

การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย



นางสาววรินทร์ ก่อกิจสุนทรสาร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SEISMIC HAZARD ANALYSIS OF THAILAND

Miss Warantorn Korkitsuntornsan



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย
โดย	นางสาววรัณธร ก่อกิจสุนทรสาร
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จีรวีตร บุญญะฐิติ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏ์ชน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ)

วรรณธร ก่อกิจสุนทรสาร : การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย (SEISMIC HAZARD ANALYSIS OF THAILAND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 77 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยด้วยความน่าจะเป็น ในการวิจัยนี้ได้พิจารณาข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหวในอดีต แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวภายในประเทศไทยและบริเวณใกล้เคียง รวมทั้งเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกสุมาตราอันดามัน โดยใช้แบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่เหมาะสมกับพื้นที่ประเทศไทยและประยุกต์ใช้ผังต้นไม้ในการวิเคราะห์ เพื่อหาโอกาสเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อในแต่ละพื้นที่ และจัดทำแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยสำหรับชั้นหินในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและค่าความเร่งสเปกตรัมที่คาบเวลา 0.2, 1.0 และ 2.0 วินาที ที่มีโอกาสเกิดเกินค่าความเร่งที่กำหนด 10% และ 2% ในรอบ 50 ปี จากผลการศึกษาพบว่ากรณีในรอบ 50 ปี ประเทศไทยมีโอกาส 10% ที่จะเกิดค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินมากกว่า 0.37g และมีโอกาส 2% ที่จะเกิดค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินมากกว่า 0.52g บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย สำหรับค่าความเร่งสเปกตรัมที่คาบเวลา 0.2 วินาที มีโอกาส 10% และ 2% ที่จะมียค่ามากกว่า 0.87g และ 1.21g ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5770293021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS:

WARANTORN KORKITSUNTORNAN: SEISMIC HAZARD ANALYSIS OF THAILAND.

ADVISOR: ASSOC. PROF. SUPOT TEACHAVORASINSKUN, D.Eng., 77 pp.

The purpose of this study is to analyze the seismic hazard in Thailand with the concept of probability. In the present study, the seismicity was collected and the seismic source zones in Thailand and adjacent area, including the Sumatra-Andaman subduction zone were considered. The appropriate strong ground motion attenuation models were used to estimate ground motion intensity by the application of a logic tree approach. The probabilistic seismic hazard map is presented in terms of peak ground acceleration and spectral acceleration at 0.2, 1.0, and 2.0 second periods for 10% and 2% probabilities of exceedance in 50 years. The expected peak ground accelerations are 0.37g at 10% and 0.52g at 2% in 50-year level. For the spectral accelerations at 0.2 second periods with 10% and 2% probabilities of exceedance in 50 years, the estimated values are about 0.87g and 1.21g, respectively.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยในครั้งนี้
รวมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอกราบ
ขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันติ ภัยหลบลี้ ผู้ให้ข้อมูลที่ใช้ในการทำวิจัย รวมทั้งรอง
ศาสตราจารย์ ดร. จีรวัตร์ บุญญะฐิติ, รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏ์ชน และผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยแนะนำ ตรวจสอบ
แก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอขอบพระคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำการ
วิจัย ทำಯที่สุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งให้กำลังใจและสนับสนุน

การทำงานเป็นอย่างดี ตลอดจนครูบาอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอน อบรม และให้
ความรู้ในสาขาวิชาต่างๆ พระคุณของท่านเหล่านี้ ผู้เขียนจะระลึกถึงจนกว่าชีวิตจะหาไม่

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัยและแผนงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นดินไหว.....	4
2.1.1 สาเหตุการเกิดแผ่นดินไหว.....	4
2.1.2 ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว.....	4
2.1.3 ปริมาณสำหรับการวัดแผ่นดินไหว.....	6
2.1.4 ตัวแปรแรงสั่นสะเทือนจากคลื่นแผ่นดินไหว.....	9
2.2 การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น.....	9
2.2.1 ความน่าจะเป็นของระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา.....	10
2.2.2 ความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวแต่ละขนาดความรุนแรง.....	12
2.2.3 ความน่าจะเป็นของแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว.....	14

2.2.4 โอกาสการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว.....	15
2.3 โปรแกรมวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหว.....	16
2.4 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.4.1 การศึกษาเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว.....	17
2.4.2 การศึกษาแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว	18
2.4.3 การประเมินแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในอดีต.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 กำหนดเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว.....	30
3.2 ข้อมูลแผ่นดินไหว.....	32
3.3 แบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือน.....	33
3.3.1 เขตแผ่นดินไหวภายในเปลือกโลก	34
3.3.2 เขตมุดตัวของเปลือกโลก	35
3.4 แผนผังต้นไม้	37
3.5 การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหว.....	38
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	40
4.1 อัตราการเกิดความเร่งสูงสุดของพื้นดิน	40
4.2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม.....	44
4.3 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหว	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
รายการอ้างอิง	58
ภาคผนวก.....	61

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 77



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงการคำนวณขนาดแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ (บุรินทร์ เวชบรรเทิง, 2548).....	6
ตารางที่ 2.2 ระดับความรุนแรงแผ่นดินไหวตามมาตราเมอร์แคลลี (บุรินทร์ เวชบรรเทิง, 2548).....	7
ตารางที่ 2.3 สรุปค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง (Chintanapakdee , 2008).....	20
ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ a และ b ของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (Pailoplee และ Choowong, 2013).....	33
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแบบพื้นที่และเส้น.....	39
ตารางที่ 4.1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่กรุงเทพมหานคร (13.7°N 100.5°E).....	44
ตารางที่ 4.2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย (20.4°N 99.9°E).....	45
ตารางที่ 4.3 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (19.8°N 99.7°E). 46	

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คลื่นปฐมภูมิและคลื่นทุติยภูมิ (Kramer, 1996)	5
รูปที่ 2.2 คลื่นเรย์ลีและคลื่นเลิฟ (Kramer, 1996).....	6
รูปที่ 2.3 การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีความน่าจะเป็น 4 ขั้นตอน (Kramer, 1996)	10
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างระยะทางจากตำแหน่งเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษาที่แตกต่างกันตามชนิดของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (Kramer, 1996).....	11
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแผ่นดินไหวกับขนาดของแผ่นดินไหว (Baker, 2013). 13	
รูปที่ 2.6 ความน่าจะเป็นของแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวมากกว่า 1g ที่ระยะทางต่างๆกัน (Baker, 2013)	14
รูปที่ 2.7 เขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย (Nutalaya และคณะ, 1985)	17
รูปที่ 2.8 เขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยและข้างเคียง (Pailoplee และ Choowong, 2013).....	18
รูปที่ 2.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร่งที่วัดได้จริงและจากแบบจำลองลดทอนแผ่นดินไหว (จิตติ ปาลศรี, 2549)	19
รูปที่ 2.10 แผนที่แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (จิตติ ปาลศรี, 2549).....	22
รูปที่ 2.11 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีโอกาสเกิด ก) 10% ข) 2% ในรอบ50ปี (จิตติ ปาลศรี, 2549).....	22
รูปที่ 2.12 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีโอกาสเกิด	23
รูปที่ 2.13 แผนที่แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ก) ข้อมูลแผ่นดินไหวเบื้องหลังและเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก ข) เขตรอยเลื่อนในแผ่นเปลือกโลก (Ornthammarath และคณะ, 2010).....	24
รูปที่ 2.14 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีโอกาสเกิด ก) 10% ข) 2% ในรอบ50ปี (Ornthammarath และคณะ, 2010)	25

รูปที่ 2.15 ก) การกระจายตัวของกลุ่มรอยเลื่อนที่มีโอกาสมีพลัง (Pailoplee และคณะ, 2009)	
ข) เขตกำเนิดแผ่นดินไหว (Charusiri et al, 2005) (จาก สันติ ภัยหลบลี้ และคณะ, 2553).....	26
รูปที่ 2.16 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีโอกาสเกิด	
ก) 2% ข) 10% ในรอบ 50ปี (สันติ ภัยหลบลี้ และคณะ, 2553)	27
รูปที่ 2.17 แผนที่แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง	
(Sutiwanich, 2012).....	28
รูปที่ 2.18 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดที่มีโอกาสเกิด	
ก) 10% ข) 5% ค) 2% และ ง) 0.5% ในรอบ 50ปี (Sutiwanich, 2012).....	28
รูปที่ 2.19 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดที่มีโอกาสเกิด	
ก) 10% ข) 2% ในรอบ 50ปี Palasri (2012)	29
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	31
รูปที่ 3.2 แผนผังต้นไม้และค่าถ่วงน้ำหนัก	37
รูปที่ 3.3 พื้นที่ศึกษาและเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว	38
รูปที่ 3.4 การจำลองแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแบบพื้นที่ เส้น และเหตุการณ์แผ่นดินไหว.....	39
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและค่า	
ความเร่งของพื้นดินสูงสุด ที่กรุงเทพมหานคร (13.7°N 100.5°E).....	41
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและค่า	
ความเร่งของพื้นดินสูงสุด ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย (20.4°N 99.9°E).....	42
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและค่า	
ความเร่งของพื้นดินสูงสุด ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (19.8°N 99.7°E).....	43
รูปที่ 4.4 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่กรุงเทพมหานคร (13.7°N 100.5°E)	45
รูปที่ 4.5 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย (20.4°N 99.9°E)	46
รูปที่ 4.6 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (19.8°N 99.7°E).....	47
รูปที่ 4.7 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน	48
รูปที่ 4.8 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม	49
รูปที่ 4.9 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม	50

รูปที่ 4.10 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม	51
รูปที่ 4.11 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน	52
รูปที่ 4.12 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม	53
รูปที่ 4.13 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่ คาบเวลา 1.0 วินาที ที่มีโอกาสเกินค่าที่กำหนด 2% ในรอบ 50 ปี	54
รูปที่ 4.14 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม	55



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

แผ่นดินไหวเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่ไม่สามารถคาดการณ์หรือพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำ และก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมเป็นอย่างมาก ในประเทศไทยนั้นได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวอยู่บ่อยครั้ง โดยตำแหน่งศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวอยู่บริเวณรอยเลื่อนมีพลังทั้งภายในและภายนอกประเทศ เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว ขนาด 6.3 ตามมาตราริกเตอร์ ที่ตำบลจอมหมอกแก้ว อำเภอมะนัง จังหวัดเชียงราย โดยเป็นแผ่นดินไหวที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของกลุ่มรอยเลื่อนพะเยา ซึ่งเป็นรอยเลื่อนมีพลังในบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย แรงสั่นสะเทือนสามารถรับรู้ได้ในหลายพื้นที่ของภาคเหนือและบริเวณอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร เหตุการณ์แผ่นดินไหวดังกล่าวมีความรุนแรงและเกิดขึ้นใกล้แหล่งชุมชน ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างเป็นจำนวนมาก

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในบริเวณพื้นที่ประเทศไทย ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ตามแนวคิดความน่าจะเป็น (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) ซึ่งพิจารณาจากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวในปัจจุบัน โดยใช้แบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดความเร่งในประเทศไทย เพื่อหาโอกาสเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวระดับต่างๆ และจัดทำแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยสำหรับชั้นหิน ในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม โดยมุ่งหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์แก่งานด้านวิศวกรรม ในการออกแบบอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ให้สามารถต้านทานต่อแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในเขตพื้นที่เสี่ยงภัย และเป็นประโยชน์แก่งานด้านการบริหารจัดการวางผังเมืองและมาตรการการป้องกันบรรเทาภัยเพื่อลดผลกระทบจากแผ่นดินไหวและอาคารถล่ม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในบริเวณประเทศไทยด้วยวิธีความน่าจะเป็น และจัดทำแผนที่แสดงระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับชั้นหินในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบเวลา 0.2, 1.0 และ 2.0 วินาที ในกรณีโอกาสความเป็นไปได้ 2% และ 10% ในรอบ 50 ปี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้ข้อมูลแผ่นดินไหว จาก Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) ในขอบเขตละติจูดที่ 1 องศาใต้ ถึง 30 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 89 ถึง 113 องศาตะวันออก ในช่วงเวลาปี 1964 ถึงปี 2010 จาก Pailoplee และ Choowong (2013)

1.3.2 พิจารณาแบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวของ Idriss (1993), Sadigh และคณะ (1997) และ Boore และ Atkinson (2008) ในเขตแผ่นดินไหวภายในเปลือกโลก และใช้แบบจำลองของ Youngs และคณะ (1997) และ Atkinson และ Boore (2003) ในเขตมุดตัวของเปลือกโลก

1.3.3 วิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีความน่าจะเป็น โดยใช้โปรแกรม CRISIS2007

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีความน่าจะเป็น ในบริเวณพื้นที่ประเทศไทย

1.4.2 สามารถจัดทำแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยสำหรับชั้นหิน โดยแสดงเส้นชั้นระดับความรุนแรงในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบเวลา 0.2, 1.0 และ 2.0 ในกรณีโอกาสความเป็นไปได้ 2% และ 10% ในรอบ 50 ปี

1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัยและแผนงาน

1.5.1 ศึกษาข้อมูลทางธรณีวิทยาและการแบ่งเขตกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย และในบริเวณพื้นที่ข้างเคียงที่มีโอกาสส่งผลกระทบต่อด้านแรงสั่นสะเทือนต่อประเทศไทย

1.5.2 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์หาค่าอัตราการเกิดแผ่นดินไหวซ้ำในเขตกำเนิดแผ่นดินไหวต่างๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแผ่นดินไหวและขนาดของแผ่นดินไหว (Frequency-magnitude distributions)

1.5.3 ศึกษาและเลือกแบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดความเร่งในประเทศไทย

1.5.4 ระบุกรณีในการวิเคราะห์ จากตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความไม่แน่นอนในการประเมิน ได้แก่ ประเภทแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว และแบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว โดยกำหนดน้ำหนักของความเป็นไปได้ในแต่ละกรณีด้วยวิธีแผนผังต้นไม้ (Logic tree method)

1.5.5 วิเคราะห์หาโอกาสที่จะได้รับผลกระทบด้านแรงสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวในแต่ละพื้นที่ และจัดทำแผนที่แสดงอันตรายจากแผ่นดินไหวโดยแสดงเส้นชั้นระดับความรุนแรงในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

1.5.6 จัดทำแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นดินไหว

2.1.1 สาเหตุการเกิดแผ่นดินไหว

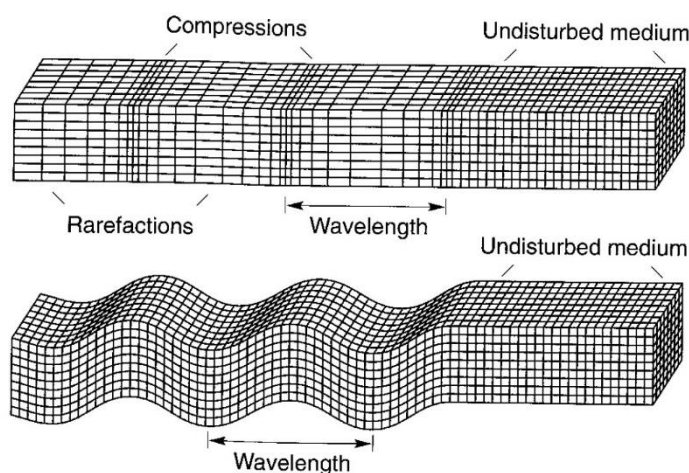
แผ่นดินไหวเป็นการสั่นสะเทือนของพื้นผิวโลก เนื่องจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น การเคลื่อนตัวของเปลือกโลก ภูเขาไฟระเบิด การพังทลายของโพรงใต้ดิน หรือจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การระเบิดและการสร้างอ่างเก็บน้ำ โดยแผ่นดินไหวส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากธรรมชาติ เนื่องจากแกนโลกได้ก่อให้เกิดพลังงานความร้อนแก่ชั้นหินหลอมละลายภายในเปลือกโลก ทำให้เกิดการลอยตัว ผลักดันเปลือกโลก ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกแต่ละชั้นในทิศทางที่ต่างกัน พร้อมกับสะสมพลังงานไว้ภายใน เมื่อบริเวณขอบของเปลือกโลกไม่สามารถทนแรงอัดได้ จะมีการเคลื่อนตัวโดยฉับพลันหรือแตกหัก ซึ่งเป็นการปลดปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อปรับตัวให้อยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งมักเกิดขึ้นในบริเวณขอบเขตของแผ่นเปลือกโลก เรียกแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นบริเวณนี้ว่า แผ่นดินไหวระหว่างแผ่น (Interplate earthquake) นอกจากนี้แรงที่สะสมในเปลือกโลกยังถูกส่งผ่านไปยังพื้นทวีป เกิดเป็นรอยเลื่อนซึ่งคือบริเวณรอยร้าวของหินใต้พื้นโลก เรียกแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นบริเวณนี้ว่า แผ่นดินไหวภายในแผ่น (Intraplate earthquake)

2.1.2 ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว

คลื่นแผ่นดินไหว (Seismic wave) สามารถแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นได้สองประเภทได้แก่ คลื่นในตัวกลาง (Body Wave) และคลื่นผิวพื้น (Surface Wave)

2.1.2.1 คลื่นในตัวกลาง

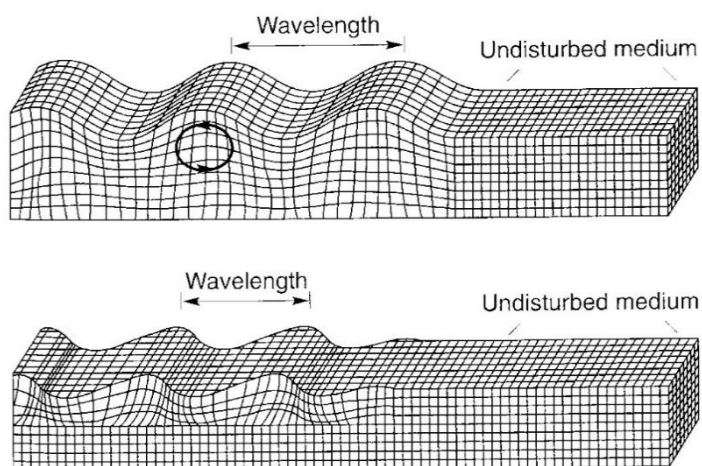
คลื่นในตัวกลาง (Body wave) เดินทางจากศูนย์กลางเกิดแผ่นดินไหว ผ่านเข้าไปในเนื้อโลกในทุกทิศทาง คลื่นในตัวกลางมี 2 ประเภท ได้แก่ คลื่นปฐมภูมิ (Primary wave, P-wave) เป็นคลื่นตามยาว โดยการเคลื่อนไหวนูภาคของตัวกลางเป็นแบบอัดขยายตามแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นชนิดนี้สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางทุกสถานะ มีความเร็วประมาณ 6 ถึง 7 กิโลเมตร/วินาที และสถานีวัดแรงสั่นสะเทือนสามารถตรวจวัดคลื่นปฐมภูมิได้ก่อนชนิดอื่น และคลื่นทุติยภูมิ (Secondary wave หรือ Shear wave, S-wave) เป็นคลื่นตามขวาง โดยการเคลื่อนไหวนูภาคของตัวกลางตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นชนิดนี้เคลื่อนที่ผ่านได้เฉพาะตัวกลางที่เป็นของแข็ง คลื่นทุติยภูมิมีความเร็วประมาณ 3 ถึง 4 กิโลเมตร/วินาที แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 คลื่นปฐมภูมิและคลื่นทุติยภูมิ (Kramer, 1996)

2.1.2.2 คลื่นผิวดิน

คลื่นผิวดิน (Surface wave) มีการเคลื่อนที่จากจุดเหนือศูนย์กลางแผ่นดินไหว (Epicenter) ไปบนพื้นผิวโลก มีความเร็วช้ากว่าคลื่นในตัวกลาง คลื่นผิวดินมี 2 ประเภท ได้แก่ คลื่นเรย์ลี (Rayleigh wave, R wave) โดยอนุภาคของตัวกลางจะสั่นแบบม้วนตัวเป็นรูปวงรี ขึ้นลงในแนวตั้ง โดยมีทิศทางเดียวกับคลื่นที่ส่งผ่าน และคลื่นเลิฟ (Love wave, L wave) ซึ่งเป็นคลื่นที่ทำให้อนุภาคของตัวกลางสั่นในแนวราบ โดยมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นที่ส่งผ่าน แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คลื่นเรย์ลีและคลื่นเลิฟ (Kramer, 1996)

2.1.3 ปริมาณสำหรับการวัดแผ่นดินไหว

2.1.3.1 ขนาดของแผ่นดินไหว

ขนาดของแผ่นดินไหว (Magnitude) คือ ปริมาณที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ถูกปล่อยออกมา ณ บริเวณจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวในรูปของการสั่นสะเทือน การคำนวณหาขนาดของแผ่นดินไหวทำได้โดยวัดความสูงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหว แล้วคำนวณจากสมการการหาขนาด ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการคำนวณขนาดแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ (บูรินทร์ เวชบรรเทิง, 2548)

ขนาด	สูตรคำนวณ	คลื่นแผ่นดินไหว	ความยาวช่วงคลื่น(วินาที)	การตรวจวัด
ML	$\text{Log } A - \text{Log } A_0$	S-wave	0.1-1.0	displacement
MB,mb	$\text{Log } (A/T) + Q(h,D)$	P-wave	1.0-5.0	velocity
Ms	$\text{Log } A + 1.66 \text{ Log } D + 2.0$	Surface-wave	20	velocity
Mw	$(2/3 \text{ log } M_0) - 10.7$	Surface-wave	>200	velocity

ในปัจจุบันขนาดของแผ่นดินไหวที่นิยมใช้มีหลายมาตราและในแต่ละฐานข้อมูลแผ่นดินไหวได้บันทึกขนาดของแผ่นดินไหวไว้ในมาตราที่แตกต่างกัน ดังนั้น ก่อนการวิเคราะห์ในขั้นต่อไปจะต้องทำการแปลงมาตราของแผ่นดินไหวให้มีความสอดคล้องกัน โดยจิตติ ปาลศรี (2549) ได้รวบรวมสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.3

$$mb = -0.02Mw^2 + 1.2285Mw - 1.0919 ; mb \leq 6.8 \quad (2.1)$$

$$Ms = -0.0832Mw^2 + 2.5357Mw - 6.6609 ; Ms \leq 7.6 \quad (2.2)$$

$$ML = \frac{mb - 1.64}{0.63} ; ML \leq 6.8 \quad (2.3)$$

2.1.3.2 ความรุนแรงแผ่นดินไหว

ความรุนแรงแผ่นดินไหว (Intensity) คือ ระดับความรุนแรงที่เป็นผลจากการเกิดแผ่นดินไหววัดโดยใช้ความรู้สึกของการสั่นสะเทือน ลักษณะกายภาพทางธรณีที่เปลี่ยนแปลง หรือความเสียหายของวัตถุและสิ่งก่อสร้างที่เกิดขึ้นขณะเกิดแผ่นดินไหวและหลังการเกิดแผ่นดินไหว โดยมีตารางบรรยายเปรียบเทียบ เรียงลำดับจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงน้อยที่สุดจนถึงรุนแรงมากที่สุด ความรุนแรงแผ่นดินไหวได้ถูกพัฒนาด้วยกันหลายมาตรา เช่น JMA Intensity Scale ถูกใช้ในประเทศญี่ปุ่น Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK) Intensity Scale ในกลุ่มประเทศยุโรป ในกรณีของประเทศไทยนิยมใช้มาตราเมอร์แคลลีซึ่งแบ่งออกเป็น 12 อันดับ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ระดับความรุนแรงแผ่นดินไหวตามมาตราเมอร์แคลลี (บุรินท์ เวชบรรเทิง, 2548)

อันดับ	เหตุการณ์แผ่นดินไหว
I	ไม่รู้สึกสั่นไหว ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือ
II	รู้สึกบางคน โดยเฉพาะผู้อยู่ชั้นบนของอาคาร สิ่งของแกว่งไกว

III	ผู้อยู่ในอาคารรู้สึก เฉพาะอย่างยิ่งผู้อยู่ชั้นบนอาคาร แต่ผู้คนส่วนใหญ่ยังไม่รู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว
IV	ในเวลากลางวันผู้คนในอาคารรู้สึกมาก แต่ผู้นอกอาคารรู้สึกบางคน งานหน้าต่าง ประตุสั้น ความรู้สึกเหมือนรถบรรทุกชนอาคาร
V	เกือบทุกคนรู้สึก หลายคนตกใจตื่น วัตถุที่ไม่มั่นคงล้มคว่ำ เสา ต้นไม้ แกว่งไกว
I	ทุกคนรู้สึก เครื่องเรือนเคลื่อน ปล่องไฟแตก เกิดความเสียหายเล็กน้อยกับอาคาร
VII	ทุกคนตกใจวิ่งออกนอกอาคาร อาคารที่ออกแบบดีไม่เสียหาย เสียหายเล็กน้อยถึงปานกลางกับอาคารสิ่งก่อสร้างธรรมดา เสียหายมากกับอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผู้ขับรถรู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว
VIII	เสียหายเล็กน้อยกับอาคารที่ออกแบบไว้ดี เสียหายมากในอาคารธรรมดา บางส่วนของอาคารพังทลาย เสียหายอย่างมากในอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผนังอาคารหลุดออกนอกอาคาร ปล่องไฟพัง ดินและทรายพุ่งขึ้นมา
IX	เสียหายมากในอาคารที่ออกแบบไว้ดี โครงสร้างอาคารพังทลาย รังธไฟบิด พื้นดินแตก ท่อใต้ดินแตกหัก
X	อาคารไม้ที่สร้างไว้อย่างดี เสียหาย โครงสร้างอาคารพังทลาย รังธไฟบิด พื้นดินแตก แผ่นดินถล่มหลายแห่ง ทรายและโคลนพุ่งจากพื้นดิน
XI	สิ่งก่อสร้างเหลืออยู่น้อย สะพานถูกทำลาย พื้นดินมีรอยแยกกว้าง ท่อใต้ดินเสียหายหมด รังธไฟบิดงอมาก
XII	เสียหายทั้งหมด เห็นคลื่นบนพื้นดิน เส้นแนวระดับสายดาบิดเบน วัตถุสิ่งของกระเด็นในอากาศ

2.1.4 ตัวแปรแรงสั่นสะเทือนจากคลื่นแผ่นดินไหว

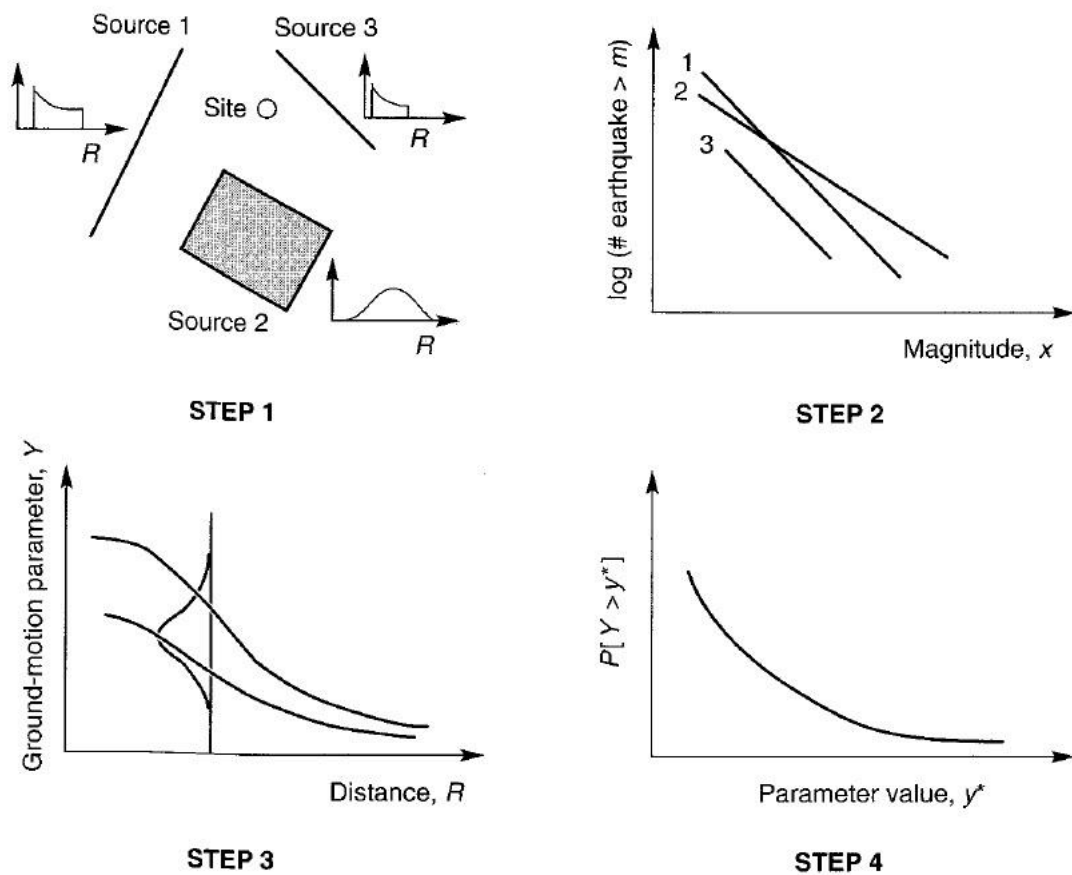
ความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration, PGA) เป็นตัวแปรแรงสั่นสะเทือนที่สำคัญในการบอกคุณลักษณะของแผ่นดินไหว และมีความสำคัญในการออกแบบสิ่งปลูกสร้างเชิงวิศวกรรมในบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของแผ่นดินไหวและระยะทาง มีหน่วยเป็นค่าอัตราเร่ง ฟุต/วินาที² หรือ เซนติเมตร/วินาที² นิยมระบุเป็นสัดส่วนของค่าอัตราเร่งหรือแรงโน้มถ่วงของโลก (% ของค่า g) หรือเป็นหน่วย gal โดย 1 g มีค่าประมาณ 980 gal ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินสามารถหาได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือจากการวิเคราะห์คลื่นความสั่นสะเทือนที่ตรวจวัด (บุรินทร์ เวชบัณฑิต, 2548)

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Response Spectral Acceleration, SA) เป็นตัวแปรแสดงผลการตอบสนองของอาคารต่อการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว มีค่าเปลี่ยนแปลงตามคาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร ใช้ในการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว มีหน่วยเหมือนค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน นิยมระบุเป็นสัดส่วนของค่าอัตราเร่งหรือแรงโน้มถ่วงของโลก หรือเป็นหน่วย gal

2.2 การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น

การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic seismic hazard analysis) เป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Cornell (1968) สำหรับประเมินอันตรายจากแผ่นดินไหวทุกขนาดที่เป็นไปได้ทั้งหมด และทุกระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา โดยคำนึงถึงความถี่ของการเกิด แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว และความไม่แน่นอนได้ถูกรวมในการคำนวณด้วย วิธีการวิเคราะห์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยมีขั้นตอนดังนี้

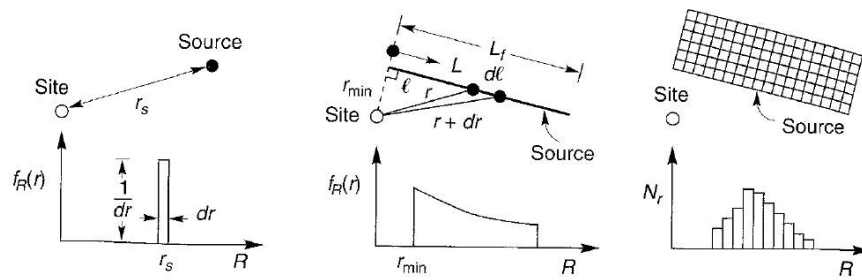
- 1) การระบุแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวและหาค่าความน่าจะเป็นของระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา
- 2) การหาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวแต่ละขนาดความรุนแรง
- 3) การหาค่าความน่าจะเป็นของแรงสั่นสะเทือนจากแบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือน
- 4) การรวมผลของความน่าจะเป็นเพื่อหาค่าโอกาสเกิดแรงสั่นสะเทือนในแต่ละตำแหน่งที่ศึกษา



รูปที่ 2.3 การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีความน่าจะเป็น 4 ขั้นตอน
(Kramer, 1996)

2.2.1 ความน่าจะเป็นของระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา

การวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นของระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา จะต้องมีการระบุคุณลักษณะที่สำคัญของเปลือกโลก ที่มีแนวโน้มก่อให้เกิดความเสียหายจากแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว เช่น รอยต่อของเปลือกโลก รอยเลื่อนมีพลัง เพื่อเป็นกำหนดเป็นพื้นที่แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว โดยแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวสามารถจำลองได้ทั้งแบบจุด เส้น และพื้นที่



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างระยะทางจากตำแหน่งเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษาที่แตกต่างกันตามชนิดของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (Kramer, 1996)

ตัวอย่างจากรูปที่ 2.4 สำหรับแหล่งกำเนิดแบบเส้น ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดแผ่นดินไหวในช่วง l ถึง $l + dl$ จะมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นที่ระยะ r ถึง $r + dr$

$$f_L(l)dl = f_R(r)dr \quad (2.4a)$$

$$f_R(r) = f_L(l) \frac{dl}{dr} \quad (2.4b)$$

เมื่อถือว่าแผ่นดินไหวมีการกระจายตัวอย่างคงที่ตามแนวรอยเลื่อน $f_L(l) = \frac{1}{L_f}$ และเนื่องจาก

$l^2 = r^2 + r_{\min}^2$ ความน่าจะเป็นของระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงพื้นที่ศึกษา คือ

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

โดยที่ $f_L(l)$ คือ ความน่าจะเป็นของระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงจุดบนแหล่งกำเนิดที่ใกล้ตำแหน่งที่ศึกษามากที่สุด

$f_R(r)$ คือ ความน่าจะเป็นของระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา

l คือ ระยะทางจากตำแหน่งเกิดแผ่นดินไหวถึงจุดบนแหล่งกำเนิดที่ใกล้ตำแหน่งที่ศึกษาที่สุด

r คือ ระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา

L_f คือ ความยาวของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว

2.2.2 ความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวแต่ละขนาดความรุนแรง

การวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวแต่ละขนาดความรุนแรง จะใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวในอดีตมาหาความสัมพันธ์ของขนาดและอัตราการเกิดแผ่นดินไหวในแต่ละแหล่งกำเนิด โดย Gutenberg และ Richter (1944) ได้เสนอความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.5

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

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

โดยที่ λ_m คือ อัตราการเกิดแผ่นดินไหวขนาดเท่ากับหรือมากกว่า m ในรอบ 1 ปี
(mean of annual rates of exceedance)

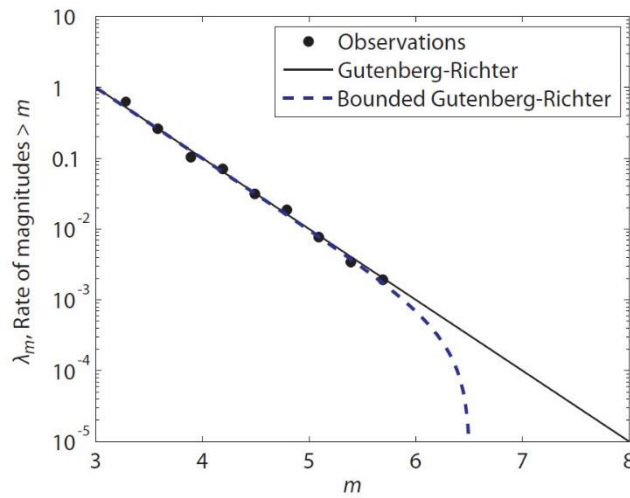
a และ b คือ ค่าคงที่ในสมการของ Gutenberg และ Richter

$$\alpha = 2.303a \text{ และ } \beta = 2.303b$$

เนื่องจากในทางวิศวกรรมถือว่าแผ่นดินไหวขนาดต่ำกว่า 4 จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่รุนแรง และตามความสัมพันธ์ของ Gutenberg และ Richter จะให้อัตราการเกิดแผ่นดินไหวในขนาดความรุนแรงที่ไม่สิ้นสุด ดังนั้นจึงควรกำหนดขอบเขตของขนาดแผ่นดินไหวต่ำสุดและสูงสุดที่ทราบค่าหรือสามารถประมาณได้ หากกำหนดแผ่นดินไหวขนาดต่ำสุดคือ m_0 และขนาดสูงสุดคือ m_{\max} จะสามารถหาอัตราการเกิดแผ่นดินไหวได้ดังสมการที่ 2.7 (McGuire และ Arabasz, 1990)

$$\lambda_m = v \frac{e^{-\beta(m-m_0)} - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}} \quad (2.7)$$

โดยที่ v คือ อัตราการเกิดแผ่นดินไหวขนาดเท่ากับหรือมากกว่า m_0



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแผ่นดินไหวกับขนาดของแผ่นดินไหว (Baker, 2013)

จากรูปที่ 2.5 พบว่าเมื่อทำการกำหนดขนาดแผ่นดินไหวสูงสุด เส้นกราฟในช่วงปลายที่ขนาดของแผ่นดินไหวมีค่าสูง จะมีการปรับโค้งลู่ลงซึ่งใกล้เคียงกับลักษณะการเกิดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของ Gutenberg และ Richter ที่มีการกำหนดขอบเขตขนาดแผ่นดินไหวต่ำสุดและสูงสุด จะสามารถแสดงความน่าจะเป็นในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function, CDF) และความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวขนาด m (probability density function, PDF) ได้ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ

$$F_M(m) = P[M < m \mid m_0 \leq m \leq m_{\max}] = \frac{1 - e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}} \quad (2.8)$$

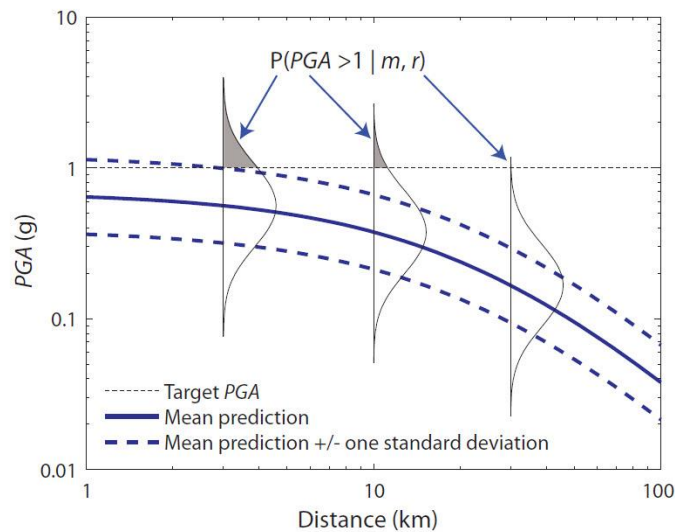
$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}} \quad (2.9)$$

2.2.3 ความน่าจะเป็นของแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว

แบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว (Attenuation Model) จะให้ค่าเฉลี่ยของการประมาณแรงสั่นสะเทือนจากตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดของแผ่นดินไหว ระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา รูปแบบของรอยเลื่อน และลักษณะชนิดดิน โดยที่ตัวแปรแรงสั่นสะเทือนมักจะถูกแสดงในรูปการแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal Distribution) และเราสามารถคำนวณความน่าจะเป็นของแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวได้จากค่าเฉลี่ย \overline{PGA} และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ แสดงดังสมการที่ (2.10)

$$P(PGA \geq x | m, r) = 1 - \Phi \frac{\ln x - \ln \overline{PGA}}{\sigma_{\ln PGA}} \quad (2.10)$$

โดยที่ Φ คือ ความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 2.6 ความน่าจะเป็นของแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวมากกว่า 1g ที่ระยะทางต่างๆกัน

(Baker, 2013)

2.2.4 โอกาสการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว

เมื่อคำนวณค่าของ $f_R(r)$ $f_M(m)$ และ $P[X \geq x | m, r]$ จากกระบวนการข้างต้นแล้ว จะสามารถหาอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับระดับที่พิจารณาได้ ดังสมการที่ (2.11)

$$\lambda[X \geq x] = \sum_{Sources\ i} v_i \int_{M_0}^{M_{\max}} \int_0^{r_{\max}} P[X \geq x | m, r] f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (2.11)$$

โดยที่ $\lambda[X \geq x]$ คือ อัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับระดับที่พิจารณาในรอบ 1 ปี

v_i คือ อัตราการเกิดแผ่นดินไหวของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว i

เมื่อทราบค่าของอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว $\lambda[X \geq x]$ จะสามารถหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดแรงสั่นสะเทือนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับระดับที่พิจารณาในรอบ t ปี ได้ จากสมการที่ (2.12)

$$P[X \geq x] = 1 - e^{-\lambda[X \geq x] t} \quad (2.12)$$

โดยที่ รอบการเกิดซ้ำ (Return Period) คือ

$$R_x(x) = \frac{1}{\lambda[X \geq x]} = \frac{-t}{\ln(1 - P[X \geq x])} \quad (2.13)$$

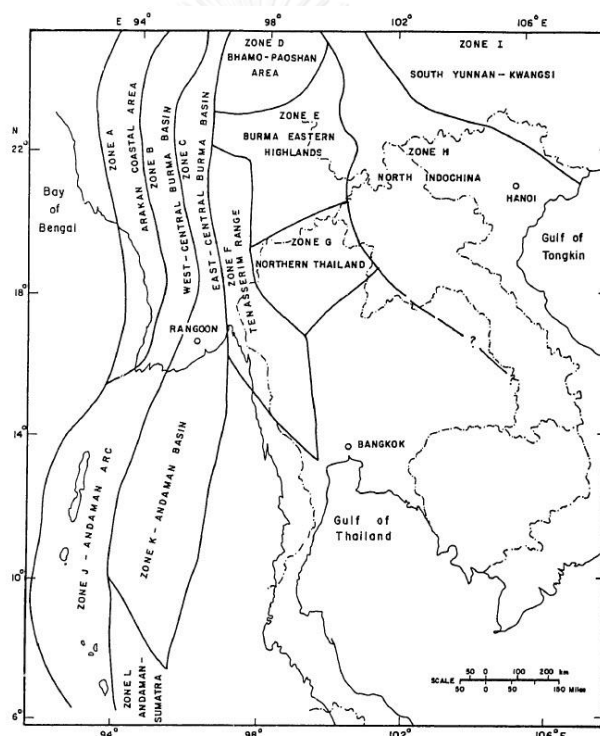
2.3 โปรแกรมวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหว

CRISIS2007 เป็นโปรแกรมวิเคราะห์และประเมินระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย M. Ordaz และคณะ โดยคำนวณด้วยวิธีความน่าจะเป็นที่พิจารณาอัตราการเกิดของแผ่นดินไหว แบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือน และการกระจายทางภูมิศาสตร์ของแผ่นดินไหว ในส่วนของอัตราการเกิดแผ่นดินไหวสามารถจำลองได้ทั้งการกระจายตัวของขนาดแผ่นดินไหวแบบ truncated exponential Gutenberg-Richter และแบบแผ่นดินไหวลักษณะเฉพาะ (Characteristic Earthquake) การจำลองแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวสามารถให้ข้อมูลในรูปของจุด เส้น หรือพื้นที่ได้ สำหรับแบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในโปรแกรมนี้ ประกอบด้วยแบบจำลองของ Abrahamson และ Silva (1997) Garcia และคณะ (2005) Spudich และคณะ (1997) และ Youngs และคณะ (1997) นอกจากนี้ผู้ใช้อย่างสามารถกำหนดแบบจำลองใหม่ได้โดยการเพิ่มข้อมูลในรูปแบบตาราง ผลลัพธ์จากการคำนวณจะแสดงในรูปของ ASCII หรือ binary format และกราฟแสดงระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวจะแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนที่มากกว่าหรือเท่ากับขนาดที่พิจารณาในรอบปี สำหรับผลลัพธ์จากกระบวนการแยกข้อมูล (disaggregation) จะแสดงผลทั้งในรูปของการแยกขนาดและระยะทาง (M-R disaggregation) และผลลัพธ์โดย epsilon disaggregation (L. Danciu และคณะ, 2012)

2.4 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

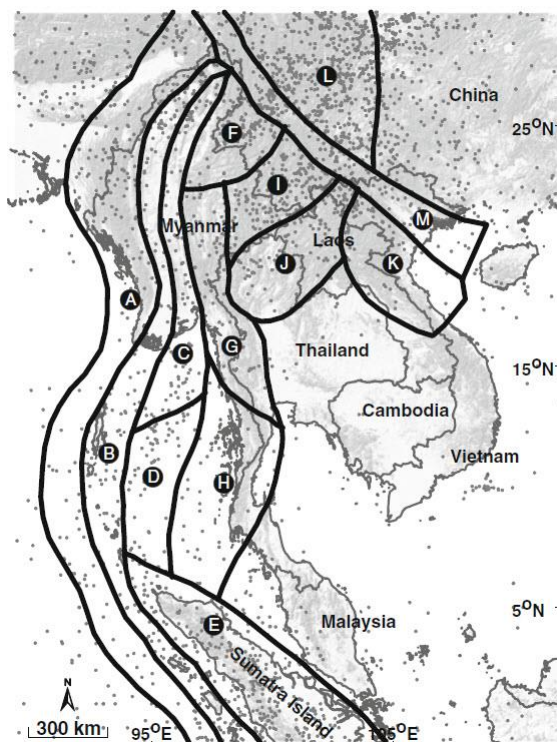
2.4.1 การศึกษาเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว

Nutalaya และคณะ (1985) ได้เสนอเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว 12 เขต A ถึง L โดยพิจารณาจากลักษณะทางธรณีวิทยาและข้อมูลแผ่นดินไหวในอดีต แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยเขตแหล่งกำเนิดนี้ไม่ได้ครอบคลุมพื้นที่บริเวณภาคใต้ของประเทศไทยและบริเวณสุมาตรา ต่อมาภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2548) ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวขึ้นใหม่ โดยได้เสนอเขตแหล่งกำเนิด 21 เขต โดยได้ขยายพื้นที่ครอบคลุมภาคใต้ของประเทศไทยและบริเวณตอนเหนือของสุมาตรา



รูปที่ 2.7 เขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย (Nutalaya และคณะ, 1985)

Pailoplee และ Choowong (2013) ได้ปรับปรุงเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวใหม่บนพื้นฐานทางธรณีวิทยา ธรณีสีณฐาน และจากการรวบรวมข้อมูลแผ่นดินไหวในช่วงปี ค.ศ. 1940-2010 ซึ่งครอบคลุมเขตการมุดตัวของเปลือกโลกและรอยเลื่อนภายในเปลือกโลก โดยได้แบ่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ออกเป็น 13 เขต ตั้งแต่เขต A ถึง M แสดงดังรูปที่ 2.8



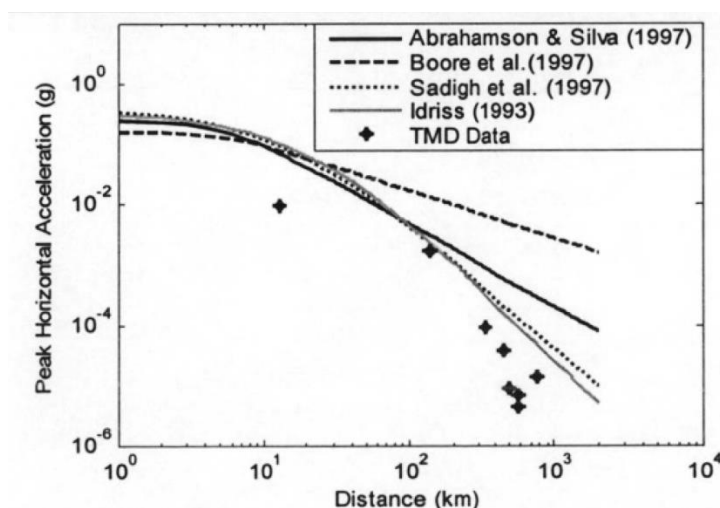
รูปที่ 2.8 เขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยและข้างเคียง
(Pailoplee และ Choowong, 2013)

2.4.2 การศึกษาแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว

จิตติ ปาลศรี (2549) ได้เปรียบเทียบแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว 4 แบบจำลองได้แก่ แบบจำลองของ Sadigh และคณะ(1997) Abrahamson และ Silva (1997) Boore และคณะ (1997) และแบบจำลองของ Idriss (1993) กับค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดของกรมอุตุนิยมวิทยาจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 5.1 วันที่ 13 ธันวาคม 2006 ที่จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าแบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนของ Sadigh และคณะ (1997) และแบบจำลองของ Idriss (1993) ให้ค่าใกล้เคียงกับผลตรวจวัดมากที่สุด

Petersen และคณะ (2007) ได้มีการศึกษาแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนเพื่อใช้ในการจัดทำแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภายใต้โครงการของสำนักงานสำรวจทางธรณีวิทยาของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Geological Survey, USGS) และได้เลือกใช้แบบจำลองของ Boore และ Atkinson (2007), Campbell และ Bozorgnia (2007) และ Chiou และ Youngs (2007) สำหรับแผ่นดินไหวภายในเปลือกโลก และแบบจำลองที่เสนอโดย

Youngs และคณะ (1997), Atkinson และ Boore (2003) และ Zhao และคณะ (1997) สำหรับแผ่นดินไหวในเขตมุดตัวของเปลือกโลก



รูปที่ 2.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร่งที่วัดได้จริงและจากแบบจำลองลดทอนแผ่นดินไหว (จิตติ ปาลศรี, 2549)

Chintanapakdee และคณะ (2008) ได้เปรียบเทียบแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวจำนวน 20 แบบจำลอง กับข้อมูลแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว 45 ครั้งในช่วงปี 2006 ถึง 2007 พบว่า แบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนที่เสนอโดย Idriss (1993) Sadigh และคณะ(1997) และ Toro (2002) เหมาะสำหรับแผ่นดินไหวภายในเปลือกโลก และแบบจำลองที่เสนอโดย Crouse (1991) เหมาะสำหรับแผ่นดินไหวในเขตมุดตัวของเปลือกโลก สรุปผลดังตารางที่ 2.3

Pailoplee และคณะ (2009) ได้เปรียบเทียบแบบจำลองลดทอนแผ่นดินไหวในต่างประเทศกับข้อมูลแรงสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จริงจากกรมอุตุนิยมวิทยาและพบว่าในเขตมุดตัวของเปลือกโลกแบบจำลองของ Crouse (1991) ให้ผลสอดคล้องกับผลตรวจวัดมากที่สุด และสำหรับรอยเลื่อนภายในเปลือกโลกแบบจำลองของ Idriss (1993) ให้ผลสอดคล้องกับผลตรวจวัดมากที่สุด

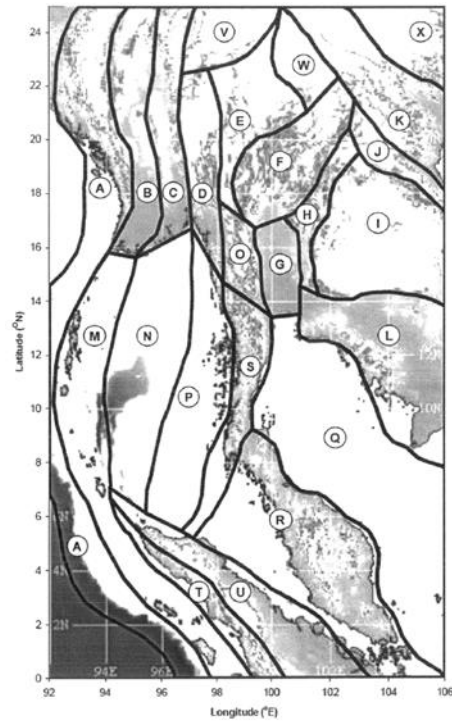
ตารางที่ 2.3 สรุปค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง (Chintanapakdee , 2008)

Attenuation models	Site condition	
	Rock	Soil
Active Tectonic Region		
Ambraseys et al. (2005)	2.25	2.46
Abrahamson and Silva (1997)	2.87	3.21
Boore and Atkinson (2008)	3.98	-
Boore et al. (1997)	4.6	4.7
Campbell (1997)	2.23	2.68
Esteva and Villaverde (1973)	1.84	-
Idriss (1993)	1.44	-
Idriss (2008)	2.46	-
Sadigh et al. (1997)	1.55	-
Spudich et al. (1997)	3.93	4.08
Sabetta and Pugliese (1987)	3.78	4.12
Stable Continental Region		
Atkinson and Boore (1997b)	2.96	-
Dahle et al. (1995)	3.4	2.37
Hwang and Huo (1997)	2.11	-
Toro: Gulf Regions (2002)	1.88	-
Toro: Mid-continent Regions (2002)	2.48	-
Subduction Zone		
Atkinson and Boore (1997a)	5.19	-
Crouse (1991)	1.98	-
Fukushima and Tanaka (1991)	6.32	4.14
Megawati et al. (2005)	4.48	-
Petersen et al. (2004)	3.73	2.68

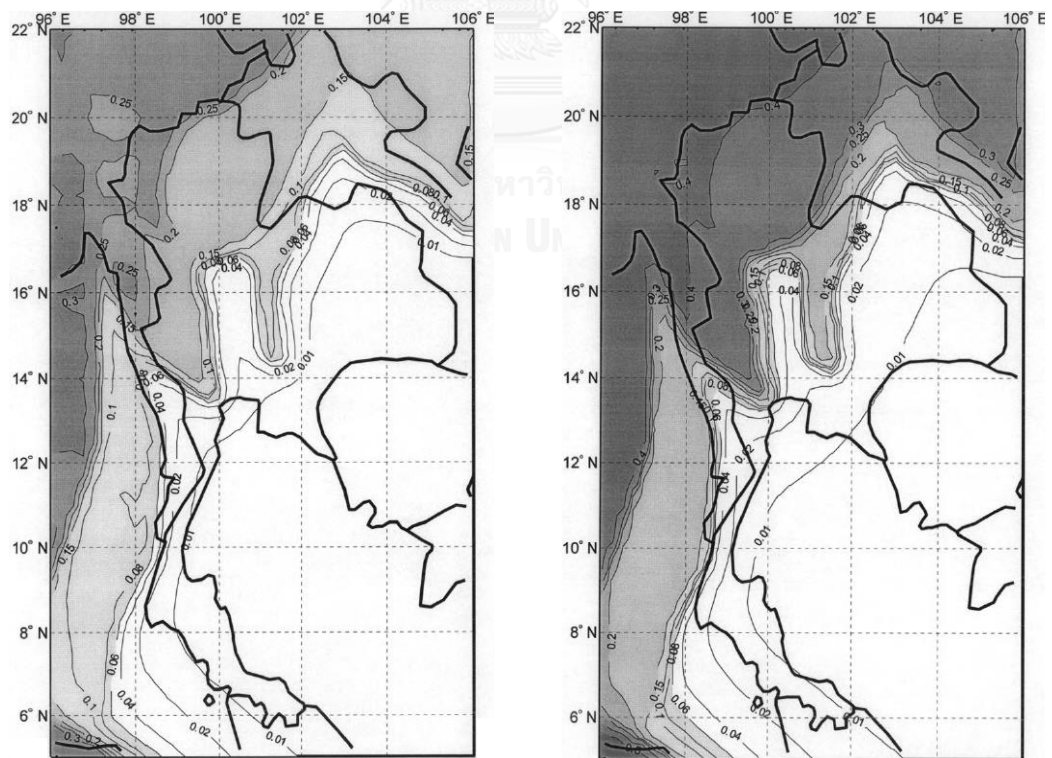
อรรถพล อำมาตย์มณี (2011) ได้เปรียบเทียบแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว สำหรับชั้นดินแข็งใหม่จำนวน 12 แบบจำลองกับข้อมูลความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน ตั้งแต่ปี ค.ศ.2003 ถึง ค.ศ.2011 จากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวดอยสุเทพของกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดคือ Chiou และ Youngs (2008) Abrahamson และ Silva (2008) และแบบจำลองของ Sadigh และคณะ (1997)

2.4.3 การประเมินแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในอดีต

จิตติ ปาลศรี (2549) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น และจัดทำแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวของประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวจากกรมอุตุนิยมวิทยาและสำนักงานสำรวจทางธรณีวิทยาของสหรัฐอเมริกา (US Geological Survey) ตั้งแต่ปี ค.ศ.1912 ถึงปี ค.ศ.2006 เพื่อคำนวณขนาดและอัตราการเกิดแผ่นดินไหวในแต่ละแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวซึ่งปรับปรุงจาก ปัญญา จารุศิริและคณะ (2543) และภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2548) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และใช้แบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนของ Sadigh และคณะ (1997) และแบบจำลองของ Idriss (1993) วิเคราะห์หาค่าความเร่งในแนวนราบสูงสุดโดยถ่วงน้ำหนักความน่าจะเป็นเท่ากับในเขตรอยเลื่อนที่เคลื่อนตัว และใช้แบบจำลองของ Petersen และคณะ (2004) ในเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก และเสนอเป็นแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งในแนวนราบสูงสุดที่ชั้นหินที่มีโอกาสเกิน 10% และ 2% ในรอบ 50 ปี พบว่าสำหรับโอกาสเกิน 10% ในรอบ 50 ปี ในบริเวณภาคเหนือแถบจังหวัดแม่ฮ่องสอน เชียงใหม่และเชียงราย มีค่าความเร่งในแนวนราบสูงสุดประมาณ 0.25g บริเวณภาคตะวันตกแถบจังหวัดกาญจนบุรีและตาก มีค่าประมาณ 0.15g ถึง 0.20g และบริเวณกรุงเทพมหานคร มีค่าประมาณ 0.02g สำหรับค่าความเร่งในแนวนราบสูงสุดที่ชั้นหินที่มีโอกาสเกิน 2% ในรอบ 50 ปี มีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าความเร่งในแนวนราบสูงสุดที่ชั้นหินที่มีโอกาสเกิน 10% ในรอบ 50 ปี



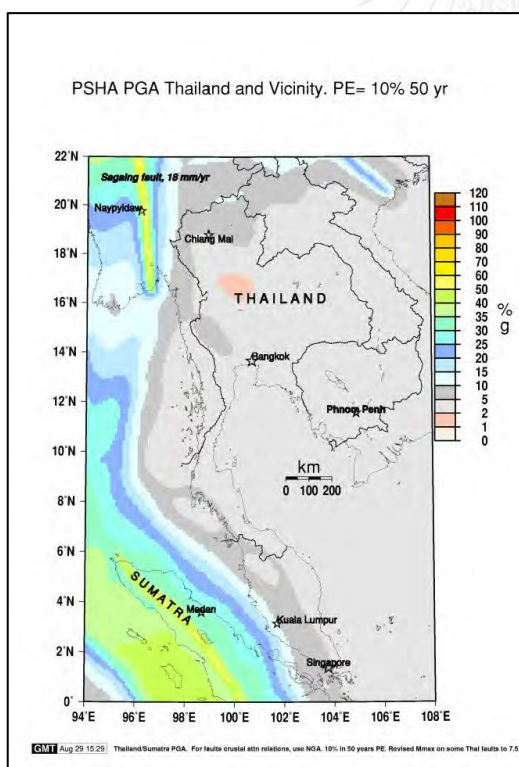
รูปที่ 2.10 แผนที่แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (จิตติ ปาลศรี, 2549)



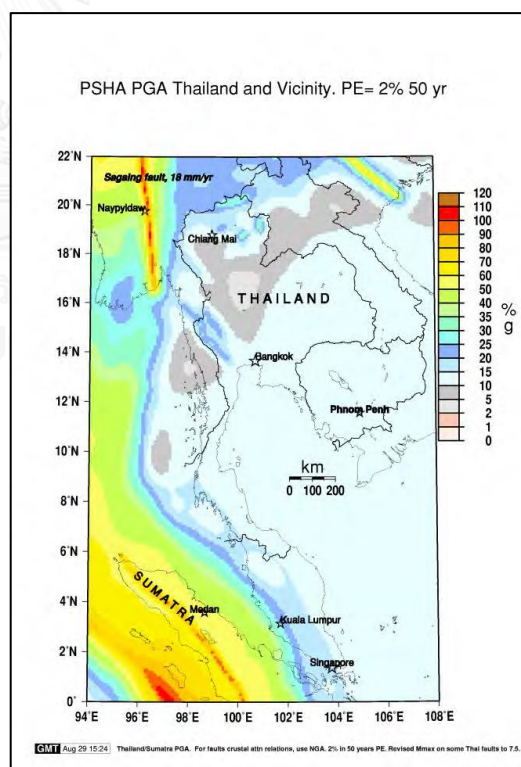
รูปที่ 2.11 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีโอกาสเกิด ก)

10% ข) 2% ในรอบ50ปี (จิตติ ปาลศรี, 2549)

Petersen และคณะ (2007) ได้จัดทำแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภายใต้โครงการของสำนักงานสำรวจทางธรณีวิทยาของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Geological Survey, USGS) โดยใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวและรอยเลื่อน 18 แห่งในบริเวณประเทศไทย และได้ใช้แบบจำลองของ Boore และ Atkinson (2007), Campbell และ Bozorgnia (2007) และ Chiou และ Youngs (2007) สำหรับแผ่นดินไหวภายในเปลือกโลก และแบบจำลองที่เสนอโดย Youngs และคณะ (1997), Atkinson และ Boore (2003) และ Zhao และคณะ (1997) สำหรับแผ่นดินไหวในเขตมุดตัวของเปลือกโลก และได้เสนอแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดิน และสเปกตรัมความเร่งที่มีโอกาสเกิน 10% และ 2% ในรอบ 50 ปี ดังแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่า ที่คาบการเกิดซ้ำ 500 ปี ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบเวลา 1 วินาที มีค่าประมาณ 0.02g ในบริเวณกรุงเทพมหานคร



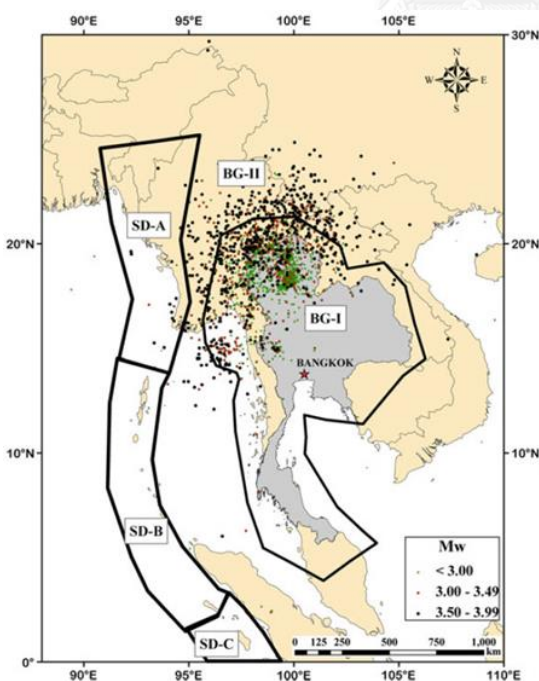
(ก)



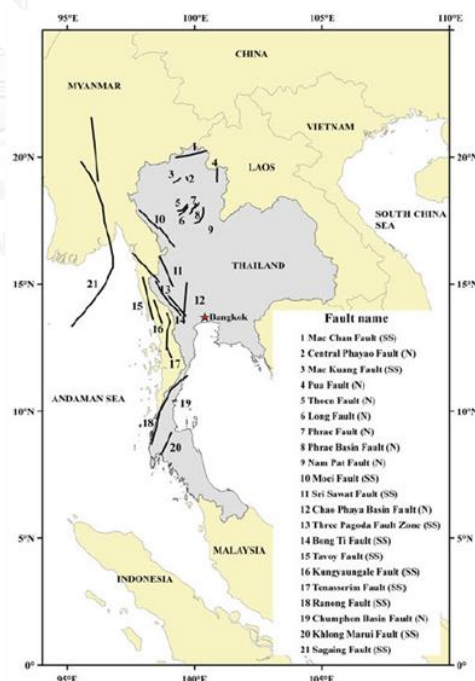
(ข)

รูปที่ 2.12 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีโอกาสเกิด
 ก) 10% ข) 2% ในรอบ 50 ปี (Petersen และคณะ, 2007)

Ornthammarath และคณะ (2010) ได้วิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น ด้วยวิธีที่ถูกพัฒนาโดย Frankel (1995) พิจารณาแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว 3 ประเภท ได้แก่ ข้อมูลแผ่นดินไหวเบื้องต้น รอยเลื่อนในแผ่นเปลือกโลก และเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยใช้แบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่พัฒนาสำหรับแนวรอยเลื่อนในแผ่นเปลือกโลกเขตตะวันตกของสหรัฐอเมริกาได้แก่ Boore และ Atkinson (2008) Campbell และ Bozorgnia (2008) และ Chiou และ Youngs (2008) โดยใช้สัดส่วนน้ำหนักความเป็นไปได้ที่เท่ากันในการวิเคราะห์แผนผังต้นไม้ สำหรับในเขตมุดตัวของเปลือกโลกใช้แบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนของ Youngs และคณะ (1997) Atkinson และ Boore (2003, 2008) และ Zhao และคณะ (2006) โดยสัดส่วนน้ำหนักเป็น 0.25, 0.25, และ 0.50 ตามลำดับ และได้เสนอแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดิน และสเปกตรัมความเร่งที่มีโอกาสเกิน 10% และ 2% ในรอบ 50 ปี พบว่าประเทศไทยมีโอกาส 10% ในรอบ 50 ปี ที่ความเร่งสูงสุดบนพื้นดินอยู่ในช่วงระหว่าง 0.8–28% g และมีโอกาส 2% ในรอบ 50 ปี ที่ความเร่งสูงสุดบนพื้นดินอยู่ในช่วงระหว่าง 1.3–65% g

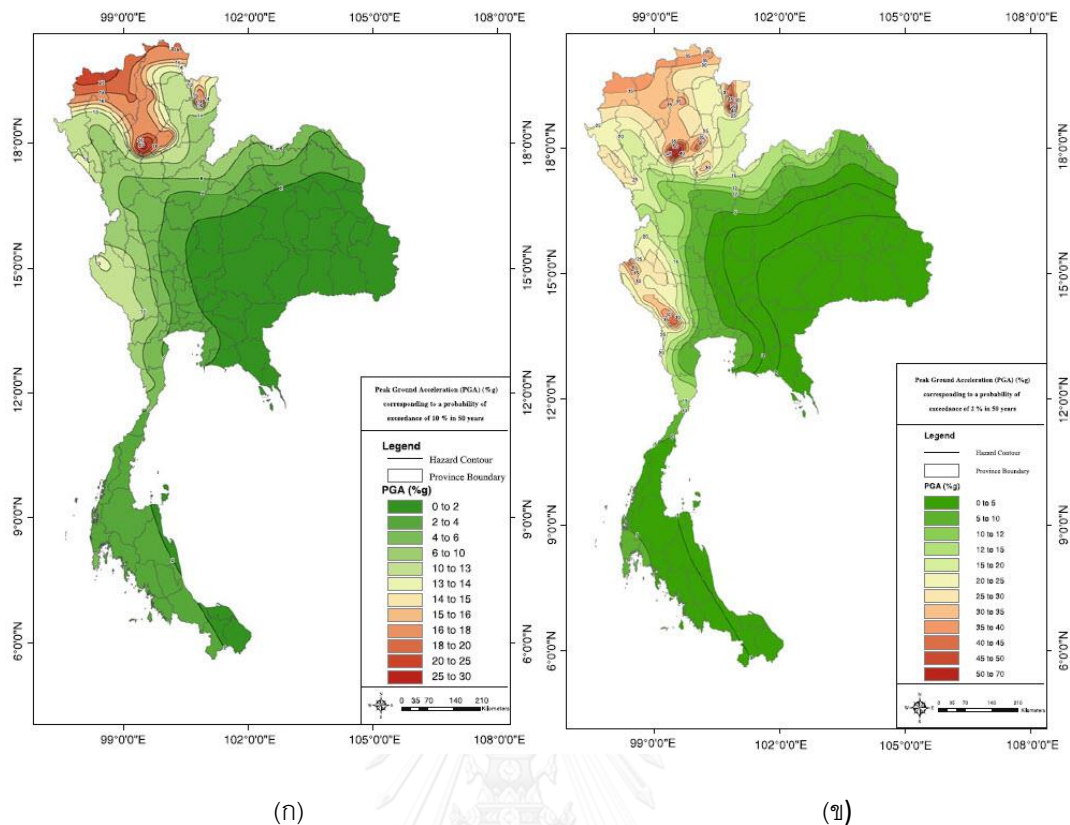


(ก)



(ข)

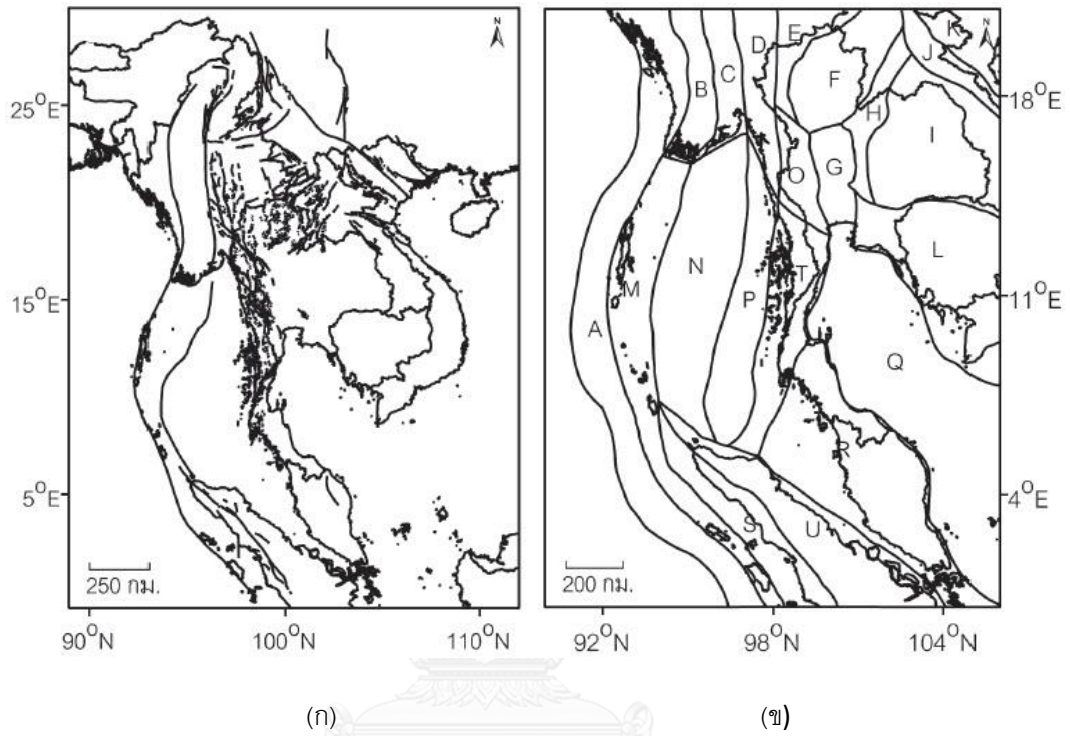
รูปที่ 2.13 แผนที่แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ก) ข้อมูลแผ่นดินไหวเบื้องต้นและเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก ข) เขตรอยเลื่อนในแผ่นเปลือกโลก (Ornthammarath และคณะ, 2010)



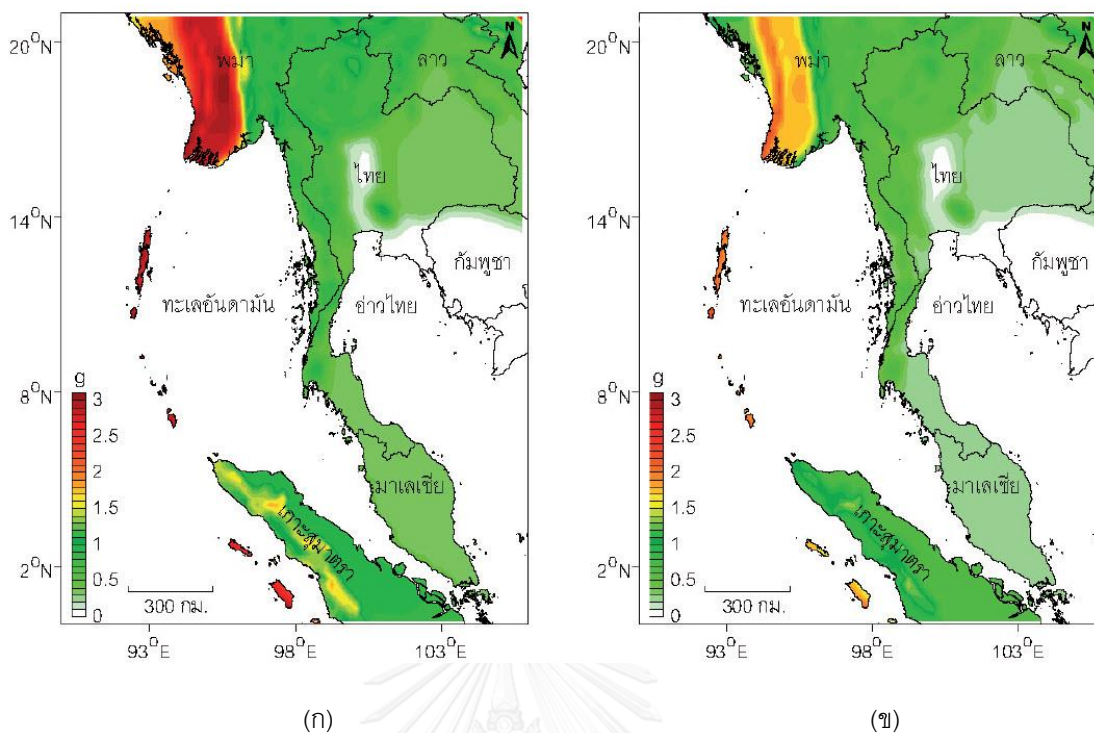
รูปที่ 2.14 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีโอกาสเกิด
ก) 10% ข) 2% ในรอบ 50 ปี (Ornthammarith และคณะ, 2010)

สันติ ภัยหลบลี้ และคณะ (2553) ได้ศึกษาวิจัยการประเมินระดับอันตรายจากแผ่นดินไหว โดยใช้แนวคิดความน่าจะเป็น และสร้างแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวโดยแสดงเส้นชั้นระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวครอบคลุมประเทศไทยและพื้นที่ข้างเคียง โดยพิจารณาแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวที่เป็นกลุ่มรอยเลื่อนร่วมกับเขตกำเนิดแผ่นดินไหวจำนวน 21 เขต ที่เสนอโดย Charusiri และคณะ (2005) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งวิเคราะห์จากข้อมูลการสำรวจรอยเลื่อนมีพลังและประมวลผลร่วมกับฐานข้อมูลแผ่นดินไหวปัจจุบัน และใช้แบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่ของ Idriss (1993) สำหรับกรณีของแผ่นดินไหวที่เกิดจากรอยเลื่อนภายในแผ่นเปลือกโลก (Shallow crustal earthquake) และแบบจำลองของ Crouse (1991) สำหรับกรณีของแผ่นดินไหวที่เกิดจากแนวการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก (Subduction zone earthquake) ผลการประเมินพบว่า ประเทศไทยมีโอกาส 2% ในรอบ 50 ปี ที่ความเร่งสูงสุดบนพื้นดินจะมีค่ามากกว่าหรือ

เท่ากับ 1g และประเทศไทยมีโอกาส 10% ในรอบ 50 ปี ที่ความเร่งสูงสุดบนพื้นดินจะมีค่ามากกว่า 0.5g และพบว่าระดับอันตรายจากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าการศึกษาในอดีต

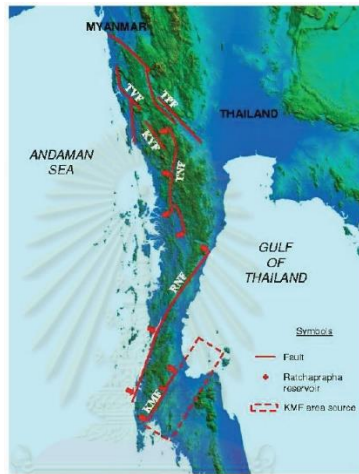


รูปที่ 2.15 ก) การกระจายตัวของกลุ่มรอยเลื่อนที่มีโอกาสมีพลัง (Pailoplee และคณะ, 2009)
ข) เขตกำเนิดแผ่นดินไหว (Charusiri et al, 2005) (จาก สันติ ภัยหลบลี้ และคณะ, 2553)

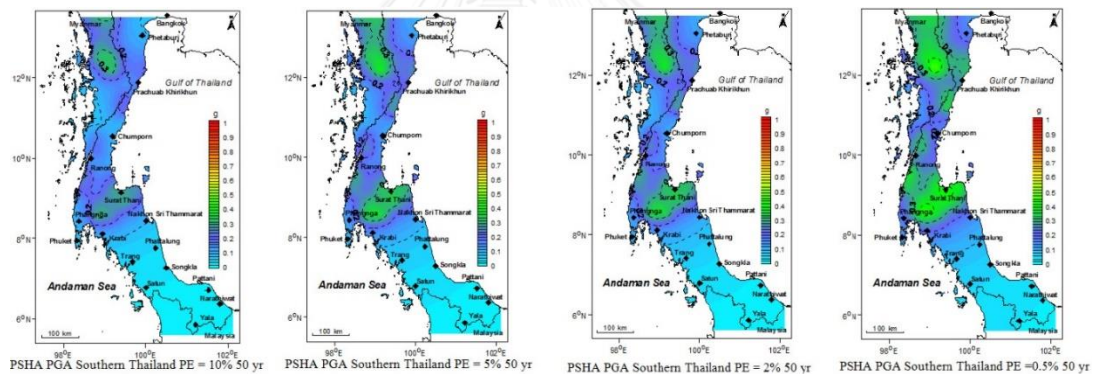


รูปที่ 2.16 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีโอกาสเกิด
ก) 2% ข) 10% ในรอบ 50 ปี (สันติ ภัยหลบลี้ และคณะ, 2553)

Sutiwanich (2012) ได้ศึกษาแผ่นดินไหวบรรพกาลของรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยและรอยเลื่อนระนองและจัดทำแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย โดยพิจารณาแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยรวมทั้งเขตเปลือกโลกมุดตัวสุมาตรา-อันดามัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 การวิเคราะห์ที่ใช้วิธีความน่าจะเป็นและ Logic tree เพื่อสร้างแผนที่แสดงค่าความเร่งในแนวราบสูงสุด และค่าความเร่งเสปคตรัม ที่คาบเวลา 0.2, 0.3 และ 1 วินาที ในรอบ 500, 1000, 2500 และ 10000 ปี จากผลการวิจัยพบว่าพื้นที่ตามแนวรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย เป็นบริเวณที่ได้รับแรงสั่นสะเทือนมากที่สุด โดยในรอบ 500-10000 ปี มีค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดระหว่าง 0.28g - 0.52g และค่าความเร่งเสปคตรัมมากที่สุดที่คาบเวลา 0.2 วินาที มีค่า 0.52g - 0.8g



รูปที่ 2.17 แผนที่แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง (Sutiwanich, 2012)

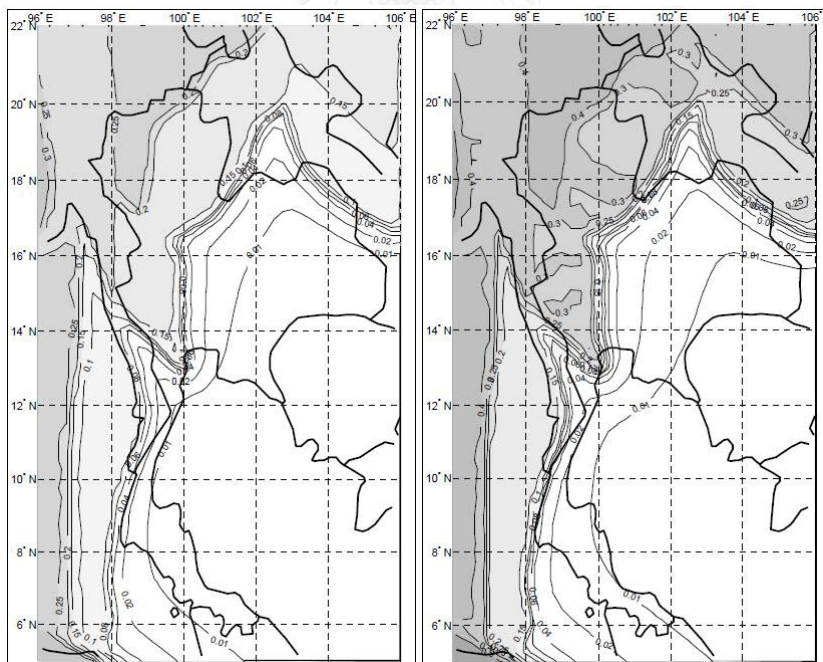


รูปที่ 2.18 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดที่มีโอกาสเกิด ก) 10% ข) 5% ค) 2% และ ง) 0.5% ในรอบ 50 ปี (Sutiwanich, 2012)

Palasri (2012) ได้วิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็นอีกครั้งและพัฒนาจัดทำแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวของประเทศไทยและบริเวณใกล้เคียง โดยเพิ่มข้อมูลแผ่นดินไหวที่ใช้วิเคราะห์ใหม่ จากกรมอุตุนิยมวิทยาประเทศไทยและจากสำนักงานสำรวจทางธรณีวิทยาของประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 1912 ถึง ค.ศ. 2009 และใช้แบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวของ Sadigh และคณะ (1997) และแบบจำลองของ

Idriss (1993) ในเขตรอยเลื่อนที่เคลื่อนตัว และแบบจำลองของ Petersen และคณะ (2004) ในเขตมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก ผลของการวิเคราะห์แสดงเป็นแผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็นสำหรับค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดที่ชั้นหินดาน และสเปกตรัมความเร่งที่มีโอกาสเกิน 10% และ 2% ในรอบ 50 ปี

พบว่าสำหรับโอกาสเกิน 10% ในรอบ 50 ปี ความเร่งในแนวราบสูงสุดมีค่าประมาณ 0.25g ทางภาคเหนือ 0.15g ทางภาคตะวันตก และ 0.03g ในบริเวณกรุงเทพมหานคร ส่วนสเปกตรัมความเร่งที่คาบการสั่น 0.2 วินาทีมีค่าประมาณ 0.6g ทางภาคเหนือ 0.3g ทางภาคตะวันตก และ 0.06g ในบริเวณกรุงเทพมหานคร และสเปกตรัมความเร่งที่คาบการสั่น 1.0 วินาทีมีค่าประมาณ 0.15g ทางภาคเหนือ 0.08g ทางภาคตะวันตก และ 0.03g ในบริเวณกรุงเทพมหานคร ค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดและสเปกตรัมความเร่งสำหรับโอกาสเกิน 2% ในรอบ 50 ปีมีค่าประมาณ 1.6 ถึง 2 เท่าของค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดและสเปกตรัมความเร่งสำหรับโอกาสเกิน 10% ในรอบ 50 ปี



รูปที่ 2.19 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวแสดงค่าความเร่งในแนวราบสูงสุดที่มีโอกาสเกิด
ก) 10% ข) 2% ในรอบ 50ปี Palasri (2012)

บทที่ 3

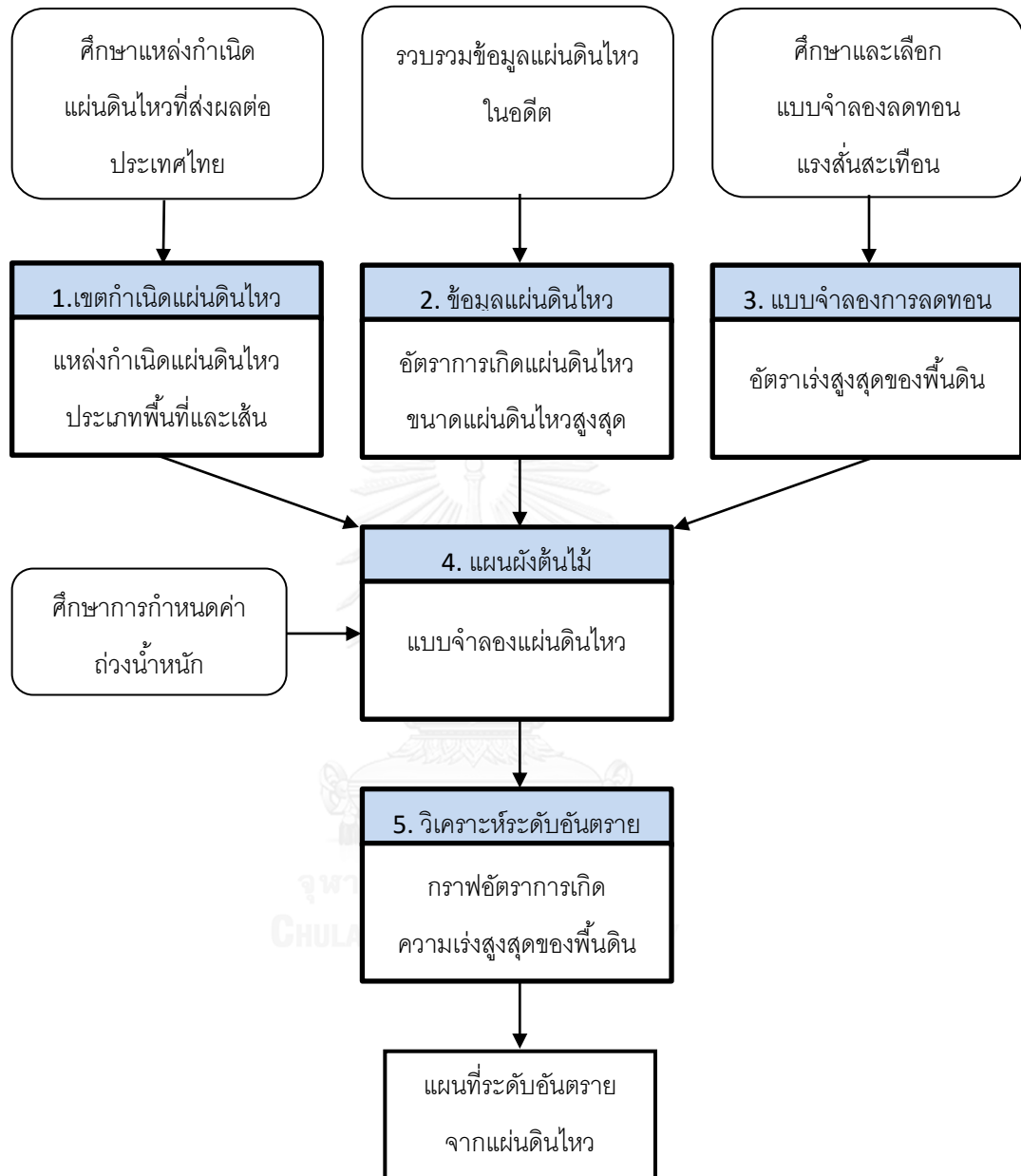
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการประเมินระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ทั้งวิธีการประเมินแบบกำหนดค่า (Deterministic seismic hazard analysis, DSHA) และวิธีเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic seismic hazard analysis, PSHA) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประเมินระดับอันตรายด้วยวิธีความน่าจะเป็นในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน โดยพิจารณาขนาดของแผ่นดินไหว และระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา รวมทั้งคำนึงถึงความไม่แน่นอนของแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือน ระยะทาง ขนาดและอัตราการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งกระบวนการดำเนินงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

3.1 กำหนดเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว

ประเทศไทยนั้นได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวจากเขตมุดตัวของเปลือกโลกและรอยเลื่อนมีพลังทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวบริเวณภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้ถูกระบุตามการศึกษาวิจัยต่างๆดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 ในงานวิจัยครั้งนี้ได้พิจารณาแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวทั้งจากเขตกำเนิดแผ่นดินไหวและจากรอยเลื่อนที่มีโอกาสมีพลังบางส่วนภายในและภายนอกประเทศไทย เพื่อใช้ในการประเมินระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวที่อาจส่งผลกระทบต่อประเทศไทย

Pailoplee และ Choowong (2013) ได้มีการศึกษาและปรับปรุงเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวบนพื้นฐานทางธรณีวิทยา ธรณีสังฐาน และจากการรวบรวมข้อมูลแผ่นดินไหวในช่วงปี ค.ศ. 1940-2010 ที่มีขอบเขตอยู่ภายในละติจูดที่ 1 องศาใต้ ถึง 30 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 89 ถึง 113 องศาตะวันออก ซึ่งครอบคลุมเขตการมุดตัวของเปลือกโลกและรอยเลื่อนภายในเปลือกโลก โดยได้แบ่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ออกเป็น 13 เขต ตั้งแต่เขต A-M ได้แก่ เขตกำเนิดแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันระหว่างและภายในแผ่นเปลือกโลก เขตรอยเลื่อนสะกาย เขตลุ่มน้ำ



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

อันตามัน เขตรอยเลื่อนสุมาตรา เขตรอยเลื่อน Hsenwi-Nanting เขตภาคตะวันตกและภาคใต้ของประเทศไทย เขตรอยเลื่อน Jinghong- Mengxing เขต ภาคเหนือของประเทศไทยถึงDein Bein Fhu เขตรอยเลื่อน Song Da-Song Ma เขตรอยเลื่อน Xianshuihe และเขตรอยเลื่อนแม่น้ำแดง แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวทั้ง 13 เขตจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

สำหรับรอยเลื่อนมีพลังที่มีโอกาสส่งผลกระทบต่อด้านแรงสั่นสะเทือน ทั้งภายในและภายนอกประเทศไทยนั้น ในงานวิจัยของ Pailoplee และคณะ (2009) ซึ่งทำการแปลความหมายข้อมูลโทรสัมผัส ได้ทำการสรุปกลุ่มรอยเลื่อนที่มีโอกาสเป็นรอยเลื่อนมีพลังและอาจก่อให้เกิดแรงสั่นสะเทือนต่อประเทศไทยจำนวน 55 กลุ่ม และจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้โดยแสดงในรูปที่ 2.15 ก.

3.2 ข้อมูลแผ่นดินไหว

การวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นของการเกิดแผ่นดินไหวแต่ละขนาดความรุนแรง จะใช้ข้อมูลขนาดของแผ่นดินไหว ตำแหน่ง และเวลาที่เกิดแผ่นดินไหวในอดีต เพื่อมาหาความสัมพันธ์ของขนาดและอัตราการเกิดแผ่นดินไหวในแต่ละแหล่งกำเนิด Pailoplee และ Choowong (2013) ได้มีการศึกษาการกระจายของความถี่และขนาดแผ่นดินไหว เพื่อหาความน่าจะเป็นในการเกิดแผ่นดินไหวขนาดต่างๆในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวในอดีต ช่วงปี 1964 ถึงปี 2010 ที่มีขอบเขตอยู่ภายในละติจูดที่ 1 องศาใต้ ถึง 30 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 89 ถึง 113 องศาตะวันออก ซึ่งครอบคลุมภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จาก Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)

โดยหน่วยของขนาดแผ่นดินไหวที่ถูกบันทึกแตกต่างกันหลายมาตรา จึงต้องทำการแปลงให้อยู่ในมาตราเดียวกันคือมาตราโมเมนต์ M_w และต้องทำการจำแนกเฉพาะแผ่นดินไหวหลักสำหรับการทำไปใช้วิเคราะห์จึงต้องทำการตัดแผ่นดินไหวที่เกิดก่อนและหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวหลักโดยใช้หลักการของ Gardner และ Knopoff (1974) แล้วจึงนำไปวิเคราะห์การกระจายของความถี่และขนาดแผ่นดินไหวตามความสัมพันธ์ของ Gutenberg และ Richter (1944) และสามารถหาค่า a และ b แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะนำเอาค่าคงที่ a และ b ในแต่ละเขตกำเนิดแผ่นดินไหวจากการศึกษาของ Pailoplee และ Choowong (2013) มาคำนวณหาค่าอัตราการเกิด

แผ่นดินไหว เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โอกาสการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวใน
ขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ a และ b ของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (Pailoplee และ Choowong, 2013)

Zone	Name	a	b
A	Sumatra-Andaman Interplate	4.06	0.63
B	Sumatra-Andaman Intraslab	4.01	0.68
C	Sagaing Fault Zone	4.05	0.72
D	Andaman Basin	1.8	0.39
E	Sumatra Fault Zone	4.25	0.75
F	Hsenwi-Nanting Fault Zone	3.57	0.7
G	Western Thailand	2.85	0.57
H	Southern Thailand	3.1	0.66
I	Jinghong-Mengxing Fault Zones	3.28	0.61
J	Northern Thailand-Dein Bein Fhu	4.32	0.8
K	Song Da-Song Ma Fault Zones	3.48	0.74
L	Xianshuihe Fault Zone	3.58	0.61
M	Red River Fault Zone	4.32	0.84

3.3 แบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือน

ในการหาค่าของตัวแปรแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว ณ ตำแหน่งที่สนใจ เช่น ค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน ค่าความเร่งสเปกตรัม จะสามารถประมาณได้จากขนาดของแผ่นดินไหว ระยะทางจากตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหวถึงตำแหน่งที่ศึกษา รูปแบบของรอยเลื่อน หรือลักษณะชนิดดิน โดยใช้แบบจำลองการลดทอนแรงสั่นสะเทือนที่เหมาะสมที่ถูกพัฒนาจากภูมิภาคที่มีลักษณะข้อมูลทางธรณีฐานไหวสะเทือนคล้ายคลึงกับประเทศไทย โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เลือกแบบจำลองสำหรับเขตแผ่นดินไหวภายในเปลือกโลก และเขตมุดตัวของเปลือกโลกดังนี้

3.3.1 เขตแผ่นดินไหวภายในเปลือกโลก

Idriss (1993) ได้เสนอแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว สำหรับกรณีชั้นหินแสดงได้ดังสมการที่ 3.1

$$\ln(y) = (\alpha_0 + e^{\alpha_1 + \alpha_2 M}) + (\beta_0 - e^{\beta_1 + \beta_2 M}) \ln(R + 20) + 0.2F + \varepsilon \quad (3.1)$$

โดยที่ y คือ ค่าแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในหน่วย g

M คือ ขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราโมเมนต์

R คือ ระยะทางจากตำแหน่งเกิดแผ่นดินไหวในหน่วยกิโลเมตร

$F = 0, 0.5$ และ 1 สำหรับรอยเลื่อนตามแนวระดับ รอยเลื่อนเฉียง และรอยเลื่อนย้อน ตามลำดับ

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \varepsilon$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว แสดงค่าดังตารางในภาคผนวก ก.

Sadigh และคณะ (1997) ได้เสนอแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากข้อมูลแผ่นดินไหวภายในเปลือกโลกของแคลิฟอร์เนีย สำหรับรอยเลื่อนในแนวระดับและรอยเลื่อนย้อน โดยมีขนาดระหว่าง 4 ถึง 8 ตามมาตราโมเมนต์ และมีระยะทางตั้งแต่ 0 ถึง 100 กิโลเมตร สำหรับกรณีชั้นหินแสดงได้ดังสมการที่ 3.2

$$\ln(y) = C_1 + C_2 M + C_3 (8.5M)^{2.5} + C_4 \ln(r_{rup} + e^{C_5 + C_6 M}) + C_7 \ln(r_{rup} + 2) \quad (3.2)$$

โดยที่ y คือ ค่าแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในหน่วย g

M คือ ขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราโมเมนต์

r_{rup} คือ ระยะห่างที่ใกล้ที่สุดจากตำแหน่งเกิดแผ่นดินไหว ในหน่วยกิโลเมตร

C_1 ถึง C_7 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว แสดงค่าดังตารางในภาคผนวก ก.

Boore และ Atkinson (2008) ได้เสนอแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว สำหรับแผ่นดินไหวขนาด 5 ถึง 8 ระยะทางไม่เกิน 200 กิโลเมตร ความเร็วของคลื่นเฉือนที่ความลึกจากผิวดิน 30 เมตรระหว่าง 180 ถึง 1300 เมตรต่อวินาที กรณีชั้นหินแสดงได้ดังสมการที่ 3.3

$$\ln(y) = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon\sigma_T \quad (3.3)$$

โดยที่ y คือ ค่าแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในหน่วยเซนติเมตรต่อวินาทีกำลังสอง

M คือ ขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราโมเมนต์

R_{JB} คือ ระยะทางจากตำแหน่งเกิดแผ่นดินไหวของ Joyner-Boore ในหน่วยกิโลเมตร

F_M, F_D และ F_S คือ ฟังก์ชันของขนาดแผ่นดินไหว ระยะทาง และลักษณะชั้นดินของพื้นที่ศึกษา แสดงค่าดังตารางในภาคผนวก ก.คือ

σ_T คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.3.2 เขตมุดตัวของเปลือกโลก

Youngs และคณะ (1997) ได้เสนอแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับแผ่นดินไหวขนาดมากกว่า 5 ตามมาตราโมเมนต์ และมีระยะทางตั้งแต่ 10 ถึง 100 กิโลเมตร ในกรณีชั้นหินแสดงได้ดังสมการที่ 3.4

$$\ln(y) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_T \quad (3.4)$$

$$\sigma = C_4 + C_5M \quad (3.5)$$

โดยที่ y คือ อัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินในหน่วย g

M คือ ขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราโมเมนต์

r_{rup} คือ ระยะทางจากตำแหน่งเกิดแผ่นดินไหวในหน่วยกิโลเมตร

H คือ ความลึกในหน่วยกิโลเมตร

$Z_T = 0$ หรือ 1 กรณีแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวระหว่างแผ่นและภายในแผ่น ตามลำดับ

C_1 ถึง C_5 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว แสดงค่าดังตารางในภาคผนวก ก.

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ถ้าแผ่นดินไหวขนาดมากกว่า 8 ให้ใช้ค่าเท่ากับขนาด 8

Atkinson และ Boore (2003) ได้เสนอแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว บริเวณเขตมุดตัวของเปลือกโลก สำหรับประยุกต์ใช้ในบริเวณเขตมุดตัวแคสคาเดียและภูมิภาคอื่นๆ แสดงได้ดังสมการที่ (3.6)

$$\log(y) = c_1 + c_2M + c_3h + c_4R - g \log R + c_5 \cdot sl \cdot S_C + c_6 \cdot sl \cdot S_D + c_7 \cdot sl \cdot S_E \quad (3.6)$$

โดยที่ y คือ อัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินในหน่วย g

M คือ ขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราโมเมนต์

R คือ ระยะทางจากตำแหน่งเกิดแผ่นดินไหวในหน่วยกิโลเมตร

h คือ ความลึกในหน่วยกิโลเมตร

g คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรขนาดของแผ่นดินไหว

S_C, S_D และ S_E คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรตามประเภทของชั้นดินตาม NEHRP

c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 และ sl คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่แปรเปลี่ยนตามคาบธรรมชาติของแผ่นดินไหว แสดงค่าดังตารางในภาคผนวก ก.

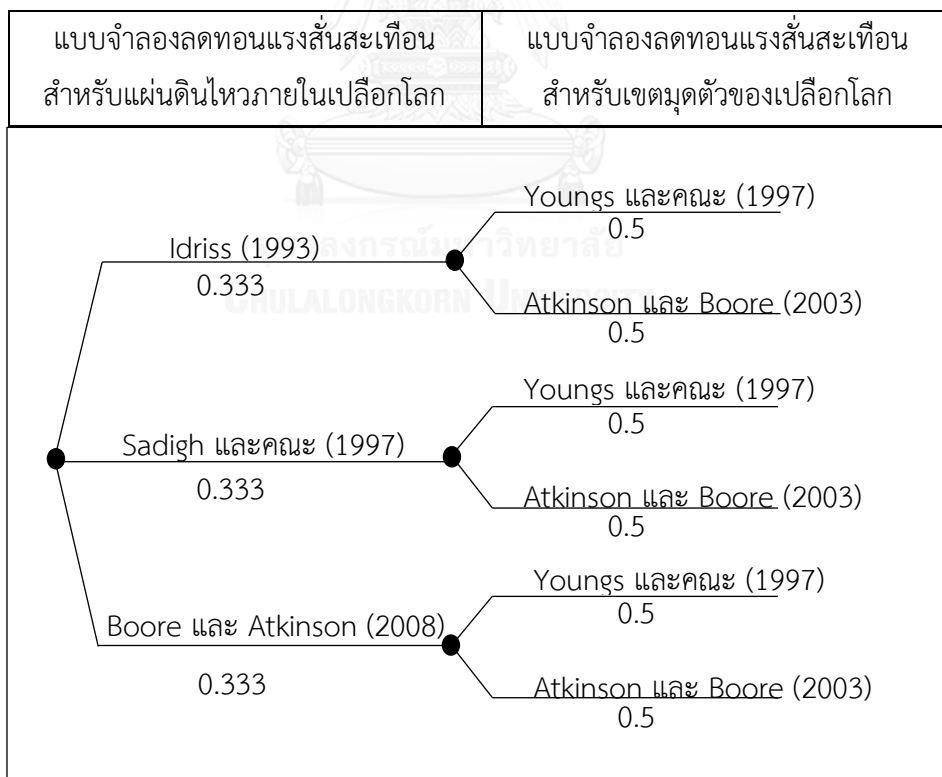
3.4 แผนผังต้นไม้

การวิเคราะห์ระดับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีความน่าจะเป็นนั้นมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ เนื่องจากข้อมูลที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์หรือความคลาดเคลื่อนในการประมาณเหตุการณ์แผ่นดินไหว เช่น สมมติฐานของการใช้แบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือน ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีการแผนผังต้นไม้เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอน ดังสมการที่ 3.7 โดยในแต่ละแขนงของแผนผังจะแสดงทางเลือกที่ถูกกำหนดค่าน้ำหนักของความเป็นไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

$$E[v(a)] = \sum_{i=1}^N E[v(a | j)]w_j \quad (3.7)$$

โดยที่ $E[v(a | j)]$ คือ อัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือน a ในกรณี j

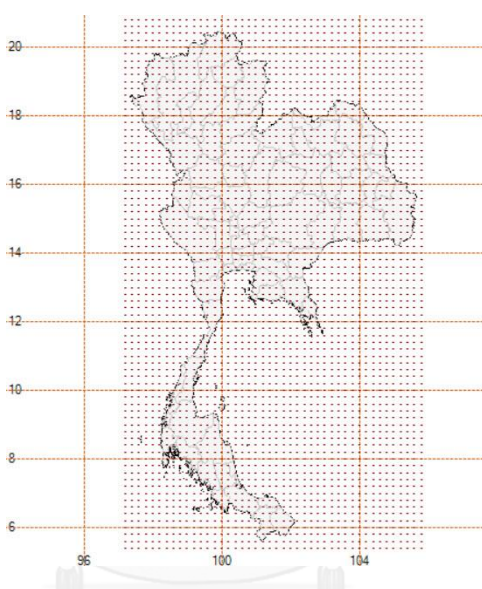
w_j คือ ค่าน้ำหนักความเป็นไปได้ของกรณี j



รูปที่ 3.2 แผนผังต้นไม้และค่าถ่วงน้ำหนัก

3.5 การวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหว

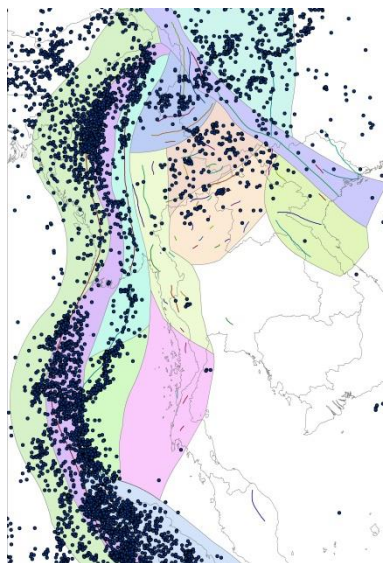
ในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีความน่าจะเป็นตามทฤษฎีของ Cornel (1968) โดยใช้โปรแกรม CRISIS 2007 (ตัวอย่างการนำเข้าสู่ข้อมูลและผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข.) และคำนวณแต่ละตำแหน่งที่ศึกษาด้วยตารางกริดระยะห่าง 0.2 องศา ตั้งแต่ ละติจูดที่ 5 ถึง 21 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 97 ถึง 106 องศาตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 พื้นที่ศึกษาและเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว

CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อได้โอกาสการเกิดแรงสั่นสะเทือนของแต่ละตำแหน่งแล้วจึงนำมาคูณค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละกรณีของแผนผังต้นไม้และหาค่าผลรวมของทุกกรณี ทั้งการจำลองแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแบบเขตพื้นที่และการจำลองแบบเส้นหรือรอยเลื่อน จากนั้นทำการรวมอัตราการผลิตแผ่นดินไหวจากแหล่งกำเนิดทั้งสองชนิดโดยหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ซึ่งได้กำหนดให้การจำลองแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแบบเขตพื้นที่มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.7 และการจำลองแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแบบเส้นมีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.3 เนื่องจากเมื่อพิจารณาเหตุการณ์แผ่นดินไหวล่าสุดที่ขนาดแผ่นดินไหวมากกว่า 4 พบว่าเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในแต่ละเขตพื้นที่มีสัดส่วนต่อแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเลื่อนเป็น 0.7 ต่อ 0.3 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ ตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 การจำลองแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแบบพื้นที่ เส้น และเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแบบพื้นที่และเส้น

เขตแหล่งกำเนิด แผ่นดินไหว	เหตุการณ์ แผ่นดินไหวในเขต กำเนิดแบบพื้นที่	เหตุการณ์ แผ่นดินไหว บริเวณรอยเลื่อน	สัดส่วนเหตุการณ์ แผ่นดินไหวในเขต แบบพื้นที่	สัดส่วนเหตุการณ์ แผ่นดินไหว บริเวณรอยเลื่อน
F	107	55	0.66	0.34
G	21	10	0.68	0.32
I	139	49	0.74	0.26
J	65	25	0.72	0.28
K	11	5	0.69	0.31
M	72	37	0.66	0.34

จากนั้นจะได้กราฟอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับระดับที่พิจารณา และจัดทำแผนที่แสดงอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย โดยแสดงเส้นชั้นระดับความรุนแรงในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบเวลา 0.2, 1.0 และ 2.0 วินาที ในกรณีโอกาสความเป็นไปได้ 2% และ 10% ในรอบ 50 ปี ซึ่งคือคาบการเกิดซ้ำ 475 และ 2475 ปี

บทที่ 4

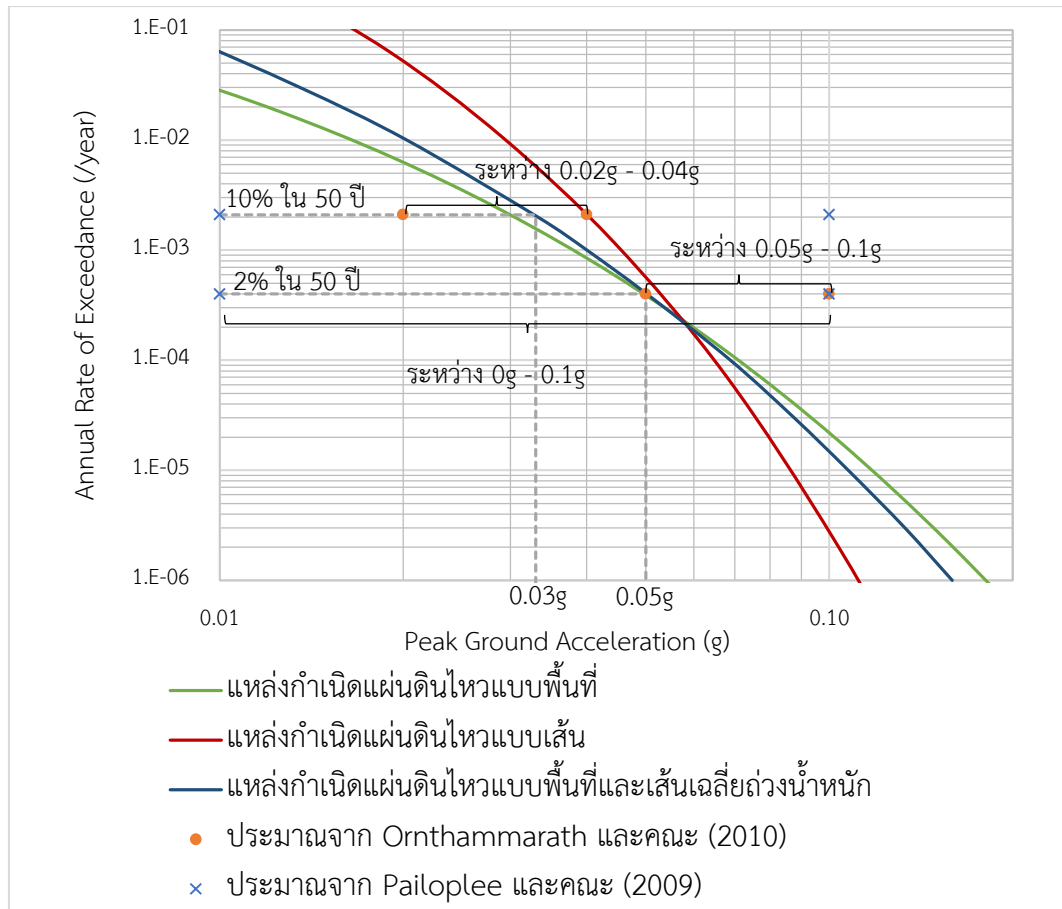
ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น โดยพิจารณาแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแบบพื้นที่จำนวน 13 เขต และกลุ่มรอยเลื่อนที่มีโอกาสเป็นรอยเลื่อนมีพลังจำนวน 55 กลุ่ม และแบบใช้จำลองลดทอนแผ่นดินไหวจำนวน 5 แบบจำลอง ทำการวิเคราะห์ด้วยตารางกริดระยะห่าง 0.2 องศาครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย จะสามารถหากราฟอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมในแต่ละตำแหน่งที่ศึกษา และจัดทำแผนที่แสดงระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในบริเวณประเทศไทยได้

4.1 อัตราการเกิดความเร่งสูงสุดของพื้นดิน

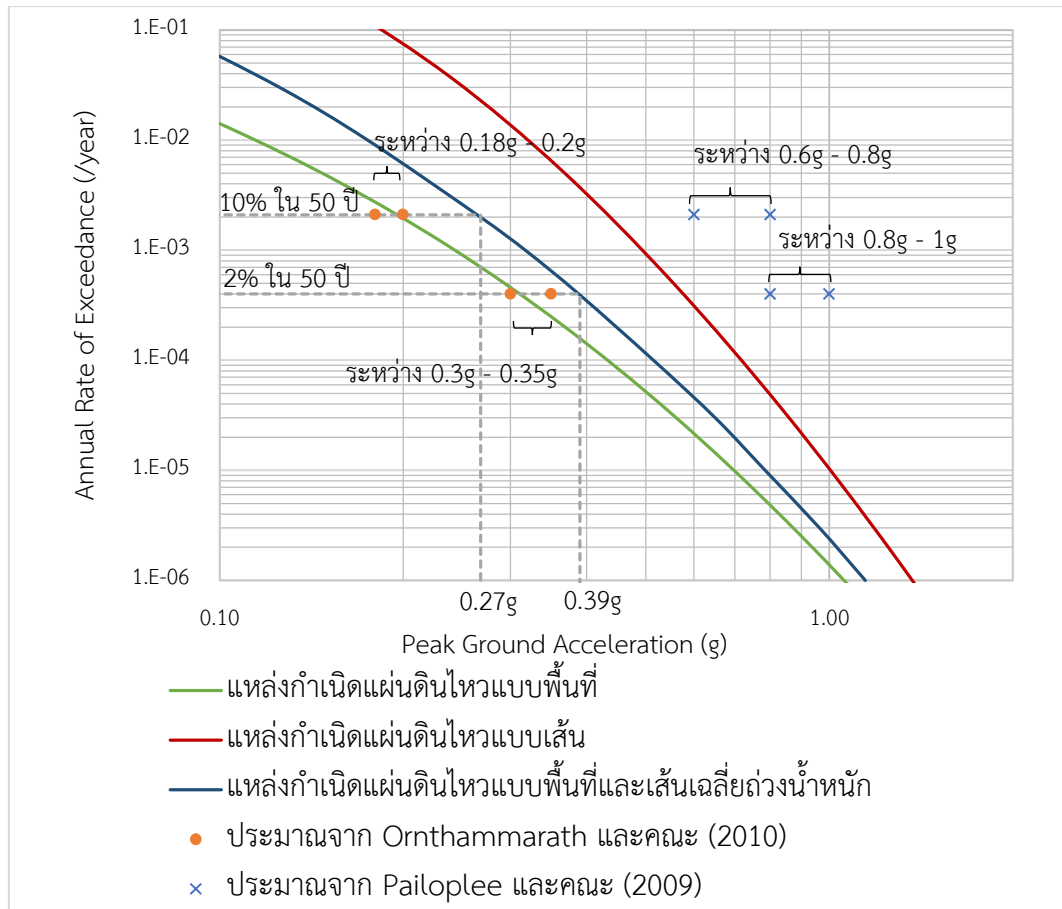
จากการวิเคราะห์ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็นจะได้เส้นกราฟแสดงอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวของแต่ละจุดในขอบเขตกริดที่ศึกษา ตัวอย่างเส้นกราฟอัตราการเกิดความเร่งของพื้นดินสูงสุดที่กรุงเทพมหานคร อำเภอแม่สาย และ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย แสดงได้ดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ โดยโอกาสเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่ 10% ในรอบ 50 ปี คือ อัตราการเกิดแผ่นดินไหวแรงสั่นสะเทือน 0.0021 ต่อปี หรือรอบการเกิดซ้ำ 475 ปี และโอกาสเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่ 2% ในรอบ 50 ปี คือ อัตราการเกิดแผ่นดินไหวแรงสั่นสะเทือน 0.004 ต่อปี หรือรอบการเกิดซ้ำ 2475 ปี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและค่าความเร่งของพื้นดินสูงสุดที่กรุงเทพมหานคร พบว่าที่อัตราการเกิดต่ำกว่า 0.0002 หรือรอบการเกิดซ้ำต่ำกว่า 5000 ปี อัตราการเกิดความเร่งของพื้นดินสูงสุดที่ได้จากการจำลองแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวประเภทพื้นที่มีค่าต่ำกว่าแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวประเภทรอยเลื่อนที่มีโอกาสมีพลัง สำหรับที่อัตราการเกิดมากกว่า 0.0002 หรือรอบการเกิดซ้ำมากกว่า 5000 ปี อัตราการเกิดความเร่งของพื้นดินสูงสุดที่ได้จากการจำลองแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวประเภทพื้นที่มีค่ามากกว่าแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวประเภทรอยเลื่อนที่มีโอกาสมีพลัง



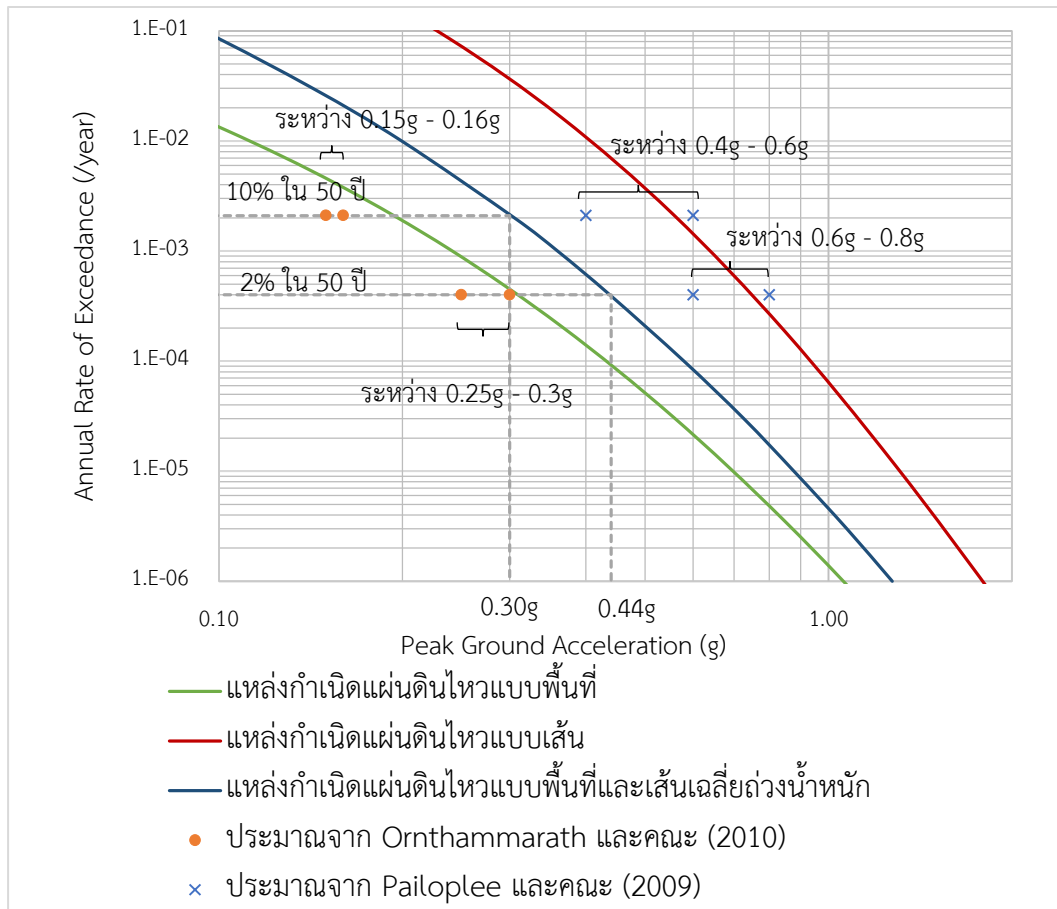
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและค่าความเร่งของพื้นดินสูงสุด ที่กรุงเทพมหานคร ($13.7^{\circ}\text{N } 100.5^{\circ}\text{E}$)

เมื่อวิเคราะห์โดยใช้แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวทั้งสองประเภทโดยเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักความเป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแบบพื้นที่เท่ากับ 0.7 และแหล่งกำเนิดแบบเส้นเท่ากับ 0.3 พบว่าที่โอกาสเกิด 10% ในรอบ 50 ปี ค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินสูงสุดมีค่า 0.03g และที่โอกาสเกิด 2% ในรอบ 50 ปี ค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินสูงสุดมีค่า 0.05g ที่บริเวณกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของการประมาณจากงานวิจัยในอดีตของ Ornthamarath และคณะ (2010) และ Pailoplee และคณะ (2009) ที่ตำแหน่งศึกษาเดียวกัน



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและค่าความเร่งของพื้นดินสูงสุด ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย (20.4°N 99.9°E)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและค่าความเร่งของพื้นดินสูงสุดที่จังหวัดเชียงราย พบว่าที่รอบการเกิดซ้ำเดียวกัน อัตราการเกิดความเร่งของพื้นดินสูงสุดที่ได้จากการจำลองแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวประเภทพื้นที่มีค่าต่ำกว่าแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวประเภทรอยเลื่อนที่มีโอกาสมีพลัง และเมื่อวิเคราะห์โดยใช้แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวทั้งสองประเภทโดยถ่วงน้ำหนักความเป็นไปได้และนำไปเปรียบเทียบกับค่าอัตราเร่งสูงสุดที่ 10% และ 2% ในรอบ 50 ปี กับงานวิจัยในอดีต พบว่าผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้ให้ค่าความเร่งของพื้นดินสูงสุดที่สูงกว่างานวิจัยของ Ornthammarath และคณะ (2010) แต่มีค่าที่ต่ำกว่างานวิจัยของ Pailoplee และคณะ (2009)



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและค่าความเร่งของพื้นดินสูงสุด ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (19.8°N 99.7°E)

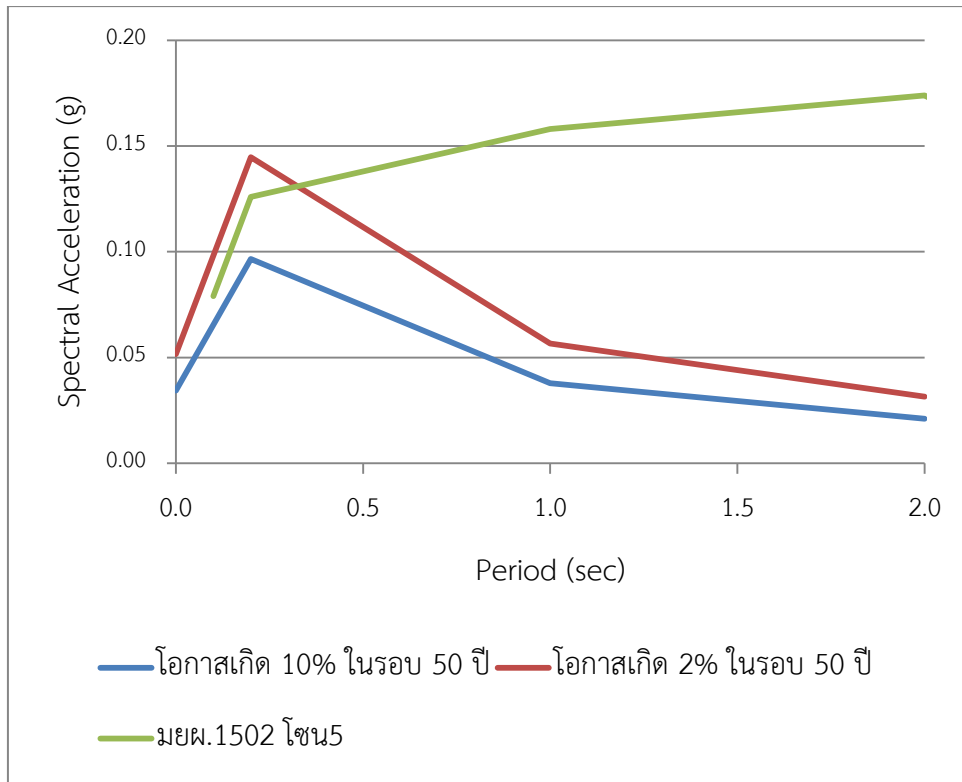
4.2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

การตอบสนองของอาคารต่อการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว จะแสดงในรูปของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์โอกาสในการเกิดความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 1.0 2.0 วินาที ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับระดับที่พิจารณา 10% และ 2% ในรอบ 50 ปี หรือกล่าวคือรอบการเกิดซ้ำ 475 และ 2475 ปี

ตัวอย่างค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมคาบเวลาต่างๆที่กรุงเทพมหานคร ที่อำเภอแม่สาย และที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย แสดงได้ดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมและคาบเวลาแสดงดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่กรุงเทพมหานคร ($13.7^{\circ}\text{N } 100.5^{\circ}\text{E}$)

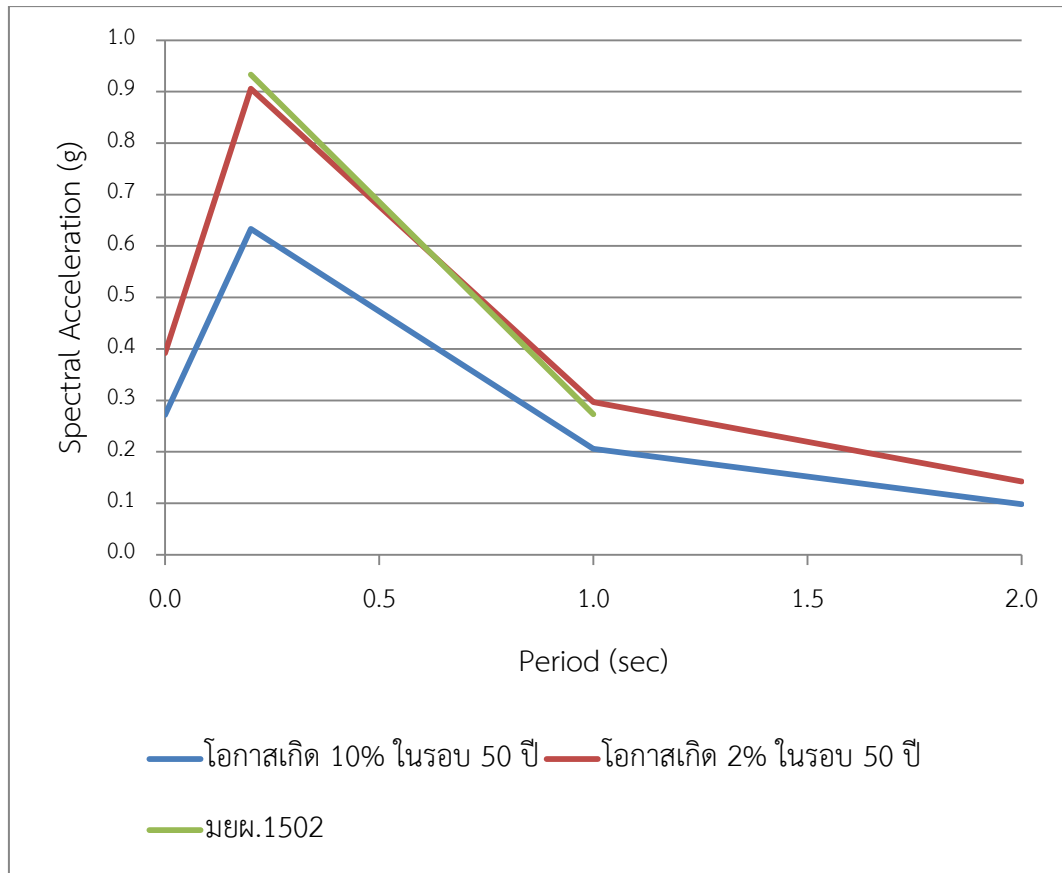
คาบเวลา (วินาที)	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (S_a, g)	
	โอกาสเกิด 10% ในรอบ 50 ปี (รอบการเกิดซ้ำ 475 ปี)	โอกาสเกิด 2% ในรอบ 50 ปี (รอบการเกิดซ้ำ 2475 ปี)
0	0.034	0.052
0.2	0.097	0.145
1	0.038	0.057
2	0.021	0.032



รูปที่ 4.4 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่กรุงเทพมหานคร (13.7°N 100.5°E)

ตารางที่ 4.2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย (20.4°N 99.9°E)

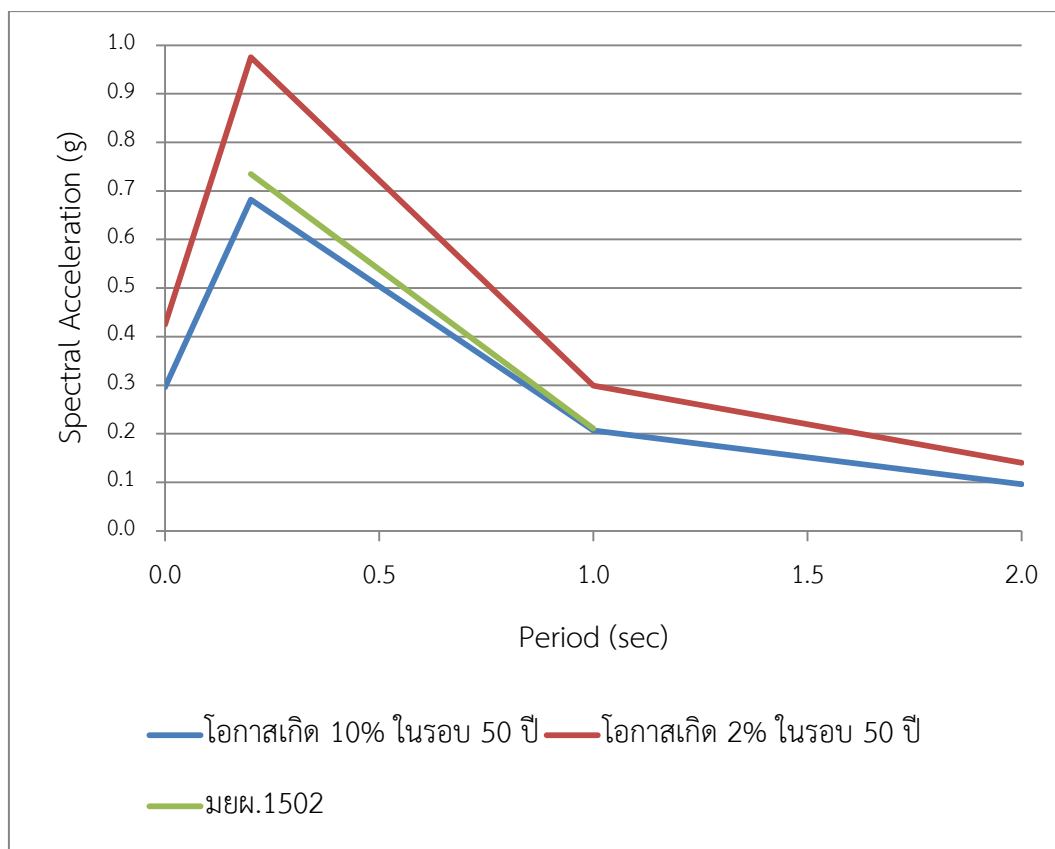
คาบเวลา (วินาที)	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Sa, g)	
	โอกาสเกิด 10% ในรอบ 50 ปี (รอบการเกิดซ้ำ 475 ปี)	โอกาสเกิด 2% ในรอบ 50 ปี (รอบการเกิดซ้ำ 2475 ปี)
0	0.271	0.392
0.2	0.633	0.906
1	0.206	0.297
2	0.098	0.142



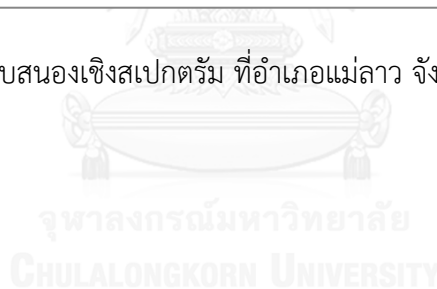
รูปที่ 4.5 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย (20.4°N 99.9°E)

ตารางที่ 4.3 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (19.8°N 99.7°E)

คาบเวลา (วินาที)	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Sa, g)	
	โอกาสเกิด 10% ในรอบ 50 ปี (รอบการเกิดซ้ำ 475 ปี)	โอกาสเกิด 2% ในรอบ 50 ปี (รอบการเกิดซ้ำ 2475 ปี)
0	0.296	0.425
0.2	0.682	0.976
1	0.207	0.299
2	0.096	0.140

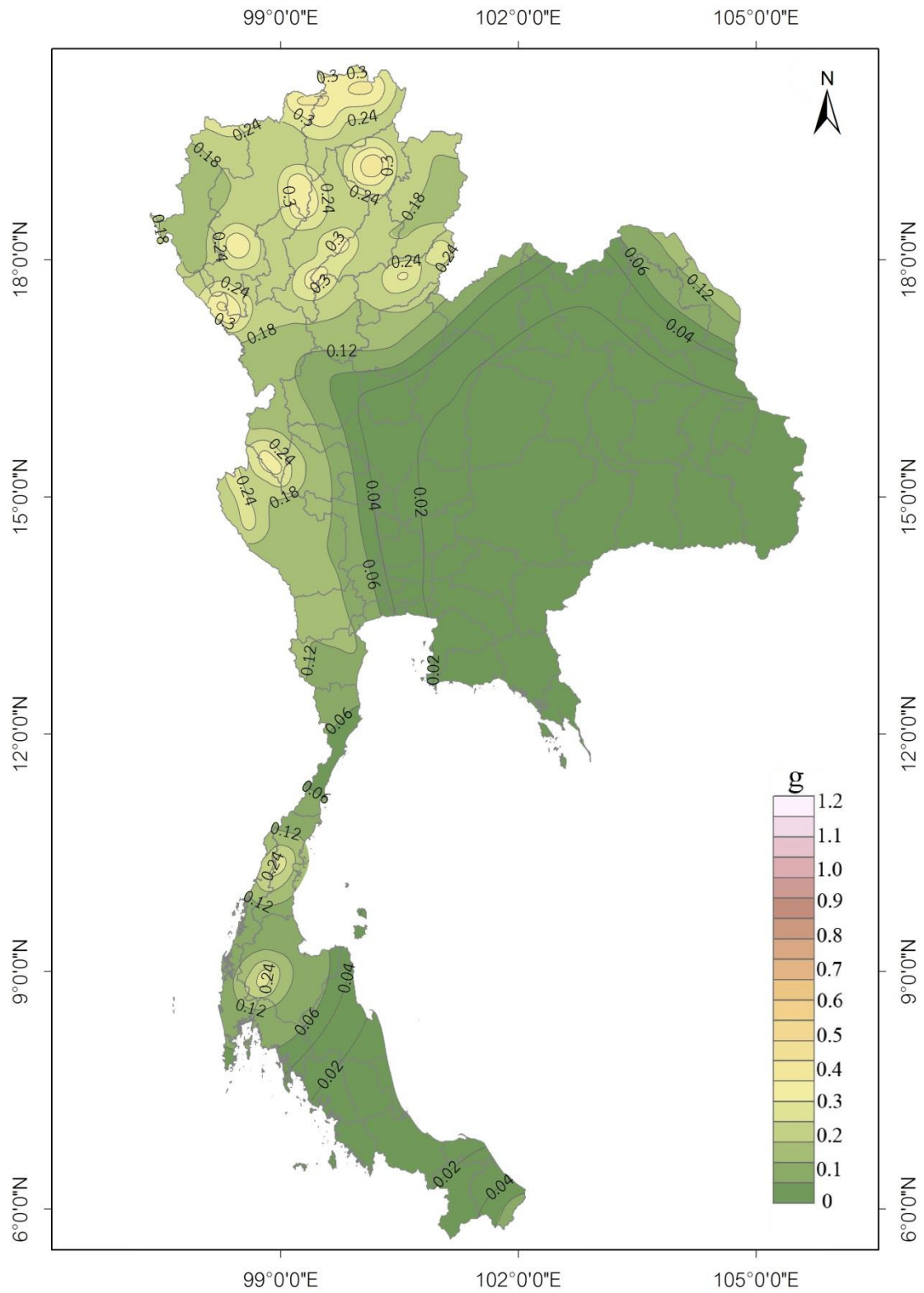


รูปที่ 4.6 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (19.8°N 99.7°E)

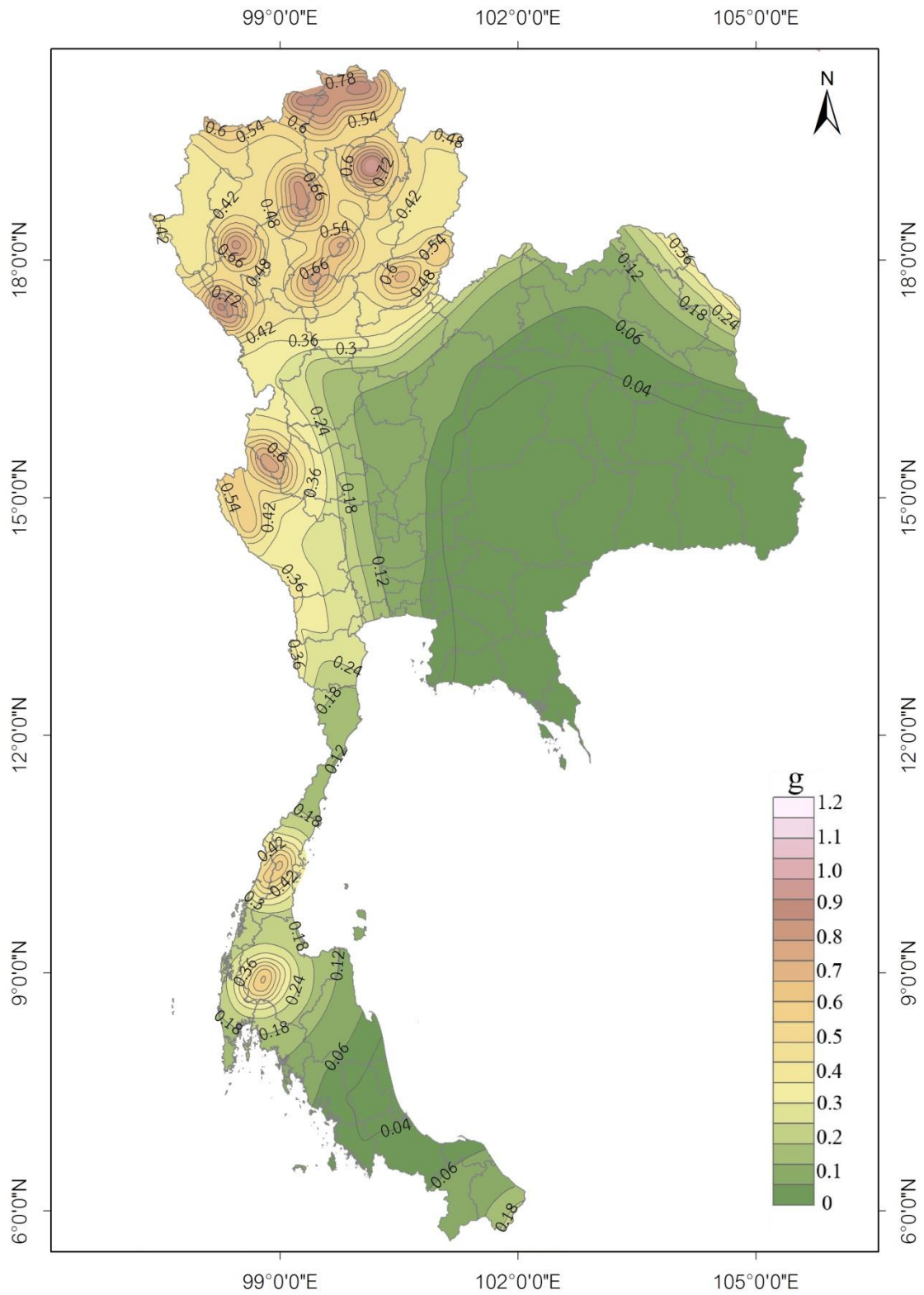


4.3 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหว

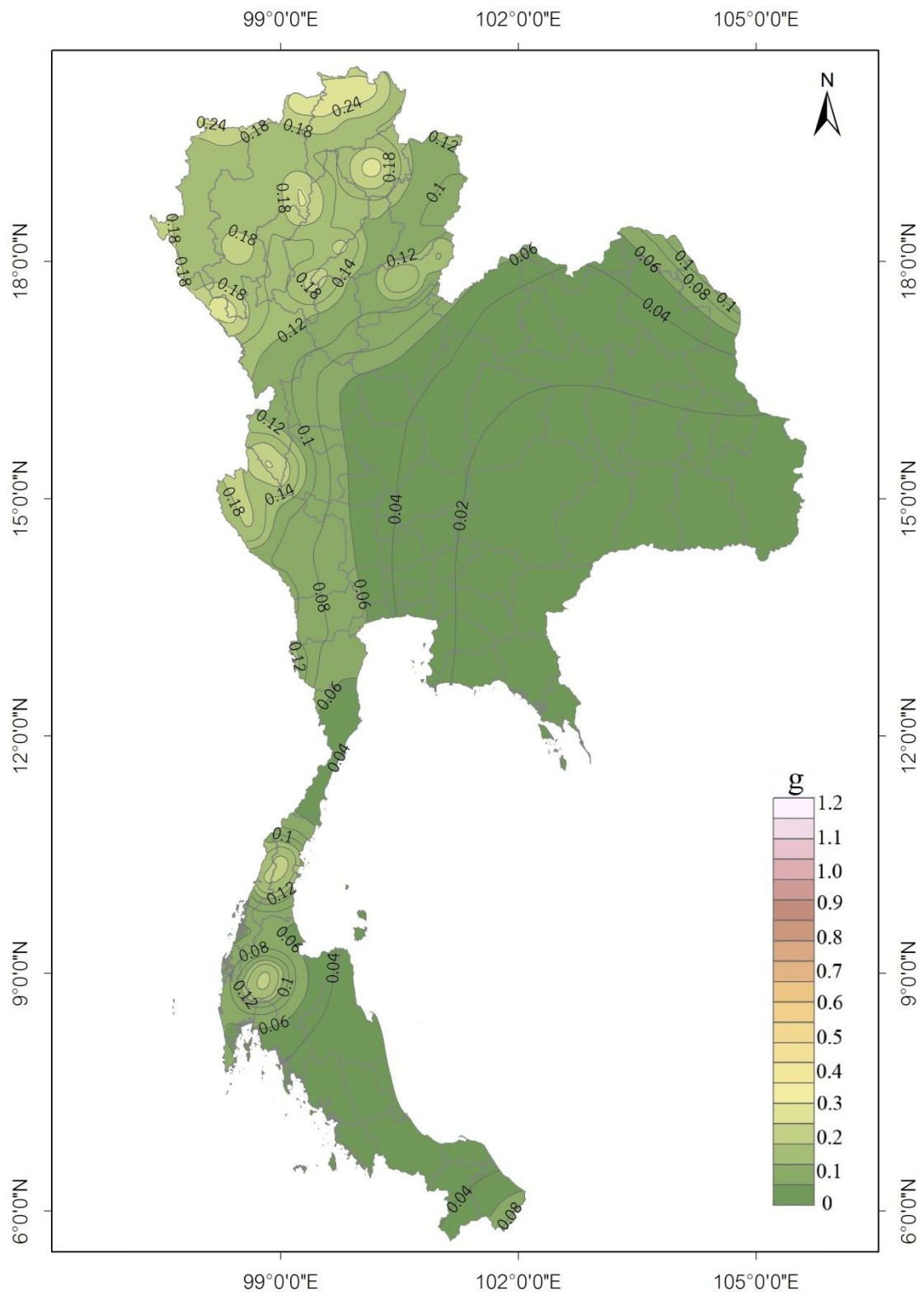
จากกราฟอัตราการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวแต่ละตำแหน่งที่ศึกษาครอบคลุมบริเวณประเทศไทยและการประยุกต์ใช้แผนผังต้นไม้ จะสามารถจัดทำแผนที่แสดงเส้นชั้นระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยสำหรับชั้นหินในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและค่าความเร่งตอบสนองสเปกตรัมที่คาบเวลา 0.2, 1.0 และ 2.0 วินาที ที่มีโอกาสเกิดขึ้นค่าความเร่งที่กำหนด 10% และ 2% ในรอบ 50 ปี หรือกล่าวคือรอบการเกิดซ้ำ 475 และ 2475 ปี แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.14



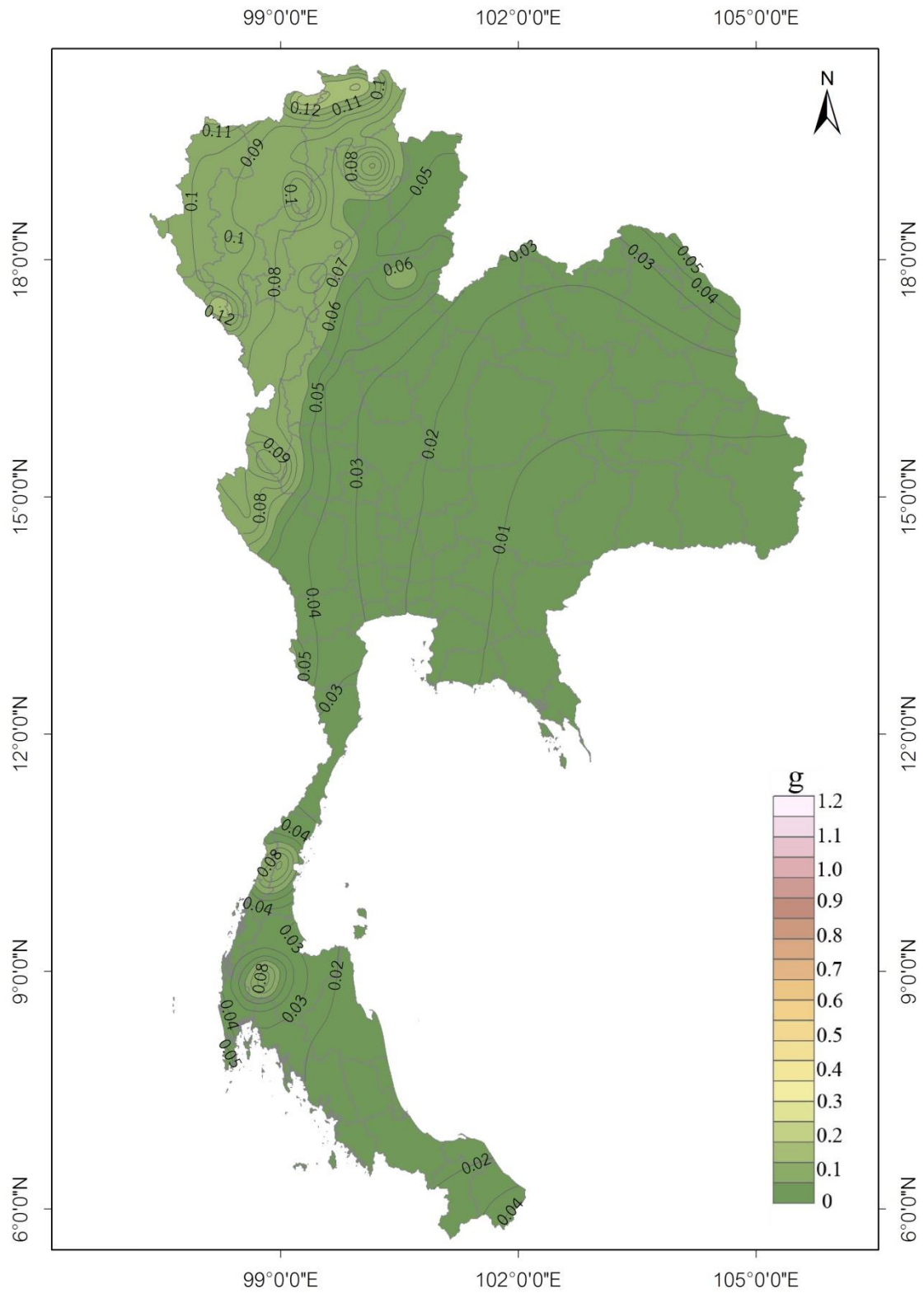
รูปที่ 4.7 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความแรงสูงสุดของพื้นดิน
ที่มีโอกาสเกินค่าที่กำหนด 10% ในรอบ 50 ปี



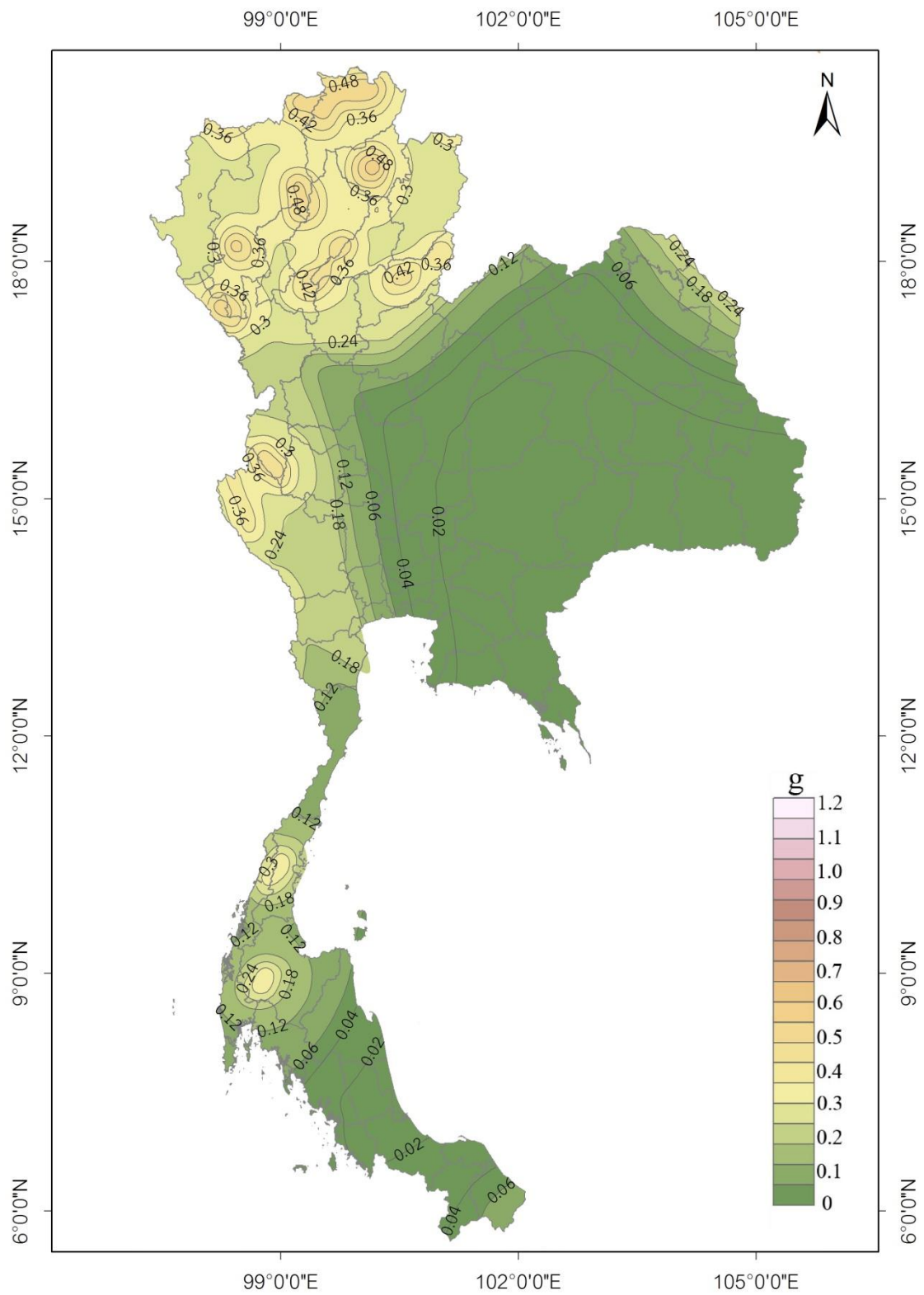
รูปที่ 4.8 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
ที่คาบเวลา 0.2 วินาที ที่มีโอกาสเกินค่าที่กำหนด 10% ในรอบ 50 ปี



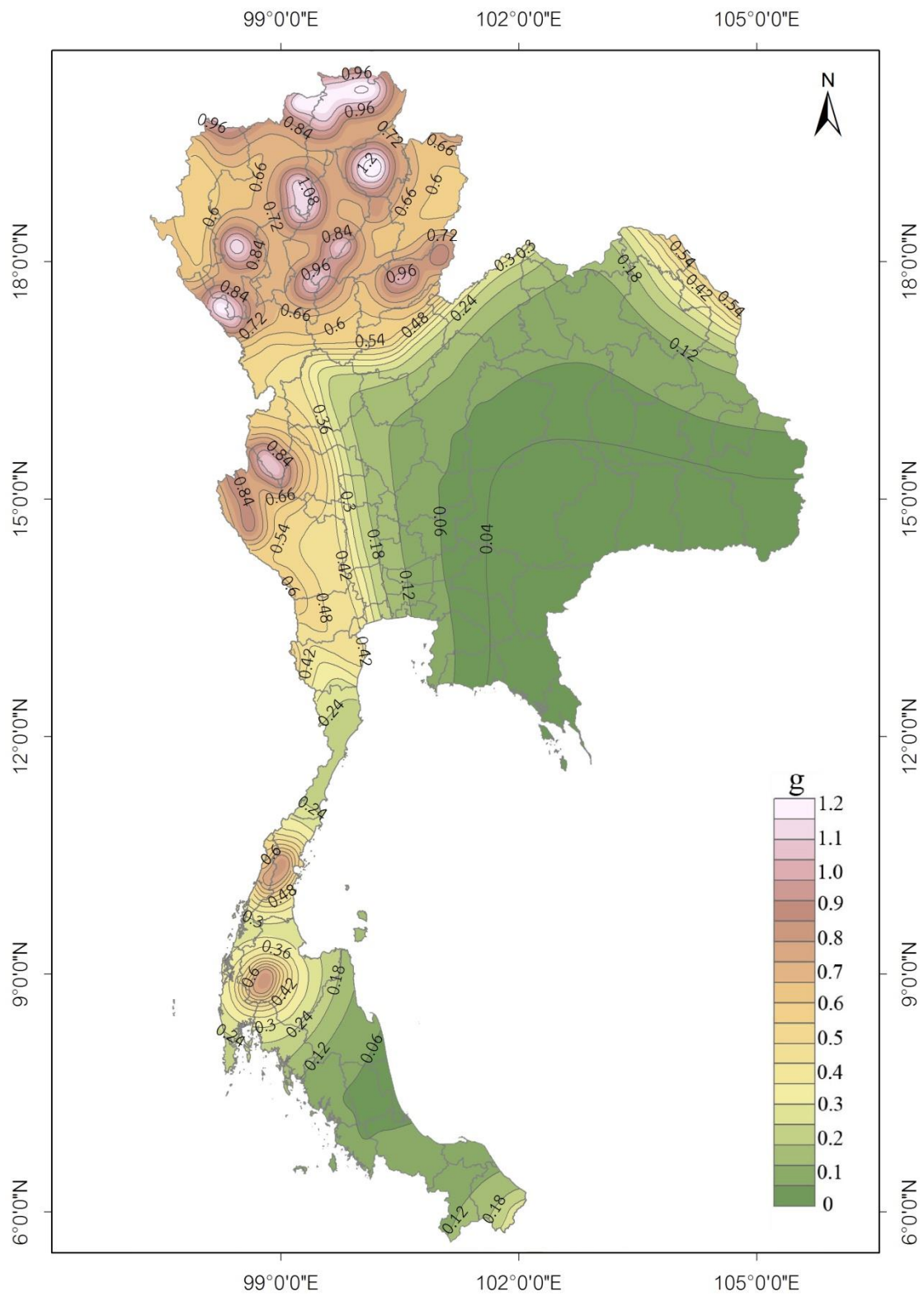
รูปที่ 4.9 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
ที่คาบเวลา 1.0 วินาที ที่มีโอกาสเกินค่าที่กำหนด 10% ในรอบ 50 ปี



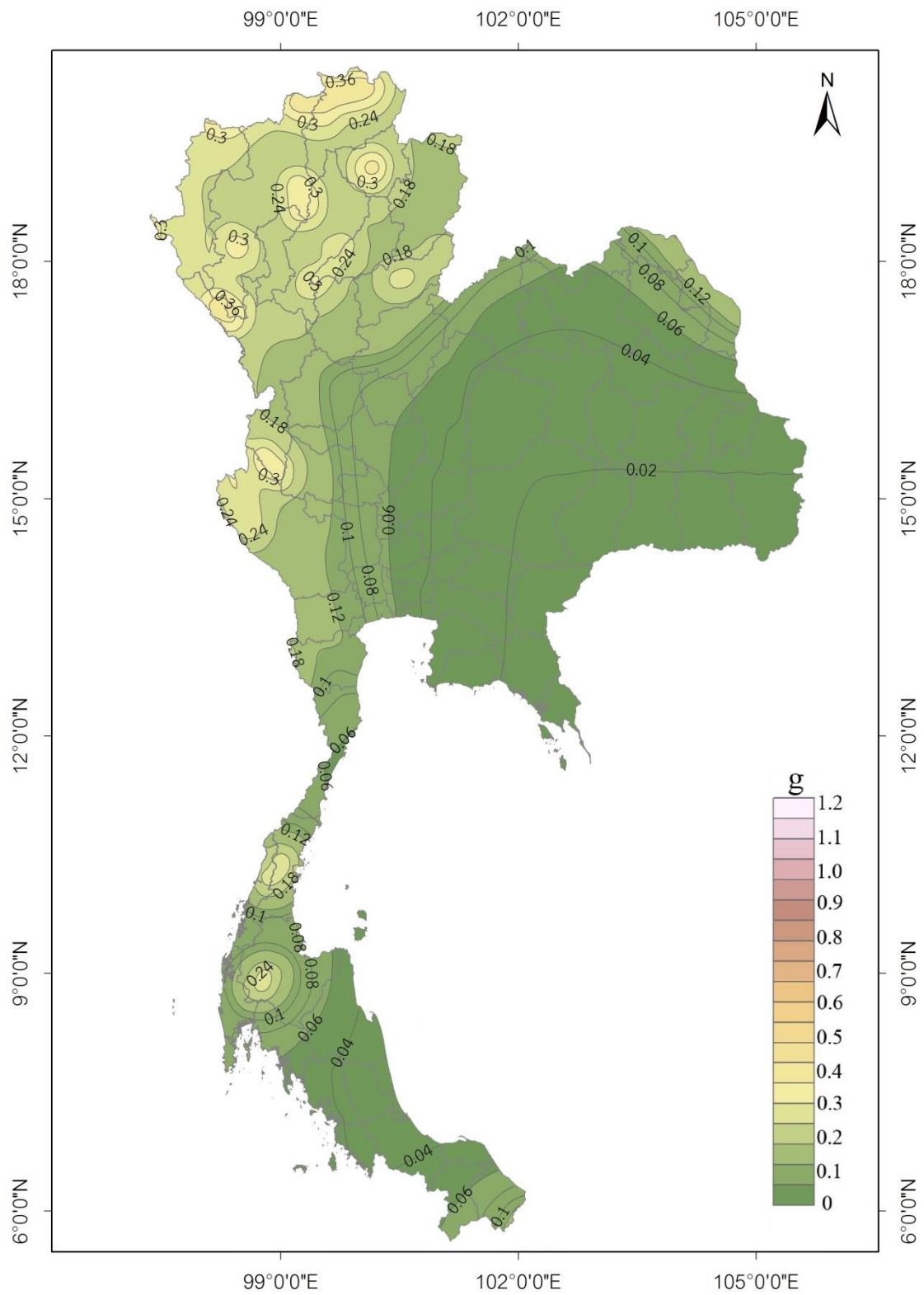
รูปที่ 4.10 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
ที่คาบเวลา 2.0 วินาที ที่มีโอกาสเกินค่าที่กำหนด 10% ในรอบ 50 ปี



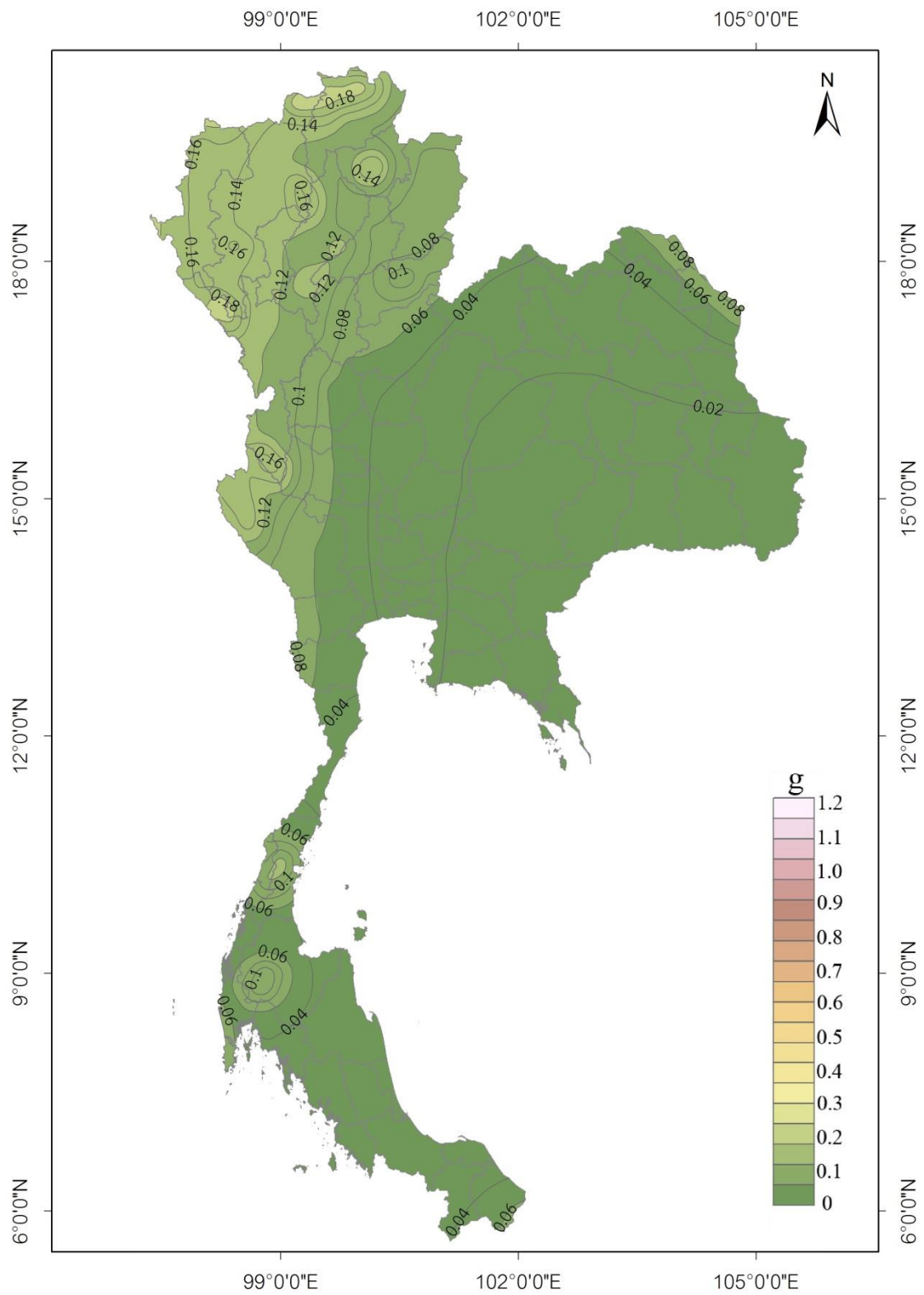
รูปที่ 4.11 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน
ที่มีโอกาสเกินค่าที่กำหนด 2% ในรอบ 50 ปี



รูปที่ 4.12 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
ที่คาบเวลา 0.2 วินาที ที่มีโอกาสเกินค่าที่กำหนด 2% ในรอบ 50 ปี



รูปที่ 4.13 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
ที่คาบเวลา 1.0 วินาที ที่มีโอกาสเกินค่าที่กำหนด 2% ในรอบ 50 ปี



รูปที่ 4.14 แผนที่ระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
ที่คาบเวลา 2.0 วินาที ที่มีโอกาสเกินค่าที่กำหนด 2% ในรอบ 50 ปี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์โอกาสเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในบริเวณประเทศไทย ด้วยวิธีความน่าจะเป็น ประยุกต์ใช้วิธีแผนผังต้นไม้ในการคำนวณและจัดทำแผนที่แสดงระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวสำหรับชั้นหินในรูปของค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินและค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ประเทศไทยได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวส่วนมากในบริเวณภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคใต้ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการกระจายตัวของรอยเลื่อนมีพลังสำหรับโอกาสเกิดแรงสั่นสะเทือนเกิน 10% ในรอบ 50 ปี ค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินในประเทศไทยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.37g สูงสุดที่ภาคเหนือบริเวณจังหวัดเชียงราย โดยมีค่าประมาณ 0.03g ในบริเวณกรุงเทพมหานคร 0.18g ทางภาคตะวันตก และ 0.23g ทางภาคเหนือ

5.1.2 ค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดินในประเทศไทยที่โอกาสเกิดแรงสั่นสะเทือนเกิน 2% ในรอบ 50 ปี มีค่าระหว่าง 0.01-0.52 โดยมีค่าประมาณ 0.04g บริเวณกรุงเทพมหานคร 0.30g ทางภาคตะวันตก และ 0.40g ทางภาคเหนือ ซึ่งมีค่าประมาณ 1.4 เท่าของโอกาสเกิน 10% ในรอบ 50 ปี

5.1.3 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับโอกาสเกิน 10% ในรอบ 50 ปี ที่คาบเวลา 0.2, 1.0 และ 2.0 วินาที บริเวณประเทศไทยจะมีค่าประมาณ 0.014-0.87g, 0.01-0.29g และ 0.01-0.13g ตามลำดับ และสำหรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับโอกาสเกิน 2% ในรอบ 50 ปี ที่คาบเวลา 0.2, 1.0 และ 2.0 วินาที จะมีค่าประมาณ 0.02-1.21g, 0.01-0.41g และ 0.01-0.19g ตามลำดับ

5.1.4 ค่าความเร่งของพื้นดินสูงสุดจากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่างานวิจัยในอดีตของ Petersen และคณะ (2007), Ornthammarath และคณะ (2010) และ Palasri (2012) แต่มีค่าที่ต่ำกว่างานวิจัยของ Pailoplee และคณะ (2009)

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ไม่ได้พิจารณาพฤติกรรมของชั้นดินที่ส่งผลกระทบต่อการขยายระดับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว โดยได้ประเมินจากสมมุติฐานของการสั่นสะเทือนบนชั้นหินเท่านั้น การรวบรวมข้อมูลแผ่นดินไหว ผลตรวจวัดความเร่งในประเทศไทย การศึกษารอยเลื่อนมีพลังและพฤติกรรมการขยายแรงสั่นสะเทือนของชั้นดินอ่อน จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้สามารถประเมินระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2552. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302). กรุงเทพมหานคร.
- จิตติ ปาลศรี. 2549. แผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวเชิงความน่าจะเป็น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุรินทร์ เวชบันเทิง. 2548. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นดินไหว เอกสารประกอบการอบรมเรื่องการออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548. การประเมินผลกระทบทางธรณีวิทยาและกายภาพในพื้นที่ประสบพิบัติภัยเพื่อการฟื้นฟูและการเฝ้าระวังเตือนภัย.
- สันติ ภัยหลบลี้, ปัญญา จารุศิริ, ยูอิชิ ชุงิยะมะ และ อารี พลดี. 2553. การประเมินระดับอันตรายจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยจากแนวคิดความน่าจะเป็น. วารสารราชบัณฑิตยสถาน, 35.
- อรรถพล อำนวยรัตน์. 2554. แบบจำลองการลดทอนพลังงานแผ่นดินไหว สำหรับชั้นดินเชียงใหม่. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, บัณฑิตวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Atkinson, G. M. and Boore, D. M. 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.
- Baker, J. W. 2013. An introduction to probabilistic seismic hazard analysis. White Paper Version, 2(1), 79.
- Boore, D. M. and Atkinson, G. M. 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.
- Campbell, K. W. and Bozorgnia, Y. 2008. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic

- response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. Earthquake Spectra, 24(1), 139-171.
- Chintanapakdee, C., Naguit, M. and Charoenyuth, M. (2008). Suitable attenuation model for Thailand. Paper presented at the Proc. 14th World Conf. Eqk. Eng.
- Cornell, C. A. 1968. Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(5), 1583-1606.
- Crouse, C. 1991. Ground-motion attenuation equations for earthquakes on the Cascadia subduction zone. Earthquake Spectra, 7(2), 201-236.
- Danciu, L., Pagani, M., Monelli, D. and Wiemer, S. (2010). GEM1 Hazard: Overview of PSHA software. Retrieved from
- Esteva, L. and Villaverde, R. (1973). Seismic risk, design spectra and structural reliability. Paper presented at the Proceedings of Fifth World Conference on Earthquake Engineering.
- Gardner, J. and Knopoff, L. 1974. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian. Bull. Seismol. Soc. Am, 64(5), 1363-1367.
- Gutenberg, B. and Richter, C. F. 1944. Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4), 185-188.
- Idriss, I. 1993. Procedures for Selecting Earthquake Ground Motions at Rock Sites: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Kramer, S. L. 1996. Geotechnical earthquake engineering (Vol. 80): Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- McGuire, R. and Arabasz, W. 1990. An introduction to probabilistic seismic hazard analysis. Geotechnical and environmental geophysics, 1, 333-353.
- Nutalaya, P., Sodsri, S. and Arnold, E. 1985. Series on seismology volume II-Thailand. Southeast Asia Association of Seismology and Earthquake Engineering, 403.
- Ornthammarath, T., Warnitchai, P., Worakanchana, K., Zaman, S., Sigbjörnsson, R. and Lai, C. G. 2010. Probabilistic seismic hazard assessment for Thailand. Bulletin of Earthquake Engineering, 9(2), 367-394.
- Pailoplee, S. and Choowong, M. 2013. Probabilities of earthquake occurrences in Mainland Southeast Asia. Arabian Journal of Geosciences, 6(12), 4993-5006.

- Pailoplee, S., Sugiyama, Y. and Charusiri, P. 2009. Deterministic and probabilistic seismic hazard analyses in Thailand and adjacent areas using active fault data. Earth, planets and space, 61(12), 1313-1325.
- Palasri, C. 2012. Seismic hazard of thailand and bi-directional response spectra. Doctor of Philosophy, Chulalongkorn University.
- Petersen, M., Harmsen, S., Mueller, C., Haller, K., Dewey, J., Luco, N., et al. 2007. Documentation for the Southeast Asia seismic hazard maps. Administrative Report September, 30.
- Petersen, M. D., Dewey, J., Hartzell, S., Mueller, C., Harmsen, S., Frankel, A., et al. 2004. Probabilistic seismic hazard analysis for Sumatra, Indonesia and across the Southern Malaysian Peninsula. Tectonophysics, 390(1), 141-158.
- Sadigh, K., Chang, C.-Y., 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.
- Sutiwanich, C., Hanpattapanich, T., Pailoplee, S. and Charusiri, P. 2012. Probability seismic hazard maps of Southern Thailand. Songklanakarin J. Sci. Technol, 34, 453-466.
- Toro, G. R. 2002. Modification of the Toro et al.(1997) attenuation equations for large magnitudes and short distances. Risk Engineering, Boulder, Colorado.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองลดทอนแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว

ตารางที่ ก.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองลดทอนของ Idriss (1993)

For Magnitude $M \leq 6$					
$\beta_1 = 1.602 \quad \beta_2 = -0.142$					
Period-sec	α_0	α_1	α_2	β_0	Standard Error Term
a	-0.150	2.261	-0.083	0	1.39-0.14*M
0.03	-0.150	2.261	-0.083	0	1.39-0.14*M
0.05	-0.278	2.365	-0.092	0.066	1.39-0.14*M
0.075	-0.308	2.334	-0.081	0.070	1.39-0.14*M
0.1	-0.318	2.319	-0.075	0.072	1.41-0.14*M
0.11	-0.328	2.294	-0.070	0.073	1.42-0.14*M
0.13	-0.338	2.255	-0.062	0.075	1.42-0.14*M
0.15	-0.348	2.219	-0.055	0.076	1.42-0.14*M
0.2	-0.358	2.146	-0.042	0.078	1.42-0.14*M
0.25	-0.429	2.073	-0.030	0.080	1.44-0.14*M
0.3	-0.486	2.010	-0.020	0.082	1.44-0.14*M
0.35	-0.535	1.977	-0.016	0.087	1.44-0.14*M
0.4	-0.577	1.921	-0.009	0.092	1.44-0.14*M
0.5	-0.648	1.818	0.003	0.099	1.46-0.14*M
0.6	-0.705	1.704	0.017	0.105	1.46-0.14*M
0.7	-0.754	1.644	0.022	0.111	1.48-0.14*M
0.8	-0.796	1.593	0.025	0.115	1.48-0.14*M
0.9	-0.834	1.482	0.039	0.119	1.48-0.14*M
1	-0.867	1.432	0.043	0.123	1.48-0.14*M
1.5	-0.970	1.072	0.084	0.136	1.48-0.14*M
2	-1.046	0.762	0.121	0.146	1.52-0.14*M
3	-1.143	0.194	0.191	0.160	1.52-0.14*M
4	-1.177	-0.466	0.280	0.169	1.52-0.14*M
5	-1.214	-1.361	0.410	0.177	1.52-0.14*M

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองลดทอนของ Idriss (1993)

For Magnitude $M > 6$						
$b_1 = 2.475 \quad b_2 = -0.286$						
Period-sec	α_0	α_1	α_2	β_0	Standard Error Term	
					$M < 7.25$	$M \geq 7.25$
a	-0.050	3.477	-0.284	0	$1.39-0.14*M$	0.38
0.03	-0.050	3.477	-0.284	0	$1.39-0.14*M$	0.38
0.05	-0.278	3.426	-0.269	0.066	$1.39-0.14*M$	0.38
0.075	-0.308	3.359	-0.252	0.070	$1.39-0.14*M$	0.38
0.1	-0.318	3.327	-0.243	0.072	$1.41-0.14*M$	0.41
0.11	-0.328	3.289	-0.236	0.073	$1.42-0.14*M$	0.41
0.13	-0.338	3.233	-0.225	0.075	$1.42-0.14*M$	0.41
0.15	-0.348	3.185	-0.216	0.076	$1.42-0.14*M$	0.41
0.2	-0.358	3.100	-0.201	0.078	$1.42-0.14*M$	0.41
0.25	-0.429	3.034	-0.190	0.080	$1.44-0.14*M$	0.43
0.3	-0.486	2.982	-0.182	0.082	$1.44-0.14*M$	0.43
0.35	-0.535	2.943	-0.177	0.087	$1.44-0.14*M$	0.43
0.4	-0.577	2.906	-0.173	0.092	$1.44-0.14*M$	0.43
0.5	-0.648	2.850	-0.169	0.099	$1.46-0.14*M$	0.45
0.6	-0.705	2.803	-0.166	0.105	$1.46-0.14*M$	0.45
0.7	-0.754	2.765	-0.165	0.111	$1.48-0.14*M$	0.47
0.8	-0.796	2.728	-0.164	0.115	$1.48-0.14*M$	0.47
0.9	-0.834	2.694	-0.163	0.119	$1.48-0.14*M$	0.47
1	-0.867	2.662	-0.162	0.123	$1.48-0.14*M$	0.47
1.5	-0.970	2.536	-0.160	0.136	$1.48-0.14*M$	0.47
2	-1.046	2.447	-0.160	0.146	$1.52-0.14*M$	0.51
3	-1.143	2.295	-0.159	0.160	$1.52-0.14*M$	0.51
4	-1.177	2.169	-0.159	0.169	$1.52-0.14*M$	0.51
5	-1.214	2.042	-0.157	0.177	$1.52-0.14*M$	0.51

ตารางที่ ก.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองลดทอนของ Sadigh และคณะ (1997)

Period(s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
For M < 6.5							
PGA	-0.624	1.0	0.000	-2.100	1.29649	0.250	0.000
0.07	0.110	1.0	0.006	-2.128	1.29649	0.250	-0.082
0.1	0.275	1.0	0.006	-2.148	1.29649	0.250	-0.041
0.2	0.153	1.0	-0.004	-2.080	1.29649	0.250	0.000
0.3	-0.057	1.0	-0.017	-2.028	1.29649	0.250	0.000
0.4	-0.298	1.0	-0.028	-1.990	1.29649	0.250	0.000
0.5	-0.588	1.0	-0.040	-1.945	1.29649	0.250	0.000
0.75	-1.208	1.0	-0.050	-1.865	1.29649	0.250	0.000
1	-1.705	1.0	-0.055	-1.800	1.29649	0.250	0.000
1.5	-2.407	1.0	-0.065	-1.725	1.29649	0.250	0.000
2	-2.945	1.0	-0.070	-1.670	1.29649	0.250	0.000
3	-3.700	1.0	-0.080	-1.610	1.29649	0.250	0.000
4	4.230	1.0	-0.100	-1.570	1.29649	0.250	0.000
For M > 6.5							
PGA	-1.274	1.1	0	-2.1	-0.48451	0.524	0
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	-0.017	-2.028	-0.48451	0.524	0.000
0.4	-0.948	1.1	-0.028	-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
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

ตารางที่ ก.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองลดทอนของ Boore และ Atkinson (2008)

Period	c1	c2	c3	h
PGV	-0.8737	0.10060	-0.00334	2.54
PGA	-0.6605	0.11970	-0.01151	1.35
0.01	-0.6622	0.12000	-0.01151	1.35
0.02	-0.6660	0.12280	-0.01151	1.35
0.03	-0.6901	0.12830	-0.01151	1.35
0.05	-0.7170	0.13170	-0.01151	1.35
0.075	-0.7205	0.12370	-0.01151	1.55
0.1	-0.7081	0.11170	-0.01151	1.68
0.15	-0.6961	0.09884	-0.01113	1.86
0.2	-0.5830	0.04273	-0.00952	1.98
0.25	-0.5726	0.02977	-0.00837	2.07
0.3	-0.5543	0.01955	-0.0075	2.14
0.4	-0.6443	0.04394	-0.00626	2.24
0.5	-0.6914	0.06080	-0.0054	2.32
0.75	-0.7408	0.07518	-0.00409	2.46
1	-0.8183	0.10270	-0.00334	2.54
1.5	-0.8303	0.09793	-0.00255	2.66
2	-0.8285	0.09432	-0.00217	2.73
3	-0.7844	0.07282	-0.00191	2.83
4	-0.6854	0.03758	-0.00191	2.89
5	-0.5096	-0.02391	-0.00191	2.93
7.5	-0.3724	-0.06568	-0.00191	3
10	-0.0982	-0.13800	-0.00191	3.04

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองลดทอนของ Boore และ Atkinson (2008)

Period	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	Mh
PGV	5.00121	5.04727	4.63188	5.082	0.18322	-0.12736	0	8.5
PGA	-0.53804	-0.5035	-0.75472	-0.510	0.28805	-0.10164	0	6.75
0.01	-0.52883	-0.49429	-0.74551	-0.500	0.28897	-0.10019	0	6.75
0.02	-0.52192	-0.48508	-0.73906	-0.489	0.25144	-0.11006	0	6.75
0.03	-0.45285	-0.41831	-0.66722	-0.422	0.17976	-0.12858	0	6.75
0.05	-0.28476	-0.25022	-0.48462	-0.261	0.06369	-0.15752	0	6.75
0.075	0.00767	0.04912	-0.20578	0.027	0.0117	-0.17051	0	6.75
0.1	0.20109	0.23102	0.03058	0.222	0.04697	-0.15948	0	6.75
0.15	0.46128	0.48661	0.30185	0.493	0.1799	-0.14539	0	6.75
0.2	0.5718	0.59253	0.4086	0.615	0.52729	-0.12964	0.00102	6.75
0.25	0.51884	0.53496	0.3388	0.577	0.6088	-0.13843	0.08607	6.75
0.3	0.43825	0.44516	0.25356	0.520	0.64472	-0.15694	0.10601	6.75
0.4	0.3922	0.40602	0.21398	0.461	0.7861	-0.07843	0.02262	6.75
0.5	0.18957	0.19878	0.00967	0.263	0.76837	-0.09054	0	6.75
0.75	-0.21338	-0.19496	-0.49176	-0.108	0.75179	-0.14053	0.10302	6.75
1	-0.46896	-0.43443	-0.78465	-0.393	0.6788	-0.18257	0.05393	6.75
1.5	-0.86271	-0.79593	-1.20902	-0.881	0.70689	-0.2595	0.19082	6.75
2	-1.22652	-1.15514	-1.57697	-1.277	0.77989	-0.29657	0.29888	6.75
3	-1.82979	-1.7469	-2.22584	-1.918	0.77966	-0.45384	0.67466	6.75
4	-2.24656	-2.15906	-2.58228	-2.382	1.24961	-0.35874	0.79508	6.75
5	-1.28408	-1.2127	-1.50904	-1.411	0.14271	-0.39006	0	8.5
7.5	-1.43145	-1.31632	-1.81022	-1.592	0.52407	-0.37578	0	8.5
10	-2.15446	-2.16137	-2.53323	-2.146	0.40387	-0.48492	0	8.5

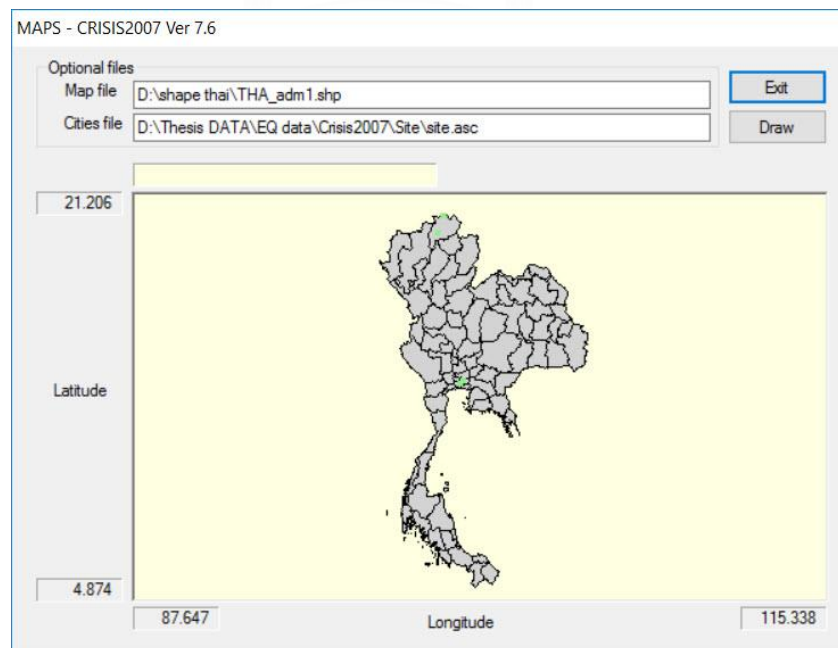
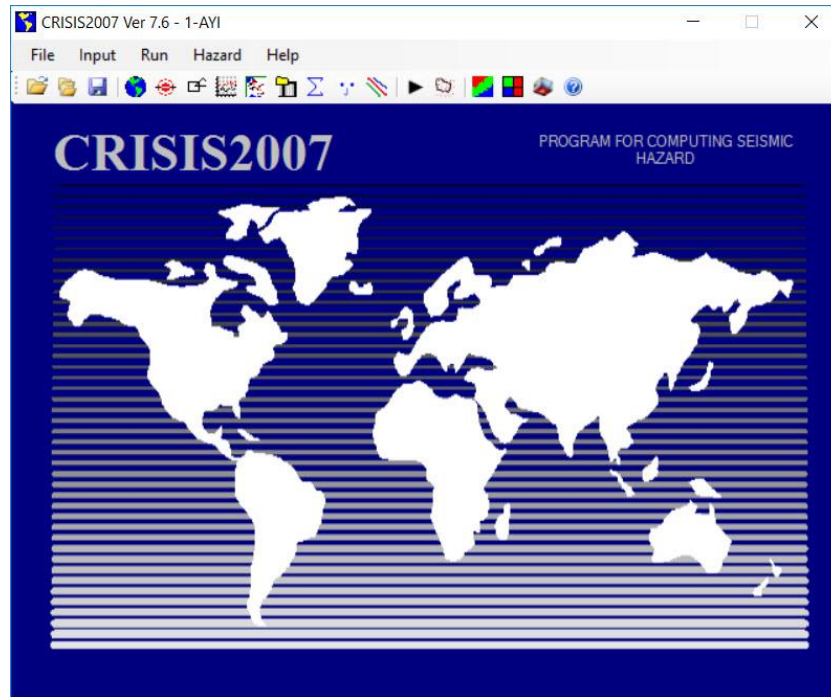
ตารางที่ ก.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองลดทอนของ Youngs และคณะ (1997)

Period(s)	C1	C2	C3	C4	C5
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	-0.400	-0.0048	-2.360	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	-2.160	1.50	-0.1
2	-3.328	-0.0080	-2.107	1.55	-0.1
3	-4.511	-0.0089	-2.033	1.65	-0.1

ตารางที่ ก.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองลดทอนของ Atkinson และ Boore (2003)

Freq	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	σ	σ_1	σ_2
Coefficients for Interface Events										
0.33	2.3010	0.022370	0.00012	0.00000	0.10	0.25	0.36	0.36	0.31	0.18
0.50	2.1907	0.071480	0.00224	0.00000	0.10	0.25	0.40	0.34	0.29	0.18
1.00	2.1442	0.134500	0.00521	-0.00110	0.10	0.30	0.55	0.34	0.28	0.19
2.50	2.5249	0.147700	0.00728	-0.00235	0.13	0.37	0.38	0.29	0.25	0.15
5.00	2.6638	0.123860	0.00884	-0.00280	0.15	0.27	0.25	0.28	0.25	0.13
10.00	2.7789	0.098410	0.00974	-0.00287	0.15	0.23	0.20	0.27	0.25	0.10
25.00	2.8753	0.070520	0.01004	-0.00278	0.15	0.20	0.20	0.26	0.22	0.14
PGA	2.9910	0.035250	0.00759	-0.00206	0.19	0.24	0.29	0.23	0.20	0.11
Coefficients for In-Slab Events										
0.33	-3.70012	1.11690	0.00615	-0.00045	0.10	0.25	0.36	0.30	0.29	0.08
0.50	-2.39234	0.99640	0.00364	-0.00118	0.10	0.25	0.40	0.30	0.28	0.11
1.00	-1.02133	0.87890	0.00130	-0.00173	0.10	0.30	0.55	0.29	0.27	0.11
2.50	0.00545	0.77270	0.00173	-0.00178	0.13	0.37	0.38	0.28	0.26	0.10
5.00	0.51589	0.69186	0.00572	-0.00192	0.15	0.27	0.25	0.28	0.26	0.10
10.00	0.43928	0.66675	0.01080	-0.00219	0.15	0.23	0.20	0.28	0.27	0.07
25.00	0.50697	0.63273	0.01275	-0.00234	0.15	0.20	0.20	0.25	0.24	0.07
PGA	-0.04713	0.69090	0.01130	-0.00202	0.19	0.24	0.29	0.27	0.23	0.14

ภาคผนวก ข โปรแกรม CRISIS2007 Version7.6



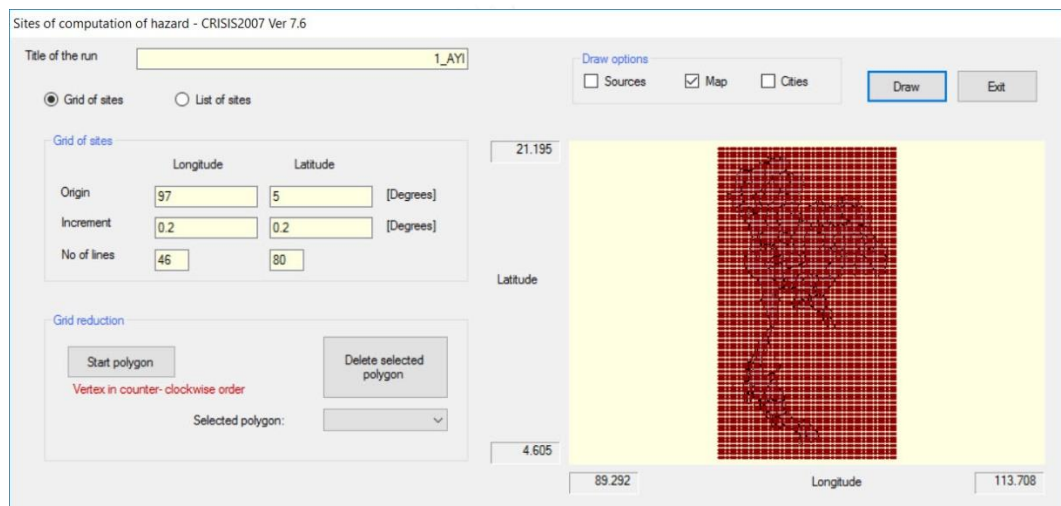
Example of site file

```

site.asc - Notepad
File Edit Format View Help
3
BKK,BKKcity,100.52,13.75
CR,MaeSai,99.88,20.43
EQCR,MaeLao,99.68,19.76

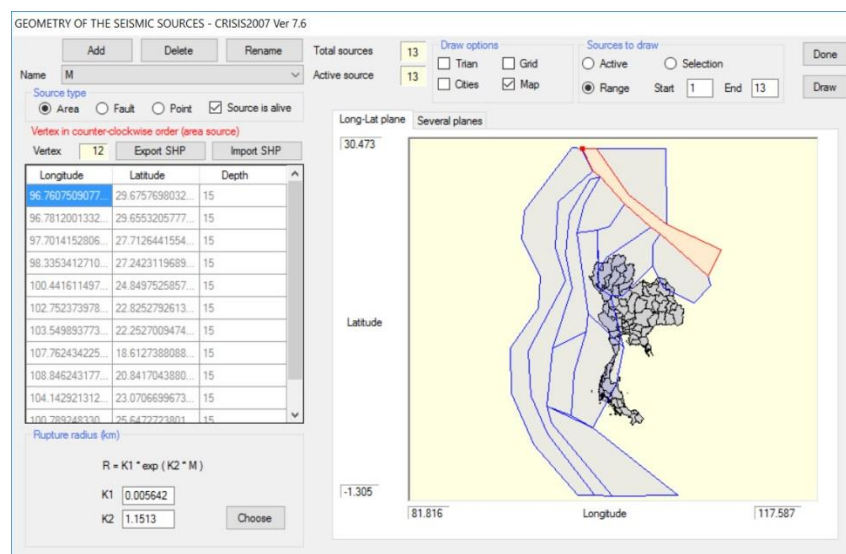
```

Input > Grid of sites



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Input > Source of Geometry



Input > Source Seismicity

SEISMICITY - CRISIS2007 Ver 7.6

Source number < > of total sources

Source name

Occurrence model
 G-R
 Characteristic

Draw options
 Active Map
 All

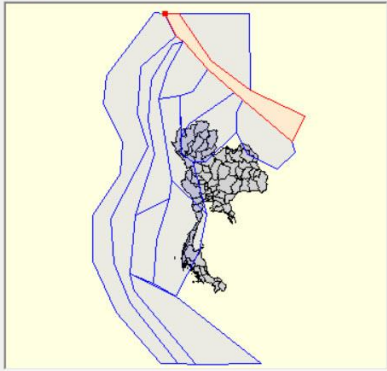
G-R Characteristic

Longitude Latitude

Threshold magnitude (M0)
 Lambda(M0)
 Expected value of Beta
 Coefficient of variation of Beta
 Parameters defining Mu:
 Untruncated expected value
 Untruncated standard deviation
 Lower limit (M1)
 Upper limit (M2)

Moment and slip rates
 Moment rate = 2.43E+25 dyne-cm/year
 Slip rate = 1.08E+00 mm/year

Recompute View summary Exit



Input > Attenuation data

ATTENUATION DATA - CRISIS2007 Ver 7.6

Number of spectral ordinates Attenuation tables

Add user model Add built-in model Delete model Exit

Attenuation table D:\Thesis DATA\EQ data\Crisis2007\ATN\Sadigh(1997).ATN

Plot of attenuation relation Source for model assignment

Curve
 Magnitude Distance
 Depth (Km)
 No. spect. ord

Active model
 Att curve
 Spectrum
 Focal
 Truncation parameter=0
 Coefficient of H=0
 Sigma_0=-0.8

Draw Copy

Special regions and attenuation models General model

Active special region Number of special regions

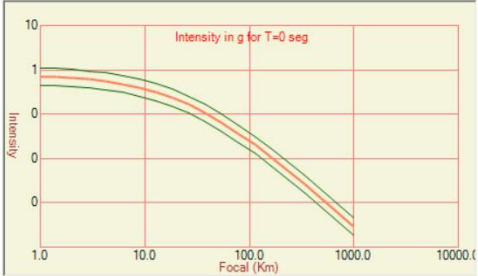
Attenuation model assigned to this region:

Vertex

Long Lat

Add region Import SHP Del region Rename region

Vertex in counter-clockwise order



Example of attenuation models: user models file

```

Sadigh(1997) - Notepad
File Edit Format View Help
4 8.5 10
1 1000 20 1
0 -0.8 0
1.92E-01 1.77E-01 1.58E-01 1.36E-01 1.11E-01 8.55E-02 6.17E-02 4.16E-02 2.62E-02 1.55E-02 8.67E-03 4.64E-03 2.39
2.50E-01 2.32E-01 2.09E-01 1.82E-01 1.52E-01 1.19E-01 8.82E-02 6.09E-02 3.93E-02 2.37E-02 1.35E-02 7.32E-03 3.82
3.23E-01 3.02E-01 2.76E-01 2.44E-01 2.06E-01 1.66E-01 1.25E-01 8.84E-02 5.83E-02 3.60E-02 2.09E-02 1.15E-02 6.08
4.17E-01 3.93E-01 3.62E-01 3.24E-01 2.78E-01 2.28E-01 1.76E-01 1.27E-01 8.60E-02 5.43E-02 3.22E-02 1.80E-02 9.65
5.37E-01 5.10E-01 4.74E-01 4.29E-01 3.74E-01 3.11E-01 2.46E-01 1.82E-01 1.26E-01 8.12E-02 4.91E-02 2.80E-02 1.52
6.91E-01 6.60E-01 6.18E-01 5.65E-01 4.99E-01 4.23E-01 3.40E-01 2.58E-01 1.82E-01 1.21E-01 7.46E-02 4.34E-02 2.39
7.09E-01 6.83E-01 6.49E-01 6.04E-01 5.48E-01 4.79E-01 4.00E-01 3.17E-01 2.36E-01 1.64E-01 1.06E-01 6.45E-02 3.69
7.22E-01 7.02E-01 6.75E-01 6.38E-01 5.90E-01 5.29E-01 4.57E-01 3.77E-01 2.93E-01 2.14E-01 1.46E-01 9.29E-02 5.55
7.33E-01 7.17E-01 6.95E-01 6.65E-01 6.25E-01 5.74E-01 5.10E-01 4.36E-01 3.54E-01 2.70E-01 1.94E-01 1.30E-01 8.09
7.41E-01 7.29E-01 7.11E-01 6.87E-01 6.55E-01 6.12E-01 5.57E-01 4.90E-01 4.13E-01 3.30E-01 2.48E-01 1.74E-01 1.14
0.87
0.8
0.73
0.66
0.59
0.52
0.45
0.42
0.42
0.42
0.2 -0.8 0
3.70E-01 3.41E-01 3.05E-01 2.62E-01 2.14E-01 1.66E-01 1.20E-01 8.11E-02 5.13E-02 3.05E-02 1.72E-02 9.23E-03 4.79
5.02E-01 4.67E-01 4.22E-01 3.68E-01 3.07E-01 2.42E-01 1.79E-01 1.24E-01 8.04E-02 4.88E-02 2.79E-02 1.52E-02 8.00
6.76E-01 6.33E-01 5.78E-01 5.11E-01 4.33E-01 3.48E-01 2.64E-01 1.87E-01 1.24E-01 7.69E-02 4.49E-02 2.49E-02 1.32
9.00E-01 8.49E-01 7.83E-01 7.01E-01 6.03E-01 4.95E-01 3.83E-01 2.78E-01 1.88E-01 1.19E-01 7.11E-02 4.01E-02 2.16
1.19E+00 1.13E+00 1.05E+00 9.51E-01 8.30E-01 6.93E-01 5.48E-01 4.07E-01 2.82E-01 1.83E-01 1.11E-01 6.38E-02 3.49
1.56E+00 1.49E+00 1.40E+00 1.28E+00 1.13E+00 9.59E-01 7.73E-01 5.87E-01 4.17E-01 2.77E-01 1.72E-01 1.01E-01 5.58
1.63E+00 1.57E+00 1.49E+00 1.39E+00 1.26E+00 1.10E+00 9.23E-01 7.32E-01 5.46E-01 3.81E-01 2.48E-01 1.51E-01 8.71
1.68E+00 1.63E+00 1.57E+00 1.48E+00 1.37E+00 1.23E+00 1.07E+00 8.81E-01 6.87E-01 5.03E-01 3.44E-01 2.20E-01 1.32
1.72E+00 1.68E+00 1.63E+00 1.56E+00 1.47E+00 1.35E+00 1.20E+00 1.03E+00 8.34E-01 6.39E-01 4.59E-01 3.08E-01 1.94
1.75E+00 1.72E+00 1.68E+00 1.62E+00 1.54E+00 1.44E+00 1.32E+00 1.16E+00 9.78E-01 7.84E-01 5.90E-01 4.16E-01 2.74
0.87
0.8

```

Input > Spectral ordinates

INTENSITIES FOR EACH SPECTRAL ORDINATE - CRISIS2007 Ver 7.6

Spectral ordinates

Total number of spectral ordinates

Actual spectral ordinate

Structural period of actual spectral ordinate

Lower limit of intensity level

Upper limit of intensity level

Units

Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed

Input > Global parameters

GLOBAL PARAMETERS - CRISIS2007 Ver 7.6

Integration parameters

Maximum integration distance km

Minimum triangle size km

Minimum Distance/Triangle Size ratio

Fixed return periods

First return period years

Second return period years

Third return period years

Fourth return period years

Fifth return period years

Distance for deaggregation

Focal

Epicentral

Joyner and Boore

Closest to rupture area

Input > Summary of data

SUMMARY OF THE SOURCES - CRISIS2007 Ver 7.6

Source number < > Active

Source Name Vertex

General attenuation model

Poisson Model

M0

Lambda(M0)

E(Beta)

c(Beta)

E(Mu)

Sigma(Mu)

M1

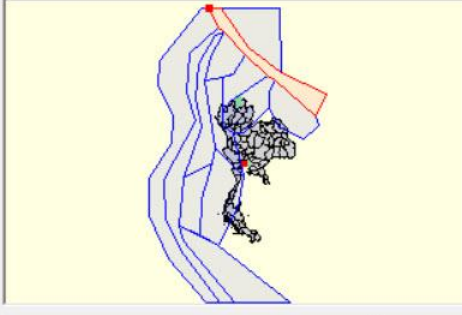
M2

Longitude	Latitude	Depth (km)
96.7607509077...	29.6757698032...	15
96.7812001332...	29.6553205777...	15
97.7014152806...	27.7126441554...	15
98.2353412710...	27.2423119689...	15

Draw options

Active All Map Cities

Area source



Input > Set output files

Output files - CRISIS2007 Ver 7.6

Choose information to print in the *.res file

Input data and exceedance rates, for each site of the grid. Only input data.

Choose output files to print

*.gra. This file contains exceedance rates from each site of the grid.

*.map. This file contains intensities corresponding to fixed period.

*.fue. This file contains exceedance rates by source, corresponding to each site of the grid.

*.des. This file contains tables of disaggregated hazard

*.smx. This file contains tables of maximum earthquakes

*.eps. This file contains rates disaggregated by epsilon

Exit

Output Files: Results file (*.res)

```

*****
Program   CRISIS2007 Ver 7.6
Run Title: 1_AYI
Date:     9/3/2559
*****

MAXIMUM VALUES OF PARAMETERS SET IN THE PROGRAM
Attenuation Models:                50
Intensity levels:                  100
Structural periods:                40
Number of regions:                 400
Magnitudes in attenuation models:  20
Distances in attenuation models:    50
Subsources per region:             8000

VALUES OF PARAMETERS FOR THE PRESENT PROJECT
Number of regions or seismic sources: 13
Number of attenuation models:         7
Number of structural periods:         4
Number of intensity levels:          20
Number of magnitudes for integration: 9
Type of computation sites:           Grid
Max. dist. of integration:            500.000
Min. distance/Triangle size ratio    7.000
Minimum triangle size (km)           11.000

INTENSITIES
I      T(I)      A0(I)      AU(I)      UNITS
1  0.00E+00  1.00E-03  3.00E+00  g
2  2.00E-01  1.00E-03  3.00E+00  g
3  1.00E+00  1.00E-03  3.00E+00  g
4  2.00E+00  1.00E-03  3.00E+00  g

```

Output Files: Graphics file (*.gra)

```

*****
Program   CRISIS2007 Ver 7.6
Run Title: 1_AYI
Date:     9/3/2559
*****

    100.6000      5.2000
INTENSITY 1
1.00000E-03  5.55476E-01  5.47468E+00
1.52408E-03  3.21486E-01  3.34259E+00
2.32281E-03  1.84128E-01  2.02953E+00
3.54013E-03  1.02643E-01  1.12716E+00
5.39542E-03  5.15492E-02  5.10098E-01
8.22303E-03  2.14191E-02  1.75259E-01
1.25325E-02  6.80242E-03  3.97174E-02
1.91005E-02  1.49504E-03  5.04244E-03
2.91106E-02  2.02629E-04  2.74990E-04
4.43667E-02  1.47308E-05  3.90148E-06
6.76182E-02  4.90146E-07  9.17369E-09
1.03055E-01  6.49520E-09  2.79295E-12
1.57064E-01  3.11612E-11  9.70572E-17
2.39377E-01  5.11207E-14  3.58845E-22
3.64829E-01  2.76269E-17  1.35302E-28
5.56027E-01  1.66568E-21  3.38047E-36
8.47427E-01  0.00000E+00  0.00000E+00
1.29154E+00  0.00000E+00  0.00000E+00
1.96841E+00  0.00000E+00  0.00000E+00
3.00000E+00  0.00000E+00  0.00000E+00
INTENSITY 2
1.00000E-03  1.51286E+00  1.44829E+01
1.52408E-03  9.82334E-01  9.86998E+00
2.32281E-03  6.21233E-01  6.45477E+00
3.54013E-03  3.83047E-01  4.09253E+00
5.39542E-03  2.31946E-01  2.57978E+00
8.22303E-03  1.38860E-01  1.59551E+00

```

Output Files: Map file (*.map)

```

*****
Program   CRISIS2007 Ver 7.6
Run Title: 1_AYI
Date:     9/3/2559
*****

INTENSITY LEVELS FOR FIXED RETURN PERIODS

NNP=Flag to show the kind of operation executed.
If NNP=0 then interpolation was executed
NNP=1 then extrapolation was executed
NNP=2 then value was impossible to calculate

FIXED RETURN PERIODS:
Long.      Lat.      NT      4.750E+02  9.490E+02  2.475E+03  4.950E+03  9.975E+03  NNP
100.6000   5.2000   1  1.737E-02  2.056E-02  2.517E-02  2.912E-02  3.260E-02  00000
100.6000   5.2000   2  5.669E-02  6.840E-02  8.395E-02  9.735E-02  1.108E-01  00000
100.6000   5.2000   3  2.190E-02  2.680E-02  3.407E-02  4.004E-02  4.659E-02  00000
100.6000   5.2000   4  9.743E-03  1.213E-02  1.560E-02  1.862E-02  2.165E-02  00000
100.8000   5.2000   1  1.614E-02  1.930E-02  2.336E-02  2.683E-02  3.042E-02  00000
100.8000   5.2000   2  5.322E-02  6.386E-02  7.865E-02  9.058E-02  1.042E-01  00000
100.8000   5.2000   3  2.073E-02  2.520E-02  3.218E-02  3.760E-02  4.400E-02  00000
100.8000   5.2000   4  9.229E-03  1.141E-02  1.474E-02  1.750E-02  2.048E-02  00000
101.0000   5.2000   1  1.510E-02  1.795E-02  2.185E-02  2.491E-02  2.844E-02  00000
101.0000   5.2000   2  5.019E-02  5.978E-02  7.412E-02  8.484E-02  9.726E-02  00000
101.0000   5.2000   3  1.968E-02  2.377E-02  3.051E-02  3.546E-02  4.127E-02  00000
101.0000   5.2000   4  8.756E-03  1.077E-02  1.397E-02  1.651E-02  1.945E-02  00000
101.2000   5.2000   1  1.420E-02  1.675E-02  2.056E-02  2.329E-02  2.643E-02  00000
101.2000   5.2000   2  4.749E-02  5.620E-02  7.017E-02  7.990E-02  9.109E-02  00000
101.2000   5.2000   3  1.859E-02  2.247E-02  2.899E-02  3.356E-02  3.888E-02  00000
101.2000   5.2000   4  8.310E-03  1.017E-02  1.328E-02  1.561E-02  1.840E-02  00000
101.4000   5.2000   1  1.344E-02  1.573E-02  1.945E-02  2.191E-02  2.472E-02  00000
101.4000   5.2000   2  4.520E-02  5.315E-02  6.652E-02  7.564E-02  8.580E-02  00000
101.4000   5.2000   3  1.756E-02  2.138E-02  2.737E-02  3.192E-02  3.680E-02  00000
101.4000   5.2000   4  7.875E-03  9.677E-03  1.268E-02  1.485E-02  1.741E-02  00000

```


Output Files: Source by source results (*.fue)

```

*****
Program   CRISIS2007 Ver 7.6
Run Title: 1_AYI
Date:     9/3/2559
*****

      100.6000      5.2000
SOURCES:           1           2           3           4           5           6
INTENSITY 1
1.00000E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 5.53842E-01 0.00000E+00 0.00
1.52408E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 3.21171E-01 0.00000E+00 0.00
2.32281E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.84082E-01 0.00000E+00 0.00
3.54013E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.02638E-01 0.00000E+00 0.00
5.39542E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 5.15488E-02 0.00000E+00 0.00
8.22303E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.14190E-02 0.00000E+00 0.00
1.25325E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 6.80242E-03 0.00000E+00 0.00
1.91005E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.49504E-03 0.00000E+00 0.00
2.91106E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.02629E-04 0.00000E+00 0.00
4.43667E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.47308E-05 0.00000E+00 0.00
6.76182E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 4.90146E-07 0.00000E+00 0.00
1.03055E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 6.49520E-09 0.00000E+00 0.00
1.57064E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 3.11612E-11 0.00000E+00 0.00
2.39377E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 5.11207E-14 0.00000E+00 0.00
3.64829E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.76269E-17 0.00000E+00 0.00
5.56027E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.66568E-21 0.00000E+00 0.00
8.47427E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00
1.29154E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00
1.96841E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00
3.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00
INTENSITY 2
1.00000E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.49308E+00 0.00000E+00 0.00
1.52408E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 9.75885E-01 0.00000E+00 0.00
2.32281E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 6.19532E-01 0.00000E+00 0.00
3.54013E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 3.82691E-01 0.00000E+00 0.00
5.39542E-03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.31888E-01 0.00000E+00 0.00

```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววันธร ก่อกิจสุนทรสาร เกิดวันที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2557

