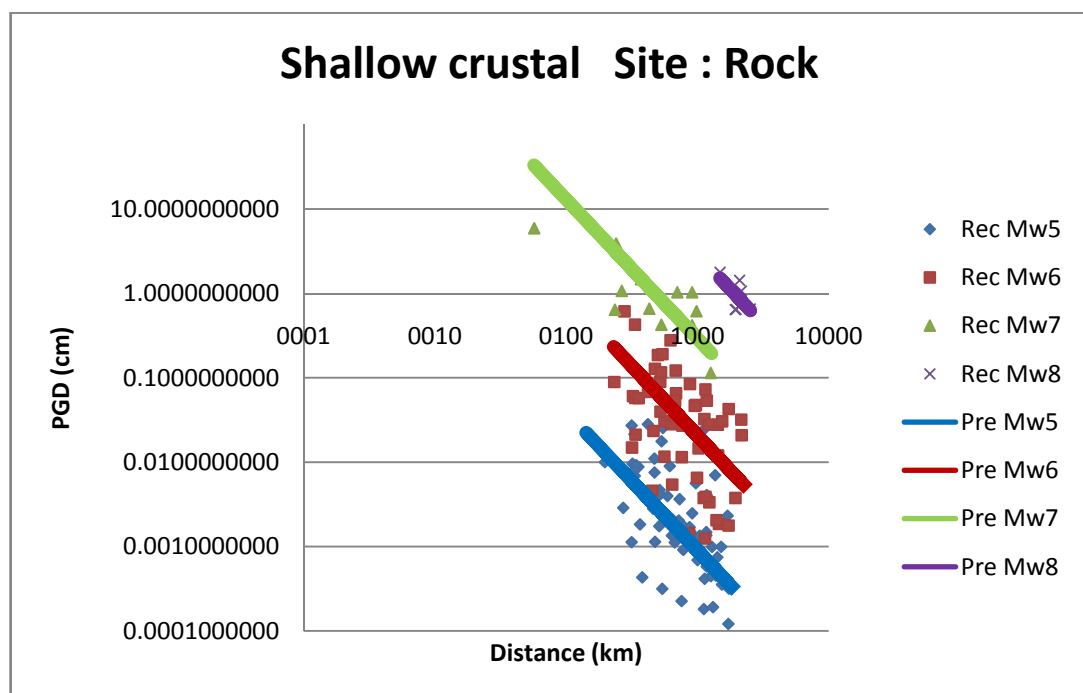
$M_w$  = ขนาดโมเมนต์

ผลการวิเคราะห์รูปแบบสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว และกราฟการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดินบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังบนที่ตั้งหิน และที่ตั้งดิน แสดงดังตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 สำหรับบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกบนที่ตั้งหิน และที่ตั้งดิน แสดงดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.37 และรูปที่ 4.38



ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์สัมพรรคทอดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน  
บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังบนที่ตั้งหิน

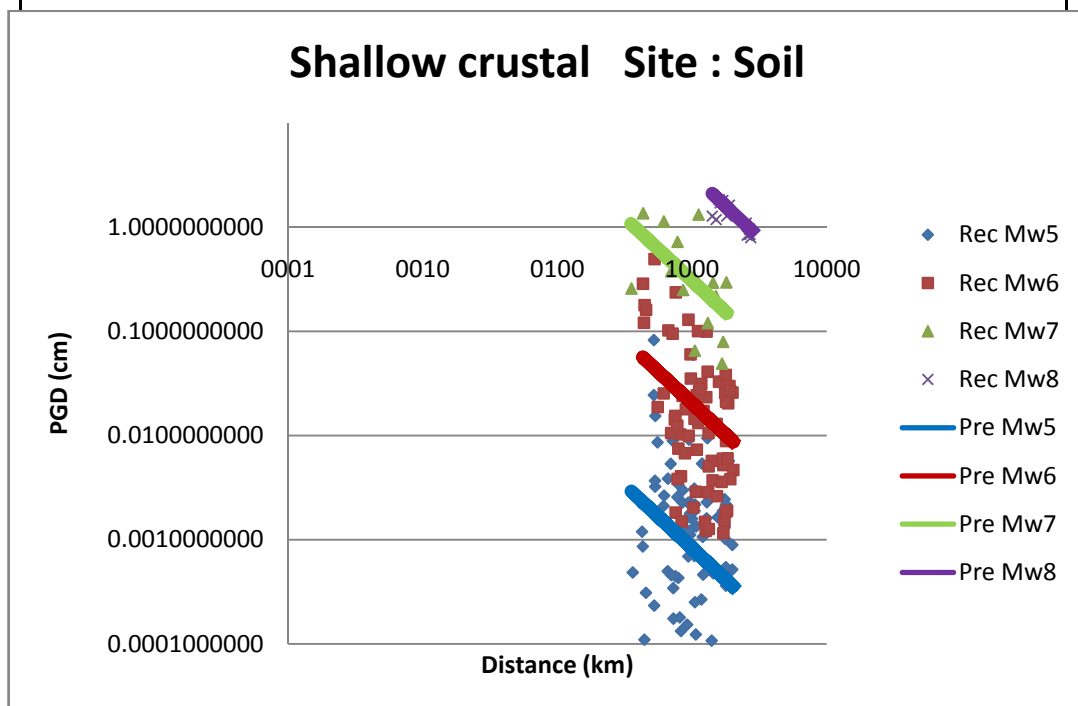
Model 1: OLS, using observations 1-140				
Dependent variable: ln_PGD_Rec_				
	coefficient	std. error	t-ratio	p-value
const	-23.31824128	1.440228536	-16.19065356	1.29E-33
ln_Dis_	-1.647919827	0.146003305	-11.28686658	2.69E-21
ln_Mw_	17.20212648	0.750769982	22.91264554	1.05E-48
Mean dependent var	-4.352977311	S.D. dependent var	2.408916135	
Sum squared resid	157.1878187	S.E. of regression	1.071147208	
R-squared	0.805122937	Adjusted R-squared	0.802278016	
F(2, 137)	283.0036552	P-value(F)	2.23E-49	
Log-likelihood	-206.7573222	Akaike criterion	419.5146444	
Schwarz criterion	428.3395717	Hannan-Quinn	423.1008309	



รูปที่ 4.35 กราฟการลดทอนของการกระจัดสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งหิน  
บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ห้สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังบนที่ตั้งดิน

Model 1: OLS, using observations 1-178				
Dependent variable: ln_PGD_Rec_				
	coefficient	std. error	t-ratio	p-value
const	-27.01291231	1.650170709	-16.36976839	3.94E-37
ln_Dis_	-1.208603318	0.224901183	-5.373930472	2.43E-07
ln_Mw_	17.56341941	0.782639864	22.44125328	2.20E-53
Mean dependent var	-4.739987782	S.D. dependent var	2.466161223	
Sum squared resid	273.1364075	S.E. of regression	1.249311599	
R-squared	0.746274921	Adjusted R-squared	0.743375206	
F(2, 175)	257.3614549	P-value(F)	7.62E-53	
Log-likelihood	-290.6797714	Akaike criterion	587.3595429	
Schwarz criterion	596.9048935	Hannan-Quinn	591.2304387	



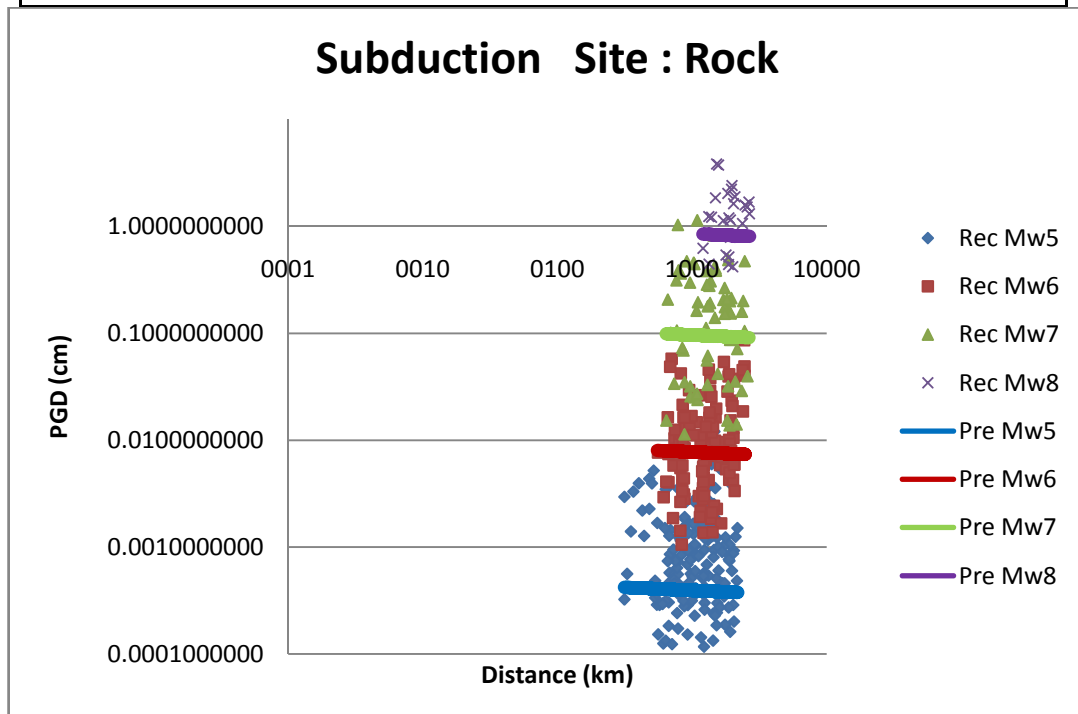
รูปที่ 4.36 กราฟการลดทอนของการกระจัดสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดิน บริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกบนที่ตั้งหิน

Model 1: OLS, using observations 1-367

Dependent variable: ln\_PGD\_Rec\_

	coefficient	std. error	t-ratio	p-value
const	-33.75784229	0.784704744	-43.01980148	8.57E-145
ln_Dis_	-0.05755959	0.113617684	-0.506607668	0.612736851
ln_Mw_	16.35092496	0.336038225	48.65793159	2.21E-161
Mean dependent var	-4.979505444	S.D. dependent var	2.548281469	
Sum squared resid	272.3923479	S.E. of regression	0.865061053	
R-squared	0.88539092	Adjusted R-squared	0.8847612	
F(2, 364)	1406.006817	P-value(F)	6.00E-172	
Log-likelihood	-466.0457216	Akaike criterion	938.0914431	
Schwarz criterion	949.8075287	Hannan-Quinn	942.7466075	



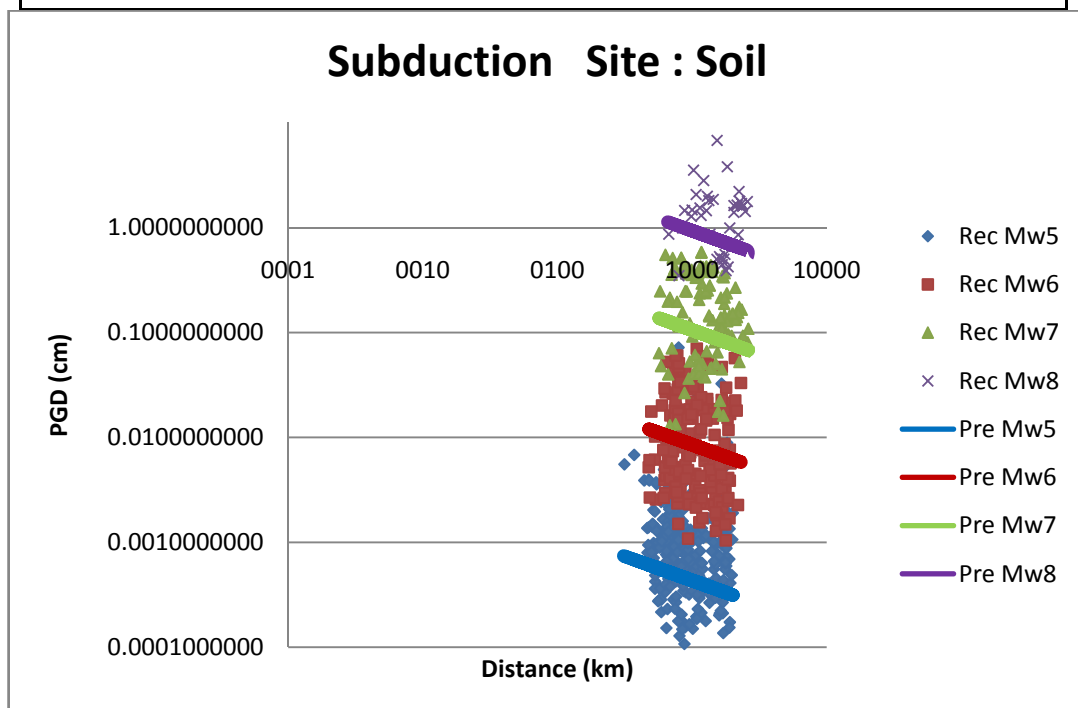
รูปที่ 4.37 กราฟการลดทอนของการกระจัดสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งหิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์สมการลดทอนสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลกบนที่ตั้งดิน

Model 1: OLS, using observations 1-611

Dependent variable: ln\_PGD\_Rec\_

	coefficient	std. error	t-ratio	p-value
const	-30.86028755	0.608062149	-50.75186408	9.31E-221
ln_Dis_	-0.459504884	0.089048565	-5.160160467	3.35E-07
ln_Mw_	16.33454244	0.254017783	64.30472023	2.11E-273
Mean dependent var	-5.01921635	S.D. dependent var	2.447194716	
Sum squared resid	426.9749863	S.E. of regression	0.838010436	
R-squared	0.883121253	Adjusted R-squared	0.882736784	
F(2, 608)	2296.986138	P-value(F)	3.90E-284	
Log-likelihood	-757.4889421	Akaike criterion	1520.977884	
Schwarz criterion	1534.223175	Hannan-Quinn	1526.129809	



รูปที่ 4.38 กราฟการลดทอนของการกระจัดสูงสุดของพื้นดินบนที่ตั้งดิน บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

การศึกษามีข้อสรุปดังนี้

1. การศึกษานี้รวบรวมข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวทั้งหมด 198 เหตุการณ์ แบ่งเป็น เหตุการณ์แผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลก 38 เหตุการณ์ และแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก 160 เหตุการณ์ ซึ่งมีข้อมูลทั้งหมด 1335 บันทึก แบ่งเป็น เหตุการณ์แผ่นดินไหวตื้นในแผ่นเปลือกโลก 356 บันทึก และแผ่นดินไหวบริเวณเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก 979 บันทึก
2. ประเทศไทยนั้นยังขาดข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดเนื่องจากแผ่นดินไหวที่มีขนาดโมเมนต์มากกว่า 4 ขึ้นไป และที่ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดที่ 0 ถึง 200 กิโลเมตร ในปริมาณที่ไม่เพียงพอสำหรับการสร้างสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทย ดังนั้น การศึกษานี้จึงหารูปแบบสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ในประเทศไทย ด้วยวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวของต่างประเทศให้มีความเหมาะสมกับข้อมูลค่าเฉลี่ยของสมการลดทอนของต่างประเทศที่ระยะทางใกล้ และข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ในประเทศไทยที่ระยะทางไกล
3. รูปแบบสมการลดทอนที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบธรรมชาติที่ 0.2 ถึง 5 วินาที สำหรับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลัง บนที่ตั้งสถานีบนหิน ได้แก่รูปแบบสมการของSadigh และคณะ 1997 และบนที่ตั้งสถานีบนดิน ได้แก่รูปแบบสมการของCampbell และBozorgnia 2003 และสำหรับบริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก บนที่ตั้งสถานีบนหินและบนดิน ได้แก่รูปแบบสมการของYoungs และคณะ 1997 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดั้งเดิม ซึ่งจะให้ค่าที่ประมาณสอดคล้องกับข้อมูลค่าเฉลี่ยจากสมการลดทอนของต่างประเทศในระยะทางใกล้ และให้ค่าที่ปลอดภัยกับข้อมูลที่บันทึกได้ในประเทศไทยในระยะทางไกลจึงเหมาะสมสำหรับนำไปประมาณค่าสำหรับประเทศไทย

4. รูปแบบสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าความเร็วสูงสุดของพื้นดิน สำหรับบริเวณการแปรสัณฐานที่มีพลังทั้งที่ตั้งสถานีบนหินและบนดิน ได้แก่รูปแบบสมการของ Akkar และ Bommer 2010
5. รูปแบบสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าการกระจัดสูงสุดของพื้นดิน ที่ตั้งสถานีบนหินและบนดิน ได้แก่รูปแบบสมการเส้นตรง 2 ตัวแปร
6. ในอนาคตหากประเทศไทยมีข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวของพื้นดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีขนาดโมเมนต์มากกว่า 4 ขึ้นไป และมีระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัดประมาณ 0 ถึง 200 กิโลเมตร ในปริมาณที่เพียงพอจึงจะสามารถสร้างสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทยได้

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ทรัพยากรธรณี,กรม. 2554. แผ่นดินไหวกับประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย

ทรัพยากรธรณี,กรม.2554.แผ่นดินไหว 6.7 ริกเตอร์ 24 มีนาคม 2554 ส่งผลกระทบต่อประเทศไทย.กรุงเทพมหานคร: สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัยกัลยา

มาณฑุ เจริญยุทธ,2550. ฐานข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ในประเทศไทย.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิษณุ หัตถา,2551. แบบจำลองการลดทอนเพื่อประมาณค่าสเปกตรัมการตอบสนองสำหรับประเทศไทย.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อาถนิตี เรืองวิทย์และจิตติपालศรี, 2554. แผ่นดินไหวที่ประเทศพม่าในวันที่ 24 มีนาคม 2554 กับบทเรียนทางวิศวกรรม. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหวและการสั่นสะเทือน. ภาควิชาวิศวกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

Abrahamson, N.A. and Silva, W.J., 2008. Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground - Motion Relations.Earthquake Spectra, 24(1): 67-97.

Abrahamson, N.A. and Silva, W.J., 1997. Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquake.Seismological Research Letters, 68(1): 94-109.

Akkar, S. and Bommer, J.J., 2010. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle East.Seismological Research Letters, 81(2): 195-206.

- Atkinson, G. and Boore, D., 2008. Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5% Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Spectra, 24(1): 99–138.
- Atkinson, G. and Boore, D., 2003. Empirical ground-motion relations for subduction zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(4): 1703-1729.
- Lin, P.S., and Lee, C.T., 2008. Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in northeastern Taiwan. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(1): 220–240.
- Atkinson, G. and Boore, D., 1997. Some Comparisons Between Recent Ground Motion Relations. Seismological Research Letters, 68(1): 24-40.
- Boore, D., Joyner, W. and Fumal, T., 1997. Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work. Seismological Research Letters, 68(1): 128-153.
- Campbell, K.W., 1997. Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Pseudo - Absolute Acceleration Response Spectra. Seismological Research Letters, 68(1): 154-179.
- Campbell, K.W., and Bozergnia, Y., 2003. Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(1): 314-331.
- Chiou, B. and Youngs, R., 2008. An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. Earthquake Spectra, 24(1): 173–215.



- Chopra, A.K., 2007. Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third edition. Prentice-Hall.
- Douglas, J., Cotton, F., Di Alessandro, C., Boore, D.M., Abrahamson, N.A. and Akkar, S., 2012. Compilation and critical review of GMPEs for the GEM-PEER Global GMPEs Project. Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering, Lisbonne,
- Idriss, I. M., 2008. An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated By Shallow Crustal Earthquakes. Earthquake Spectra, 24(1): 217–242.
- Kanno, T., Narata, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y., 2006. A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(3): 879–897.
- Mcveery, G. H., Zhao, G. H., Abrahamson, N. A. and Somerville, P. G., 2006. New Zealand acceleration response spectrum attenuation relations for crustal and subduction zone earthquakes. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 39(4): 1–58.
- Naguit, M.E., 2007. Estimation of Probable Earthquake Ground Motions in Bangkok. Master dissertation, Civil Engineering, Graduate division, Chulalongkorn University.
- Sadigh, K., Chang, C., Egan, J., Makdisi, F. and Youngs, R., 1997. Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data. Seismological Research Letters, 68(1): 180-189.
- Youngs, R.R., Chiou, S.-J., Silva, W.J., Humphrey, J.R., 1997. Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone. Seismological Research Letters, 68(1): 74-85.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y. and Fukushima, Y., 2006. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site

classification based on predominant period. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(3): 898-913.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

**ภาคผนวก ก**  
**รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา**

ตารางที่ ก.1 รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

No. Ev.	Date	Time	epN	epE	FM.	Mag.	Dep.(km)	Ty.EQ
001	2006/10/07	21:12:28	+011.78	+100.15	NM	5.0	012.0	Shallow
002	2006/11/18	13:55:25	+004.58	+094.57	IF	5.9	036.4	Subduction
003	2006/11/18	13:57:57	+004.60	+094.67	IF	5.9	023.0	Subduction
004	2006/12/01	03:58:24	+003.46	+099.05	IS	6.3	208.4	Subduction
005	2006/12/12	17:02:00	+018.93	+098.97	SS	5.1	011.0	Shallow
006	2006/12/17	21:10:26	+004.58	+094.89	IS	5.8	054.4	Subduction
007	2006/12/17	21:39:17	+000.57	+099.83	SS	5.8	018.2	Shallow
008	2006/12/22	19:50:49	+010.70	+092.11	IF	6.2	022.0	Subduction
009	2007/01/03	12:47:33	+005.25	+094.28	IF	5.4	044.0	Subduction
010	2007/01/07	10:47:07	+022.04	+098.30	SS	4.8	020.0	Shallow
011	2007/01/08	12:48:44	+008.03	+092.30	IF	6.1	012.0	Subduction
012	2007/01/09	05:27:24	+019.13	+095.35	IS	4.9	097.6	Subduction
013	2007/01/22	16:44:35	+002.36	+095.58	IF	5.3	036.8	Subduction
014	2007/01/25	15:18:40	+001.36	+097.03	IF	5.0	039.6	Subduction
015	2007/01/29	19:48:40	+008.37	+093.76	IS	5.4	077.3	Subduction
016	2007/02/11	10:47:37	+006.12	+094.47	IS	5.4	063.6	Subduction
017	2007/02/14	19:50:02	+000.33	+097.22	IF	5.7	012.0	Subduction
018	2007/02/14	20:12:00	+005.04	+094.23	IF	5.2	034.2	Subduction
019	2007/02/14	20:46:34	+000.39	+097.17	IF	5.4	012.0	Subduction
020	2007/03/01	02:01:05	+003.60	+096.23	IF	5.2	043.4	Subduction
021	2007/03/01	05:08:23	+010.42	+093.23	IS	5.0	089.2	Subduction
022	2007/03/06	03:49:44	-000.65	+100.53	SS	6.4	020.9	Shallow
023	2007/03/06	05:49:29	-000.51	+100.47	SS	6.3	021.9	Shallow
024	2007/03/07	10:53:42	+001.80	+097.74	IF	5.9	049.0	Subduction
025	2007/04/07	09:51:54	+002.74	+095.48	IF	6.1	012.0	Subduction
026	2007/04/10	13:56:55	+013.13	+092.59	IS	5.5	018.3	Subduction
027	2007/04/26	05:23:48	+015.47	+096.16	SS	4.9	012.0	Shallow

ตารางที่ ก.1(ต่อ)รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

No. Ev.	Date	Time	epN	epE	FM.	Mag.	Dep.(km)	Ty.EQ
028	2007/04/27	08:02:52	+005.09	+094.43	IF	5.9	049.2	Subduction
029	2007/04/28	19:14:31	+001.76	+099.15	SS	4.9	018.1	Shallow
030	2007/05/01	19:44:20	+005.29	+094.38	IS	5.0	051.2	Subduction
031	2007/05/16	08:56:18	+020.52	+100.89	SS	6.3	012.6	Shallow
032	2007/05/18	15:57:31	+003.68	+096.07	IS	5.2	056.5	Subduction
033	2007/05/23	20:19:11	+002.48	+095.39	IF	5.2	012.0	Subduction
034	2007/05/31	23:18:05	+008.31	+094.03	SS	5.4	012.0	Shallow
035	2007/06/02	21:35:02	+023.02	+101.13	SS	6.1	012.0	Shallow
036	2007/06/03	02:49:03	+022.93	+101.12	SS	4.9	024.4	Shallow
037	2007/06/09	14:59:51	+002.19	+095.93	IF	5.2	036.3	Subduction
038	2007/06/23	08:17:20	+021.49	+100.00	SS	5.6	016.1	Shallow
039	2007/06/23	08:27:49	+021.46	+099.93	SS	5.4	017.6	Shallow
040	2007/06/24	13:47:40	+005.21	+094.50	IS	5.0	054.0	Subduction
041	2007/07/21	12:53:03	+005.14	+097.72	IF	5.2	012.0	Subduction
042	2007/07/24	14:51:33	+002.14	+097.72	IS	5.3	050.5	Subduction
043	2007/07/25	23:37:35	+007.06	+092.52	IF	6.0	012.0	Subduction
044	2007/07/30	22:42:06	+019.06	+095.77	IF	5.6	012.0	Subduction
045	2007/07/31	08:43:42	+019.05	+095.79	IF	5.0	013.5	Subduction
046	2007/08/08	17:05:11	-006.03	+107.58	IS	7.5	304.8	Subduction
047	2007/08/25	17:03:08	+014.31	+094.01	SS	5.2	041.1	Shallow
048	2007/09/12	11:11:15	-003.78	+100.99	IF	8.5	024.4	Subduction
049	2007/09/12	23:49:35	-002.46	+100.13	IF	7.9	043.1	Subduction
050	2007/09/13	02:30:04	-001.94	+099.54	IF	6.5	034.8	Subduction
051	2007/09/13	03:35:36	-002.31	+099.39	IF	7.0	017.0	Subduction
052	2007/09/20	08:31:24	-002.24	+099.85	IF	6.7	032.3	Subduction
053	2007/10/04	12:40:30	+002.47	+092.83	SS	6.2	012.0	Shallow
054	2007/10/24	21:02:58	-004.37	+100.78	IF	6.8	020.0	Subduction
055	2007/11/21	03:30:15	+002.81	+096.19	IF	4.9	041.0	Subduction
056	2007/11/21	19:04:02	+007.76	+093.79	IS	4.9	017.8	Subduction
057	2007/11/22	23:02:14	+004.46	+095.01	IS	5.8	052.1	Subduction

ตารางที่ ก.1(ต่อ)รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

No. Ev.	Date	Time	epN	epE	FM.	Mag.	Dep.(km)	Ty.EQ
058	2007/12/01	01:44:35	+001.81	+097.75	IS	5.9	050.3	Subduction
059	2007/12/22	12:26:21	+001.92	+096.58	IF	6.1	025.0	Subduction
060	2007/12/28	05:24:19	+005.63	+095.95	SS	5.4	025.7	Shallow
061	2008/01/14	13:38:40	+010.39	+092.69	IF	5.8	043.8	Subduction
062	2008/01/22	17:15:03	+000.94	+097.16	IF	6.1	023.2	Subduction
063	2008/02/20	08:08:45	+002.73	+095.93	IF	7.4	015.2	Subduction
064	2008/02/24	14:46:27	-002.65	+099.69	IF	6.4	012.0	Subduction
065	2008/02/25	08:36:42	-002.76	+099.87	IF	6.9	022.6	Subduction
066	2008/02/25	18:06:09	-002.67	+099.66	IF	6.4	023.0	Subduction
067	2008/02/25	21:02:23	-002.53	+099.65	IF	6.5	023.0	Subduction
068	2008/03/15	14:43:30	+002.49	+094.47	IF	6.0	012.0	Subduction
069	2008/03/29	17:30:57	+002.74	+095.19	IF	6.3	012.0	Subduction
070	2008/05/12	06:28:41	+031.49	+104.11	RV	7.9	012.0	Shallow
071	2008/05/13	10:29:22	+004.34	+095.07	IS	5.4	050.0	Subduction
072	2008/05/19	14:26:48	+001.66	+099.11	SS	6.0	016.5	Shallow
073	2008/06/19	00:35:34	+006.76	+092.66	IF	5.1	012.0	Subduction
074	2008/06/25	01:52:40	+001.00	+096.97	IF	5.5	020.0	Subduction
075	2008/06/27	11:40:19	+010.92	+091.82	IS	6.6	017.1	Subduction
076	2008/06/27	13:07:15	+011.09	+091.95	IS	5.9	012.1	Subduction
077	2008/07/14	04:44:54	+001.83	+096.28	IF	5.6	028.9	Subduction
078	2008/08/10	08:20:37	+010.96	+091.83	SS	6.2	015.8	Shallow
079	2008/08/10	09:27:58	+011.05	+091.80	IS	5.3	013.5	Subduction
080	2008/08/10	12:21:19	+011.12	+091.84	IS	5.7	012.0	Subduction
081	2008/08/21	12:24:36	+024.92	+097.99	SS	6.0	018.2	Shallow
082	2008/09/03	06:27:27	+024.84	+098.02	SS	5.0	018.4	Shallow
083	2008/09/22	13:30:38	+015.46	+096.15	NM	5.2	012.0	Shallow
084	2008/10/03	21:20:27	+010.83	+091.80	IS	5.4	012.0	Subduction
085	2008/11/16	12:20:39	+010.88	+091.82	IS	5.5	012.0	Subduction
086	2008/12/05	23:24:39	+008.71	+094.13	SS	5.2	022.0	Shallow
087	2008/12/06	00:43:09	+008.73	+094.11	SS	5.3	024.6	Shallow

ตารางที่ ก.1(ต่อ)รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

No. Ev.	Date	Time	epN	epE	FM.	Mag.	Dep.(km)	Ty.EQ
088	2008/12/20	23:22:51	+022.65	+096.09	SS	5.3	014.8	Shallow
089	2009/03/12	10:05:11	+004.43	+095.03	IF	5.0	047.6	Subduction
090	2009/07/28	05:15:00	+010.64	+094.23	IS	5.2	012.0	Subduction
091	2009/08/10	19:56:05	+014.16	+092.94	IS	7.5	022.0	Subduction
092	2009/08/12	04:33:24	+009.03	+093.78	IS	5.1	019.7	Subduction
093	2009/08/13	09:21:37	+014.04	+092.76	SS	5.8	033.0	Shallow
094	2009/08/14	19:39:53	+014.08	+093.02	IS	5.0	019.7	Subduction
095	2009/08/23	07:20:16	+000.21	+096.92	IS	5.4	016.5	Subduction
096	2009/09/19	10:50:42	+000.49	+099.90	SS	5.1	021.6	Shallow
097	2009/09/21	19:38:44	+020.14	+094.87	IS	5.7	074.2	Subduction
098	2009/11/02	21:35:48	+013.97	+093.13	IF	5.4	016.7	Subduction
099	2009/11/10	02:48:48	+008.05	+091.86	SS	6.0	019.9	Shallow
100	2009/12/01	11:40:48	+013.62	+092.81	SS	5.3	027.4	Shallow
101	2009/12/07	22:06:16	+000.05	+096.97	IS	4.9	012.0	Subduction
102	2009/12/29	09:01:55	+024.31	+094.84	IS	5.6	125.1	Subduction
103	2010/01/22	06:46:16	+002.95	+093.75	IS	5.0	013.1	Subduction
104	2010/02/14	22:09:10	+002.71	+094.10	IF	4.9	012.0	Subduction
105	2010/03/12	23:19:57	+022.99	+094.62	IS	5.5	114.7	Subduction
106	2010/03/13	14:59:06	+001.16	+096.81	IF	5.8	023.6	Subduction
107	2010/03/19	19:53:38	+021.47	+099.99	SS	4.9	015.2	Shallow
108	2010/03/30	16:54:54	+013.58	+092.76	SS	6.6	030.5	Shallow
109	2010/04/06	22:15:19	+002.07	+096.74	IF	7.8	017.6	Subduction
110	2010/04/09	06:29:36	+001.87	+099.17	SS	4.9	021.1	Shallow
111	2010/04/13	20:15:00	+007.83	+091.94	SS	5.2	028.5	Shallow
112	2010/04/28	18:01:23	+019.18	+093.01	IS	5.2	031.2	Subduction
113	2010/05/09	05:59:51	+003.36	+095.78	IF	7.2	037.2	Subduction
114	2010/05/11	12:17:49	+003.24	+095.69	IF	5.4	042.3	Subduction
115	2010/05/16	08:55:48	+014.31	+093.29	IS	5.1	030.0	Subduction
116	2010/05/31	19:51:50	+011.16	+093.70	IS	6.5	127.9	Subduction
117	2010/06/01	15:58:12	+024.84	+099.24	SS	4.9	017.6	Shallow



ตารางที่ ก.1(ต่อ)รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

No. Ev.	Date	Time	epN	epE	FM.	Mag.	Dep.(km)	Ty.EQ
118	2010/06/03	09:24:18	+004.71	+095.77	IS	5.4	088.3	Subduction
119	2010/06/12	19:27:00	+007.85	+091.65	IF	7.5	033.1	Subduction
120	2010/06/13	06:26:04	+007.71	+091.82	SS	5.2	012.0	Shallow
121	2010/06/13	07:05:36	+007.98	+091.92	IS	5.2	018.9	Subduction
122	2010/06/15	23:24:26	+007.41	+091.67	SS	5.0	012.0	Shallow
123	2010/06/18	23:09:34	+013.21	+093.12	IF	5.9	020.1	Subduction
124	2010/06/24	04:08:37	+007.69	+091.85	SS	5.5	014.8	Shallow
125	2010/06/24	17:06:22	+007.72	+091.96	SS	4.9	016.6	Shallow
126	2010/06/25	07:29:00	+007.65	+091.85	SS	5.2	014.4	Shallow
127	2010/06/27	09:43:52	+013.43	+095.88	NM	5.0	012.0	Shallow
128	2010/06/27	10:51:46	+013.50	+096.00	NM	5.0	012.0	Shallow
129	2010/07/01	15:21:52	+001.09	+096.68	IF	5.1	035.8	Subduction
130	2010/07/02	18:23:12	+010.22	+092.02	IF	5.4	012.0	Subduction
131	2010/07/08	13:47:01	+014.37	+093.20	SS	5.0	028.3	Shallow
132	2010/07/13	04:26:27	+001.18	+096.85	IF	5.1	023.2	Subduction
133	2010/08/09	22:21:47	+013.64	+092.76	SS	5.2	022.4	Shallow
134	2010/08/17	01:39:31	+011.54	+095.13	SS	5.4	012.4	Shallow
135	2010/08/21	05:42:57	+002.01	+096.45	IF	5.9	024.0	Subduction
136	2010/09/10	17:24:21	+023.29	+090.74	SS	5.1	018.4	Shallow
137	2010/09/11	11:43:13	+007.73	+094.24	SS	5.8	019.9	Shallow
138	2010/12/01	00:50:23	+002.70	+098.86	IS	5.6	164.4	Subduction
139	2010/12/14	20:01:02	+003.81	+095.91	IF	4.9	044.5	Subduction
140	2010/12/18	22:56:45	+005.27	+094.55	IS	5.0	053.1	Subduction
141	2010/12/21	14:07:52	+002.44	+095.59	IF	5.8	023.2	Subduction
142	2011/01/07	03:10:00	+004.20	+090.37	SS	5.5	013.6	Shallow
143	2011/01/15	11:23:55	+002.26	+096.13	IF	5.8	017.0	Subduction
144	2011/01/15	16:26:09	+002.30	+096.22	IF	5.5	012.0	Subduction
145	2011/01/18	11:33:47	+002.38	+096.17	IF	5.9	015.0	Subduction
146	2011/01/22	07:34:16	+002.48	+095.34	IF	5.2	035.7	Subduction
147	2011/01/22	07:38:58	+002.74	+095.32	IF	5.7	015.0	Subduction

ตารางที่ ก.1(ต่อ)รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

No. Ev.	Date	Time	epN	epE	FM.	Mag.	Dep.(km)	Ty.EQ
148	2011/01/26	07:24:29	+009.96	+108.22	SS	5.0	012.0	Shallow
149	2011/01/26	15:42:35	+001.87	+096.52	IF	6.0	022.7	Subduction
150	2011/01/26	15:45:44	+001.49	+096.55	IF	4.9	040.5	Subduction
151	2011/01/26	07:24:29	+009.96	+108.22	SS	5.0	012.0	Shallow
152	2011/02/01	13:39:46	+010.62	+094.27	SS	5.5	012.0	Shallow
153	2011/02/04	13:53:49	+024.46	+094.68	IS	6.3	103.5	Subduction
154	2011/02/18	23:12:07	+001.86	+097.77	IF	5.2	044.2	Subduction
155	2011/03/10	04:58:16	+024.63	+098.01	SS	5.5	014.6	Shallow
156	2011/03/24	13:55:20	+020.65	+100.06	SS	6.8	012.6	Shallow
157	2011/04/06	14:01:48	+001.45	+096.82	IF	6.0	018.0	Subduction
158	2011/04/29	08:56:51	+003.98	+095.96	IS	5.4	067.2	Subduction
159	2011/06/03	07:27:14	+009.74	+092.58	IS	5.5	045.1	Subduction
160	2011/06/14	00:08:35	+001.85	+099.05	SS	5.5	019.0	Shallow
161	2011/06/14	03:01:31	+001.85	+099.07	SS	5.7	020.2	Shallow
162	2011/06/18	11:58:03	+001.80	+099.12	SS	5.2	017.0	Shallow
163	2011/06/20	10:16:52	+025.00	+098.80	RV	5.0	015.7	Shallow
164	2011/07/04	19:00:56	+001.24	+096.87	IF	5.2	024.3	Subduction
165	2011/07/21	06:48:01	+000.12	+096.93	IS	4.8	019.2	Subduction
166	2011/08/03	20:02:20	+001.08	+098.68	IS	5.2	091.8	Subduction
167	2011/08/09	11:50:19	+024.98	+098.73	SS	5.1	020.1	Shallow
168	2011/08/21	08:18:15	+004.48	+094.95	IS	4.9	051.3	Subduction
169	2011/08/31	03:08:27	+002.16	+096.28	IF	4.9	032.1	Subduction
170	2011/09/05	17:55:14	+002.88	+097.86	IS	6.7	094.6	Subduction
171	2011/10/01	12:49:00	+012.85	+095.76	NM	5.0	012.0	Shallow
172	2011/10/16	17:16:20	+002.46	+096.10	SS	5.4	031.3	Shallow
173	2011/11/21	03:15:42	+024.82	+095.19	IS	5.8	129.2	Subduction
174	2011/11/27	11:01:07	+000.06	+097.65	IF	5.4	024.0	Subduction
175	2011/11/30	19:42:36	+007.90	+094.01	IS	5.6	012.0	Subduction
176	2011/12/02	19:37:48	+007.90	+094.12	IS	5.1	014.7	Subduction
177	2011/12/16	15:47:27	+007.84	+094.11	SS	5.1	015.8	Shallow

ตารางที่ ก.1(ต่อ)รายการเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

No. Ev.	Date	Time	epN	epE	FM.	Mag.	Dep.(km)	Ty.EQ
178	2012/01/10	18:37:13	+002.59	+092.98	SS	7.2	023.7	Shallow
179	2012/03/06	02:52:45	+008.57	+093.86	IS	5.4	012.9	Subduction
180	2012/04/11	08:39:29	+002.24	+092.78	SS	8.6	040.0	Shallow
181	2012/04/14	15:21:57	+000.29	+092.22	IF	5.4	012.0	Subduction
182	2012/04/15	05:57:42	+002.52	+090.32	SS	6.2	029.9	Shallow
183	2012/04/16	09:44:25	+008.02	+098.37	SS	4.3	010.0	Shallow
184	2012/04/20	23:14:34	+002.22	+093.36	IF	5.9	042.2	Subduction
185	2012/04/24	14:57:15	+008.94	+094.05	SS	5.6	012.4	Shallow
186	2012/04/25	07:42:27	+008.92	+094.07	SS	5.8	014.3	Shallow
187	2012/11/11	01:12:57	+022.74	+096.05	SS	6.8	014.2	Shallow
188	2012/11/11	10:54:44	+022.64	+096.04	SS	5.9	012.0	Shallow
189	2012/11/11	18:19:45	+023.08	+096.08	SS	5.6	018.9	Shallow

## ภาคผนวก ข

ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่ายตรวจวัด  
แผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

ตาราง ข.1 ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่าย  
ตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

Component name	Sensor Sensitivity (V/ground)	LSB ( $\mu\text{V}/\text{count}$ )	System ( $\mu\text{m}/\text{count}$ )
Short-period seismic stations (Geotech S-13) and Accelerometer (PA-23)			
1. PHIT เชื้อนแควน้อย จ.พิษณุโลก			
SHZ	634	3.2	0.005047
SHN	622	3.2	0.005145
SHE	631	3.2	0.005071
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
2. SUKH อ่างเก็บน้ำห้วยท่าแพ จ.สุโขทัย			
SHZ	631	3.2	0.005071
SHN	631	3.2	0.005071
SHE	631	3.2	0.005071
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
3 .UTTA เชื้อนสิริกิต จ.อุตรดิตถ์			
SHZ	630	3.2	0.005079
SHN	628	3.2	0.005096
SHE	624	3.2	0.005128
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206

ตาราง ข.1 (ต่อ) ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

Component name	Sensor Sensitivity (V/ground)	LSB ( $\mu$ V/count)	System ( $\mu$ m/count)
Short-period seismic stations (Geotech S-13) and Accelerometer (PA-23)			
4. LAMP เขื่อนกิ่วลม จ.ลำปาง			
SHZ	630	3.2	0.005079
SHN	634	3.2	0.005047
SHE	631	3.2	0.005071
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
5. NAN ฝ่ายน้ำกอน จ.น่าน			
SHZ	628	3.2	0.005096
SHN	633	3.2	0.005055
SHE	631	3.2	0.005071
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
6. PAYA อ่างเก็บน้ำแม่ปืม			
SHZ	630	3.2	0.005079
SHN	631	3.2	0.005071
SHE	624	3.2	0.005128
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
7. UMPA สถานีอุตุนิยมวิทยาอุ้มผาง จ.ตาก			
SHZ	634	3.2	0.005047
SHN	631	3.2	0.005071
SHE	624	3.2	0.005128
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206

ตาราง ข.1 (ต่อ) ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

Component name	Sensor Sensitivity (V/ground)	LSB ( $\mu\text{V}/\text{count}$ )	System ( $\mu\text{m}/\text{count}$ )
Short-period seismic stations (Geotech S-13) and Accelerometer (PA-23)			
8. UTHA เขื่อนทับเสลา จ.อุทัยธานี			
SHZ	633	3.2	0.005055
SHN	631	3.2	0.005071
SHE	630	3.2	0.005079
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
9. PHET อ่างเก็บน้ำแก่งกระจาน			
SHZ	611	3.2	0.005237
SHN	627	3.2	0.005104
SHE	627	3.2	0.005104
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
10. PATY สถานีอุตุนิยมวิทยาพัทยา จ.ชลบุรี			
SHZ	605	3.2	0.005289
SHN	627	3.2	0.005104
SHE	625	3.2	0.00512
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
11. CHAI อ่างเก็บน้ำช่อระกา จ.ชัยภูมิ			
SHZ	631	3.2	0.005071
SHN	622	3.2	0.005145
SHE	634	3.2	0.005047
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206

ตาราง ข.1 (ต่อ) ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

Component name	Sensor Sensitivity (V/ground)	LSB ( $\mu$ V/count)	System ( $\mu$ m/count)
Short-period seismic stations (Geotech S-13) and Accelerometer (PA-23)			
12. KHON สถานีอากาศเกษตรท่าพระ จ.ขอนแก่น			
SHZ	630	3.2	0.005079
SHN	630	3.2	0.005079
SHE	622	3.2	0.005145
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
13. SURI อ่างเก็บน้ำอำปี้ม จ.สุรินทร์			
SHZ	624	3.2	0.005128
SHN	610	3.2	0.005246
SHE	628	3.2	0.005096
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
14. SRAK อ่างเก็บน้ำห้วยยาง จ.สระแก้ว			
SHZ	628	3.2	0.005096
SHN	628	3.2	0.005096
SHE	610	3.2	0.005246
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
15. KRAB อ่างเก็บน้ำบางก่าปรัต จ.กระบี่			
SHZ	630	3.2	0.005079
SHN	634	3.2	0.005047
SHE	634	3.2	0.005047
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206

ตาราง ข.1 (ต่อ) ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

Component name	Sensor Sensitivity (V/ground))motion)	LSB ( $\mu$ V/count)	System ( $\mu$ m/count)
Broadband seismic stations (Geotech KS-2000M) and Accelerometer (PA-23)			
16. PHRA อ่างเก็บน้ำสอง จ.แพร่			
BHZ	1,987.00	3.2	0.00161
BHN	2,020.00	3.2	0.001584
BHE	2,047.00	3.2	0.001563
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
17. CRAI อ่างเก็บน้ำห้วยช้าง จ.เชียงราย			
BHZ	2,036.00	3.2	0.001572
BHN	2,063.00	3.2	0.001551
BHE	2,042.00	3.2	0.001567
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
18. CMAI สถานีอุตสาหกรรมอ่างขาง จ.เชียงใหม่			
BHZ	1,992.00	3.2	0.001606
BHN	2,056.00	3.2	0.001556
BHE	1,989.00	3.2	0.001609
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
19. PRAC เขื่อนปรมาณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์			
BHZ	2,059.00	3.2	0.001554
BHN	2,012.00	3.2	0.00159
BHE	1,937.00	3.2	0.001652
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206



ตาราง ข.1 (ต่อ) ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

Component name	Sensor Sensitivity (V/ground)	LSB ( $\mu$ V/count)	System ( $\mu$ m/count)
Broadband seismic stations (Geotech KS-2000M) and Accelerometer (PA-23)			
20. SRIT อ่างเก็บน้ำคลองดินแดง จ.นครศรีธรรมราช			
BHZ	1,982.00	3.2	0.001615
BHN	2,101.00	3.2	0.001523
BHE	2,014.00	3.2	0.001589
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
21. SURA ฝ่ายเก็บน้ำท่าทอง จ.สุราษฎร์ธานี			
BHZ	2,027.00	3.2	0.001579
BHN	2,026.00	3.2	0.001579
BHE	2,059.00	3.2	0.001554
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
22. NONG อ่างเก็บน้ำห้วยเปลวเหนือ จ.หนองคาย			
BHZ	1,980.00	3.2	0.001616
BHN	1,978.00	3.2	0.001618
BHE	1,979.00	3.2	0.001617
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
23. PANO อ่างเก็บน้ำห้วยแคน จ.นครพนม			
BHZ	2,003.00	3.2	0.001598
BHN	2,013.00	3.2	0.00159
BHE	1,939.00	3.2	0.00165
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206

ตาราง ข.1 (ต่อ) ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

Component name	Sensor Sensitivity (V/ground)	LSB ( $\mu$ V/count)	System ( $\mu$ m/count)
Broadband seismic stations (Geotech KS-2000M) and Accelerometer (PA-23)			
24. NAYO อ่างเก็บน้ำคลองท่าด่าน จ.นครนายก			
BHZ	2,010.00	3.2	0.001592
BHN	2,015.00	3.2	0.001588
BHE	1,983.00	3.2	0.001614
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
25. LOEI อ่างเก็บน้ำห้วยน้ำหนาม จ.เลย			
BHZ	2,038.00	3.2	0.00157
BHN	2,006.00	3.2	0.001595
BHE	1,995.00	3.2	0.001604
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.063	0.4	6.349206
HNE	0.063	0.4	6.349206
TMDA กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา			
HLZ	0.063	0.4	6.349206
HLN	0.062	0.4	6.451613
HLE	0.063	0.4	6.349206
HNZ	0.063	0.4	6.349206
HNN	0.064	0.4	6.25
HNE	0.061	0.4	6.557377
TMDB กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา			
SHZ	1,973.00	3.2	0.001622
SHN	2,008.00	3.2	0.001594
SHE	1,981.00	3.2	0.001615

ตาราง ข.1 (ต่อ) ค่า System sensitivity ของเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหวในระบบเครือข่าย  
ตรวจวัดแผ่นดินไหวระบบใหม่ระยะที่ 2

Naming Convention:		
1. Band Code (instrument sampling rate, response band)		
Band type	Sample rate (Hz)	Corner period (s)
S = Short period	$\geq 10$ to $< 80$	$< 10$
H = High Broad Band	$\geq 80$	$\geq 10$
B = Broad Band	$\geq 10$ to $< 80$	$\geq 11$
2. Instrument Code		
H = High Gain Seismometer		
N = Accelerometer		
3. Instrument Code		
Z N E = Traditional (Vertical, North-South, East-West)		

ภาคผนวก ค

**ภาคผนวก ค**  
**ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนคลื่นแผ่นดินไหว**

ตาราง ค.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Akkar and Bommer, 2010)

Period(s)	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10	$\sigma_1$	$\sigma_2$
0.000	1.04159	0.91333	-0.08140	-2.92728	0.28120	7.86638	0.08753	0.01527	-0.04189	0.08015	0.26100	0.09940
0.050	2.11528	0.72571	-0.07351	-3.33201	0.33534	7.74734	0.04707	-0.02426	-0.04260	0.08649	0.27200	0.11420
0.100	2.11994	0.75179	-0.07448	-3.10538	0.30253	8.21405	0.02667	-0.00062	-0.04906	0.07910	0.27280	0.11670
0.150	1.64489	0.83683	-0.07544	-2.75848	0.25490	8.31786	0.02578	0.01703	-0.04184	0.07840	0.27880	0.11920
0.200	0.92065	0.96815	-0.07903	-2.49264	0.21790	8.21914	0.06557	0.02105	-0.02098	0.08438	0.28210	0.10810
0.250	0.13978	1.13068	-0.08761	-2.33824	0.20089	7.20688	0.09810	0.03919	-0.04853	0.85770	0.28710	0.09900
0.300	-0.84006	1.37439	-0.10349	-2.19123	0.18139	6.54299	0.12847	0.04340	-0.05554	0.09221	0.29020	0.09760
0.350	-1.32207	1.47055	-0.10873	-2.12993	0.17485	6.24751	0.16213	0.06695	-0.04722	0.09903	0.29980	0.11010
0.400	-1.70320	1.55930	-0.11388	-2.12718	0.17137	6.57173	0.21222	0.09201	-0.05145	0.09903	0.29980	0.11010
0.450	-1.96720	1.61645	-0.11742	-2.16619	0.17700	6.78082	0.24121	0.11675	-0.05202	0.09943	0.30370	0.11230
0.500	-2.76925	1.83268	-0.13202	-2.12969	0.16877	7.17423	0.25944	0.13562	-0.04283	0.08579	0.30780	0.11630
0.550	-3.51672	2.02523	-0.14495	-2.04211	0.15617	6.37617	0.26498	0.14446	-0.04259	0.06945	0.30700	0.12740
0.600	-3.92759	2.08471	-0.14648	-1.88144	0.13621	6.10103	0.27718	0.15156	-0.03853	0.05932	0.30070	0.14300

ตาราง ค.1(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Akkar and Bommer, 2010)

Period (s)	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10	$\sigma_1$	$\sigma_2$
0.650	-4.49490	2.21154	-0.15522	-1.79031	0.12916	5.19135	0.28574	0.15239	-0.03423	0.05111	0.30040	0.15460
0.700	-4.62925	2.21764	-0.15491	-1.79800	0.13495	4.46323	0.30348	0.15652	-0.04146	0.04661	0.29780	0.16260
0.750	-4.95053	2.29142	-0.15983	-1.81321	0.13920	4.27945	0.31516	0.16333	-0.04050	0.04253	0.29730	0.16020
0.800	-5.32863	2.38389	-0.16571	-1.77273	0.13273	4.37011	0.32153	0.17366	-0.03946	0.03373	0.29170	0.15430
0.850	-5.75799	2.50635	-0.17479	-1.77068	0.13096	4.62192	0.33520	0.18480	-0.03786	0.02867	0.29170	0.15430
0.900	-5.82689	2.50287	-0.17367	-1.76295	0.13059	4.65393	0.34849	0.19061	-0.02884	0.02475	0.29150	0.15210
0.950	-5.90592	2.51405	-0.17417	-1.79854	0.13535	4.84540	0.35919	0.19411	-0.02209	0.02502	0.29120	0.14840
1.000	-6.17066	2.58558	-0.17938	-1.80717	0.13599	4.97596	0.36619	0.19519	-0.02269	0.02121	0.28950	0.14830
1.100	-6.90379	2.77044	-0.19171	-1.71109	0.12227	5.00975	0.37756	0.19423	-0.02655	0.00140	0.28960	0.14270
1.200	-6.99236	2.73427	-0.18491	-1.59120	0.10265	5.03274	0.38120	0.19309	-0.00162	0.00413	0.28780	0.14390
1.300	-6.51719	2.51869	-0.16330	-1.46527	0.08005	5.14423	0.38862	0.19273	-0.01902	-0.00369	0.28690	0.14270
1.400	-6.61945	2.52611	-0.16274	-0.14826	0.08213	5.33490	0.38625	0.19285	-0.01607	-0.00876	0.28750	0.14580
1.500	-6.71787	2.49486	-0.15689	-1.35301	0.06379	5.15750	0.37867	0.18812	-0.01208	-0.00215	0.28390	0.14680
1.600	-6.83632	2.51009	-0.15676	-1.33260	0.05870	5.54539	0.36952	0.18149	-0.00533	-0.00006	0.28440	0.14570

ตาราง ค.1(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Akkar and Bommer, 2010)

Period (s)	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1.700	-6.94600	2.57151	-0.16294	-1.47676	0.07672	6.36599	0.35936	0.17301	-0.01204	-0.00744	0.28400	0.15370
1.800	-7.22818	2.66824	-0.17057	-1.54273	0.08325	7.11603	0.34775	0.16743	-0.01402	-0.01492	0.28340	0.15820
1.900	-7.35522	2.67749	-0.16934	-1.46988	0.07065	7.25988	0.34142	0.16325	-0.01563	-0.00703	0.28260	0.16110
2.000	-7.50404	2.71004	-0.17130	-1.44395	0.06602	7.26059	0.33298	0.15839	-0.02258	-0.00486	0.28350	0.16570
2.100	-7.53463	2.71709	-0.17221	-1.46662	0.06940	7.46168	0.32645	0.15337	-0.02920	-0.00871	0.28320	0.16630
2.200	-8.09168	2.91159	-0.18920	-1.55644	0.08428	7.77062	0.31354	0.14430	-0.00399	-0.01927	0.28300	0.16270
2.300	-8.16272	2.93325	-0.19155	-1.60461	0.09284	7.91753	0.30826	0.14412	-0.04238	-0.02626	0.28290	0.16330
2.400	-7.96679	2.85363	-0.18561	-1.57833	0.09288	7.59643	0.31801	0.14301	-0.04910	-0.02570	0.28260	0.16450
2.500	-7.88403	2.81817	-0.18320	-1.60381	0.09887	7.53947	0.31104	0.14332	-0.04710	-0.02769	0.28180	0.16810
2.600	-7.72574	2.82043	-0.18717	-1.88782	0.14049	8.12248	0.31122	0.14255	-0.05106	-0.02966	0.28380	0.17410
2.700	-7.41587	2.69012	-0.17632	-1.87041	0.14283	7.49999	0.30688	0.14074	-0.00489	-0.02963	0.28540	0.17720
2.800	-7.24561	2.61028	-0.16951	-1.85612	0.14444	7.11861	0.30534	0.13923	-0.04731	-0.02751	0.28670	0.17940
2.900	-6.99332	2.52699	-0.16303	-1.89704	0.15039	7.45038	0.30362	0.13776	-0.04203	-0.02615	0.28740	0.17840
3.000	-6.92924	2.45899	-0.15513	-1.76801	0.13314	7.21950	0.29772	0.13198	-0.03855	-0.02469	0.28760	0.17850

ตาราง ค.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Ambraseys และคณะ, 2005)

Period (s)	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	$\sigma_1$	$\sigma_2$	Nrec	Neq	Nst
PGA	2.522	-0.142	-3.184	0.314	7.6	0.137	0.05	-0.084	0.062	-0.044	0.665-0.065Mw	0.222-0.022Mw	595	135	338
0.05	3.247	-0.225	-3.525	0.359	7.4	0.098	0.005	-0.096	0.078	-0.048	0.708-0.069Mw	0.249-0.024Mw	595	135	338
0.055	3.125	-0.206	-3.418	0.345	7.1	0.085	0.004	-0.096	0.072	-0.050	0.672-0.063Mw	0.235-0.022Mw	595	135	338
0.06	3.202	-0.212	-3.444	0.347	7.4	0.079	0.002	-0.103	0.073	-0.047	0.687-0.065Mw	0.237-0.023Mw	595	135	338
0.065	3.442	-0.242	-3.571	0.365	7.7	0.069	0.001	-0.104	0.076	-0.035	0.693-0.067Mw	0.241-0.023Mw	595	135	338
0.07	3.504	-0.249	-3.576	0.367	7.9	0.064	-0.002	-0.114	0.068	-0.043	0.647-0.059Mw	0.225-0.021Mw	595	135	338
0.075	3.472	-0.240	-3.521	0.358	8	0.064	-0.003	-0.121	0.063	-0.046	0.674-0.063Mw	0.227-0.021Mw	595	135	338
0.08	3.526	-0.248	-3.520	0.358	8.1	0.069	-0.002	-0.116	0.074	-0.040	0.756-0.076Mw	0.252-0.025Mw	595	135	338
0.085	3.32	-0.215	-3.381	0.336	8	0.067	0.01	-0.116	0.075	-0.039	0.750-0.076Mw	0.258-0.026Mw	595	135	338
0.09	3.309	-0.211	-3.353	0.332	7.9	0.064	0.014	-0.119	0.065	-0.048	0.727-0.072Mw	0.249-0.025Mw	595	135	338
0.095	3.479	-0.240	-3.420	0.345	7.8	0.062	0.014	-0.107	0.073	-0.051	0.772-0.079Mw	0.262-0.027Mw	595	135	338
0.1	3.596	-0.258	-3.511	0.36	7.9	0.065	0.025	-0.095	0.076	-0.047	0.747-0.075Mw	0.249-0.025Mw	595	135	338
0.11	3.453	-0.239	-3.398	0.345	7.9	0.077	0.041	-0.082	0.072	-0.052	0.81-0.084Mw	0.256-0.027Mw	595	135	338
0.12	3.33	-0.214	-3.300	0.329	8	0.07	0.045	-0.081	0.065	0.046	0.753-0.075Mw	0.240-0.024Mw	595	135	338
0.13	3.249	-0.195	-3.254	0.321	8.2	0.069	0.043	-0.084	0.056	-0.059	0.712-0.068Mw	0.236-0.023Mw	595	135	338
0.14	2.993	-0.154	-3.088	0.297	8.2	0.065	0.042	-0.074	0.053	-0.067	0.650-0.059Mw	0.218-0.020Mw	595	135	338



ตาราง ค.2 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Ambraseys และคณะ, 2005)

Period (s)	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	$\sigma_1$	$\sigma_2$	Nrec	Neq	Nst
0.15	2.725	-0.111	-2.909	0.27	8.3	0.067	0.044	-0.074	0.067	-0.060	0.634-0.057Mw	0.223-0.020Mw	595	135	338
0.16	2.738	-0.120	-2.912	0.274	8.2	0.085	0.049	-0.069	0.09	0.061	0.734-0.072Mw	0.251-0.025Mw	595	135	338
0.17	2.692	-0.114	-2.907	0.275	8.2	0.091	0.053	-0.059	0.087	-0.055	0.760-0.077Mw	0.257-0.026Mw	595	135	338
0.18	2.665	-0.110	-2.907	0.276	8.1	0.098	0.049	-0.057	0.087	-0.054	0.736-0.073Mw	0.251-0.025Mw	595	135	338
0.19	2.713	-0.118	-2.989	0.288	8.1	0.112	0.059	-0.050	0.09	-0.054	0.752-0.076Mw	0.250-0.025Mw	595	135	338
0.2	2.632	-0.109	-2.990	0.289	8.1	0.124	0.07	-0.033	0.09	-0.039	0.784-0.080Mw	0.251-0.026Mw	595	135	338
0.22	2.483	-0.088	-2.941	0.281	7.9	0.136	0.078	-0.033	0.086	-0.024	0.778-0.079Mw	0.244-0.025Mw	595	135	338
0.24	2.212	-0.051	2.823	0.265	7.6	0.156	0.087	-0.037	0.09	-0.020	0.770-0.077Mw	0.235-0.024Mw	595	135	338
0.26	2.058	-0.036	-2.787	0.263	7.3	0.179	0.077	-0.024	0.12	0.01	0.917-0.101Mw	0.278-0.030Mw	595	135	338
0.28	1.896	-0.010	-2.732	0.251	7.5	0.193	0.074	-0.023	0.112	0.027	0.947-0.104Mw	0.285-0.031Mw	595	135	338
0.3	1.739	0.009	-2.667	0.244	7.1	0.192	0.069	-0.034	0.104	0.012	0.890-0.095Mw	0.267-0.028Mw	595	135	338
0.32	1.728	0.001	-2.688	0.251	7.1	0.207	0.073	-0.021	0.118	0.008	0.917-0.098Mw	0.273-0.029Mw	595	135	338
0.15	2.725	-0.111	-2.909	0.27	8.3	0.067	0.044	-0.074	0.067	-0.060	0.634-0.057Mw	0.223-0.020Mw	595	135	338
0.16	2.738	-0.120	-2.912	0.274	8.2	0.085	0.049	-0.069	0.09	-0.061	0.734-0.072Mw	0.251-0.025Mw	595	135	338
0.17	2.692	-0.114	-2.907	0.275	8.2	0.091	0.053	-0.059	0.087	-0.055	0.760-0.077Mw	0.257-0.026Mw	595	135	338
0.18	2.665	-0.110	-2.907	0.276	8.1	0.098	0.049	-0.057	0.087	-0.054	0.736-0.073Mw	0.251-0.025Mw	595	135	338

ตาราง ค.2 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Ambraseys และคณะ, 2005)

Period (s)	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	$\sigma_1$	$\sigma_2$	Nrec	Neq	Nst
0.19	2.713	-0.118	-2.989	0.288	8.1	0.112	0.059	-0.050	0.09	-0.054	0.752-0.076Mw	0.250-0.025Mw	595	135	338
0.2	2.632	-0.109	-2.990	0.289	8.1	0.124	0.07	-0.033	0.09	-0.039	0.784-0.080Mw	0.251-0.026Mw	595	135	338
0.22	2.483	-0.088	-2.941	0.281	7.9	0.136	0.078	-0.033	0.086	-0.024	0.778-0.079Mw	0.244-0.025Mw	595	135	338
0.24	2.212	-0.051	-2.823	0.265	7.6	0.156	0.087	-0.037	0.09	-0.020	0.770-0.077Mw	0.235-0.024Mw	595	135	338
0.26	2.058	-0.036	-2.787	0.263	7.3	0.179	0.077	-0.024	0.12	0.01	0.917-0.101Mw	0.278-0.030Mw	595	135	338
0.28	1.896	-0.010	-2.732	0.251	7.5	0.193	0.074	-0.023	0.112	0.027	0.947-0.104Mw	0.285-0.031Mw	595	135	338
0.3	1.739	0.009	-2.667	0.244	7.1	0.192	0.069	-0.034	0.104	0.012	0.890-0.095Mw	0.267-0.028Mw	595	135	338
0.32	1.728	0.001	-2.688	0.251	7.1	0.207	0.073	-0.021	0.118	0.008	0.917-0.098Mw	0.273-0.029Mw	595	135	338
0.34	1.598	0.02	-2.667	0.246	7.2	0.216	0.078	-0.010	0.118	0.005	0.896-0.095Mw	0.261-0.028Mw	595	135	338
0.36	1.477	0.034	-2.641	0.244	6.9	0.23	0.091	-0.013	0.107	-0.011	0.846-0.087Mw	0.254-0.026Mw	595	135	338
0.38	1.236	0.071	-2.534	0.227	6.7	0.247	0.1	-0.010	0.106	-0.018	0.803-0.080Mw	0.250-0.025Mw	595	135	338
0.4	1.07	0.091	-2.474	0.219	6.3	0.256	0.097	-0.013	0.115	-0.020	0.793-0.078Mw	0.244-0.024Mw	594	134	338
0.42	0.998	0.096	-2.469	0.22	5.9	0.259	0.1	-0.021	0.116	-0.024	0.757-0.072Mw	0.233-0.022Mw	594	134	338
0.44	1.045	0.085	-2.540	0.231	6.3	0.269	0.114	-0.016	0.114	-0.028	0.787-0.077Mw	0.241-0.024Mw	594	134	338
0.46	0.98	0.093	-2.564	0.234	6.3	0.278	0.122	-0.011	0.108	-0.029	0.766-0.074Mw	0.238-0.023Mw	594	134	338
0.48	0.874	0.103	-2.530	0.231	6.2	0.286	0.13	0.001	0.118	-0.024	0.778-0.076Mw	0.240-0.023Mw	594	134	338

ตาราง ค.2 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Ambraseys และคณะ, 2005)

Period (s)	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	$\sigma_1$	$\sigma_2$	Nrec	Neq	Nst
0.5	0.624	0.139	-2.410	0.212	6.1	0.289	0.133	0.004	0.126	-0.026	0.798-0.079Mw	0.246-0.024Mw	592	134	338
0.55	0.377	0.174	-2.317	0.196	6.1	0.293	0.137	-0.004	0.118	-0.035	0.841-0.085Mw	0.268-0.027Mw	591	134	338
0.6	0.359	0.158	-2.343	0.206	5.4	0.311	0.136	0.008	0.118	-0.028	0.919-0.099Mw	0.308-0.033Mw	590	134	337
0.65	0.13	0.182	-2.294	0.202	5	0.318	0.149	0.005	0.107	-0.031	0.867-0.090Mw	0.301-0.031Mw	588	134	336
0.7	-0.014	0.198	-2.305	0.205	4.8	0.327	0.154	-0.011	0.105	-0.032	0.803-0.080Mw	0.298-0.030Mw	579	132	333
0.75	-0.307	0.236	-2.201	0.191	4.7	0.318	0.148	-0.001	0.114	-0.032	0.774-0.076Mw	0.278-0.027Mw	569	132	329
0.44	1.045	0.085	-2.540	0.231	6.3	0.269	0.114	-0.016	0.114	-0.028	0.787-0.077Mw	0.241-0.024Mw	594	134	338
0.46	0.98	0.093	-2.564	0.234	6.3	0.278	0.122	-0.011	0.108	-0.029	0.766-0.074Mw	0.238-0.023Mw	594	134	338
0.48	0.874	0.103	-2.530	0.231	6.2	0.286	0.13	0.001	0.118	-0.024	0.778-0.076Mw	0.240-0.023Mw	594	134	338
0.5	0.624	0.139	-2.410	0.212	6.1	0.289	0.133	0.004	0.126	-0.026	0.798-0.079Mw	0.246-0.024Mw	592	134	338
0.55	0.377	0.174	-2.317	0.196	6.1	0.293	0.137	-0.004	0.118	-0.035	0.841-0.085Mw	0.268-0.027Mw	591	134	338
0.6	0.359	0.158	-2.343	0.206	5.4	0.311	0.136	0.008	0.118	-0.028	0.919-0.099Mw	0.308-0.033Mw	590	134	337
0.65	0.13	0.182	-2.294	0.202	5	0.318	0.149	0.005	0.107	-0.031	0.867-0.090Mw	0.301-0.031Mw	588	134	336
0.7	-0.014	0.198	-2.305	0.205	4.8	0.327	0.154	-0.011	0.105	-0.032	0.803-0.080Mw	0.298-0.030Mw	579	132	333
0.75	-0.307	0.236	-2.201	0.191	4.7	0.318	0.148	-0.001	0.114	-0.032	0.774-0.076Mw	0.278-0.027Mw	569	132	329
0.8	-0.567	0.279	2.083	0.17	5.2	0.332	0.178	-0.003	0.083	-0.062	0.661-0.059Mw	0.240-0.021Mw	550	128	324

ตาราง ค.2 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Ambraseys และคณะ, 2005)

Period (s)	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	$\sigma_1$	$\sigma_2$	Nrec	Neq	Nst
0.85	-0.519	0.262	-2.177	0.186	4.9	0.341	0.183	0.005	0.085	-0.070	0.694-0.064Mw	0.253-0.023Mw	546	127	321
0.9	-0.485	0.249	-2.246	0.199	4.5	0.354	0.191	-0.003	0.072	-0.082	0.714-0.067Mw	0.263-0.025Mw	533	125	314
0.95	-1.133	0.369	-1.957	0.143	5.5	0.353	0.204	-0.025	0.024	-0.109	0.309	0.121	514	122	305
1	-1.359	0.403	-1.848	0.124	6	0.357	0.211	-0.013	0.024	-0.101	0.305	0.12	490	116	295
1.1	1.675	0.437	-1.711	0.108	5.5	0.373	0.213	-0.029	-0.007	-0.108	0.306	0.118	475	112	290
1.2	-1.982	0.477	-1.636	0.095	5.4	0.389	0.226	-0.014	-0.017	-0.095	0.297	0.12	459	107	284
1.3	-2.226	0.511	-1.605	0.089	5.5	0.395	0.215	-0.004	-0.025	-0.085	0.296	0.119	442	102	275
1.4	-2.419	0.533	-1.541	0.08	6	0.408	0.237	0.028	-0.040	-0.091	0.29	0.115	408	96	263
1.5	-2.639	0.55	-1.443	0.074	4.9	0.405	0.229	0.02	-0.053	-0.133	0.292	0.111	379	90	246
1.6	-2.900	0.587	-1.351	0.06	5.2	0.387	0.216	0.019	-0.056	-0.131	0.296	0.114	358	87	239
1.7	-2.695	0.564	-1.564	0.086	6.5	0.38	0.212	0.001	-0.081	-0.141	0.302	0.117	358	87	239
1.8	-3.209	0.63	-1.410	0.069	5.4	0.391	0.174	0.012	-0.035	-0.154	0.291	0.128	319	81	217
1.9	-3.313	0.647	-1.424	0.067	5.9	0.386	0.175	0.03	-0.033	-0.145	0.29	0.133	319	81	217
2	-3.063	0.586	-1.372	0.07	4.2	0.421	0.177	0.008	-0.019	-0.174	0.282	0.134	260	72	185
2.1	-3.043	0.578	-1.435	0.08	4.3	0.404	0.171	0.002	-0.026	-0.164	0.281	0.134	260	72	185
2.2	-3.068	0.575	-1.448	0.083	4.2	0.394	0.16	-0.007	-0.034	-0.169	0.283	0.136	260	72	185

ตาราง ค.2 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Ambraseys และคณะ, 2005)

Period (s)	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	$\sigma_1$	$\sigma_2$	Nrec	Neq	Nst
2.3	-3.996	0.74	-0.829	-0.025	5.1	0.349	0.135	-0.010	-0.031	-0.125	0.282	0.137	208	59	146
2.4	-4.108	0.758	-0.755	-0.038	5.3	0.338	0.119	-0.024	-0.050	-0.147	0.284	0.137	208	59	146
2.5	-4.203	0.768	-0.714	-0.044	5.1	0.325	0.103	-0.026	-0.063	-0.155	0.285	0.137	207	59	145

ตาราง ค.3ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Atkinson and Boore, 2003)

Freq	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	$\sigma$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
Coefficients for Interface Events										
0.33	2.301	0.02237	0.00012	0	0.1	0.25	0.36	0.36	0.31	0.18
0.5	2.1907	0.07148	0.00224	0	0.1	0.25	0.4	0.34	0.29	0.18
1	2.1442	0.1345	0.00521	-0.0011	0.1	0.3	0.55	0.34	0.28	0.19
2.5	2.5249	0.1477	0.00728	-0.00235	0.13	0.37	0.38	0.29	0.25	0.15
5	2.6638	0.12386	0.00884	-0.0028	0.15	0.27	0.25	0.28	0.25	0.13
10	2.7789	0.09841	0.00974	-0.00287	0.15	0.23	0.2	0.27	0.25	0.1
25	2.8753	0.07052	0.01004	-0.00278	0.15	0.2	0.2	0.26	0.22	0.14
PGA	2.991	0.03525	0.00759	-0.00206	0.19	0.24	0.29	0.23	0.2	0.11
Coefficients for In-Slab Events										
0.33	-3.70012	1.1169	0.00615	-0.00045	0.1	0.25	0.36	0.3	0.29	0.08
0.5	-2.39234	0.9964	0.00364	-0.00118	0.1	0.25	0.4	0.3	0.28	0.11
1	-1.02133	0.8789	0.0013	-0.00173	0.1	0.3	0.55	0.29	0.27	0.11

ตาราง ค.3(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Atkinson and Boore, 2003)

Freq	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	$\sigma$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
Coefficients for In-Slab Events										
2.5	0.005445	0.7727	0.00173	-0.00178	0.13	0.37	0.38	0.28	0.26	0.1
5	0.51589	0.69186	0.00572	-0.00192	0.15	0.27	0.25	0.28	0.26	0.1
10	0.43928	0.66675	0.0108	-0.00219	0.15	0.23	0.2	0.28	0.27	0.07
25	0.50697	0.63273	0.01275	-0.00234	0.15	0.2	0.2	0.25	0.24	0.07
PGA	-0.04713	0.6909	0.0113	-0.00202	0.19	0.24	0.29	0.27	0.23	0.14

ตาราง ค.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Campbell and Bozorgnia, 2003)

T (sec)	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12	c13	c14	c15	c16	c17	NO.	r2
Average Horizontal Component																			
Unc. PGA	-2.896	0.812	0	-1.318	0.187	-0.029	-0.064	0.616	0	0.179	0.307	-0.062	-0.195	-0.32	0.37	0.964	0.263	960	0.955
Cor. PGA	-4.033	0.812	0.036	-1.061	0.041	-0.005	-0.018	0.766	0.034	0.343	0.351	-0.123	-0.138	-0.289	0.37	0.92	0.219	443	0.949
0.05	-3.74	0.812	0.036	-1.121	0.058	-0.004	-0.028	0.724	0.032	0.302	0.362	-0.14	-0.158	-0.205	0.37	0.94	0.239	435	0.94
0.075	-3.076	0.812	0.05	-1.252	0.121	-0.005	-0.051	0.648	0.04	0.243	0.333	-0.15	-0.196	-0.208	0.37	0.952	0.251	439	0.923
0.1	-2.661	0.812	0.06	-1.308	0.166	-0.009	-0.068	0.621	0.046	0.224	0.313	-0.146	-0.253	-0.258	0.37	0.958	0.257	439	0.901
0.15	-2.27	0.812	0.041	-1.324	0.212	-0.033	-0.081	0.613	0.031	0.318	0.344	-0.176	-0.267	-0.284	0.37	0.974	0.273	439	0.862
0.2	-2.771	0.812	0.03	-1.153	0.098	-0.014	-0.038	0.704	0.026	0.296	0.342	-0.148	-0.183	-0.359	0.37	0.981	0.28	439	0.844
0.3	-2.999	0.812	0.007	-1.08	0.059	-0.007	-0.022	0.752	0.007	0.359	0.385	-0.162	-0.157	-0.585	0.37	0.984	0.283	439	0.859
0.4	-3.511	0.812	-0.015	-0.964	0.024	-0.002	-0.005	0.842	-0.016	0.379	0.438	-0.078	-0.129	-0.557	0.37	0.987	0.286	439	0.871
0.5	-3.556	0.812	-0.035	-0.964	0.023	-0.002	-0.004	0.842	-0.036	0.406	0.479	-0.122	-0.13	-0.701	0.37	0.99	0.289	439	0.89
0.75	-3.709	0.812	-0.071	-0.964	0.021	-0.002	-0.002	0.842	-0.074	0.347	0.419	-0.108	-0.124	-0.796	0.331	1.021	0.32	438	0.917



ตาราง ค.4 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Campbell and Bozorgnia, 2003)

T (sec)	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12	c13	c14	c15	c16	c17	NO.	r2
Average Horizontal Component																			
1	-3.867	0.812	-0.101	-0.964	0.019	0	0	0.842	-0.105	0.329	0.338	-0.073	-0.072	-0.858	0.281	1.021	0.32	438	0.935
1.5	-4.093	0.812	-0.15	-0.964	0.019	0	0	0.842	-0.155	0.217	0.188	-0.079	-0.056	-0.954	0.21	1.021	0.32	428	0.96
2	-4.311	0.812	-0.18	-0.964	0.019	0	0	0.842	-0.187	0.06	0.064	-0.124	-0.116	-0.916	0.16	1.021	0.32	405	0.971
3	-4.817	0.812	-0.193	-0.964	0.019	0	0	0.842	-0.2	-0.079	0.021	-0.154	-0.117	-0.873	0.089	1.021	0.32	333	0.976
4	-5.211	0.812	-0.202	-0.964	0.019	0	0	0.842	-0.209	-0.061	0.057	-0.054	-0.261	-0.889	0.039	1.021	0.32	275	0.978

ตาราง ค.5ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Idriss, 2008)

For Mw < 6.75					For Mw ≥ 6.75					γ	□	Mw = 7.5		Mw = 5.0	
Period (sec)	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	β <sub>1</sub>	β <sub>2</sub>	Period (sec)	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	β <sub>1</sub>	β <sub>2</sub>			SE Term_min	Value	SE Term_max	Value
0.01	3.7066	-0.1252	2.9832	-0.2339	0.01	5.6315	-0.4104	2.9832	-0.2339	0.00047	0.12	0.53	1.699	0.73	2.076
0.02	3.7066	-0.1252	2.9832	-0.2339	0.02	5.6315	-0.4104	2.9832	-0.2339	0.00047	0.12	0.53	1.699	0.73	2.076
0.03	3.7566	-0.1252	2.9832	-0.2339	0.03	5.6815	-0.4104	2.9832	-0.2339	0.00047	0.12	0.53	1.699	0.73	2.076
0.04	3.8066	-0.1252	2.9832	-0.2339	0.04	5.7315	-0.4104	2.9832	-0.2339	0.00047	0.12	0.53	1.699	0.73	2.076
0.05	3.9507	-0.1626	2.8658	-0.2239	0.05	5.2853	-0.3293	2.5018	-0.1688	-0.00135	0.12	0.53	1.699	0.73	2.076
0.06	3.905	-0.1432	2.8622	-0.2243	0.06	5.284	-0.3177	2.49	-0.1683	-0.00178	0.12	0.54	1.715	0.54	1.715
0.07	3.868	-0.1254	2.8589	-0.2247	0.07	5.2879	-0.3071	2.4793	-0.1679	-0.00208	0.12	0.55	1.728	0.75	2.111
0.075	3.8456	-0.1171	2.8574	-0.2249	0.075	5.2848	-0.3021	2.4742	-0.1676	-0.00217	0.12	0.55	1.734	0.75	2.118
0.08	3.8265	-0.109	2.8559	-0.2251	0.08	5.2844	-0.2973	2.4693	-0.1674	-0.00232	0.12	0.55	1.74	0.75	2.125
0.09	3.7849	-0.0937	2.853	-0.2254	0.09	5.2784	-0.2882	2.4599	-0.167	-0.0025	0.12	0.56	1.75	0.76	2.137
0.1	3.7461	-0.0792	2.8503	-0.2257	0.1	5.2733	-0.2796	2.4511	-0.1666	-0.00268	0.12	0.56	1.759	0.76	2.149
0.12	3.6556	-0.0526	2.8453	-0.2263	0.12	5.2453	-0.2637	2.4348	-0.1659	-0.00263	0.12	0.57	1.775	0.77	2.168

ตาราง ค.5(ต่อ)ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Idriss, 2008)

For Mw < 6.75					For Mw ≥ 6.75					γ	□	Mw = 7.5		Mw = 5.0	
Period (sec)	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	β <sub>1</sub>	β <sub>2</sub>	Period (sec)	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	β <sub>1</sub>	β <sub>2</sub>			SE Term_min	Value	SE Term_max	Value
0.15	3.4911	-0.0169	2.8386	-0.2271	0.15	5.1652	-0.2424	2.413	-0.1649	-0.00237	0.12	0.59	1.795	0.79	2.193
0.17	3.3521	0.0048	2.8345	-0.2276	0.17	5.0777	-0.2295	2.3998	-0.1643	-0.0021	0.12	0.59	1.807	0.79	2.206
0.2	3.1226	0.0346	2.8288	-0.2282	0.2	4.9199	-0.2116	2.3814	-0.1635	-0.0014	0.12	0.6	1.821	0.8	2.224
0.25	2.7514	0.0791	2.8203	-0.2292	0.25	4.6567	-0.185	2.354	-0.1623	-0.0007	0.12	0.61	1.842	0.81	2.249
0.3	2.3754	0.1187	2.8126	-0.2301	0.3	4.3778	-0.1614	2.3296	-0.1612	0.00034	0.12	0.62	1.859	0.82	2.27
0.35	2.0132	0.1545	2.8056	-0.2309	0.35	4.1044	-0.1399	2.3074	-0.1602	0.00088	0.12	0.63	1.873	0.83	2.288
0.4	1.6847	0.1873	2.7992	-0.2317	0.4	3.8582	-0.1202	2.2869	-0.1593	0.00106	0.12	0.63	1.885	0.83	2.303
0.45	1.3678	0.2177	2.7932	-0.2324	0.45	3.6181	-0.102	2.2679	-0.1584	0.00117	0.12	0.64	1.897	0.84	2.317
0.5	1.0651	0.2461	2.7876	-0.233	0.5	3.3877	-0.0849	2.2502	-0.1577	0.0013	0.12	0.65	1.907	0.85	2.329
0.6	0.4848	0.2979	2.7772	-0.2342	0.6	2.9407	-0.0538	2.2176	-0.1562	0.00175	0.12	0.65	1.924	0.85	2.35
0.7	-0.0205	0.3443	2.7677	-0.2353	0.7	2.5567	-0.0258	2.1883	-0.1549	0.00186	0.12	0.66	1.939	0.86	2.368
0.75	-0.2478	0.366	2.7633	-0.2358	0.75	2.3864	-0.0128	2.1746	-0.1543	0.00175	0.12	0.67	1.946	0.87	2.376

ตาราง ค.5(ต่อ)ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Idriss, 2008)

For Mw < 6.75					For Mw ≥ 6.75					γ	□	Mw = 7.5		Mw = 5.0	
Period (sec)	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	β <sub>1</sub>	β <sub>2</sub>	Period (sec)	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	β <sub>1</sub>	β <sub>2</sub>			SE Term_min	Value	SE Term_max	Value
0.8	-0.4629	0.3866	2.759	-0.2363	0.8	2.226	-0.0003	2.1614	-0.1537	0.00165	0.12	0.67	1.952	0.87	2.384
0.9	-0.8769	0.4255	2.751	-0.2373	0.9	1.9156	0.0232	2.1366	-0.1525	0.0018	0.11	0.67	1.964	0.87	2.398
1	-1.2882	0.4615	2.7434	-0.2381	1	1.6014	0.045	2.1135	-0.1515	0.00206	0.1	0.68	1.974	0.88	2.411
1.5	-2.999	0.6103	2.7112	-0.2418	1.5	0.301	0.1354	2.0167	-0.1471	0.00272	0.06	0.7	2.014	0.9	2.46
2	-4.3588	0.7246	2.6851	-0.2447	2	-0.733	0.2054	1.9406	-0.1436	0.00278	0.04	0.71	2.043	0.91	2.496
3	-6.3139	0.8935	2.6437	-0.2493	3	-2.193	0.3099	1.824	-0.1382	0.00056	0	0.73	2.085	0.935	2.547
4	-7.8169	1.0137	2.611	-0.2529	4	-3.336	0.3855	1.7366	-0.1341	-0.0021	0	0.73	2.085	0.93	2.547
5	-8.987	1.1027	2.5839	-0.2558	5	-4.24	0.4427	1.6679	-0.1308	-0.004	0	0.73	2.085	0.93	2.547
6	-9.919	1.1696	2.5607	-0.2582	6	-4.979	0.4868	1.6124	-0.1281	-0.005	0	0.73	2.085	0.93	2.547
7	-10.66	1.2197	2.5406	-0.2603	7	-5.584	0.5209	1.5669	-0.1258	-0.0057	0	0.73	2.085	0.93	2.547
8	-11.284	1.2566	2.5228	-0.2621	8	-6.1196	0.5471	1.5294	-0.1239	-0.0059	0	0.73	2.085	0.93	2.547
9	-11.794	1.2826	2.507	-0.2636	9	-6.5845	0.5669	1.4984	-0.1223	-0.006	0	0.73	2.085	0.93	2.547
10	-12.215	1.2995	2.4928	-0.265	10	-6.9979	0.5814	1.4728	-0.1209	-0.0062	0	0.735	2.085	0.93	2.547

ตาราง ค.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Kanno และคณะ, 2006)

Period (s)	a1	b1	c1	d1	$\epsilon_1$	a2	b2	c2	$\epsilon_2$	p	q
PGA	0.56	-0.0031	0.26	0.0055	0.37	0.41	-0.0039	1.56	0.4	-0.55	1.35
0.05	0.54	-0.0035	0.48	0.0061	0.37	0.39	-0.004	1.76	0.42	-0.32	0.8
0.06	0.54	-0.0037	0.57	0.0065	0.38	0.39	-0.0041	1.86	0.43	-0.26	0.65
0.07	0.53	-0.0039	0.67	0.0066	0.38	0.38	-0.0042	1.96	0.45	-0.24	0.6
0.08	0.52	-0.004	0.75	0.0069	0.39	0.38	-0.0042	2.03	0.45	-0.26	0.64
0.09	0.52	-0.0041	0.8	0.0071	0.4	0.38	-0.0043	2.08	0.46	-0.29	0.72
0.1	0.52	-0.0041	0.85	0.0073	0.4	0.38	-0.0043	2.12	0.46	-0.32	0.78
0.11	0.5	-0.004	0.96	0.0061	0.4	0.38	-0.0044	2.14	0.46	-0.35	0.84
0.12	0.51	-0.004	0.93	0.0062	0.4	0.38	-0.0044	2.14	0.46	-0.39	0.94
0.13	0.51	-0.0039	0.91	0.0062	0.4	0.38	-0.0044	2.13	0.46	-0.43	1.04
0.15	0.52	-0.0038	0.89	0.006	0.41	0.39	-0.0044	2.12	0.46	-0.53	1.28
0.17	0.53	-0.0037	0.84	0.0056	0.41	0.4	-0.0043	2.08	0.45	-0.61	1.47
0.2	0.54	-0.0034	0.76	0.0053	0.4	0.4	-0.0042	2.02	0.44	-0.68	1.65
0.22	0.54	-0.0032	0.73	0.0048	0.4	0.4	-0.0041	1.99	0.43	-0.72	1.74

ตาราง ค.6 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Kanno และคณะ, 2006)

Period (s)	a1	b1	c1	d1	$\epsilon_1$	a2	b2	c2	$\epsilon_2$	p	q
0.25	0.54	-0.0029	0.66	0.0044	0.4	0.41	-0.004	1.88	0.42	-0.75	1.82
0.3	0.56	-0.0026	0.51	0.0039	0.39	0.43	-0.0038	1.75	0.42	-0.8	1.96
0.35	0.56	-0.0024	0.42	0.0036	0.4	0.43	-0.0036	1.62	0.41	-0.85	2.09
0.4	0.58	-0.0021	0.26	0.0033	0.4	0.45	-0.0034	1.49	0.41	-0.87	2.13
0.45	0.59	-0.0019	0.13	0.003	0.41	0.46	-0.0032	1.33	0.41	-0.89	2.18
0.5	0.59	-0.0016	0.04	0.0022	0.41	0.47	-0.003	1.19	0.4	-0.91	2.25
0.6	0.62	-0.0014	-0.22	0.0025	0.41	0.49	-0.0028	0.95	0.4	-0.92	2.3
0.7	0.63	-0.0012	-0.37	0.0022	0.41	0.51	-0.0026	0.72	0.4	-0.96	2.41
0.8	0.65	-0.0011	-0.54	0.002	0.41	0.53	-0.0025	0.49	0.4	-0.98	2.46
0.9	0.68	-0.0009	-0.8	0.0019	0.41	0.56	-0.0023	0.27	0.4	-0.97	2.44
1	0.71	-0.0009	-1.04	0.0021	0.41	0.57	-0.0022	0.08	0.41	-0.93	2.32
1.1	0.72	-0.0007	-1.19	0.0018	0.41	0.59	-0.0022	-0.08	0.41	-0.92	2.3
1.2	0.73	-0.0006	-1.32	0.0014	0.41	0.6	-0.0021	-0.24	0.41	-0.91	2.26

ตาราง ค.6 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอน (Kanno และคณะ, 2006)

Period (s)	a1	b1	c1	d1	$\epsilon_1$	a2	b2	c2	$\epsilon_2$	p	q
1.3	0.74	-0.0006	-1.44	0.0014	0.41	0.62	-0.002	-0.4	0.41	-0.88	2.2
1.5	0.77	-0.0005	-1.7	0.0017	0.4	0.64	-0.002	-0.63	0.41	-0.85	2.12
1.7	0.79	-0.0005	-1.89	0.0019	0.39	0.66	-0.0018	-0.83	0.4	-0.83	2.06
2	0.8	-0.0004	-2.08	0.002	0.39	0.68	-0.0017	-1.12	0.4	-0.78	1.92
2.2	0.82	-0.0004	-2.24	0.0022	0.38	0.69	-0.0017	-1.27	0.4	-0.76	1.88
2.5	0.84	-0.0003	-2.46	0.0023	0.38	0.71	-0.0017	-1.48	0.39	-0.72	1.8
3	0.86	-0.0002	-2.72	0.0021	0.38	0.73	-0.0017	-1.72	0.39	-0.68	1.7
3.5	0.9	-0.0003	-2.99	0.0032	0.37	0.75	-0.0017	-1.97	0.38	-0.66	1.64
4	0.92	-0.0005	-3.21	0.0045	0.38	0.77	-0.0016	-2.22	0.37	-0.62	1.54
4.5	0.94	-0.0007	-3.39	0.0064	0.38	0.79	-0.0016	-2.45	0.36	-0.6	1.5
5	0.92	-0.0004	-3.35	0.003	0.38	0.82	-0.0017	-2.7	0.35	-0.59	1.46
PGV	0.7	-0.0009	-1.93	0.0022	0.32	0.55	-0.0032	-0.57	0.36	-0.71	1.77

ตาราง ค.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งหิน (Lin และ Lee, 2008)

Period (s)	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	$\sigma_{lny}$
PGA	-2.500	1.205	-1.905	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5268
0.01	-2.500	1.205	-1.895	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5218
0.02	-2.490	1.2	-1.880	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5189
0.03	-2.280	1.155	-1.875	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5235
0.04	-2.000	1.1	-1.860	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5352
0.05	-1.900	1.09	-1.855	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.537
0.06	-1.725	1.065	-1.840	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5544
0.09	-1.265	1.02	-1.815	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5818
0.1	-1.220	1	-1.795	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5806
0.12	-1.470	1.04	-1.770	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5748
0.15	-1.675	1.045	-1.730	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5817
0.17	-1.846	1.065	-1.710	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.5906
0.2	-2.170	1.085	-1.675	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.6059
0.24	-2.585	1.105	-1.630	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.6315
0.3	-3.615	1.215	-1.570	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.6656
0.36	-4.160	1.255	-1.535	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.701
0.4	-4.595	1.285	-1.500	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7105
0.46	-5.020	1.325	-1.495	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7148
0.5	-5.470	1.365	-1.465	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7145
0.6	-6.095	1.42	-1.455	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7177
0.75	-6.675	1.465	-1.450	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7689
0.85	-7.320	1.545	-1.450	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7787
1	-8.000	1.62	-1.450	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7983
1.5	-9.240	1.705	-1.440	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.8411



ตาราง ค.7(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ต้งหิน (Lin และ Lee, 2008)

Period (s)	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	$\sigma_{Iny}$
2	-10.200	1.77	-1.430	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.8766
3	-11.470	1.83	-1.370	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.859
4	-12.550	1.845	-1.260	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.8055
5	-13.390	1.805	-1.135	0.51552	0.63255	0.0075	0.275	0.7654

ตาราง ค.8 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ต้งดิน (Lin และ Lee, 2008)

Period (s)	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	$\sigma_{Iny}$
PGA	-0.900	1	-1.900	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6277
0.01	-2.200	1.085	-1.750	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.58
0.02	-2.290	1.085	-1.730	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.573
0.03	-2.340	1.095	-1.720	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.5774
0.04	-2.215	1.09	-1.730	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.5808
0.05	-1.895	1.055	-1.755	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.5937
0.06	-1.110	1.01	-1.835	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6123
0.09	-0.210	0.945	-1.890	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6481
0.1	-0.055	0.92	-1.880	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6535
0.12	-0.055	0.935	-1.895	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6585
0.15	-0.040	0.955	-1.880	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6595
0.17	-0.340	1.02	-1.885	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.668
0.2	-0.800	1.045	-1.820	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6565
0.24	-1.575	1.12	-1.755	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6465
0.3	-3.010	1.315	-1.695	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6661
0.36	-3.680	1.38	-1.660	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.6876
0.4	-4.250	1.415	-1.600	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7002
0.46	-4.720	1.43	-1.545	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7092

ตาราง ค.8(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งดิน (Lin และ Lee, 2008)

Period (s)	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	$\sigma_{lny}$
0.5	-5.550	1.455	-1.490	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7122
0.6	-5.700	1.47	-1.445	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.728
0.75	-6.450	1.5	-1.380	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7752
0.85	-7.250	1.565	-1.325	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7931
1	-8.150	1.605	-1.235	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.8158
1.5	-10.300	1.8	-1.165	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.8356
2	-11.620	1.86	-1.070	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.8474
3	-12.630	1.89	-1.060	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.8367
4	-13.420	1.87	-0.990	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7937
5	-13.750	1.835	-0.975	0.99178	0.52632	0.004	0.31	0.7468



ตาราง ค.9 (ต่อ)ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ต้งดิน (Mcverry และคณะ, 2006)

T(s)	0.000	0.000	0.075	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.750	1.000	1.500	2.000	3.000
20	0.01545	0.01590	0.01821	0.01737	0.01531	0.01304	0.01426	0.01277	0.01055	0.00927	0.00748	0.00748	-0.00273
24	-0.49963	-0.43223	-0.52504	-0.61452	-0.65966	-0.56604	-0.33169	-0.24374	-0.01583	0.02009	-0.07051	-0.07051	-0.23967
29	0.27315	0.38730	0.27879	0.28619	0.34064	0.53213	0.63272	0.58809	0.50708	0.33002	0.07445	0.07445	0.09869
30	-0.23000	-0.23000	-0.28000	-0.28000	-0.24500	-0.19500	-0.16000	-0.12100	-0.05000	0.00000	0.04000	0.04000	0.04000
32	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000
33	0.26000	0.26000	0.26000	0.26000	0.26000	0.19800	0.15400	0.11900	0.05700	0.01300	-0.04900	-0.04900	-0.15600
43	-0.33716	-0.31036	-0.49068	-0.46604	-0.31282	-0.07565	0.17615	0.34775	0.72380	0.89239	0.77743	0.77743	0.60938
46	-0.03255	-0.03250	-0.03441	-0.03594	-0.03823	-0.03535	-0.03354	-0.03211	-0.02857	-0.02500	-0.02008	-0.02008	-0.01587
SigmaM6	0.48710	0.50990	0.52970	0.54010	0.55990	0.54560	0.55560	0.56580	0.56110	0.55730	0.54190	0.54190	0.58090
Sigslope	-0.10110	-0.02590	-0.07030	-0.02920	0.01720	-0.05660	-0.10640	-0.11230	-0.08360	-0.06200	0.03850	0.03850	0.14030
Tau	0.26770	0.24690	0.31390	0.30170	0.25830	0.19670	0.18020	0.14400	0.18710	0.20730	0.24050	0.24050	0.20530
SigtotM6	0.55580	0.56660	0.61570	0.61870	0.61660	0.58000	0.58400	0.58390	0.59150	0.59460	0.59290	0.59290	0.61610

ตาราง ค.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งหิน (Sadigh และคณะ, 1997)

Period (sec)	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
$M_w \leq 6.5$							
0	-0.624	1.0	0.000	-2.100	1.29649	0.25	0.000
0.07	0.110	1.0	0.006	-2.128	1.29649	0.25	-0.082
0.1	0.275	1.0	-0.006	-2.148	1.29649	0.25	-0.041
0.2	0.153	1.0	-0.004	-2.080	1.29649	0.25	0.000
0.3	-0.057	1.0	-0.017	-2.028	1.29649	0.25	0.000
0.4	-0.298	1.0	-0.028	-1.990	1.29649	0.25	0.000
0.5	-0.588	1.0	-0.400	-1.945	1.29649	0.25	0.000
0.75	-1.208	1.0	-0.050	-1.865	1.29649	0.25	0.000
1	-1.705	1.0	-0.055	-1.800	1.29649	0.25	0.000
1.5	-2.407	1.0	-0.065	-1.725	1.29649	0.25	0.000
2	-2.945	1.0	-0.070	-1.670	1.29649	0.25	0.000
3	-3.700	1.0	-0.080	-1.610	1.29649	0.25	0.000
4	-4.230	1.0	-0.100	-1.570	1.29649	0.25	0.000
$M_w > 6.5$							
0	-1.274	1.1	0.000	-2.100	-0.48451	0.524	0.000
0.07	-0.540	1.1	0.006	-2.128	-0.48451	0.524	-0.082
0.1	-0.375	1.1	0.006	-2.148	-0.48451	0.524	-0.041
0.2	-0.497	1.1	-0.004	-2.080	-0.48451	0.524	0.000
0.3	-0.707	1.1	-0.002	-2.028	-0.48451	0.524	0.000
0.4	-0.948	1.1	-0.003	-1.990	-0.48451	0.524	0.000
0.5	-1.238	1.1	0.040	-1.945	-0.48451	0.524	0.000
0.75	-1.858	1.1	-0.050	-1.865	-0.48451	0.524	0.000

ตาราง ค.10(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งหิน (Sadigh และคณะ, 1997)

Period (sec)	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
Mw > 6.5							
1	-2.355	1.1	-0.055	-1.800	-0.48451	0.524	0.000
1.5	-3.057	1.1	-0.065	-1.725	-0.48451	0.524	0.000
2	-3.595	1.1	-0.070	-1.670	-0.48451	0.524	0.000
3	-4.350	1.1	-0.080	-1.610	-0.48451	0.524	0.000
4	-4.880	1.1	-0.100	-1.570	-0.48451	0.524	0.000

หมายเหตุ: ค่าสัมประสิทธิ์ในตารางใช้สำหรับเหตุการณ์เลื่อนตามแนวระดับ (strike slip event) เท่านั้นสำหรับการคำนวณค่าความเร่งเทียบของเหตุการณ์เลื่อนย้อน (reverse/thrust events) ให้คูณค่าสัมประสิทธิ์ในตารางด้วยตัวประกอบ 1.2

ตาราง ค.11 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับพจน์คาดเคลื่อนมาตรฐาน (Sadigh และคณะ, 1997)

Period (sec)	Standard Error Term	Minimum Value for $M \geq 7.21$
PGA	1.39 - 0.14Mw	0.38
0.07	1.40 - 0.14Mw	0.39
0.1	1.41 - 0.14Mw	0.4
0.2	1.43 - 0.14Mw	0.42
0.3	1.45 - 0.14Mw	0.44
0.4	1.48 - 0.14Mw	0.47
0.5	1.50 - 0.14Mw	0.49
0.75	1.52 - 0.14Mw	0.51
$\geq 1.00$	1.53 - 0.14Mw	0.52

ตาราง ค.12 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ตั้งดิน (Sadigh และคณะ, 1997)

Period (sec)	c1 ss	c1 rv	c2	c3	c4	c5	c4	c5	c6 ss	c6 rv	c7
					M≤6.5	M≤6.5	M>6.5	M>6.5			
0	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.0000	0.0000	0.000
0.075	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.4572	0.4572	0.005
0.1	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.6395	0.6395	0.005
0.2	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.9187	0.9187	-0.004
0.3	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.9547	0.9547	-0.014
0.4	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.9251	0.9005	-0.024
0.5	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.8494	0.8285	-0.033
0.75	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.7010	0.6802	-0.051
1	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.5665	0.5075	-0.065
1.5	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.3235	0.2215	-0.090
2	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	0.1001	-0.0526	-0.108
3	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	-0.2801	-0.4905	-0.139
4	-2.17	-1.92	1	1.7	2.1863	0.32	0.3825	0.5882	-0.6274	-0.8907	-0.160

ตาราง ค.13 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ (Youngs และคณะ, 1997)

Period (sec)	C1	C2	C3	C4*	C5*
For Rock					
PGA	0	0	-2.552	1.45	-0.1
0.075	1.275	0	-2.707	1.45	-0.1
0.1	1.188	-0.0011	-2.655	1.45	-0.1
0.2	0.722	-0.0027	-2.528	1.45	-0.1
0.3	0.246	-0.0036	-2.454	1.45	-0.1
0.4	-0.115	-0.0043	-2.401	1.45	-0.1
0.5	-0.4	-0.0048	-2.36	1.45	-0.1
0.75	-1.149	-0.0057	-2.286	1.45	-0.1
1	-1.736	-0.0064	-2.234	1.45	-0.1
1.5	-2.634	-0.0073	-2.16	1.5	-0.1
2	-3.328	-0.008	-2.107	1.55	-0.1
3	-4.511	-0.0089	-2.033	1.65	-0.1
For Soil					
PGA	0	0	-2.329	1.45	-0.1
0.075	2.4	-0.0019	-2.697	1.45	-0.1
0.1	2.516	-0.0019	-2.697	1.45	-0.1
0.2	1.549	-0.0019	-2.464	1.45	-0.1
0.3	0.793	-0.002	-2.327	1.45	-0.1
0.4	0.144	-0.002	-2.23	1.45	-0.1
0.5	-0.438	-0.0035	-2.14	1.45	-0.1



ตาราง ค.13(ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ (Youngs และคณะ, 1997)

Period (sec)	C1	C2	C3	C4*	C5*
For Soil					
0.75	-1.704	-0.0048	-1.952	1.45	-0.1
1	-2.87	-0.0066	-1.785	1.45	-0.1
1.5	-5.101	-0.0114	-1.47	1.5	-0.1
2	-6.433	-0.0164	-1.29	1.55	-0.1
3	-6.672	-0.0221	-1.347	1.65	-0.1
4	-0.7618	-0.0235	-1.272	1.65	-0.1

\* ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของเหตุการณ์ที่มีขนาดโมเมนต์ ( $M_w$ ) มากกว่า 8.0 ให้กำหนดขนาดโมเมนต์ ( $M_w$ ) เท่ากับ 8.0

ตาราง ค.14ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ (Zhao และคณะ, 2006)

Period (sec)	a	b	c	d	e	SR	SI	SS	SSL
PGA	1.101	-0.00564	0.0055	1.080	0.01412	0.251	0.000	2.607	-0.528
0.05	1.076	-0.00671	0.0075	1.060	0.01463	0.251	0.000	2.764	-0.551
0.1	1.118	-0.00787	0.0090	1.083	0.01423	0.240	0.000	2.156	-0.420
0.15	1.134	-0.00722	0.0100	1.053	0.01509	0.251	0.000	2.161	-0.431
0.2	1.147	-0.00659	0.0120	1.014	0.01462	0.260	0.000	1.901	-0.372
0.25	1.149	-0.00590	0.0140	0.966	0.01459	0.269	0.000	1.814	-0.360
0.3	1.163	-0.00520	0.0150	0.934	0.01458	0.259	0.000	2.181	-0.450
0.4	1.200	-0.00422	0.0100	0.959	0.01257	0.248	-0.041	2.432	-0.506
0.5	1.250	-0.00338	0.0060	1.008	0.01114	0.247	-0.053	2.629	-0.554
0.6	1.293	-0.00282	0.0030	1.088	0.01019	0.233	-0.103	2.702	-0.575
0.7	1.336	-0.00258	0.0025	1.084	0.00979	0.220	-0.146	2.654	-0.572
0.8	1.386	-0.00242	0.0022	1.088	0.00944	0.232	-0.164	2.480	-0.540
0.9	1.433	-0.00232	0.0020	1.109	0.00972	0.220	-0.206	2.332	-0.522
1	1.479	-0.00220	0.0020	1.115	0.01005	0.211	-0.239	2.233	-0.509
1.25	1.551	-0.00207	0.0020	1.083	0.01003	0.251	-0.256	2.029	-0.469
1.5	1.621	-0.00224	0.0020	1.091	0.00928	0.248	-0.306	1.589	-0.379
2	1.694	-0.00201	0.0025	1.055	0.00833	0.263	-0.321	0.966	-0.248
2.5	1.748	-0.00187	0.0028	1.052	0.00776	0.262	-0.337	0.789	-0.221
3	1.759	-0.00147	0.0032	1.025	0.00644	0.307	-0.331	1.037	-0.263
4	1.826	-0.00195	0.0040	1.044	0.00590	0.353	-0.390	0.561	-0.169
5	1.825	-0.00237	0.0050	1.065	0.00510	0.248	-0.498	0.225	-0.120

ตาราง ค.14ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ (Zhao และคณะ, 2006)

Period (sec)	CH	C1	C2	C3	C4	$\sigma$	$\tau$	$\sigma\tau$
PGA	0.293	1.111	1.344	1.355	1.420	0.604	0.398	0.723
0.05	0.939	1.684	1.793	1.747	1.814	0.640	0.444	0.779
0.1	1.499	2.061	2.135	2.031	2.082	0.694	0.490	0.849
0.15	1.462	1.916	2.168	2.052	2.113	0.702	0.460	0.839
0.2	1.280	1.669	2.085	2.001	2.030	0.692	0.423	0.811
0.25	1.121	1.468	1.942	1.941	1.937	0.682	0.391	0.786
0.3	0.852	1.172	1.683	1.808	1.770	0.670	0.379	0.770
0.4	0.365	0.655	1.127	1.482	1.397	0.659	0.390	0.766
0.5	-0.207	0.071	0.515	0.934	0.955	0.653	0.389	0.760
0.6	-0.705	-0.429	-0.003	0.394	0.559	0.653	0.401	0.766
0.7	-1.144	-0.866	-0.449	-0.111	0.188	0.652	0.408	0.769
0.8	-1.609	-1.325	-0.928	-0.620	-0.246	0.647	0.418	0.770
0.9	-2.023	-1.732	-1.349	-1.066	-0.643	0.653	0.411	0.771
1	-2.451	-2.152	-1.776	-1.523	-1.084	0.657	0.410	0.775
1.25	-3.243	-2.923	-2.542	-2.327	-1.936	0.660	0.402	0.773
1.5	-3.888	-3.548	-3.169	-2.979	-2.661	0.664	0.408	0.779
2	-4.783	-4.410	-4.039	-3.871	-3.640	0.669	0.414	0.787
2.5	-5.444	-5.049	-4.698	-4.496	-4.341	0.671	0.411	0.786
3	-5.839	-5.431	-5.089	-4.893	-4.758	0.667	0.396	0.776
4	-6.598	-6.181	-5.882	-5.698	-5.588	0.647	0.382	0.751
5	-6.752	-6.347	-6.051	-5.873	-5.798	0.643	0.377	0.745

ตาราง ค.14ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการลดทอนสำหรับที่ (Zhao และคณะ, 2006)

Period (sec)	QC	WC	TC	QI	WI	TI	PS	QS	WS	TS
PGA	0.0000	0.0000	0.303	0.0000	0.0000	0.3080	0.1392	0.1584	-0.059	0.321
0.05	0.0000	0.0000	0.326	0.0000	0.0000	0.3430	0.1636	0.1932	-0.0841	0.378
0.1	0.0000	0.0000	0.342	0.0000	0.0000	0.4030	0.1690	0.2057	-0.0877	0.420
0.15	0.0000	0.0000	0.331	-0.0138	0.0286	0.3670	0.1669	0.1984	-0.0773	0.372
0.2	0.0000	0.0000	0.312	-0.0256	0.0352	0.3280	0.1631	0.1856	-0.0644	0.324
0.25	0.0000	0.0000	0.298	-0.0348	0.0403	0.2890	0.1588	0.1714	-0.0515	0.294
0.3	0.0000	0.0000	0.300	-0.0423	0.0445	0.2800	0.1544	0.1573	-0.0395	0.284
0.4	0.0000	0.0000	0.346	-0.0541	0.0511	0.2710	0.1460	0.1309	-0.0183	0.278
0.5	-0.0126	0.0116	0.338	-0.0632	0.0562	0.2770	0.1381	0.1078	-0.0008	0.272
0.6	-0.0329	0.0202	0.349	-0.0707	0.0604	0.2960	0.1307	0.0878	0.0136	0.285
0.7	-0.0501	0.0274	0.351	-0.0771	0.0639	0.3130	0.1239	0.0705	0.0254	0.290
0.8	-0.0650	0.0336	0.356	-0.0825	0.0670	0.3290	0.1176	0.0556	0.0352	0.299
0.9	-0.0781	0.0391	0.348	-0.0874	0.0697	0.3240	0.1116	0.0426	0.0432	0.289
1	-0.0899	0.0440	0.338	-0.0917	0.0721	0.3280	0.1060	0.0314	0.0498	0.286
1.25	-0.1148	0.0545	0.313	-0.1009	0.0772	0.3390	0.0933	0.0093	0.0612	0.277
1.5	-0.1351	0.0630	0.306	-0.1083	0.0814	0.3520	0.0821	-0.0062	0.0674	0.282
2	-0.1672	0.0764	0.283	-0.1202	0.0880	0.3600	0.0628	-0.0235	0.0692	0.300
2.5	-0.1921	0.0869	0.287	-0.1293	0.0931	0.3560	0.0465	-0.0287	0.0622	0.292
3	-0.2124	0.0954	0.278	-0.1368	0.0972	0.3380	0.0322	-0.0261	0.0496	0.274
4	-0.2445	0.1088	0.273	-0.1486	0.1038	0.3070	0.0083	-0.0065	0.0150	0.281
5	-0.2694	0.1193	0.275	-0.1578	0.1090	0.2720	-0.012	0.0246	-0.0268	0.296

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนครินทร์ ดำเนินสวัสดิ์ เกิดวันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ.2531 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาตอนปลายที่ โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) จังหวัดกรุงเทพมหานคร ต่อมาได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี ในปี พ.ศ.2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553