

ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อนบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง

นางสาว จารุวรรณ ผิวบัวเฟื่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาครธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REGION-TIME-LENGTH ALGORITHM IN THE PHILIPPINES ISLANDS AND THE
ADJACENT AREAS

MISS JARUWAN PEABUAPUAN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Bachelor of Science
Department of Geology, Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

วันที่ส่ง/...../.....

วันที่อนุมัติ/...../.....

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันติ ภัยหลบลี้)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

หัวข้องานวิจัย : ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อนบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง

ผู้จัดทำ : นางสาวจรรุวรรณ ผิวบัวเพื่อน

รหัสประจำตัวนิสิต : 5532705023

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันติ ภัยหลบลี้

ภาควิชา : ธรณีวิทยา

ปีการศึกษา : 2558

บทคัดย่อ

งานศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวในอนาคตบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง โดยวิธีการที่ใช้ในการศึกษาคือ ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน ซึ่งจะใช้ฐานข้อมูลแผ่นดินไหวมีการบันทึกข้อมูลไว้จากแหล่งข้อมูล 3 แหล่ง ได้แก่ ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว National Earthquake Information (NEIC) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว International Seismological Center (ISC) และฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Global CMT Catalogue (GCMT) ที่มีการบันทึกย้อนหลังในช่วงปี ค.ศ. 1962–ค.ศ. 2015 มีขนาดแผ่นดินไหวตั้งแต่ 5.0 ริกเตอร์ขึ้นไป และมีข้อมูลแผ่นดินไหวทั้งสิ้น 4,925 เหตุการณ์ ซึ่งได้มีการคัดเลือกเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่สำคัญมา 34 เหตุการณ์ เพื่อทำการทดสอบย้อนกลับโดยกำหนดค่าตัวแปร $R_{max} = 190$ กิโลเมตร และค่า $T_{max} = 2.0$ ปี สามารถตรวจพบค่าความผิดปกติที่สัมพันธ์กันทั้งในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ทั้งหมด 29 เหตุการณ์ ดังนั้นค่าตัวแปรดังกล่าวสามารถใช้เป็นสัญญาณบอกเหตุถึงเหตุการณ์แผ่นดินไหวได้ ประกอบกับค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นในช่วง 10 ที่ผ่านมามีคือช่วงปี ค.ศ. 2005-2015 ซึ่งพบว่า 4 พื้นที่ที่มีค่าความผิดปกติเกิดขึ้น คือ บริเวณทางตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศไต้หวัน ตะวันออกของเมืองดาเวา ตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันออกเฉียงใต้ของเมืองบันดาร์ เสรี เบกาวัน ซึ่งบริเวณดังกล่าวถือว่าเป็นพื้นที่เสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหวได้ในอนาคต

คำสำคัญ : การทดสอบย้อนกลับ; ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว; ภาวะเสถียรสงบ; ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน; สัญญาณบอกเหตุ; ฟิลิปปินส์

Project Title : REGION-TIME-LENGTH ALGORITHM IN THE PHILIPPINES ISLANDS AND THE ADJACENT AREAS

Researcher : Miss Jaruwan Peaubuapuan **ID** : 5532705023

Advisor : Asst. Prof. Dr. Santi Pailoplee

Department : Geology

Academic Year : 2016

ABSTRACT

In this study, the prospective areas of the upcoming large earthquakes were evaluated in the Philippines Islands and the adjacent areas. In order to investigate the precursory seismic quiescence of earthquakes, the Region-Time-Length (RTL) algorithm was applied. The utilized earthquake catalogs consisting of the National Earthquake Information (NEIC), International Seismological Center (ISC) and Global CMT Catalogue (GCMT) that were recorded during 1962-2015 and 4,925 events with $M_w \geq 5.0$. These events were defined as the completeness data which meaningful for any seismicity investigation. Then, there are 34 available events of the $M_w \geq 5.0$ earthquakes were considered for the retrospective test. After iterative test, it was found that $R_{max} = 190$ km and $T_{max} = 2.0$ years, that can detect the anomaly associate with temporal and spatial all 29 events. So these variables are appropriate characteristic parameters for the Philippines Islands and the adjacent areas. As result, according to the seismic quiescence map from 2005 to 2015 indicated that there are 4 areas might be risked for the upcoming large earthquakes, i.e., i) East of Taiwan, ii) Eastern part of Davao, iii) eastern and iv) northeastern part of Bandar Seri Begawan, Philippines.

KEYWORDS : Retrospective Test; Earthquake Catalogue; Seismic Quiescence; Region-Time-Length (RTL) Algorithm; Precursor; Philippines

กิตติกรรมประกาศ

(ACKNOWLEDGEMENT)

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันติ ภัยหลบลี้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาสละเวลามาให้ความรู้ คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือมากมายตลอดระยะเวลาของการทำโครงการ เพื่อให้โครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคอยแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ประสาทประสิทธิวิชาความรู้ รวมทั้งประสบการณ์ต่างๆ และให้ความช่วยเหลือตลอดมา ขอขอบพระคุณพี่บุคลากรทุกท่านที่ช่วยดูแลและคอยประสานงานต่างๆในภาควิชาธรณีวิทยา ขอขอบคุณเพื่อนร่วมโครงการทุกคนที่คอยช่วยเหลือ แนะนำและให้กำลังใจในการทำโครงการ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ธรณีวิทยาชั้นปีที่ 4 ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณอุปการีทั้งสองที่เป็นที่รักยิ่ง ที่คอยให้กำลังใจ เลี้ยงดูและให้โอกาสในการศึกษาอันมีค่ายิ่ง

สารบัญ (CONTENT)

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ (ACKNOWLEDGEMENT)	ค
สารบัญรูปภาพ (FIGURE CONTENT)	ฉ
สารบัญตาราง (TABLE CONTENT)	ซ
สารบัญสมการ (EQUATION CONTENT)	ณ
บทที่ 1 บทนำ (INTRODUCTION)	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ (Theme and Background)	1
1.2 วัตถุประสงค์ (Objective)	1
1.3 พื้นที่ศึกษา (Study Area)	1
1.4 ขอบเขตการศึกษา (Scope of study)	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Expected Results)	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและระเบียบวิธีวิจัย (THEORY AND METHODOLOGY)	3
2.1 ทฤษฎีแนวคิดขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน	3
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)	4
2.3 ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)	11
บทที่ 3 การปรับปรุงฐานข้อมูลแผ่นดินไหว (SEISMICITY DATA AND COMPLETENESS)	14
3.1 การรวบรวมฐานข้อมูลแผ่นดินไหว (Earthquake Catalogue Combination)	14
3.1.1 ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว National Earthquake Information (NEIC)	15
3.1.2 ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว International Seismological Center (ISC)	15
3.1.3 ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Global CMT Catalogue (GCMT)	15
3.2 การปรับเทียบขนาดแผ่นดินไหว (Earthquake Magnitude Conversion)	15
3.3 การคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก (Earthquake Declustering)	21
3.4 ตรวจสอบและกำจัดแผ่นดินไหวที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Man-made Seismicity)	24
3.5 การคัดเลือกระดับของแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์ (Magnitude of Completeness)	26
บทที่ 4 ผลการศึกษา (RESULT)	29
4.1 การทดสอบย้อนกลับ (Retrospective Test)	29
4.2 การประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว (Evaluation of Prospective Area)	33

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผล (DISCUSSION AND CONCLUSION)	51
5.1 ฐานข้อมูลแผ่นดินไหวทั้งหมด (Earthquake Catalogue)	51
5.2 การปรับเทียบขนาดแผ่นดินไหว (Magnitude Conversion)	51
5.3 การคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก (Earthquake Declustering)	51
5.4 การตรวจสอบและกำจัดแผ่นดินไหวที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Man-made Seismicity)	52
5.5 การคัดเลือกระดับของแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์ (Magnitude of Completeness)	52
5.6 การทดสอบย้อนกลับ (Retrospective Test)	53
5.7 การประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว (Evaluation of Prospective Area)	55
เอกสารอ้างอิง (REFERENCES)	56

สารบัญรูปภาพ

(FIGURE CONTENT)

	เรื่อง	หน้า
รูป 1.1	แผนที่พื้นที่ศึกษาครอบคลุมบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง (Pailoplee and Boonchaluy, accepted)	2
รูป 2.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 1995 (Huang และคณะ, 2001)	5
รูป 2.2	แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 1995 (Huang และคณะ, 2001)	5
รูป 2.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 2000 (Huang และ Sobolev, 2002)	6
รูป 2.4	แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 2000 (Huang และ Sobolev, 2002)	7
รูป 2.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 1999 (Chen และ Wu, 2006)	7
รูป 2.6	แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 1999 (Chen และ Wu, 2006)	8
รูป 2.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 2008 (Shashidhar และคณะ, 2010)	9
รูป 2.8	แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติในพื้นที่ซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 2008 (Shashidhar และคณะ, 2010)	10
รูป 2.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 2010 (Gambino และคณะ, 2014)	10
รูป 2.10	แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติในพื้นที่ซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 2010 (Gambino และคณะ, 2014)	11
รูป 2.11	แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา	12
รูป 3.1	แสดงการกระจายตัวของขนาดแผ่นดินไหวในแต่ละหน่วยมาตราวัด	18
รูป 3.2	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (Mb) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (Mw)	19
รูป 3.3	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (Ms) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (Mw)	20

	เรื่อง	หน้า
รูป 3.4	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (ML) และขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (Mb)	21
รูป 3.5	หลักการคัดเลือกแผ่นดินไหวหลักออกจากแผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตามตามสมมติฐานของ Gardner และ Knopoff (1974)	22
รูป 3.6	แสดงผลของการจัดกลุ่มแผ่นดินไหวตามแนวคิดของ Gardner และ Knopoff (1974) ซึ่งเส้นสีแดงแสดงถึงกรอบของเวลา (ด้านบน) และกรอบของระยะทาง (ด้านล่าง) โดยข้อมูลแผ่นดินไหวที่อยู่เหนือเส้นสีแดง คือข้อมูลแผ่นดินไหวหลัก	23
รูป 3.7	แสดงข้อมูลแผ่นดินไหวสะสมก่อนการแยกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก	24
รูป 3.8	แสดงข้อมูลแผ่นดินไหวสะสมหลังการแยกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก	24
รูป 3.9	แสดงข้อมูลแผ่นดินไหวสะสมหลังจากการกำจัดผลกระทบจากการกระทำของมนุษย์	26
รูป 3.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวและความถี่ โดยที่มีขนาดแผ่นดินไหวต่ำที่สุดที่มีความสมบูรณ์คือ $M_c = 5.0$	27
รูป 3.11	แสดงการเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุงฐานข้อมูล	28
รูป 4.1	แสดงการกระจายตัวของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้เป็นกรณีศึกษา	30
รูป 4.2	แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติที่ได้จากเงื่อนไขที่กำหนด	35
รูป 5.1	แผนที่แสดงภาวะเงียบสงบของแผ่นดินไหว	55

สารบัญตาราง
(TABLE CONTENT)

	เรื่อง	หน้า
ตาราง 3.1	ตารางแสดงตัวอย่างรูปแบบการจัดเก็บฐานข้อมูลแผ่นดินไหว	14
ตาราง 4.1	ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เลือกมาเป็นกรณีศึกษา	29
ตาราง 4.2	ตารางแสดงตัวอย่างเงื่อนไขค่า R_{max} และค่า T_{max} ในหลายกรณี	31
ตาราง 4.3	ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลเงื่อนไขที่สนใจ	32
ตาราง 4.4	ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลของเงื่อนไขที่นำมาใช้พิจารณา	33
ตาราง 4.5	ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เลือกมาทำแผนที่แสดงค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา	33
ตาราง 5.1	ตารางแสดงถึงสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวแต่ละประเภท	51
ตาราง 5.2	ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลแผ่นดินไหวก่อนและหลังการคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหว	52
ตาราง 5.3	ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลแผ่นดินไหวก่อนและหลังการคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหว และหลังการกำจัดผลจากกิจกรรมของมนุษย์	52
ตาราง 5.4	ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลแผ่นดินไหวก่อนและหลังการคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหว หลังการกำจัดผลจากกิจกรรมของมนุษย์ รวมถึงหลังจากคัดเลือกระดับของแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์	53
ตาราง 5.5	ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลของเหตุการณ์แผ่นดินไหวทั้ง 34 เหตุการณ์ที่เลือกมาเป็นกรณีศึกษา	53
ตาราง 5.6	ตารางแสดงเงื่อนไข ค่า R_{max} และค่า T_{max} และเหตุการณ์กรณีศึกษาที่สนใจ	54

สารบัญสมการ (EQUATION CONTENT)

	เรื่อง	หน้า
สมการ 2.1	สมการฟังก์ชันของระยะห่างจากจุดเหนือศูนย์กลางแผ่นดินไหวถึงจุดศึกษา	3
สมการ 2.2	สมการฟังก์ชันของระยะเวลาในการเกิดแผ่นดินไหวถึงเวลาที่จะพิจารณา	3
สมการ 2.3	สมการฟังก์ชันของความยาวของรอยเลื่อน	3
สมการ 2.4	สมการของ Wells และ Coppersmith (1994)	4
สมการ 2.5	สมการของภาวะเงียบสงบ หรือ Q-parameter	4
สมการ 2.6	สมการของภาวะกระตุ้น หรือ S-parameter	4
สมการ 3.1	สมการความสัมพันธ์ในการใช้แปลงจากขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (Mb) ไปเป็นขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (Mw)	19
สมการ 3.2	สมการความสัมพันธ์ในการใช้แปลงจากขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (Ms) ไปเป็นขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (Mw)	20
สมการ 3.3	สมการความสัมพันธ์ในการใช้แปลงจากขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (ML) ไปเป็นขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (Mb)	21
สมการ 3.4	สมการการเปลี่ยนแปลงอัตราการตรวจวัดแผ่นดินไหว (Z)	25

บทที่ 1

บทนำ (INTRODUCTION)

1.1 ที่มาและความสำคัญ (Theme and Background)

เนื่องจากพายุไต้ฝุ่นทำให้เกิดแผ่นดินไหวในปัจจุบัน ทำให้หมู่เกาะฟิลิปปินส์และประเทศใกล้เคียงได้รับผลกระทบบ่อยครั้ง ทั้งจากแผ่นดินไหว สึนามิและภูเขาไฟ (Pailoplee and Boonchaluy, accepted) โดยจากการสำรวจทางธรณีวิทยาพบว่ามีภูเขาไฟมีพลังอย่างน้อย 65 ลูก ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงของหมู่เกาะฟิลิปปินส์ และมีแผ่นดินไหวที่มีขนาดมากกว่า 7.0 ริกเตอร์ เกิดขึ้นอย่างน้อย 95 เหตุการณ์ที่ถูกบันทึกไว้ในช่วงระยะเวลา 54 ปีที่ผ่านมาของค.ศ. 1960-2014 นอกจากนี้นับตั้งแต่ ค.ศ. 1509 เป็นต้นมา (ประมาณ 500 ปีที่ผ่านมา) หน่วยงาน NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) รายงานบริเวณที่เคยได้รับผลกระทบจากพิบัติภัยสึนามิประมาณ 280 ตำแหน่ง ดังนั้นหมู่เกาะฟิลิปปินส์จึงถือได้ว่าเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่อันตรายจากพิบัติภัยธรรมชาติ และจำเป็นต้องมีการประเมินระดับอันตรายจากพิบัติภัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งพิบัติภัยที่เกิดจากแผ่นดินไหวและภัยสึนามิเพื่อช่วยในการวางแผนรับมือพิบัติภัยทางธรรมชาติ

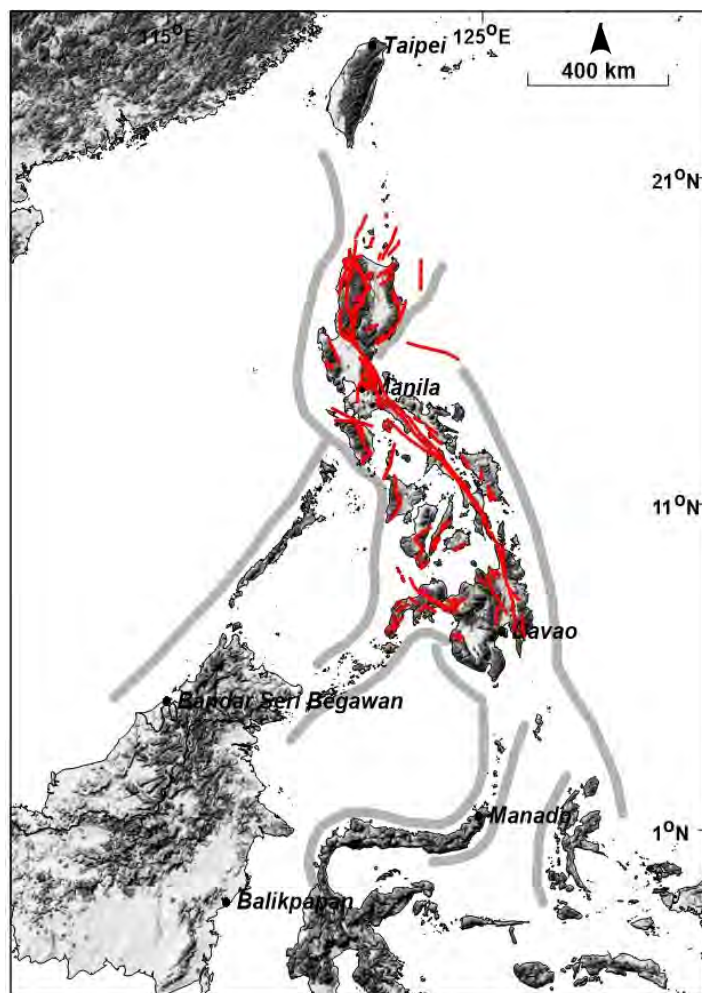
จากเหตุทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่จะวิเคราะห์ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน เพื่อประเมินพื้นที่เสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหวในอนาคต โดยให้ความสนใจในพื้นที่บริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง เนื่องด้วยแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้สามารถส่งผลกระทบต่อทะเลจีนใต้และประเทศไทยได้

1.2 วัตถุประสงค์ (Objective)

ประเมินพื้นที่ที่มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวในบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง ด้วยขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน (Region-Time-Length Algorithm : RTL Algorithm)

1.3 พื้นที่ศึกษา (Study Area)

บริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง ดังรูป 1.1 ครอบคลุมพื้นที่ระหว่างละติจูดที่ $4^{\circ}15'$ ใต้ ถึง $26^{\circ}10'$ เหนือ และ ลองจิจูดที่ $109^{\circ}99'$ ตะวันออก ถึง $132^{\circ}22'$ ตะวันออก



รูป 1.1 แผนที่พื้นที่ศึกษาครอบคลุมบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง (Pailoplee and Boonchaluay, accepted)

1.4 ขอบเขตการศึกษา (Scope of study)

วิเคราะห์ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน บริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง โดยใช้ฐานข้อมูลแผ่นดินไหวที่เคยมีการตรวจวัดและบันทึกได้จากเครื่องมือตรวจวัด (instrumental earthquake records)

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Expected Results)

แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติของภาวะเฉียบสงบในบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่ใกล้เคียง จากขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน

บทที่ 2

ทฤษฎีและระเบียบวิธีวิจัย (THEORY AND METHODOLOGY)

2.1 ทฤษฎีแนวคิดขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน

Sobolev (1995) จำลองการเกิดแผ่นดินไหว โดยทดลองกดอัดแท่งหินและใช้อุปกรณ์ในการวัดพลังงานเสียงจากการปริแตกของหิน ซึ่งผลการทดลองบ่งชี้ว่าเมื่อเริ่มบีบอัดหิน จะเริ่มมีสัญญาณเสียงเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการปริแตกขนาดเล็กของแท่งหิน และเมื่อบีบอัดด้วยแรงที่เพิ่มขึ้น สัญญาณเสียงจะเริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นสัญญาณเสียงจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ก่อนที่แท่งหินจะเกิดการแตกหักและเปลี่ยนรูปร่างไป ซึ่งจากการทดลองสรุปว่า ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ จะมีการลดลงของอัตราการเกิดแผ่นดินไหวอย่างมีนัยสำคัญ เรียกว่า ภาวะสงบเงียบ (seismic quiescence) และหลังจากนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดแผ่นดินไหว เรียกว่า ภาวะกระตุ้น (seismic activation) ตามมา

Sobolev และ Tyupkin (1997) พัฒนาขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อนขึ้นหลังจาก Sobolev (1995) ทดลองกดอัดแท่งหิน ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมแผ่นดินไหวก่อนเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ (Huang, 2004) โดยคำนึงถึงตัวแปรระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว ทั้ง 3 ตัวแปรดังนี้ บริเวณ เวลา และความยาวรอยเลื่อน ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (2.1)-(2.3)

$$R(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_{bg}(x, y, z, t) \quad \text{สมการ (2.1)}$$

$$T(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t-t_i}{t_0}\right) \right] - T_{bg}(x, y, z, t) \quad \text{สมการ (2.2)}$$

$$L(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{l_i}{r_i}\right) \right] - L_{bg}(x, y, z, t) \quad \text{สมการ (2.3)}$$

จากสมการ (2.1)-(2.3) สามารถอธิบายตัวแปรในแต่ละฟังก์ชันได้ดังนี้

R	คือ ฟังก์ชันของระยะห่างจากจุดเหนือศูนย์กลางแผ่นดินไหวถึงจุดศึกษา
T	คือ ฟังก์ชันของระยะเวลาในการเกิดแผ่นดินไหวถึงเวลาที่พิจารณา
L	คือ ฟังก์ชันของความยาวของรอยเลื่อน
r_i	คือ ระยะห่างจากจุดเหนือศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่พิจารณาถึงจุดศึกษา
t_i	คือ เวลาของการเกิดแผ่นดินไหวในแต่ละครั้ง
l_i	คือ ความยาวของรอยเลื่อน
t	คือ ช่วงเวลาที่ต้องการพิจารณา
r_0, t_0	คือ ค่าลักษณะเฉพาะที่ได้จากการเปรียบเทียบในพื้นที่ศึกษา
n	คือ จำนวนเหตุการณ์
R_{bg}, T_{bg}, L_{bg}	คือ แนวโน้มของ R, T, L ตามลำดับ

โดยค่า l_i หาได้จากสมการของ Wells และ Coppersmith (1994) ดังสมการ (2.4)

$$\log(SRL) = a + b * M \quad \text{สมการ (2.4)}$$

ซึ่งตัวแปร M คือ ขนาดของแผ่นดินไหว (magnitude) โดยที่สมการที่ได้ในแต่ละพื้นที่จะมีค่าที่ไม่เท่ากันซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพื้นที่

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นมาสามารถแสดงค่าความผิดปกติของทั้งภาวะเจ็บสงบและภาวะกระตุ้นก่อนที่สัมพันธ์กับการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ในเวลาต่อมาได้ (Huang, 2004) โดยที่ภาวะเจ็บสงบ และภาวะกระตุ้นมีสมการ ดังนี้

ภาวะเจ็บสงบ หรือ Q-parameter

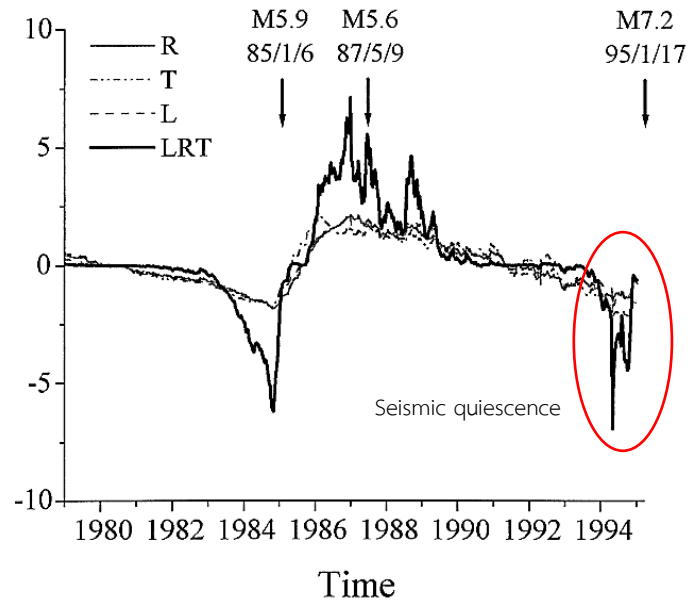
$$Q(x, y, z, t_1, t_2) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m RTL(x, y, z, t_i) \quad \text{สมการ (2.5)}$$

ภาวะกระตุ้น หรือ S-parameter

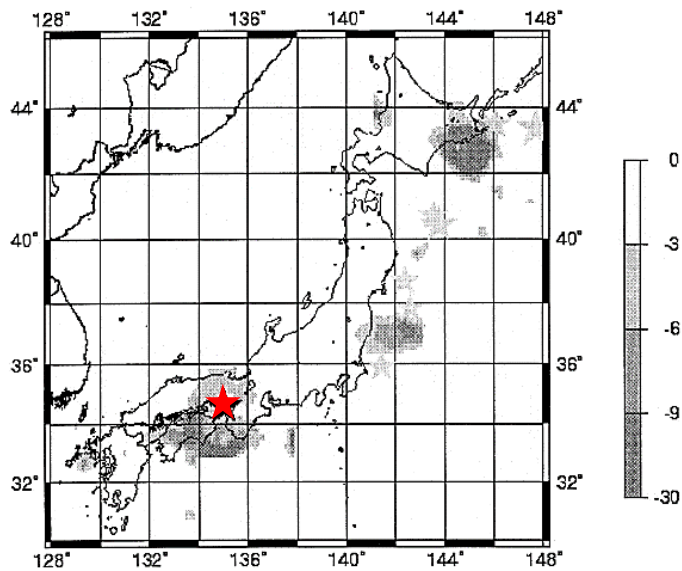
$$S_{eff} = \frac{1}{\Delta T} \sum_i \frac{S_i}{S_{ref}} = \frac{1}{\Delta T} \sum_i 10^{(M_i - M_{ref})} \quad \text{สมการ (2.6)}$$

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)

Huang และคณะ (2001) อธิบายขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน ว่าเป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่งที่น่าข้อมูลขนาดแผ่นดินไหว เวลาและสถานที่ที่เกิดแผ่นดินไหว มาประยุกต์ใช้กับการสำรวจรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของผิวเปลือกโลกก่อนการเกิดแผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ (Kobe) ประเทศญี่ปุ่น ขนาด 7.2 ริคเตอร์ เมื่อปี ค.ศ. 1995 ซึ่งจากการศึกษา พบว่ามีการเกิดภาวะเจ็บสงบขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1993 จนถึงเดือนพฤษภาคม ค.ศ. 1994 และเริ่มเข้าสู่ช่วงภาวะกระตุ้นนาน 8 เดือนที่บริเวณรอบจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว ก่อนเกิดแผ่นดินไหวขนาด 7.2 ริคเตอร์ ซึ่งจะแสดงดังรูป 2.1 และรูป 2.2 จึงสรุปผลได้ว่าขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเกิดแผ่นดินไหวก่อนเกิดแผ่นดินไหวใหญ่ได้



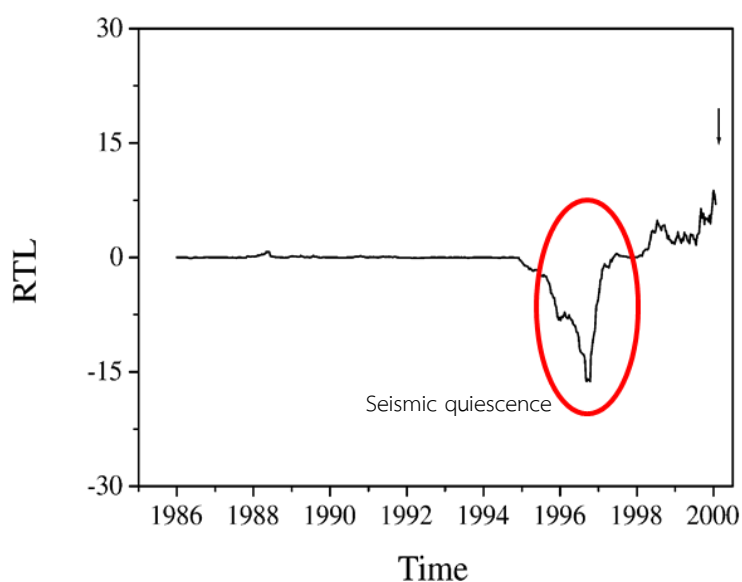
รูป 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 1995 (Huang และคณะ, 2001)



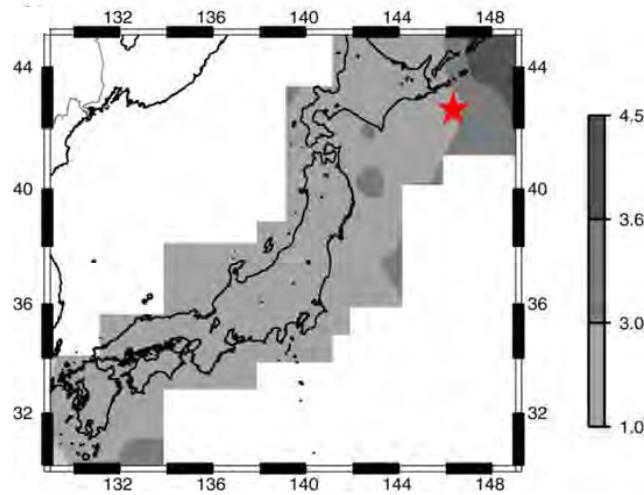
รูป 2.2 แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 1995 (Huang และคณะ, 2001)

Huang และ Sobolev (2002) ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน กับฐานข้อมูลแผ่นดินไหว JMA เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเกิดแผ่นดินไหวในบริเวณอ่าวเนะมุโระ (Nemuro Peninsula earthquake) ทางตอนเหนือของประเทศญี่ปุ่น ซึ่งจากการศึกษาพบภาวะเงียบสงบแผ่นดินไหวเริ่มเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1995 และค่า RTL ลดลงต่ำสุดในเดือน ตุลาคม ค.ศ. 1996 ในบริเวณนอกชายฝั่งตะวันออกของเกาะฮอกไกโด ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งแสดงดังรูป 2.3 และรูป 2.4

ต่อมาในช่วงต้นปี ค.ศ. 1997 จึงเกิดภาวะกระตุ้นแผ่นดินไหวนานประมาณ 8 เดือน ในบริเวณเดียวกันกับที่เคยเกิดภาวะเงียบสงบแผ่นดินไหว และหลังจากนั้นอีกประมาณ 4 ปี จึงเกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.8 ริกเตอร์ ในบริเวณที่เคยตรวจพบค่าความผิดปกติดังกล่าวในเดือนมกราคม ค.ศ. 2000

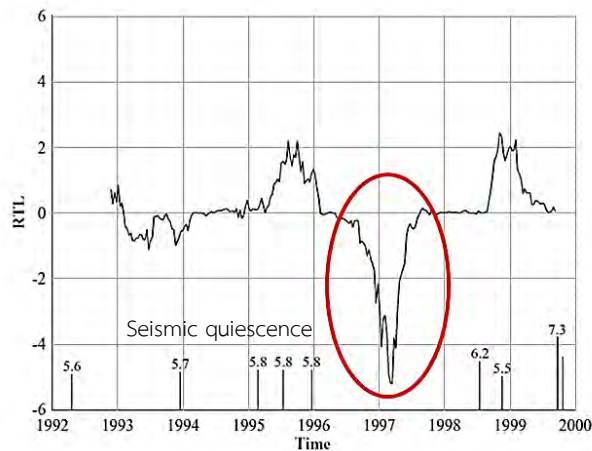


รูป 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 2000 (Huang และ Sobolev, 2002)

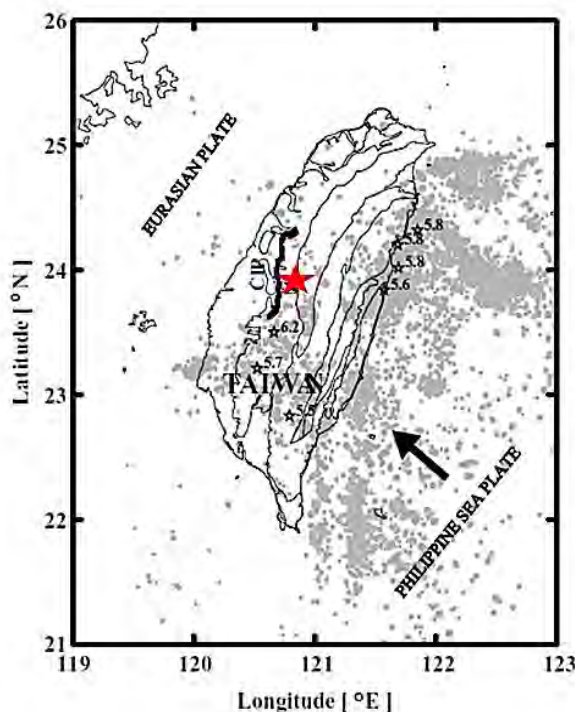


รูป 2.4 แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 2000 (Huang และ Sobolev, 2002)

Chen และ Wu (2006) พบว่าขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อนนั้นสามารถตรวจจับสภาวะเจียบสงบและสภาวะกระตุ้นก่อนการเกิดแผ่นดินไหวขนาด 7.6 ริกเตอร์ ที่เมืองชีชี (Chi-Chi) ประเทศไต้หวันได้ โดยจากการศึกษาพบว่ามีสภาวะเจียบสงบแผ่นดินไหวเกิดขึ้นในพื้นที่เมื่อ ค.ศ. 1996 ตามด้วย สภาวะกระตุ้นเมื่อปี ค.ศ. 1997 ดังแสดงในรูป 2.5 และรูป 2.6 ก่อนที่จะเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดใหญ่เกิดขึ้นในเดือนกันยายน ปี ค.ศ. 1999 ซึ่งถือว่าเป็นแผ่นดินไหวใหญ่ที่สุดที่เคยเกิดบนเกาะไต้หวันในศตวรรษที่ 20

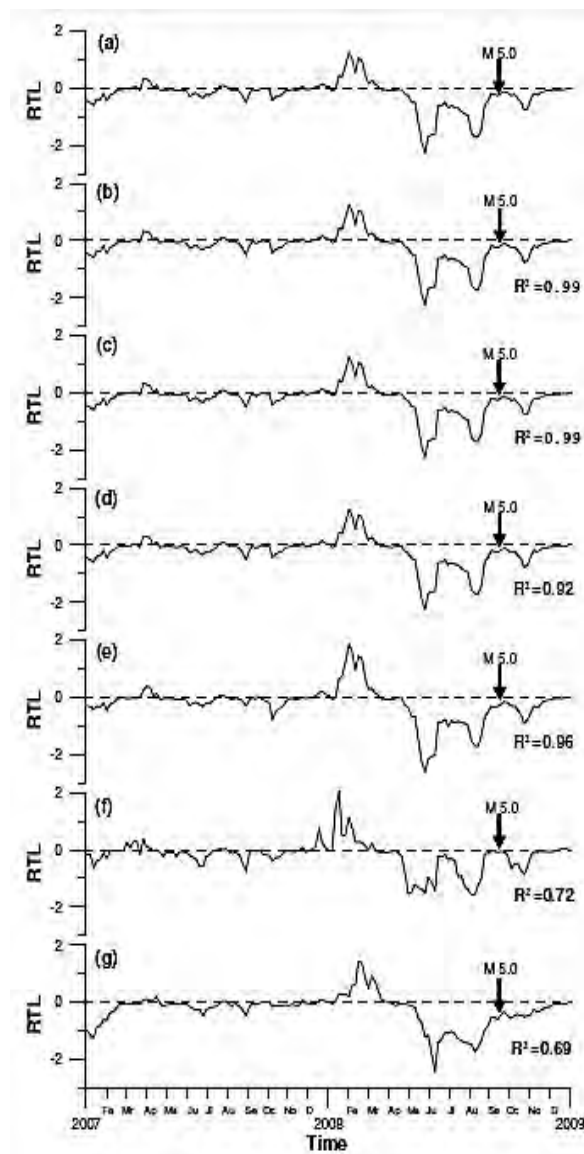


รูป 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 1999 (Chen และ Wu, 2006)

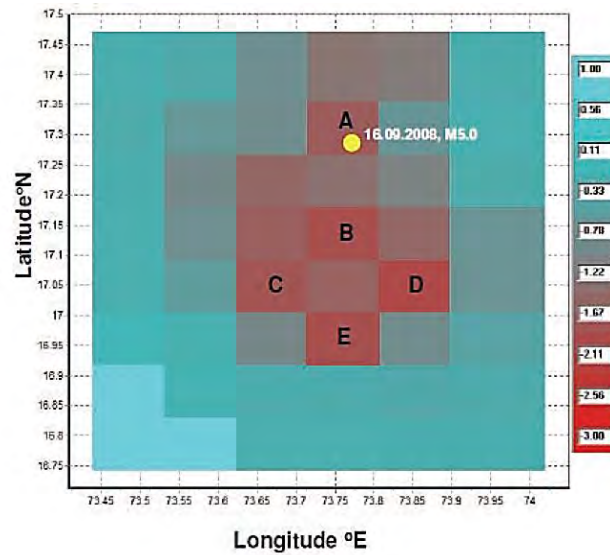


รูป 2.6 แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 1999 (Chen และ Wu, 2006)

Shashidhar และคณะ (2010) ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมแผ่นดินไหวทางตะวันตกของประเทศไทย ซึ่งพบว่าการเกิดแผ่นดินไหวขนาด 5.0 ริคเตอร์นั้น จะสามารถพบได้กับลักษณะของภาวะเสียบสงบและภาวะกระตุ้นได้ด้วยเช่นกัน ดังรูป 2.7 และรูป 2.8 ดังนั้น จึงได้สรุปและนำเสนอว่านอกจากการประเมินพื้นที่เสี่ยงแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ (มากกว่า 6.0 ริคเตอร์) แล้วขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อนยังสามารถประเมินพื้นที่เสี่ยงแผ่นดินไหวระดับปานกลาง (5.0-6.0 ริคเตอร์) ได้เช่นกัน

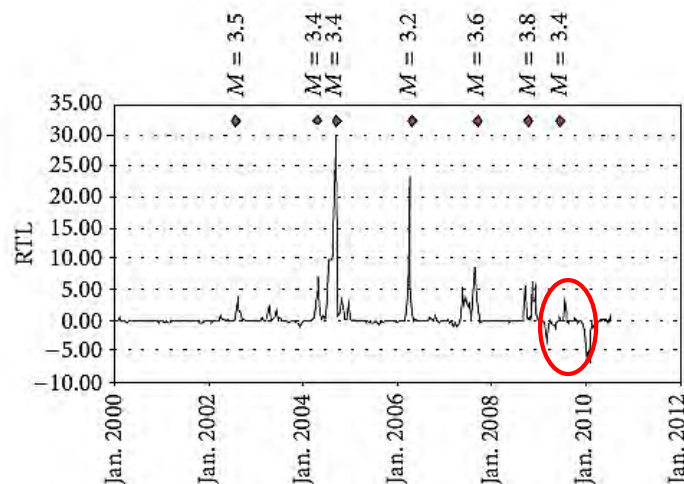


รูป 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 2008 (Shashidhar และคณะ, 2010)

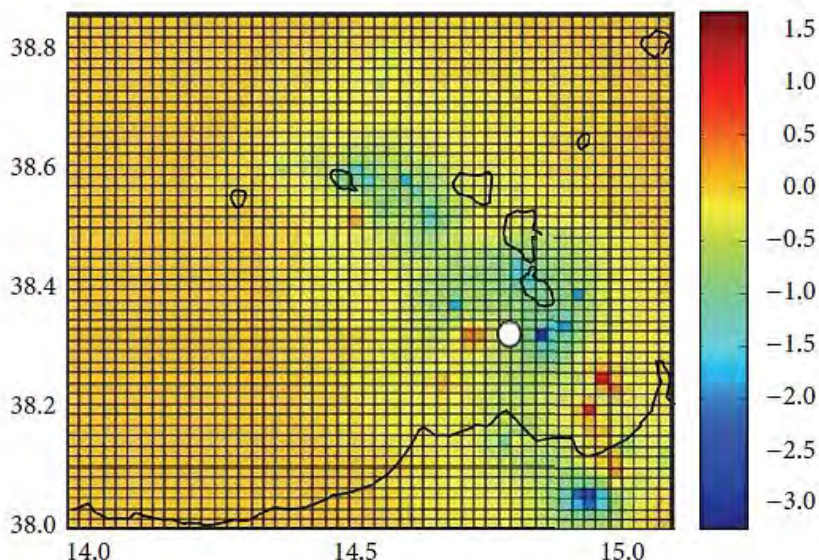


รูป 2.8 แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติในพื้นที่ซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 2008 (Shashidhar และคณะ, 2010)

Gambino และคณะ (2014) ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน มาวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณกลุ่มเกาะเอโอเลียน ทางตอนใต้ของภูเขาไฟในทะเลไทรเร-เนียน ประเทศอิตาลี ซึ่งพบว่า เกิดภาวะเงียบสงบในช่วงเดือนมิถุนายนถึงธันวาคม 2552 ก่อนจะมีการเกิดแผ่นดินไหวขนาด 4.8 ริกเตอร์ ขึ้นในวันที่ 16 สิงหาคม 2553 ซึ่งจะแสดงดังรูป 2.9 และรูป 2.10 จึงสรุปผลได้ว่าขั้นตอนวิธีพื้นที่-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเกิดแผ่นดินไหวก่อนเกิดแผ่นดินไหวระดับปานกลาง



รูป 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTL กับเวลา (ปี) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 2010 (Gambino และคณะ, 2014)



รูป 2.10 แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติในพื้นที่ซึ่งเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในปี ค.ศ. 2010 (Gambino และคณะ, 2014)

2.3 ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

โดยมีแผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาประกอบด้วย 7 ขั้นตอนหลักดังนี้ (ดูรูป 2.11 ประกอบ)

1. ศึกษางานวิจัยและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งทางทฤษฎีและพื้นที่ศึกษา

1.2 รวบรวมข้อมูลแผ่นดินไหวในพื้นที่ศึกษาที่มีการบันทึกข้อมูลไว้จากแหล่งข้อมูลต่างๆ ที่มีการบันทึกย้อนหลังไปตั้งแต่ช่วง ค.ศ.1962–2015

- ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว National Earthquake Information (NEIC)
- ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว International Seismological Center (ISC)
- ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Global CMT Catalogue (GCMT)

1.3 เตรียมซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

- ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลและแสดงผล คือ ZMAP (Wiemer, 2001) และ Golden Software Surfer 11

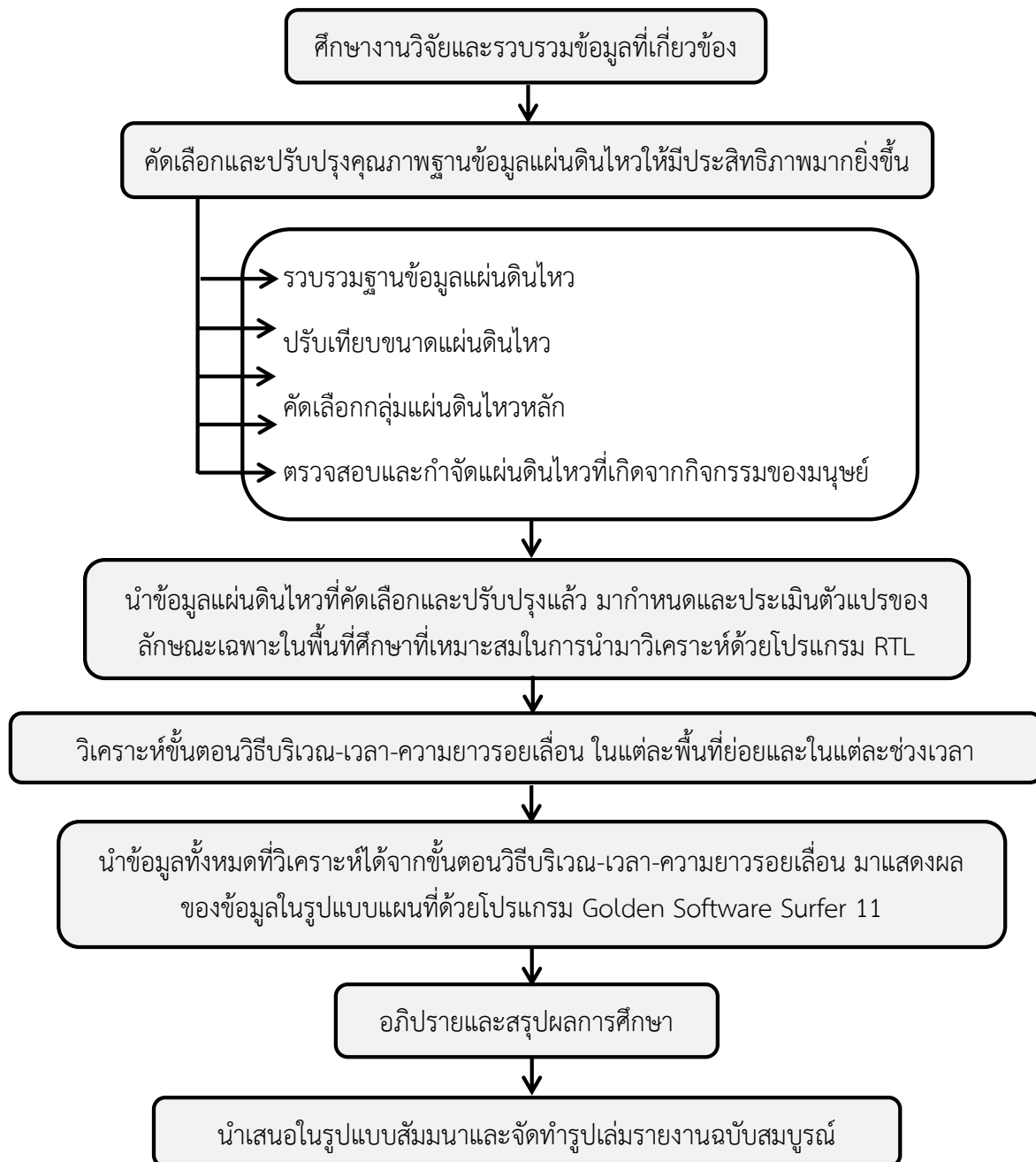
2. คัดเลือกและปรับปรุงคุณภาพฐานข้อมูลแผ่นดินไหวให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.1 รวบรวมฐานข้อมูลแผ่นดินไหว (earthquake catalogue combination)

- ได้ฐานข้อมูลแผ่นดินไหวใหม่ที่มีระยะเวลาในการตรวจวัดยาวนานขึ้นและมีการกระจายตัวของขนาดแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดกว้างมากขึ้น

2.2 ปรับเทียบขนาดแผ่นดินไหว (earthquake magnitude conversion)

- เปลี่ยนมาตรวจวัดแผ่นดินไหวให้เป็นหน่วยมาตรฐานเดียวกัน (Mw) จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างมาตรการตรวจวัดขนาดแผ่นดินไหวแบบต่างๆ



รูป 2.11 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา

2.3 คัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก (earthquake declustering)

- คัดเลือกข้อมูลเฉพาะข้อมูลแผ่นดินไหวหลักเท่านั้น ด้วยแนวคิด Gardner และ Knopoff (1974) เนื่องจากข้อมูลแผ่นดินไหวหลักแสดงถึงพฤติกรรมหรือศักยภาพทางธรณีแปรสัณฐานโดยตรงในพื้นที่

2.4 ตรวจสอบและกำจัดแผ่นดินไหวที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (man-made seismicity)

- ปรับแก้หรือเลือกใช้ฐานข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีการต่อเนื่องของข้อมูลมากที่สุด โดยตรวจสอบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดแผ่นดินไหวโดยรวมจาก Habermann (1983; 1987) เพื่อให้ได้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่สื่อถึงพฤติกรรมทางธรณีแปรสัณฐานโดยตรงในพื้นที่ศึกษา

2.5 คัดเลือกระดับของแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์ (magnitude of completeness)

- ทำเพื่อหาข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวที่มีค่าต่ำที่สุด ที่สามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดของแผ่นดินไหว

3. นำข้อมูลแผ่นดินไหวที่คัดเลือกและปรับปรุงแล้ว มากำหนดและประเมินตัวแปรของลักษณะเฉพาะในพื้นที่ศึกษาที่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์

3.1 กำหนดรัศมีในการพิจารณาข้อมูลในตำแหน่งวิเคราะห์ใดๆ (space window)

3.2 กำหนดกรอบเวลาการเลือกข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาการวิเคราะห์ใดๆ (time window)

3.3 ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแปรที่กำหนดจากข้อมูลแผ่นดินไหวหลัก

4. วิเคราะห์ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน ในแต่ละพื้นที่ย่อยและในแต่ละช่วงเวลา

4.1 วิเคราะห์หาค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้น จากข้อมูลแผ่นดินไหวหลักและตัวแปรเฉพาะที่เหมาะสมในพื้นที่

5. นำข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้จากขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน มาแสดงผลของข้อมูลในรูปแบบแผนที่ด้วยโปรแกรม Golden Software Surfer 11

5.1 แผนที่พื้นที่เสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหวในอนาคต

6. อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

7. นำเสนอในรูปแบบสัมมนาและจัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 3

การปรับปรุงฐานข้อมูลแผ่นดินไหว (SEISMICITY DATA AND COMPLETENESS)

การปรับปรุงฐานข้อมูลแผ่นดินไหวก่อนจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติ มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดกรองฐานข้อมูลแผ่นดินไหวเฉพาะช่วงข้อมูลที่เกี่ยวข้องถึงพฤติกรรมธรณีแปรสัณฐาน (tectonic activities) ของพื้นที่ศึกษาอย่างแท้จริง ซึ่งในทางแผ่นดินไหววิทยาเชิงสถิติ (statistical seismology) มีระเบียบวิธีทางสถิติในการปรับปรุงฐานข้อมูลแผ่นดินไหว 5 ขั้นตอน คือ

3.1 การรวบรวมฐานข้อมูลแผ่นดินไหว (Earthquake Catalogue Combination)

ข้อมูลแผ่นดินไหวในพื้นที่ศึกษาที่จะนำมาวิเคราะห์ สามารถรวบรวมคัดลอกได้มาจากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีการบันทึกไว้ทางอินเทอร์เน็ต โดยที่งานวิจัยนี้จะรวบรวมข้อมูลแผ่นดินไหวมาจากฐานข้อมูลแผ่นดินไหว 3 แหล่งด้วยกัน คือ 1) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว National Earthquake Information (NEIC) 2) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว International Seismological Center (ISC) และ 3) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Global CMT Catalogue (GCMT) ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาจากอินเทอร์เน็ตได้โดยเลือกขอบเขตละติจูดลองจิจูดของพื้นที่ศึกษา ช่วงของขนาดแผ่นดินไหว และช่วงระยะเวลาที่ต้องการศึกษา

เมื่อได้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่ต้องการแล้ว จัดเรียงข้อมูลแผ่นดินไหวของฐานข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน โดยเรียงตามลำดับดังนี้ ละติจูด ลองจิจูด ปี เดือน วัน ขนาดของแผ่นดินไหวในหน่วยต่างๆ ความลึก ชั่วโมง นาที และวินาที ดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ตารางแสดงตัวอย่างรูปแบบการจัดเก็บฐานข้อมูลแผ่นดินไหว

Longitude	Latitude	Year	Month	Day	Mw	Mb	Ms	ML	Depth	Hour	Minute	Second
94.18	25.26	1987	5	18	6.3	5.6	5.9	-	50	1	53	51
99.48	30.07	1989	5	3	6.1	6	6.1	-	10	5	53	0
92.371	27.635	1995	2	17	5.4	5.2	5.1	5.4	39.3	2	44	25
99.637	30.704	1996	12	21	5.4	5.2	5	-	10	8	39	39
92.4314	22.4056	2000	11	9	-	4.4	3.3	4.1	13.5	8	37	52
99.26	21.45	2001	1	4	4.4	4.3	4.4	4.8	33	4	2	57
95.93	24.3	2002	5	26	-	4.6	4.1	4.3	33	6	9	30
95.672	19.917	2003	9	21	6.6	-	6.9	-	10	18	16	13

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำฐานข้อมูลแผ่นดินไหวจาก 1) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว National Earthquake Information (NEIC) 2) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว International Seismological Center (ISC) และ 3) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Global CMT Catalogue (GCMT) มาใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งมีการกำหนดขอบเขตระยะเวลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1962-2015 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาบริเวณหมู่เกาะฟิลิปปินส์และพื้นที่

ใกล้เคียง ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ระหว่างละติจูดที่ $04^{\circ}15'00.0000''$ ใต้ ถึง $26^{\circ}10'00.0000''$ เหนือ และ ลองจิจูดที่ $109^{\circ}99'00.0000''$ ตะวันออก ถึง $132^{\circ}22'00.0000''$ ตะวันออก ขนาดของข้อมูลแผ่นดินไหวที่ต้องการตั้งแต่ 0.0-9.5 ริกเตอร์ และความลึกของการเกิดแผ่นดินไหวตั้งแต่ 0-782.3 เมตร จากการรวบรวมฐานข้อมูลแผ่นดินไหว พบว่า มีข้อมูลทั้งหมด 542,726 เหตุการณ์ โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 1962-วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2015

3.1.1 ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว National Earthquake Information (NEIC)

จัดตั้งขึ้นในปี ค.ศ. 1940 ซึ่งอยู่ในการกำกับดูแลของกรมทรัพยากรธรณี สหรัฐอเมริกา (U.S. Geological Survey, USGS) โดยเป็นเครือข่ายตรวจวัดแบบอัตโนมัติ และสามารถรายงานแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นทั่วโลกได้อย่างทันทีทันใดหลังจากเกิดแผ่นดินไหว (Sipkin และคณะ, 2000) ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลบ้างเล็กน้อยจากกระบวนการประมวลผลแบบอัตโนมัติ แต่เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลอื่นๆ ฐานข้อมูล NEIC ถือเป็นฐานข้อมูลที่มีการรายงานข้อมูลที่ทันสมัยที่สุด ณ ปัจจุบัน

3.1.2 ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว International Seismological Center (ISC)

เป็นอีกหนึ่งฐานข้อมูลที่อยู่ในการดูแลของหน่วยงาน USGS โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อจัดทำฐานข้อมูลแผ่นดินไหวที่แม่นยำมากขึ้น ซึ่งฐานข้อมูล ISC เกิดจากการนำฐานข้อมูล NEIC มาคำนวณใหม่อีกครั้ง (International Seismological Centre, 2001) เพื่อความถูกต้องแม่นยำของข้อมูล ตลอดจนรายงานข้อมูลในเชิงลึกอื่นๆ ที่อาจจำเป็นต่อการวิจัยในเชิงลึกด้านแผ่นดินไหววิทยา โดยบางเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นล่าสุด ฐานข้อมูล ISC จะยังไม่มีกรรายงาน แต่ถือว่าโดยภาพรวมของข้อมูลจะมีความถูกต้องมากกว่าฐานข้อมูล NEIC

3.1.3 ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Global CMT Catalogue (GCMT)

หรือที่ในอดีตเรียกว่าฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Harvard CMT (HRV) มีภารกิจหลักในการวิเคราะห์และรายงานค่าโมเมนต์เทนเซอร์ (centroid moment tensor) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีขนาดมากกว่า 5.5 ริกเตอร์ นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 (Ekström และคณะ, 2005) โดยฐานข้อมูลนี้จะวิเคราะห์ตัวแปรด้านแผ่นดินไหวต่างๆ อย่างละเอียด ตลอดจนรายงานผลการวิเคราะห์กลไกการเกิดแผ่นดินไหว (focal mechanism) เพื่อให้ให้นักแผ่นดินไหววิทยานำไปใช้ในการศึกษาวิจัยกระบวนการเกิดแผ่นดินไหวในเชิงลึก อย่างไรก็ตามสืบเนื่องจากเป็นฐานข้อมูลที่มีรายละเอียดมาก ดังนั้นในแต่ละเหตุการณ์แผ่นดินไหวจึงต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ผลนานกว่าฐานข้อมูลแผ่นดินไหวอื่นๆ ข้างต้น ซึ่งบางครั้งอาจใช้เวลา 3-4 เดือนหลังจากเกิดแผ่นดินไหว

3.2 การปรับเทียบขนาดแผ่นดินไหว (Earthquake Magnitude Conversion)

ข้อมูลที่ได้จากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวจะมีการรายงานขนาดของแผ่นดินไหวด้วยหน่วยที่แตกต่างกันไป ได้แก่ ขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (moment magnitude; M_w) ขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (body-wave magnitude; M_b) ขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (local magnitude; M_L) และขนาด

แผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (surface-wave magnitude; M_s) ซึ่งจะนำข้อมูลแผ่นดินไหวไปใช้ในการวิเคราะห์ได้นั้น ต้องปรับเปลี่ยนเป็นข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวที่อยู่ในมาตรวัดมาตรฐานเดียวกัน โดยแต่ละหน่วยขนาดแผ่นดินไหวที่อ้างอิงมาจากสมมติฐานและวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันไป แต่สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวหน่วยเดียวกันคือ ขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (moment magnitude; M_w)

การเปรียบเทียบหรือการแปลงข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวสามารถทำได้โดยการปรับข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (body-wave magnitude; M_b) ขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (M_s) และขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (local magnitude; M_L) ให้มีหน่วยมาตรฐานเดียวกันคือ ขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (moment magnitude; M_w) โดยเริ่มจากการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยมาตรวัดขนาดแผ่นดินไหวที่แตกต่างกันซึ่งมีความเฉพาะและแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ความสัมพันธ์ดังนี้

- (1) ขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w)
- (2) ขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (M_s) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w)
- (3) ขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (M_L) และขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b)

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b), ขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (M_s) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w) โดยเริ่มจากการนำข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w) มาสร้างเป็นกราฟในแกนแนวตั้งหรือแกน y ส่วนขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) และขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (M_s) มาสร้างเป็นกราฟในแกนแนวนอนหรือแกน x หลังจากนั้นก็สร้างเส้นแนวโน้มในรูปแบบของสมการ Polynomial จึงได้สมการความสัมพันธ์ที่ต้องการ ส่วนการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (M_L) และขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) กำหนดขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) ให้เป็นแกนแนวตั้ง ส่วนขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (M_L) ให้เป็นแกนแนวนอน ก็จะได้เป็นสมการความสัมพันธ์เช่นเดียวกัน

ข้อมูลแผ่นดินไหวที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิตินั้นจำเป็นต้องมีความแม่นยำและถูกต้องมากที่สุด จึงจำเป็นที่จะต้องมีการแปลงข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวให้อยู่ในหน่วยมาตรวัดขนาดแผ่นดินไหวเดียวกัน ซึ่งในปัจจุบัน หน่วยมาตรวัดขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w) เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติและมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด เนื่องจากหน่วยวัดนี้ไม่มีการเกิดการอ้อมตัวของสัญญาณ เหมือนกับหน่วยมาตรวัดแผ่นดินไหวอื่นๆ ซึ่งฐานข้อมูลที่จะนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ คือ ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว National Earthquake Information (NEIC) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว International Seismological Center (ISC) และฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Global CMT Catalogue (GCMT) เนื่องจากฐานข้อมูลนี้มีการบันทึกข้อมูลในทุกหน่วยมาตรวัดแผ่นดินไหว ซึ่งจะเห็นได้ดังรูป 3.1 ที่แสดงให้เห็นถึงข้อมูลในหน่วยมาตรวัดแผ่นดินไหวที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสภาพการณ์ของการตรวจวัด โดยหน่วยมาตรวัดขนาดแผ่นดินไหวที่สามารถพบได้ทั่วไปมีดังนี้

- M_w (moment magnitude) เป็นมาตรวัดขนาดแผ่นดินไหวที่อาศัยการวัดจากพื้นที่การปริแตกและการเลื่อนตัวของรอยเลื่อน ซึ่งเป็นการวัดขนาดแผ่นดินไหวจากตัวแปรที่แสดงถึงพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในขณะที่เกิดแผ่นดินไหว จึงแตกต่างจากมาตรวัดขนาดชนิดอื่นที่จะทำการวัดขนาดของแผ่นดินไหว

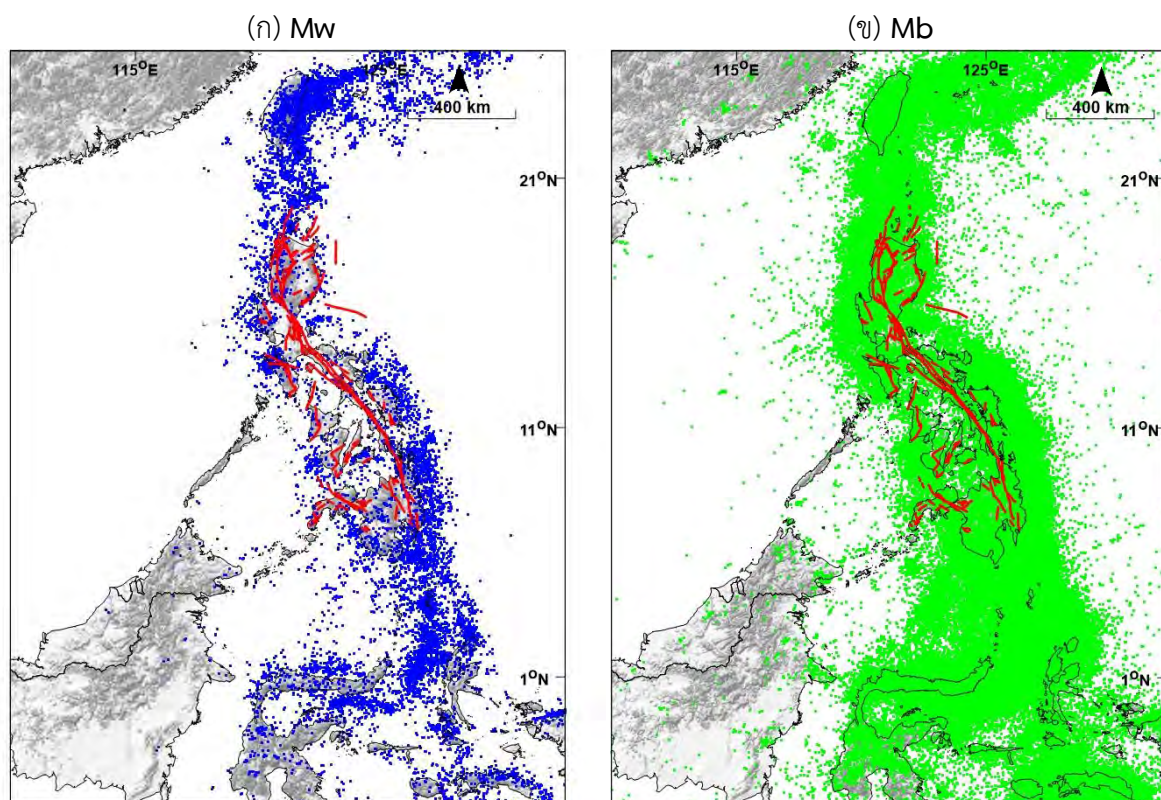
โดยอาศัยความสูงของแอมพลิจูดคลื่นเป็นหลัก ซึ่งมาตรวัดแผ่นดินไหวชนิด M_w จะนิยมนำมาใช้มากที่สุด ดังรูป 3.1 (ก)

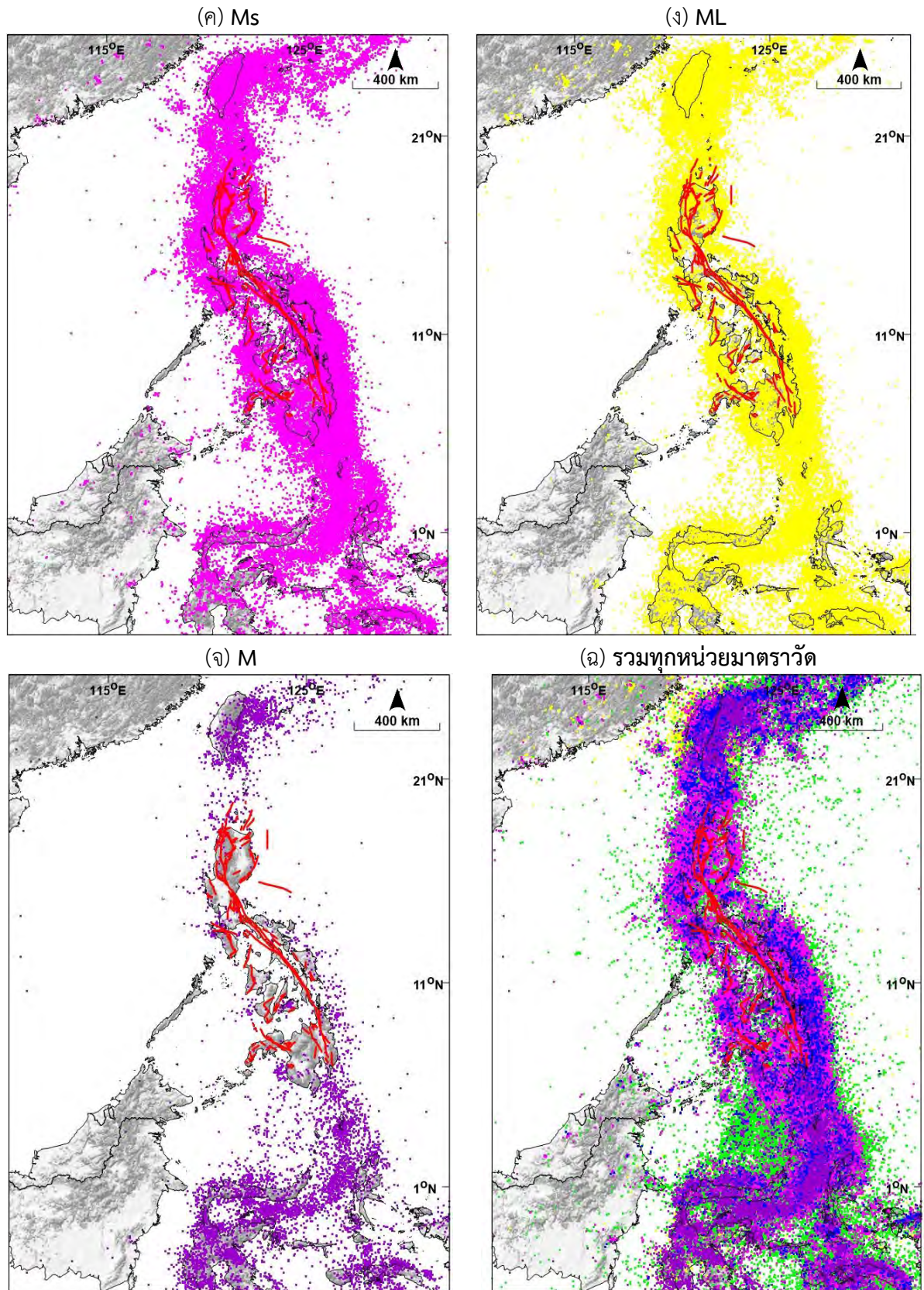
- M_b (body-wave magnitude) ในขณะที่เกิดแผ่นดินไหวแต่ละครั้งจะเกิดคลื่นแผ่นดินไหวที่เคลื่อนที่อยู่ภายในโลก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้สองแบบคือคลื่นปฐมภูมิ (P-Wave) และคลื่นทุติยภูมิ (S-Wave) มาตรวัดแผ่นดินไหวหน่วย M_b จะวัดขนาดของแผ่นดินไหวโดยอาศัยความสูงของแอมพลิจูดคลื่นปฐมภูมิ ซึ่งจะเหมาะกับการวัดขนาดแผ่นดินไหวในระดับลึก ดังรูป 3.1 (ข)

- M_s (surface-wave magnitude) จะเหมาะสำหรับการวัดขนาดแผ่นดินไหวในบริเวณกว้าง (regional scale) โดยจะอาศัยการวัดความสูงของแอมพลิจูดคลื่นผิวโลก เพราะว่าการวัดขนาดแผ่นดินไหวระยะไกลจะสามารถตรวจวัดคลื่นผิวโลกได้ดีกว่าคลื่นชนิดอื่น ดังรูป 3.1 (ค)

- M_L (local magnitude) เป็นมาตรวัดที่ใช้วัดขนาดแผ่นดินไหวที่เกิดในท้องถิ่น ความแม่นยำจะลดลงตามระยะทางที่ทำการวัดจากบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหว นิยมใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดกับสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ในบริเวณนั้นเช่นเหมือง เขื่อน อาคารสูง ดังรูป 3.1 (ง)

นอกจากนี้ยังมีชนิดของขนาดแผ่นดินไหวชนิดอื่นที่สามารถตรวจได้แทนด้วย M เป็นข้อมูลที่ทางผู้ให้บริการฐานข้อมูลแผ่นดินไหวไม่ได้ระบุชนิด ทำให้ไม่สามารถระบุได้ แต่ด้วยจำนวนข้อมูลที่เหลืออยู่ยังสามารถมาเติมเต็มกับข้อมูลแผ่นดินไหวได้ และจะกำหนดให้แผ่นดินไหวที่ไม่ทราบชนิดของขนาดแผ่นดินไหวนี้เป็นแบบ M_w ดังรูป 3.1 (จ)

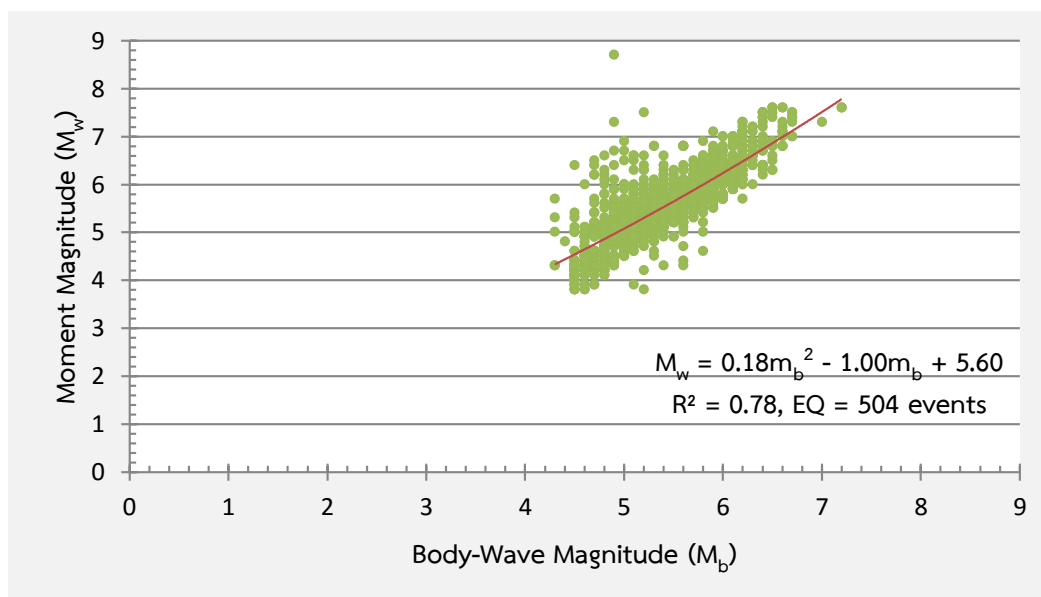




รูป 3.1 แสดงการกระจายตัวของขนาดแผ่นดินไหวในแต่ละหน่วยมาตรารวัด

3.2.1 ขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w)

จากการศึกษาข้อมูลแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวของ NEIC GCMT และ ISC ทำให้ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w) ดังรูป 3.2



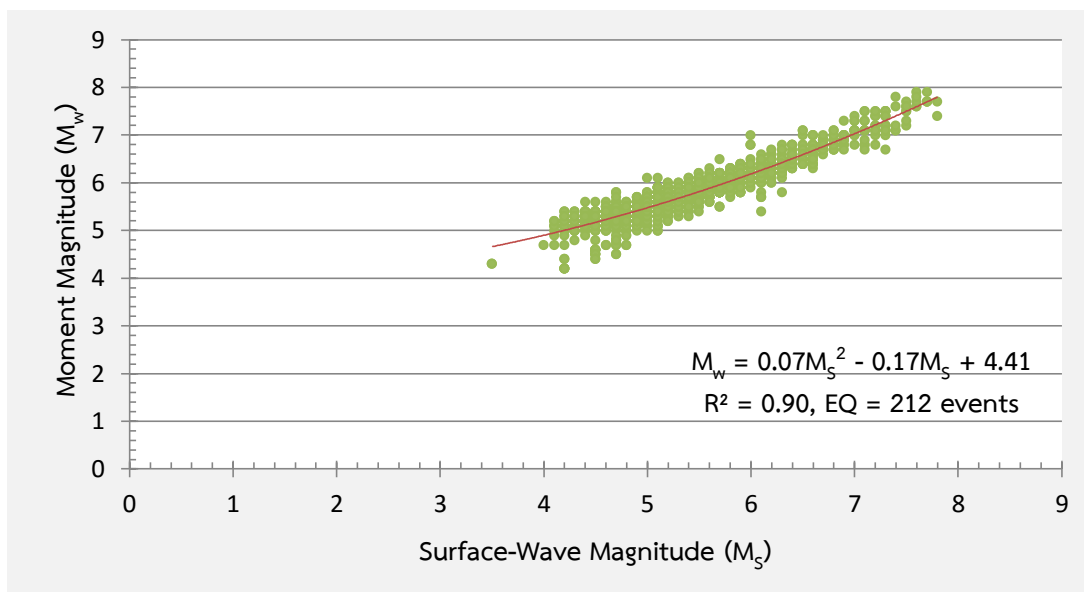
รูป 3.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w)

สมการความสัมพันธ์ในการใช้แปลงจากขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) ไปเป็นขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w) เป็นดังสมการ (3.1)

$$M_w = 0.18(M_b)^2 - 1.00(M_b) + 5.60 \quad \text{สมการ (3.1)}$$

3.2.2 ขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (M_s) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w)

จากการศึกษาข้อมูลแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวของ NEIC GCMT และ ISC ทำให้ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (M_s) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w) ดังรูป 3.3



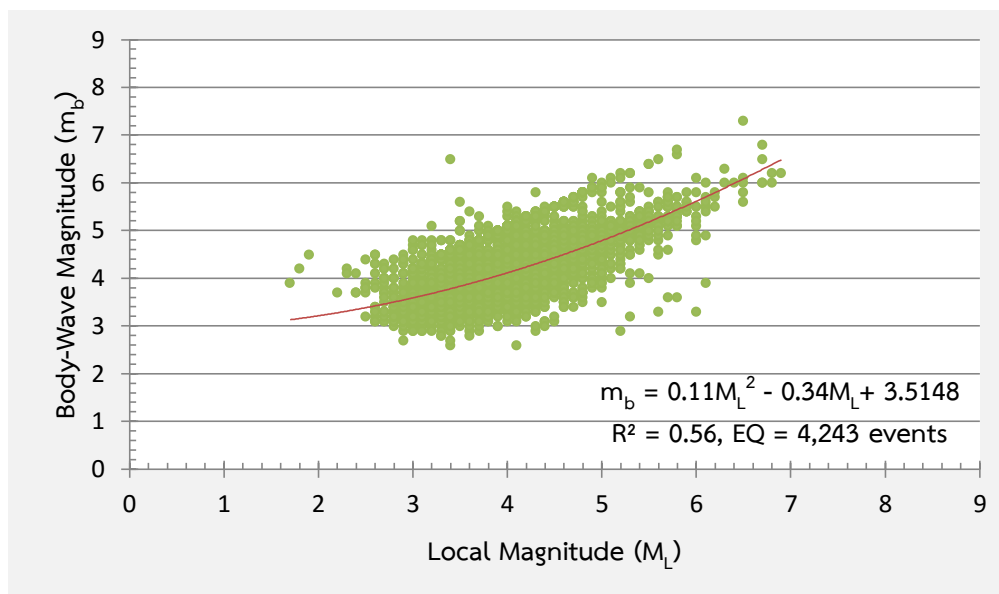
รูป 3.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (M_s) และขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w)

สมการความสัมพันธ์ในการใช้แปลงจากขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (M_s) ไปเป็นขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (M_w) เป็นดังสมการ (3.2)

$$M_w = 0.07(M_s)^2 - 0.17(M_s) + 4.41 \quad \text{สมการ (3.2)}$$

3.2.3 ขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (M_L) และขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b)

จากการศึกษาข้อมูลแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวของ NEIC GCMT และ ISC ทำให้ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (M_L) และขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) ดังรูป 3.4



รูป 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (M_L) และขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b)

สมการความสัมพันธ์ในการใช้แปลงจากขนาดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (M_L) ไปเป็นขนาดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (M_b) เป็นดังสมการ (3.3)

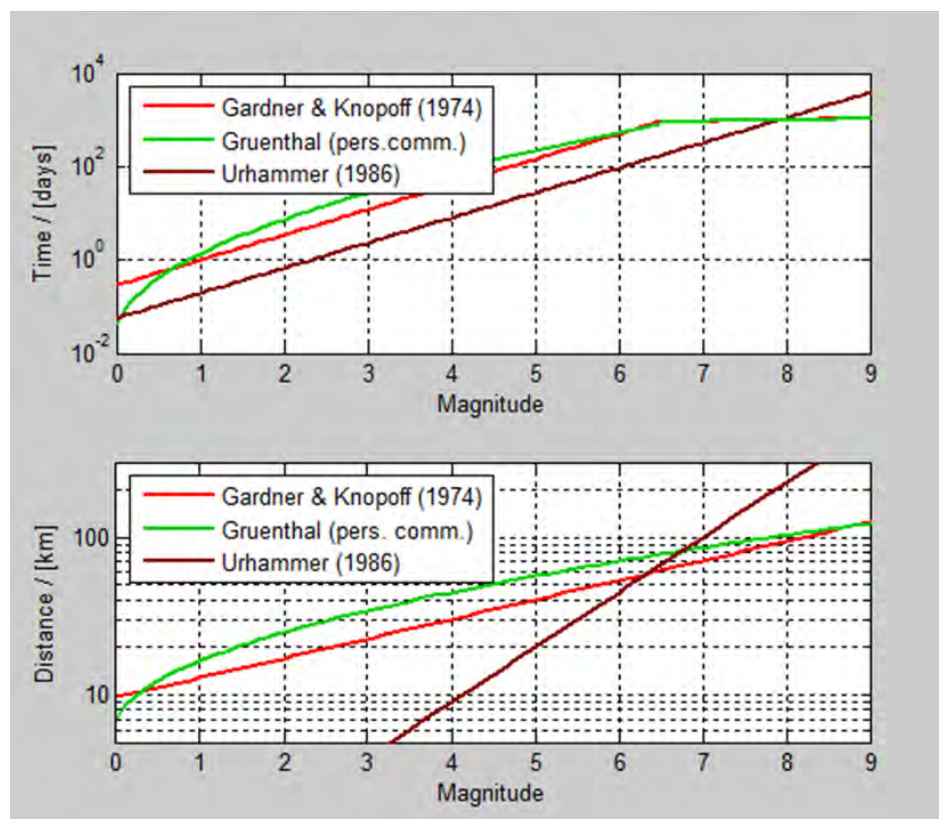
$$M_b = 0.11(M_L)^2 - 0.34(M_L) + 3.5148 \quad \text{สมการ (3.3)}$$

เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ทั้งหมดแล้ว ปรับเทียบฐานข้อมูลแผ่นดินไหวให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกันทั้งหมด เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลแผ่นดินไหวที่สมบูรณ์และถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

3.3 การคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก (Earthquake Declustering)

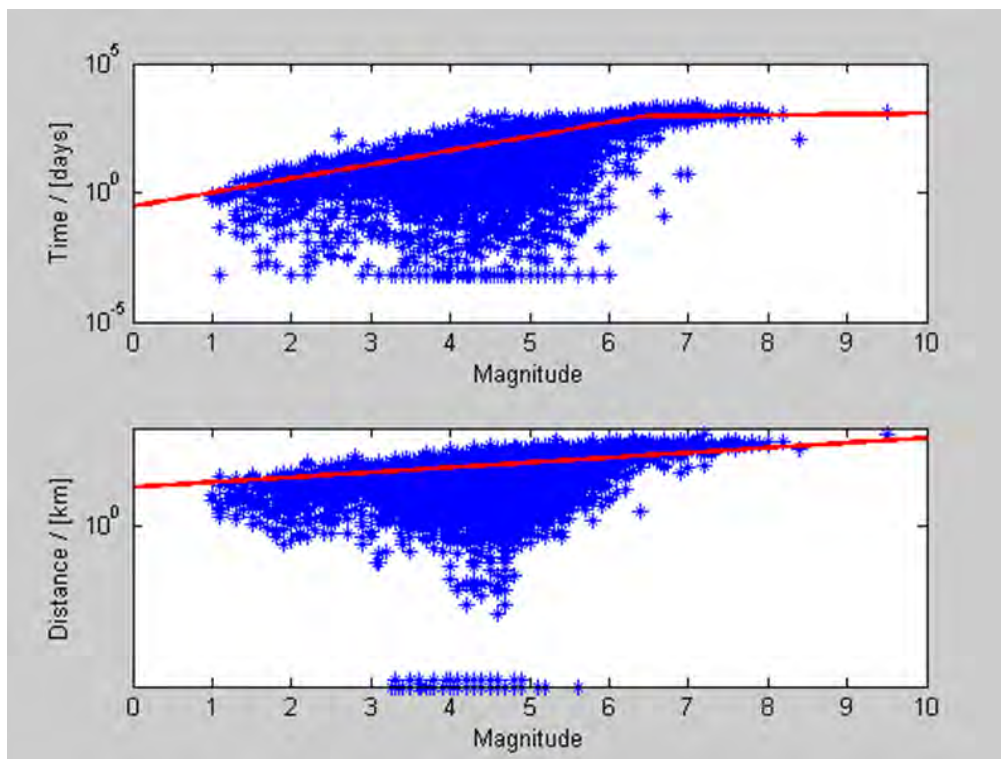
ข้อมูลแผ่นดินไหวที่บันทึกในฐานข้อมูลแต่ละฐานประกอบด้วย 3 ประเภท คือ แผ่นดินไหวนำ (foreshock) แผ่นดินไหวหลัก (mainshock) และแผ่นดินไหวตาม (aftershock) ซึ่งในการวิเคราะห์เชิงสถิติ นั้น ฐานข้อมูลที่จะนำมาใช้จะต้องเลือกเพียงแค่แผ่นดินไหวหลัก เนื่องจากแผ่นดินไหวหลักเกิดจากแรงเค้น (stress) ที่มาจากการเปลี่ยนแปลงธรณีแปรสัณฐาน (tectonic activity) โดยตรง แต่แผ่นดินไหวนำเกิดจากการเตรียมพร้อมก่อนการเกิดแผ่นดินไหวหลัก และแผ่นดินไหวตามเกิดจากแรงเครียด (strain) ซึ่งเกิดมาจากระบวนการการเคลื่อนตัวของพื้นที่หรือรอยเลื่อนในบริเวณ เมื่อเกิดแผ่นดินไหวหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจัดกลุ่มแผ่นดินไหวเพื่อคัดเลือกแผ่นดินไหวหลักและกำจัดแผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตามออก เพื่อให้ได้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่แสดงถึงพฤติกรรมทางธรณีแปรสัณฐานโดยตรง โดยแนวคิดที่จะนำมาใช้ในการคัดเลือกข้อมูลแผ่นดินไหวหลัก และกำจัดแผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตาม รวมถึงเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีการรายงานซ้ำซ้อนในพื้นที่นั้นๆไว้ ก็คือ แนวคิดของ Gardner และ Knopoff (1974) ซึ่ง

แนวคิดนี้เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน จากการศึกษาของงานวิจัยต่างๆในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงประเทศไทยด้วย



รูป 3.5 หลักการคัดเลือกแผ่นดินไหวหลักออกจากแผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตาม ตามสมมติฐานของ Gardner และ Knopoff (1974)

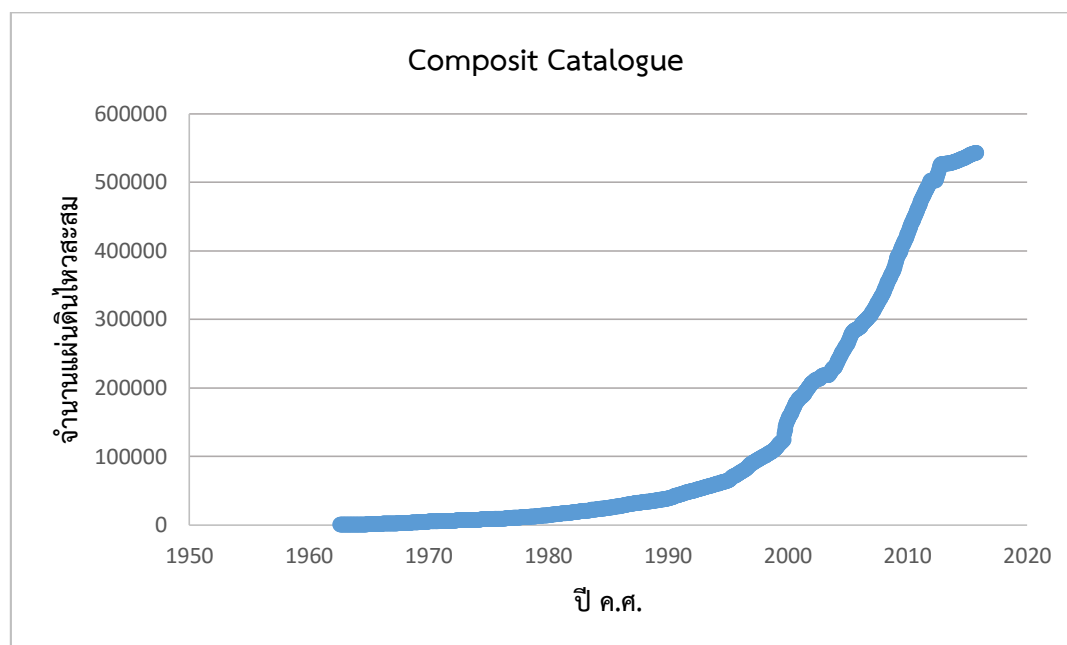
การคัดเลือกข้อมูลแผ่นดินไหวหลัก ด้วยการเลือกกำจัดแผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตามออกจากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวหลัก โดยใช้โปรแกรม ZMAP (Wiemer, 2001) เปิดผ่านโปรแกรม MATLAB ในการทำงาน ซึ่งในการจำแนกเหตุการณ์แผ่นดินไหวหลักนั้นจะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหว ระยะทางระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ศึกษา และช่วงเวลาที่เกิดขึ้น โดยที่แสดงอยู่ในรูปของกรอบของเวลา (time window) และกรอบของระยะทาง (space window) ซึ่งจะทำให้เห็นถึงการจัดกลุ่มกันของแผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตาม โดยที่จะอยู่ภายใต้กรอบของเวลาและกรอบของระยะทางหรืออยู่ภายใต้เส้นสีแดง ดังรูป 3.6 ซึ่งถือว่าเป็นกลุ่มของแผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตามที่ต้องกำจัดออก



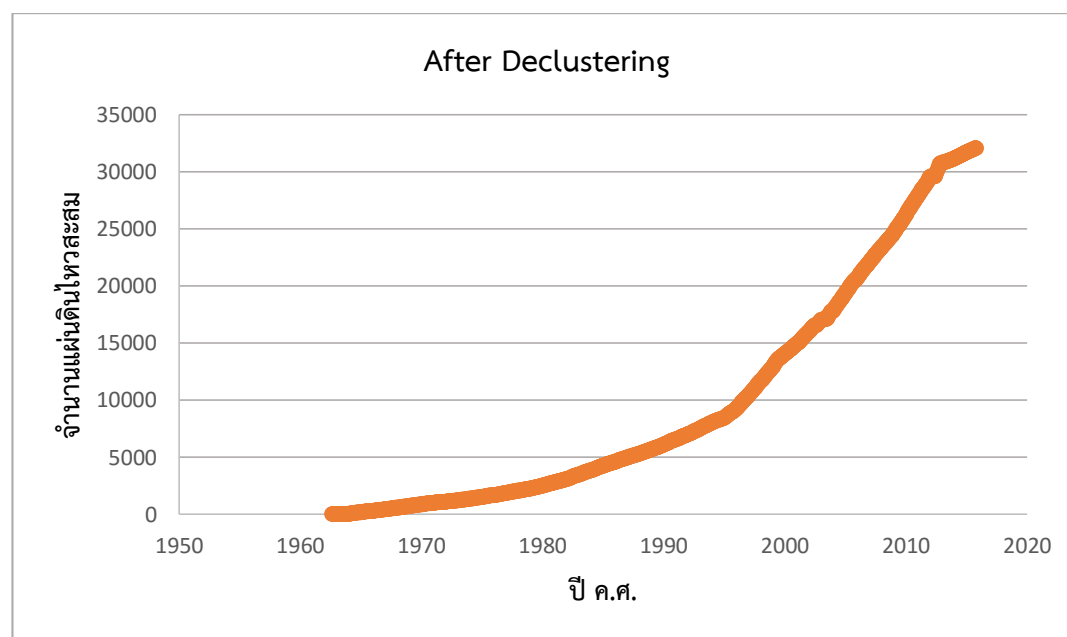
รูป 3.6 แสดงผลของการจัดกลุ่มแผ่นดินไหวตามแนวคิดของ Gardner และ Knopoff (1974) ซึ่งเส้นสีแดงแสดงถึงกรอบของเวลา (ด้านบน) และกรอบของระยะทาง (ด้านล่าง) โดยข้อมูลแผ่นดินไหวที่อยู่เหนือเส้นสีแดง คือข้อมูลแผ่นดินไหวหลัก

ผลจากการจัดกลุ่มข้อมูลแผ่นดินไหวตามแนวคิดของ Gardner และ Knopoff (1974) พบว่าสามารถจัดกลุ่มของแผ่นดินไหวให้อยู่ในกลุ่มแผ่นดินไหวเดียวกัน (earthquake cluster) ได้ 18,061 กลุ่มแผ่นดินไหว และจากการจัดกลุ่มแผ่นดินไหวนั้นประกอบด้วยข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวทั้งสิ้น 542,726 เหตุการณ์ เป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตาม 510,705 เหตุการณ์ ซึ่งคิดเป็น 94.1% ของเหตุการณ์ทั้งหมด จากการวิเคราะห์ดังกล่าวทำให้สามารถจำแนกเหตุการณ์แผ่นดินไหวหลักได้ทั้งสิ้น 32,021 เหตุการณ์

จากการแยกกลุ่มแผ่นดินไหวหลักแล้ว ผู้จัดทำได้นำข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหว ทั้งก่อนและหลังจากการแยกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแผ่นดินไหวสะสมของฐานข้อมูลแผ่นดินไหว (cumulative number of earthquake) และช่วงเวลาในแต่ละปี ดังรูป 3.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในส่วนของการแยกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก จำนวนแผ่นดินไหวสะสมของฐานข้อมูลจะมีจำนวนข้อมูลทั้งแผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตามมาเกี่ยวข้องด้วย จึงทำให้ลักษณะของกราฟไม่เป็นเส้นตรง ในขณะที่กราฟของฐานข้อมูลที่มีการแยกกลุ่มแผ่นดินไหวแล้วจะมีลักษณะที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรงมากขึ้น แต่ก็ยังไม่ถือว่าเป็นเส้นตรงที่สมบูรณ์ เนื่องจากมีปัจจัยด้านอื่นที่ทำให้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่วิเคราะห์ได้ ยังไม่ได้สื่อถึงพฤติกรรมทางธรณีแปรสัณฐานอย่างแท้จริง ดังรูป 3.8 โดยปัจจัยอีกประการหนึ่งอาจเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (man-made seismicity) ซึ่งจะพูดถึงในหัวข้อถัดไป



รูป 3.7 แสดงข้อมูลแผ่นดินไหวสะสมก่อนการแยกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก



รูป 3.8 แสดงข้อมูลแผ่นดินไหวสะสมหลังการแยกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก

3.4 การตรวจสอบและกำจัดแผ่นดินไหวที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Man-made Seismicity)

ในปัจจุบันจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าฐานข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีการบันทึกไว้ มักจะได้รับผลกระทบมาจากกิจกรรมของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็น การเพิ่มหรือลดของจำนวนสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวใน

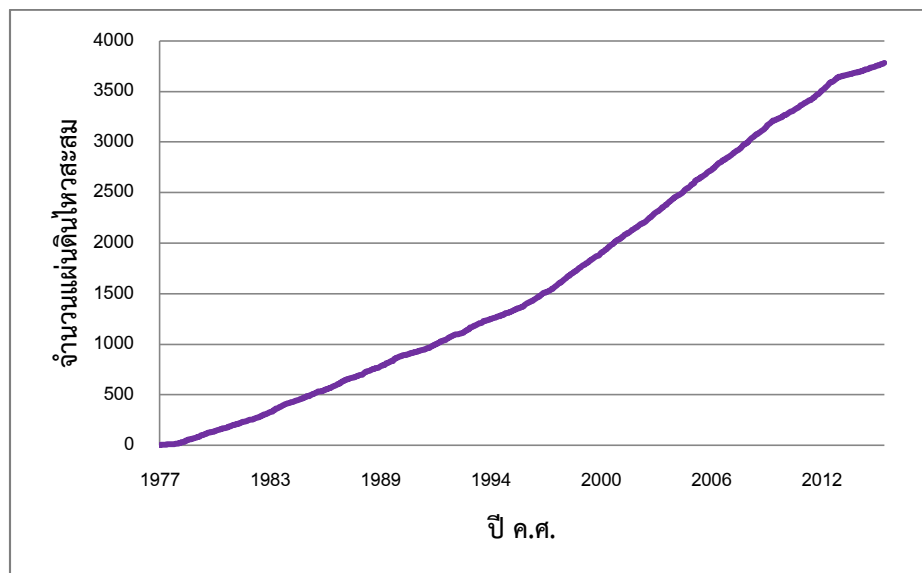
เครือข่ายตรวจวัด ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลที่มีการบันทึกไว้มากขึ้น (Wyss, 1991) การเปลี่ยนแปลงระบบการดูแลเครือข่ายสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว จะทำให้มีการประเมินขนาดแผ่นดินไหวที่เปลี่ยนไปจากเดิม (Habermann และ Wyss, 1984) การเปลี่ยนแปลงซอฟต์แวร์ในการประมวลผลข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวในแต่ละช่วงเวลา (Wyss และ Habermann, 1988b) การเปลี่ยนแปลงในหน่วยวัดและคำจำกัดความของขนาดแผ่นดินไหว (Perez และ Scholz, 1984) จากการศึกษาในทางทฤษฎีพบว่า กระบวนการทางธรณีแปรสัณฐาน เป็นกลไกหลักของการเกิดแผ่นดินไหว ที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปได้อย่างกะทันหันหรือทันทีทันใด ภายในระยะเวลาอันสั้น เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงอัตราการตรวจวัดแผ่นดินไหวจึงสื่อถึงกิจกรรมของมนุษย์อย่างแท้จริง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแก้ข้อมูลหรือเลือกใช้ข้อมูลที่มีความต่อเนื่องและค่อนข้างคงที่มากที่สุด

เนื่องจากข้อมูลที่ถูกรวบรวมได้มีการเปลี่ยนแปลงจากกิจกรรมของมนุษย์ จึงทำให้ Habermann (1983; 1987) ได้นำเสนอหลักการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอัตราการตรวจวัดแผ่นดินไหว (Z) ซึ่งการวิเคราะห์ค่า Z ได้จากการใช้ค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดแผ่นดินไหวใน 2 ช่วงเวลา คือ M_1 และ M_2 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือ S_1 และ S_2 และสุดท้ายคือจำนวนตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลาหรือ N_1 และ N_2 ซึ่งจะแสดงดังสมการ (3.4) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า Z และจะแสดงผลการคำนวณในรูปของการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดแผ่นดินไหวในแต่ละขนาด แต่ละช่วงเวลา

$$Z = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{N_1} + \frac{S_2^2}{N_2}}}, \quad \text{สมการ (3.4)}$$

จากการวิเคราะห์พบว่า คัดเลือกช่วงของข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่า 3.8 ริกเตอร์ในช่วงปี ค.ศ. 1980-2015 ซึ่งมีการตรวจวัดด้วยอัตราเดียวกันอย่างต่อเนื่องมาเป็นตัวแทนของพฤติกรรมการเกิดแผ่นดินไหวได้ ทำให้หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้ว เหลือข้อมูลแผ่นดินไหวทั้งสิ้น 19,296 เหตุการณ์ จาก 32,021 เหตุการณ์

หลังจากนั้นได้สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแผ่นดินไหวสะสมของฐานข้อมูลแผ่นดินไหว (cumulative number of earthquake) และช่วงเวลาในแต่ละปี จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นกราฟหลังจากการกำจัดแผ่นดินไหวที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์แล้ว จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงตรงมากจากรูป 3.9 แสดงให้เห็นว่าฐานข้อมูลแผ่นดินไหวที่ได้สามารถสื่อถึงพฤติกรรมของการเกิดแผ่นดินไหวได้อย่างแท้จริง และข้อมูลนี้จะนำไปวิเคราะห์หาพฤติกรรมของแผ่นดินไหวได้อย่างเหมาะสมและถูกต้องมากที่สุด

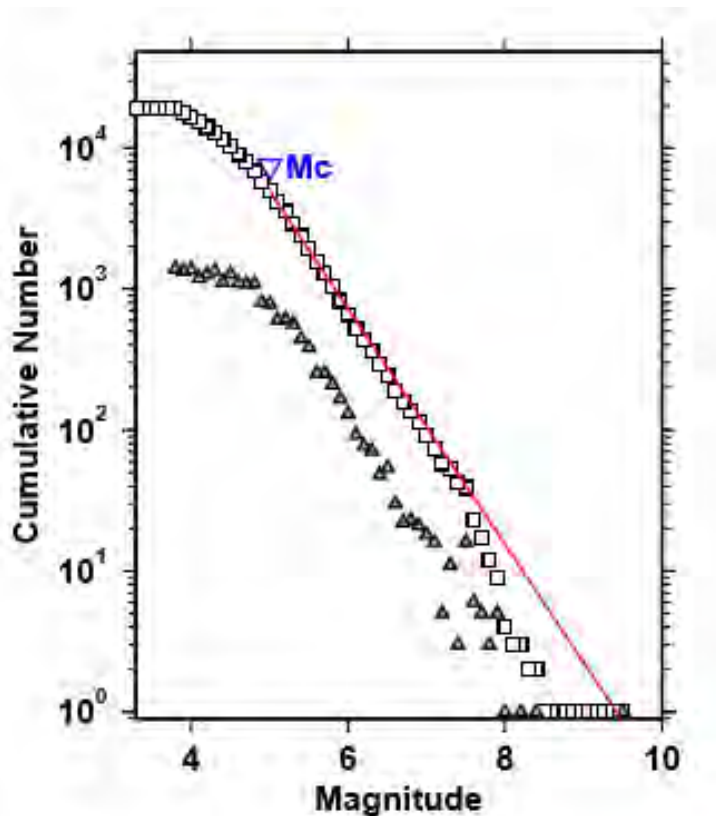


รูป 3.9 แสดงข้อมูลแผ่นดินไหวสะสมหลังจากการกำจัดผลกระทบจากการกระทำของมนุษย์

3.5 การคัดเลือกระดับของแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์ (Magnitude of Completeness)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และขนาดของแผ่นดินไหว ดังรูป 3.13 แสดงให้เห็นว่า ช่วงที่ขนาดแผ่นดินไหวมีค่าน้อยกว่าค่า M_c จะมีลักษณะของเส้นกราฟไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งจากการศึกษาวิจัยต่างๆ ทำให้ทราบว่า เป็นผลอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของการตรวจวัดแผ่นดินไหว เนื่องจากความไวต่อสัญญาณคลื่นแผ่นดินไหวของเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหว รวมถึงประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวด้วย เช่น แผ่นดินไหวขนาดเล็ก ซึ่งจะมีบางส่วนของแรงสั่นสะเทือนที่เครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวไม่สามารถตรวจวัดและบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูลแผ่นดินไหวได้ แม้จะเกิดแผ่นดินไหวขึ้นจริงก็ตาม

จากเหตุนี้เองจึงทำให้มีการกำหนดค่าขนาดแผ่นดินไหวที่ต่ำที่สุดที่มีความสมบูรณ์ในการตรวจวัดแผ่นดินไหวจากเครื่องมือ โดยเรียกว่า magnitude of completeness (M_c) (Woessner และ Wiemer, 2005) ซึ่งค่า M_c หมายถึง ระดับขนาดแผ่นดินไหวที่เครือข่ายตรวจวัดสามารถตรวจวัดได้ทุกเหตุการณ์ที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้น ในขณะที่แผ่นดินไหวขนาดเล็กกว่า M_c บางเครือข่ายไม่สามารถตรวจวัดได้ เพราะฉะนั้นการกำหนดค่า M_c ให้ถูกต้อง จึงเป็นผลที่ดีที่จะนำฐานข้อมูลไปวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดแผ่นดินไหวได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

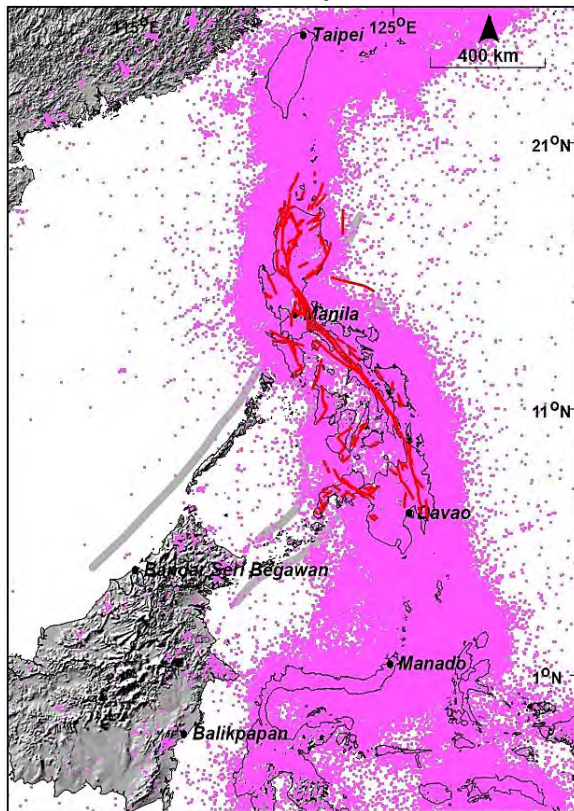


รูป 3.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวและความถี่ โดยที่ขนาดแผ่นดินไหวต่ำที่สุดที่มีความสมบูรณ์คือ $M_c = 5.0$

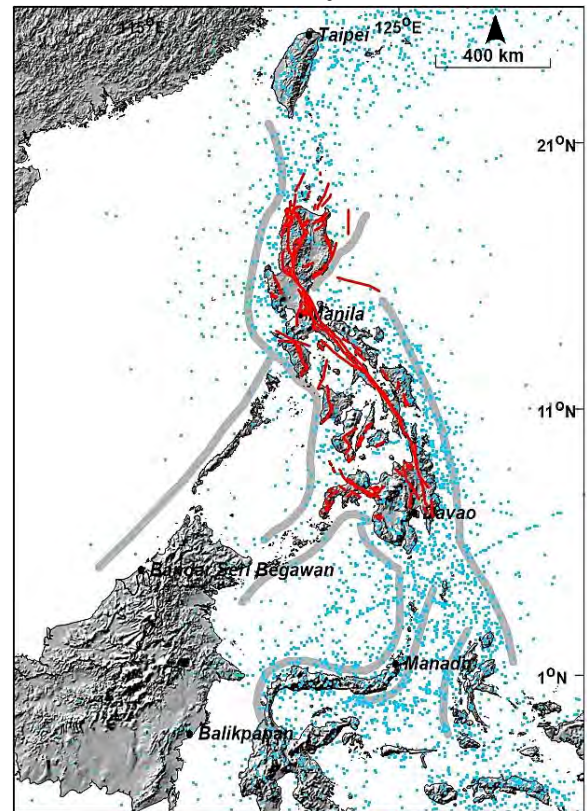
จากการคัดเลือกระดับของขนาดแผ่นดินไหวที่มากกว่าขนาดแผ่นดินไหวที่ต่ำที่สุด ซึ่งก็คือ 5.0 ริกเตอร์ ทำให้ฐานข้อมูลแผ่นดินไหวที่จะนำมาใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดแผ่นดินไหวมีทั้งสิ้น 4,925 เหตุการณ์

จากกระบวนการปรับปรุงฐานข้อมูลทั้งหมดที่ได้กล่าวมา ทำให้ได้ฐานข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์ ถูกต้องและสื่อถึงพฤติกรรมธรณีแปรสัณฐาน (tectonic activities) ของพื้นที่ศึกษาอย่างแท้จริง โดยก่อนการปรับปรุงฐานข้อมูลแผ่นดินไหว จะพบว่าข้อมูลมีจำนวนมากและกระจายตัวทั่วพื้นที่ศึกษา ดังรูป 3.11 (ก) และเมื่อทำการคัดเลือกข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์แล้วพบว่า ข้อมูลมีจำนวนลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ยังมีกระจายตัวทั่วพื้นที่เช่นเดิมดังรูป 3.11 (ข)

(ก) ก่อนการปรับปรุงฐานข้อมูลแผ่นดินไหว



(ข) หลังการปรับปรุงฐานข้อมูลแผ่นดินไหว



รูป 3.11 แสดงการเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุงฐานข้อมูล

บทที่ 4 ผลการศึกษา (RESULT)

4.1 การทดสอบย้อนกลับ (Retrospective Test)

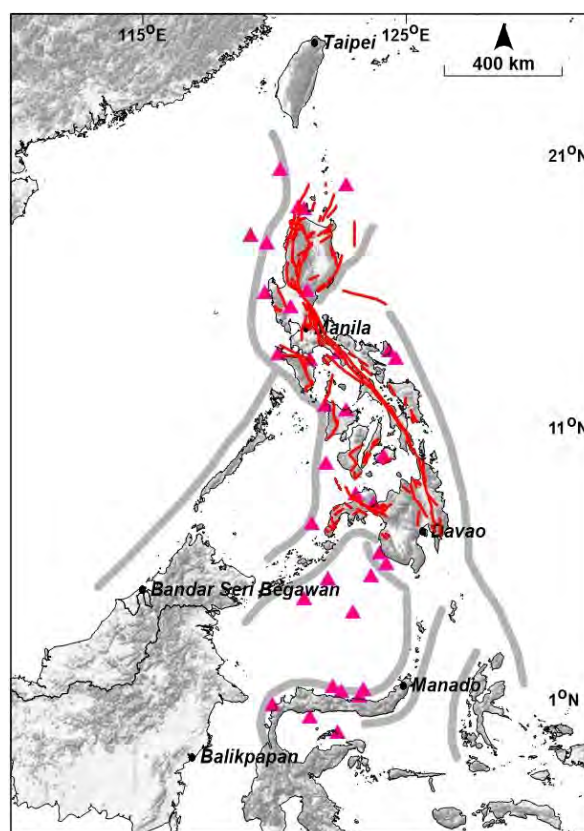
หลังจากได้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่ผ่านการปรับปรุงฐานข้อมูลแล้ว ต่อมาจึงทำการคัดเลือกเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่สนใจเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา โดยได้ทำการคัดเลือกมาทั้งหมด 34 เหตุการณ์ ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เลือกมาเป็นกรณีศึกษา

Event	Longitude	Latitude	Year	Month	Day	MW	Depth	Hour	Min
1	124.358	13.752	1982	1	11	7.2	19.0	6	10
2	123.762	8.147	1984	3	5	7.3	651.0	3	33
3	121.400	7.400	1984	3	5	7.2	33.0	3	32
4	122.380	-0.290	1984	8	6	7.4	252.8	12	2
5	119.700	17.700	1985	4	23	7.3	189.0	16	15
6	120.610	15.344	1985	4	23	7.0	191.0	16	15
7	124.616	13.477	1988	2	24	7.2	37.0	3	52
8	123.350	1.310	1990	4	18	7.6	33.2	13	39
9	121.899	11.760	1990	6	14	7.0	20.0	7	40
10	121.230	15.970	1990	7	16	7.7	15.0	7	26
11	123.230	1.040	1991	6	20	7.5	15.0	5	19
12	122.700	19.860	1993	5	18	7.1	189.0	10	19
13	121.320	13.440	1994	11	14	7.1	15.0	19	15
14	119.930	0.740	1996	1	1	7.9	15.0	8	5
15	122.536	1.241	1997	11	25	7.0	18.0	12	14
16	122.030	5.380	1999	3	4	7.1	18.0	8	52
17	121.350	0.300	1999	3	18	7.3	0.0	1	58
18	119.640	15.870	1999	12	11	7.3	35.1	18	3
19	124.250	5.920	2002	3	5	7.5	28.7	21	16
20	121.134	4.644	2002	3	5	7.2	18.2	21	16
21	123.670	5.470	2005	2	5	7.1	530.6	12	23
22	121.950	9.624	2006	2	15	7.9	2.0	18	29
23	122.727	11.571	2006	2	15	7.4	96.0	10	10
24	123.086	8.472	2006	2	26	7.8	31.0	22	31
25	120.148	13.640	2006	3	3	7.0	36.0	14	41

26	120.217	20.393	2006	5	26	8.2	4.0	15	57
27	120.884	19.054	2006	6	1	8.4	13.0	18	57
28	119.075	17.992	2006	6	5	8.0	124.0	0	50
29	121.117	18.974	2006	10	9	9.5	11.0	19	6
30	122.440	13.660	2007	5	21	7.5	0.0	16	55
31	122.190	1.390	2008	11	16	7.5	36.0	17	2
32	123.980	6.324	2010	7	23	7.9	520.5	22	51
33	122.981	4.137	2011	2	10	7.0	346.3	14	41
34	124.117	9.880	2013	10	15	7.1	19.0	0	12

หลักการที่นำมาใช้คัดเลือกเหตุการณ์แผ่นดินไหวมาเป็นกรณีศึกษาคือ เลือกเหตุการณ์ที่มีขนาดแผ่นดินไหวในมาตราวัดขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์มากกว่าหรือเท่ากับ 7.0 ริกเตอร์ขึ้นไป เป็นข้อมูลแผ่นดินไหวที่อยู่ในช่วงปี ค.ศ. 1980–2015 จากการคัดเลือกทำให้ได้เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่จะนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาทั้งหมด 34 เหตุการณ์จากเหตุการณ์ทั้งหมด ดังรูป 4.1



รูป 4.1 แสดงการกระจายตัวของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

การทดสอบย้อนกลับ เพื่อทำการหาค่าตัวแปร รัศมี (Rmax) และกรอบเวลา (Tmax) ที่เหมาะสม โดยหาจาก ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน (RTL) โดยคำนึงถึงตัวแปรระหว่างการเกิด แผ่นดินไหวทั้ง 3 ตัวแปรดังนี้ บริเวณ เวลา และความยาวรอยเลื่อน ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (2.1) - (2.3) โดย กำหนดค่า Rmax เริ่มตั้งแต่ 50-200 กิโลเมตร และขยับไปทุกๆ 10 กิโลเมตร ส่วนค่า Tmax เริ่มตั้งแต่ 1.0-3.5 ปี และขยับไปทุกๆ 0.5 ปี ซึ่งจากการกำหนดค่าดังกล่าว ทำให้ได้เงื่อนไขของค่า Rmax และค่า Tmax หลากหลายกรณี แสดงตัวอย่างดังตาราง 4.2

ตาราง 4.2 ตารางแสดงตัวอย่างเงื่อนไขค่า Rmax และค่า Tmax ในหลายกรณี

เงื่อนไข	Rmax (กม.)	Tmax (ปี)	จำนวนเหตุการณ์กรณีศึกษาที่พบ
1	50	1.0	3 เหตุการณ์
2	60	1.5	4 เหตุการณ์
2	70	1.5	7 เหตุการณ์
3	80	2.0	11 เหตุการณ์
4	90	1.0	7 เหตุการณ์
5	100	2.0	10 เหตุการณ์
6	110	2.5	14 เหตุการณ์
7	120	2.5	11 เหตุการณ์
8	130	1.5	10 เหตุการณ์
9	130	2.5	13 เหตุการณ์
10	140	2.5	14 เหตุการณ์
11	140	3.0	12 เหตุการณ์
12	150	1.0	6 เหตุการณ์
13	150	2.0	14 เหตุการณ์
14	160	1.5	14 เหตุการณ์
15	160	3.5	18 เหตุการณ์
16	170	2.5	17 เหตุการณ์
17	180	1.5	16 เหตุการณ์
18	190	2.0	19 เหตุการณ์
19	190	2.5	16 เหตุการณ์
20	200	3.0	16 เหตุการณ์

จากเงื่อนไขของค่า Rmax และค่า Tmax หลากหลายกรณี ที่ยกตัวอย่างมาแสดงดังตาราง 4.2 ได้ทำการคัดเลือกเงื่อนไขมา 1 เงื่อนไข แสดงดังตาราง 4.3 โดยหลักการในการคัดเลือกคือ เลือกค่า Rmax และค่า Tmax ที่ไม่มากเกินไป ซึ่งจะต้องเป็นเงื่อนไขที่พบเหตุการณ์กรณีศึกษามากที่สุด พบว่า ค่า Rmax ที่เลือกนั้นมีค่าเท่ากับ 190 กิโลเมตร และค่า Tmax คือ 2.0 ปี ใช้เพื่อทำการทดสอบย้อนกลับ

ตาราง 4.3 ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลเงื่อนไขที่สนใจ

เงื่อนไข	Rmax (กม.)	Tmax (ปี)	เหตุการณ์	Lon	Lat	Year	MW	RTL _{time}	RTL _{min}	DETECTION Time
18	190	2.0	1	120.610	15.344	1985.31	7.0	1983.42	-1.000000000	1.9
			2	121.134	4.644	2002.18	7.2	1999.26	-1.000000000	2.9
			3	121.230	15.970	1990.54	7.7	1983.46	-1.000000000	7.1
			4	121.117	18.974	2006.77	9.5	2006.51	-1.000000000	0.3
			5	121.320	13.440	1994.87	7.1	1993.28	-0.982521400	1.6
			6	120.884	19.054	2006.42	8.4	1997.30	-0.844170588	9.1
			7	123.980	6.324	2010.56	7.9	2002.21	-0.827928866	8.3
			8	122.440	13.660	2007.39	7.5	2007.05	-0.789076874	0.3
			9	122.981	4.137	2011.11	7.0	1999.18	-0.782344554	11.9
			10	123.670	5.470	2005.10	7.1	1999.18	-0.644774114	5.9
			11	121.350	0.300	1999.21	7.3	1997.96	-0.628197228	1.3
			12	119.075	17.992	2006.43	8.0	2004.44	-0.616815888	2.0
			13	123.350	1.310	1990.30	7.6	1983.65	-0.610697722	6.6
			14	122.380	-0.290	1984.60	7.4	1982.23	-0.604939966	2.4
			15	119.700	17.700	1985.31	7.3	1983.80	-0.600415016	1.5
			16	122.700	19.860	1993.38	7.1	1988.37	-0.594564947	5.0
			17	120.217	20.393	2006.40	8.2	2005.86	-0.550772610	0.5
			18	122.536	1.241	1997.90	7.0	1997.61	-0.547394026	0.3
			19	121.899	11.760	1990.45	7.0	1990.13	-0.499180485	0.3

ค่า Rmax = 190 กิโลเมตร และค่า Tmax = 2.0 ปี ซึ่งเป็นค่า Rmax และค่า Tmax ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ความละเอียดในการตีวงรัศมีและเวลาที่พิจารณาในพื้นที่แสดงได้ละเอียด มาเป็นตัวแทนในการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อไป โดยแสดงรายละเอียดข้อมูลของเงื่อนไขที่ 18 ดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลของเงื่อนไซที่นำมาใช้พิจารณา

Rmax	Tmax	ระยะห่างของการตีช่องกรดย่อย	จำนวนเหตุการณ์กรณีศึกษาที่พบ
190 กิโลเมตร	2.0 ปี	0.05 x 0.05 องศา	34 เหตุการณ์

4.2 การประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว (Evaluation of Prospective Area)

จากการคำนวณค่าต่างๆตามเงื่อนไซที่กำหนดไว้แล้ว ทำให้ได้แผนที่แสดงค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา หรือก็คือค่า RTL ทั้งหมด 34 เหตุการณ์ แต่จะพิจารณาแค่ 29 เหตุการณ์ ดังตารางที่ 4.5 เนื่องจาก 29 เหตุการณ์ที่พิจารณานั้นมีความชัดเจนของข้อมูลมากที่สุด ดังรูป 4.2 ซึ่งสามารถนำมาใช้ประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหวได้

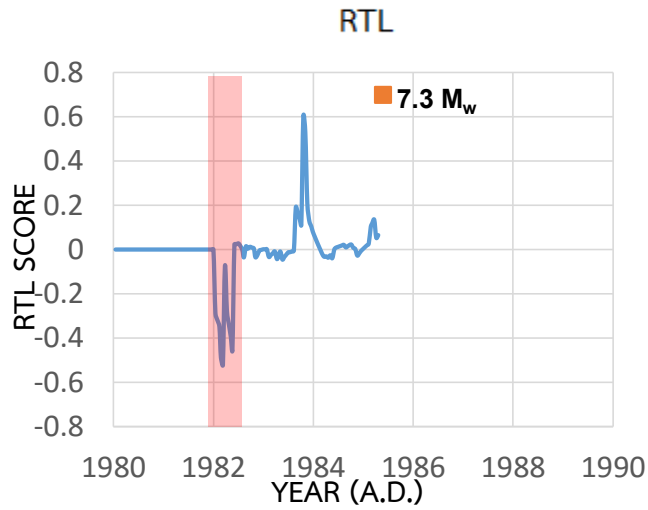
ตาราง 4.5 ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เลือกมาทำแผนที่แสดงค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา

Event	Longitude	Latitude	Year	Month	Day	MW	Depth	Hour	Min
2	123.762	8.147	1984	3	5	7.3	651.0	3	33
3	121.400	7.400	1984	3	5	7.2	33.0	3	32
4	122.380	-0.290	1984	8	6	7.4	252.8	12	2
5	119.700	17.700	1985	4	23	7.3	189.0	16	15
6	120.610	15.344	1985	4	23	7.0	191.0	16	15
7	124.616	13.477	1988	2	24	7.2	37.0	3	52
8	123.350	1.310	1990	4	18	7.6	33.2	13	39
9	121.899	11.760	1990	6	14	7.0	20.0	7	40
10	121.230	15.970	1990	7	16	7.7	15.0	7	26
11	123.230	1.040	1991	6	20	7.5	15.0	5	19
12	122.700	19.860	1993	5	18	7.1	189.0	10	19
13	121.320	13.440	1994	11	14	7.1	15.0	19	15
14	119.930	0.740	1996	1	1	7.9	15.0	8	5
15	122.536	1.241	1997	11	25	7.0	18.0	12	14
16	122.030	5.380	1999	3	4	7.1	18.0	8	52
17	121.350	0.300	1999	3	18	7.3	0.0	1	58
18	119.640	15.870	1999	12	11	7.3	35.1	18	3
21	123.670	5.470	2005	2	5	7.1	530.6	12	23
22	121.950	9.624	2006	2	15	7.9	2.0	18	29
23	122.727	11.571	2006	2	15	7.4	96.0	10	10

24	123.086	8.472	2006	2	26	7.8	31.0	22	31
25	120.148	13.640	2006	3	3	7.0	36.0	14	41
26	120.217	20.393	2006	5	26	8.2	4.0	15	57
27	120.884	19.054	2006	6	1	8.4	13.0	18	57
28	119.075	17.992	2006	6	5	8.0	124.0	0	50
30	122.440	13.660	2007	5	21	7.5	0.0	16	55
31	122.190	1.390	2008	11	16	7.5	36.0	17	2
32	123.980	6.324	2010	7	23	7.9	520.5	22	51
33	122.981	4.137	2011	2	10	7.0	346.3	14	41

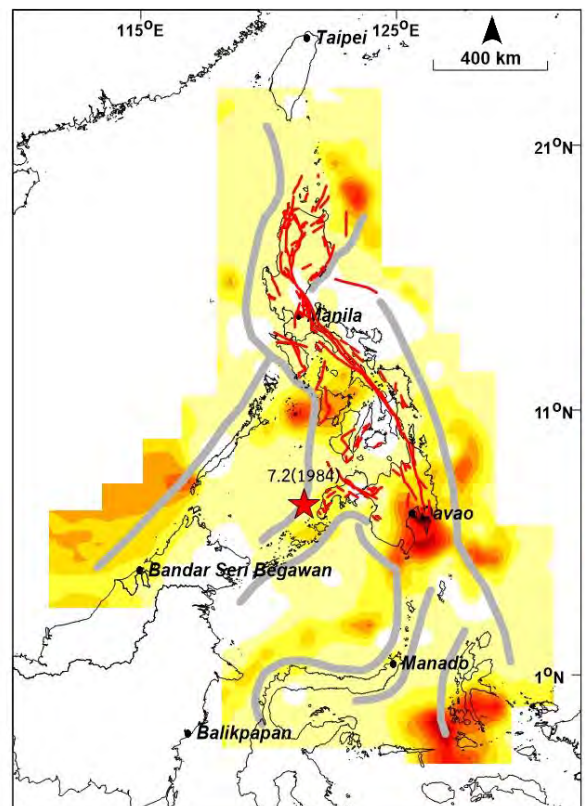
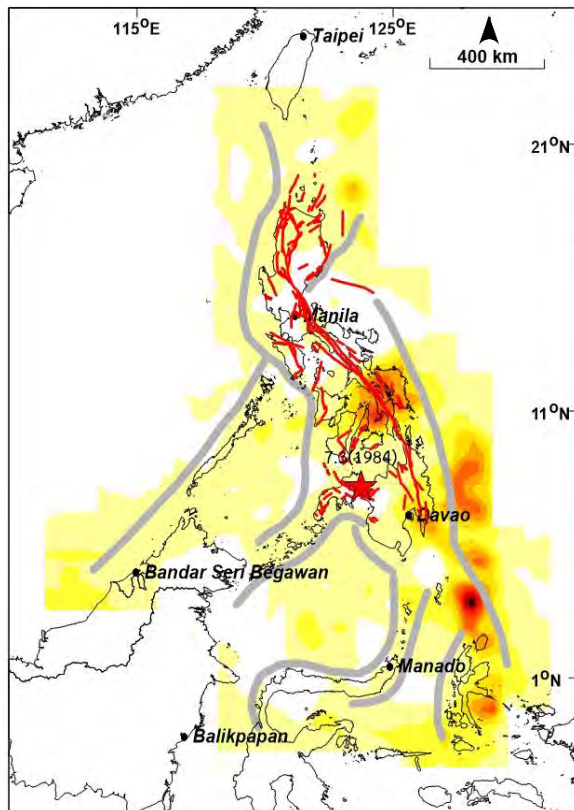
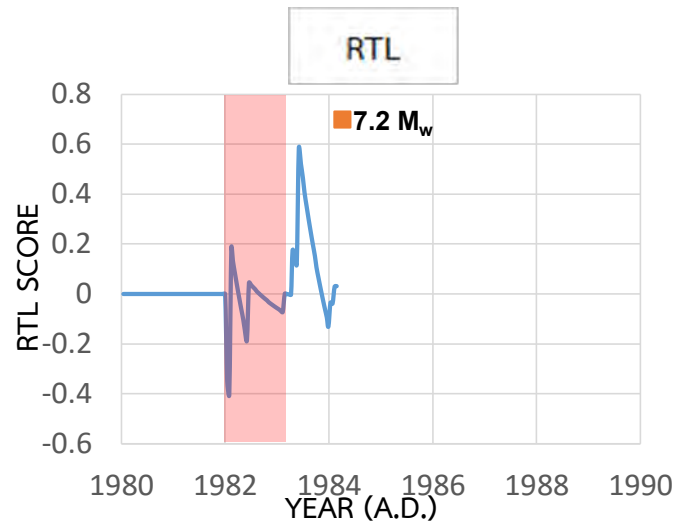
เหตุการณ์ที่ 2

(2) $M_w = 7.3$, Date = 05/03/1984
 QD = 0.15 y (1983.65–1983.80)



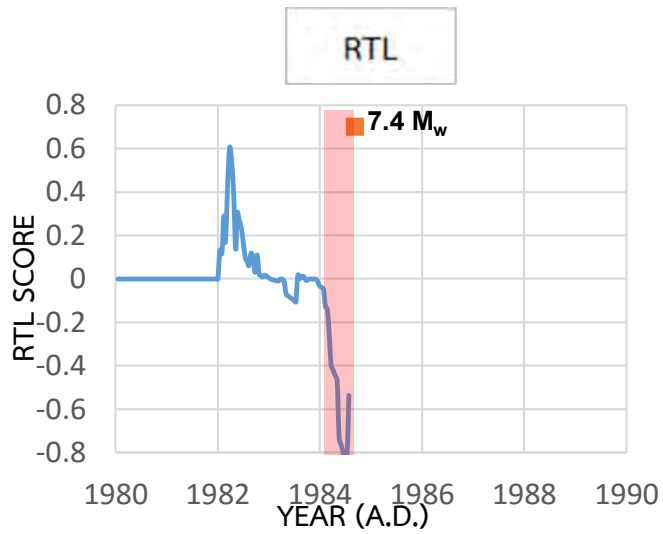
เหตุการณ์ที่ 3

(3) $M_w = 7.2$, Date = 05/03/1984
 QD = 1.15 y (1981.81–1982.96)



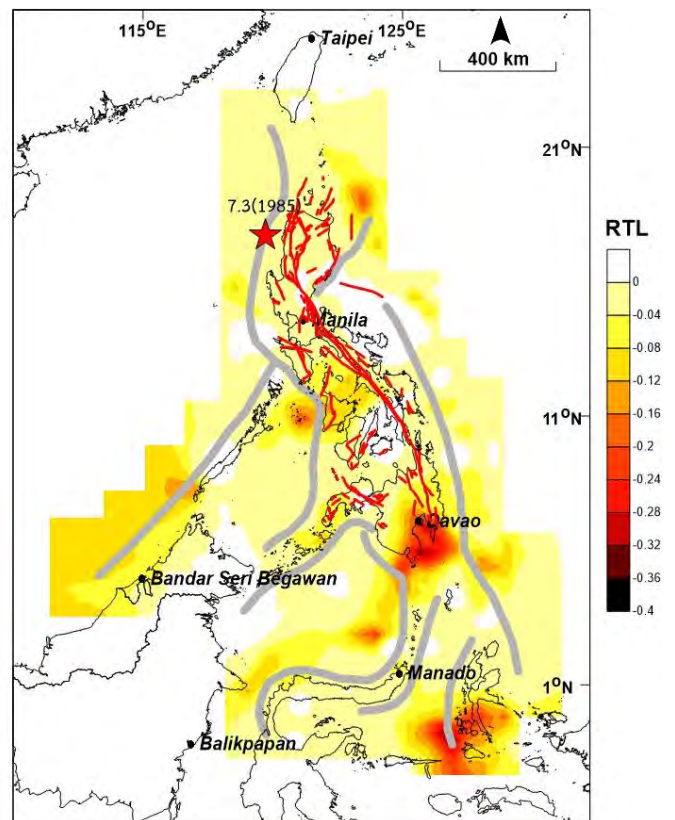
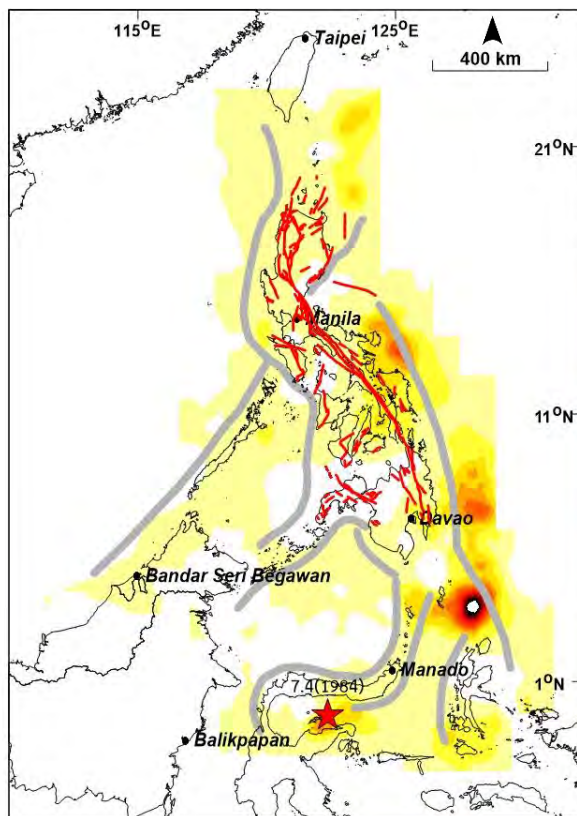
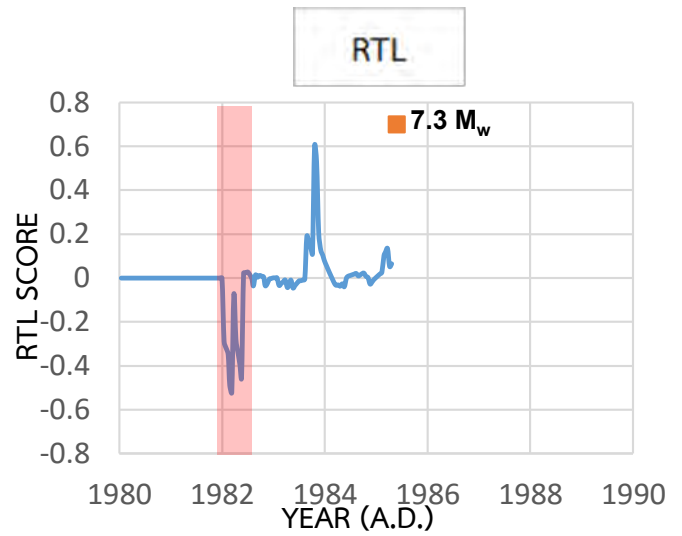
เหตุการณ์ที่ 4

(4) $M_w = 7.4$, Date = 06/08/1984
 QD = 0.61 y (1983.96–1984.57)



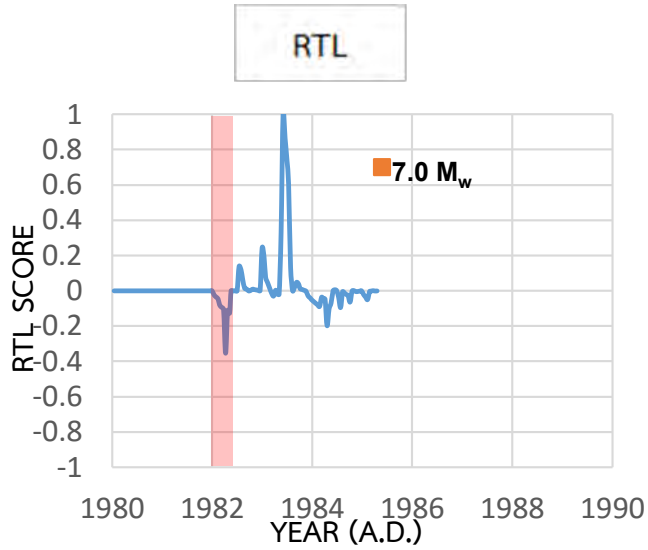
เหตุการณ์ที่ 5

(5) $M_w = 7.3$, Date = 23/04/1985
 QD = 0.69 y (1981.81–1982.50)



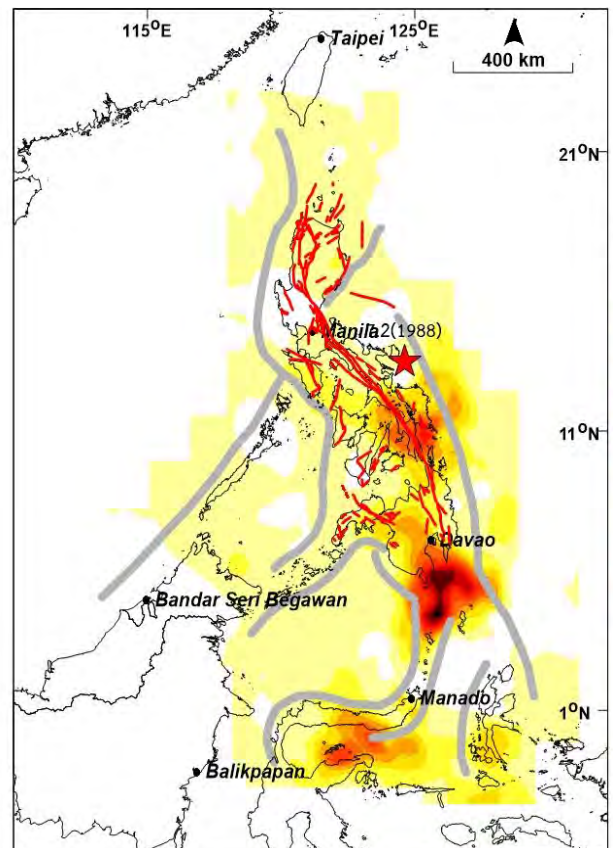
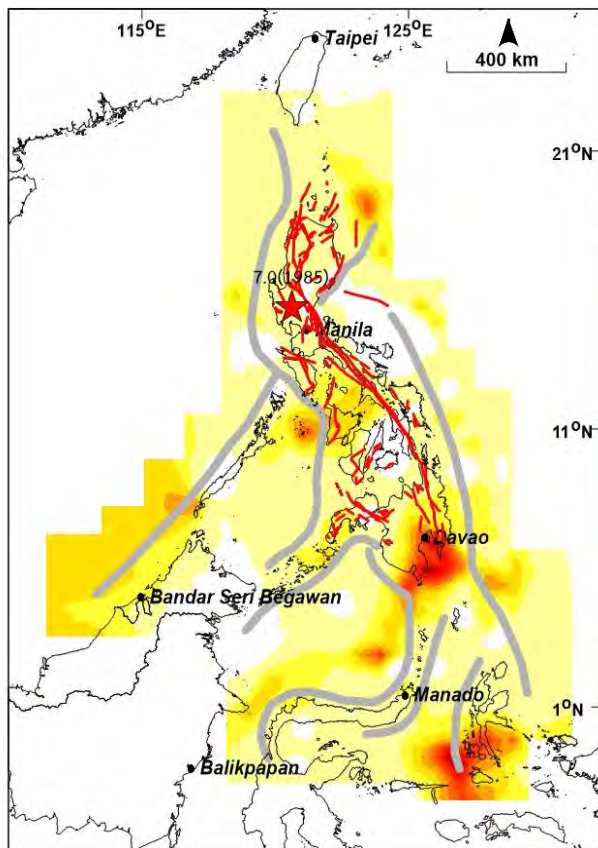
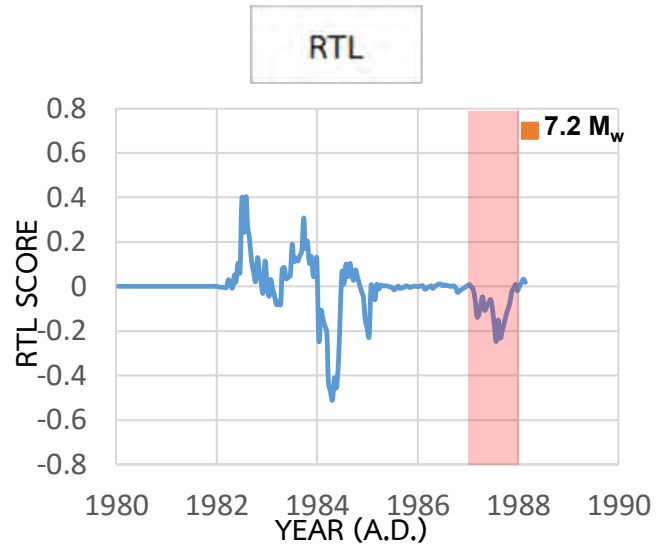
เหตุการณ์ที่ 6

(6) Mw = 7.0, Date = 23/04/1985
 QD = 0.69 y (1981.81–1982.50)



เหตุการณ์ที่ 7

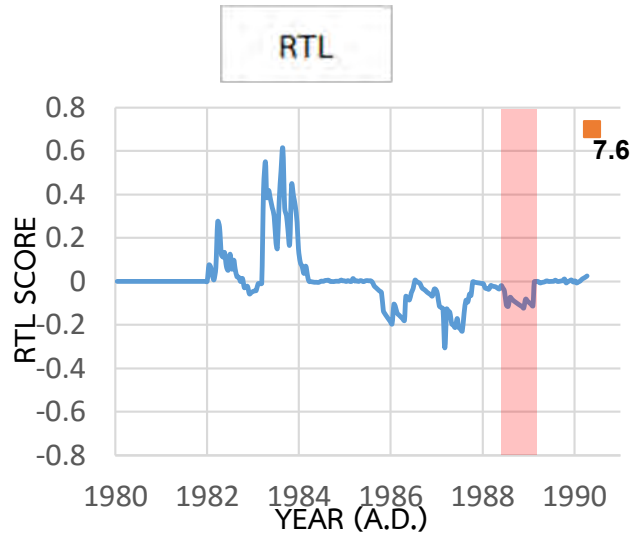
(7) Mw = 7.2, Date = 24/02/1988
 QD = 1.00 y (1986.87–1987.87)



เหตุการณ์ที่ 8

(8) Mw = 7.6, Date = 18/04/1990

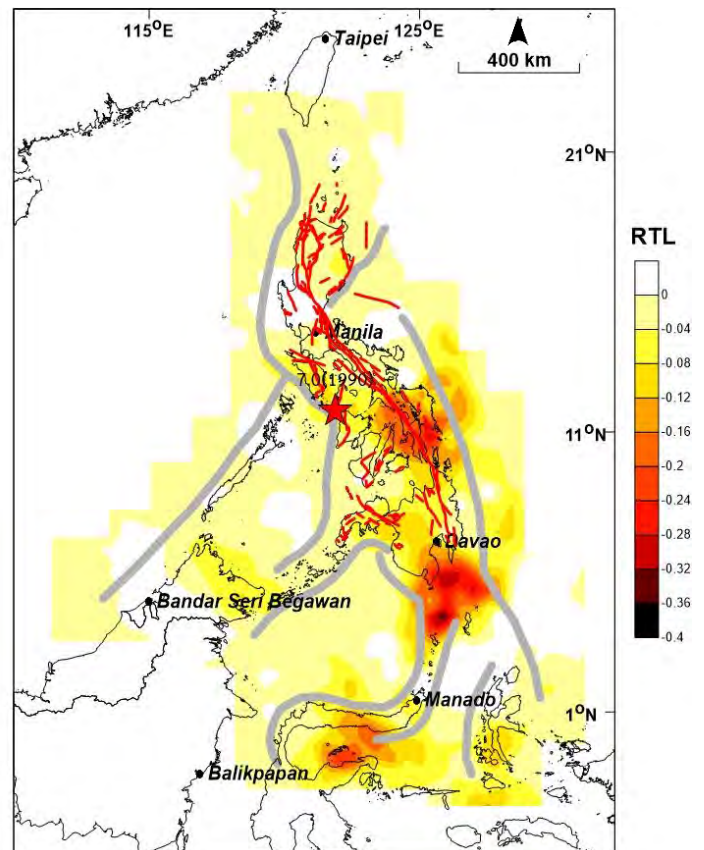
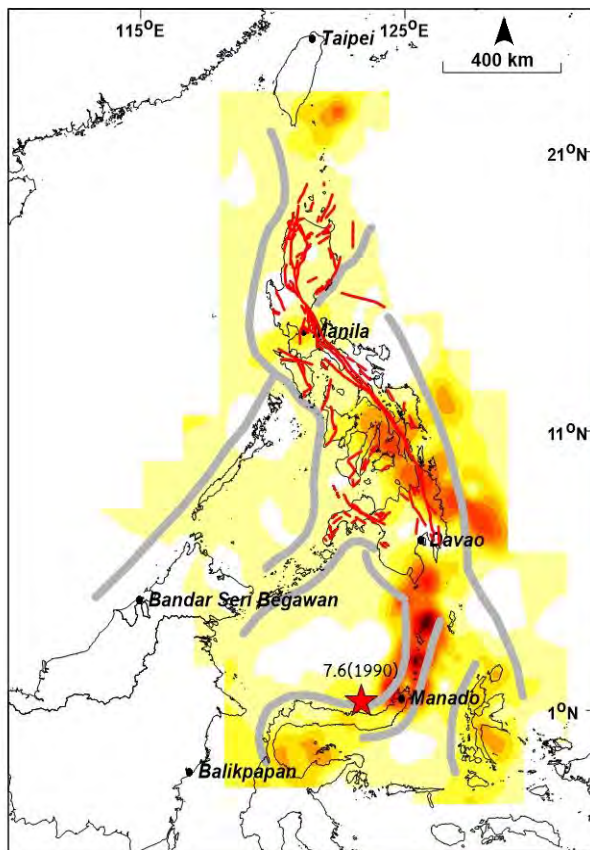
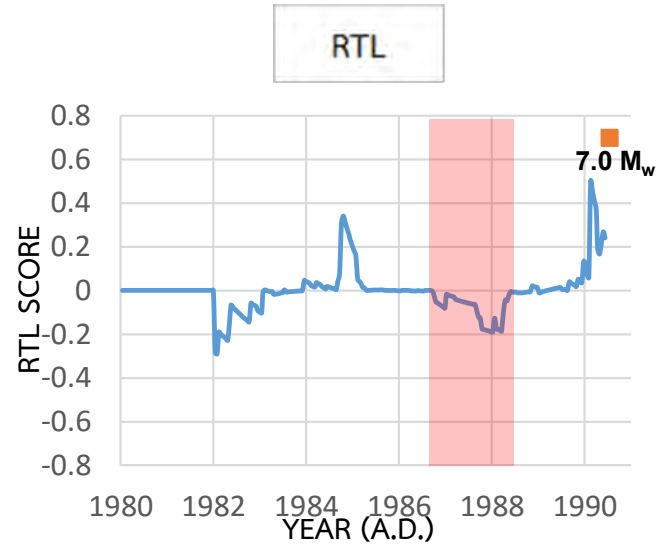
QD = 0.88 y (1988.25–1989.13)



เหตุการณ์ที่ 9

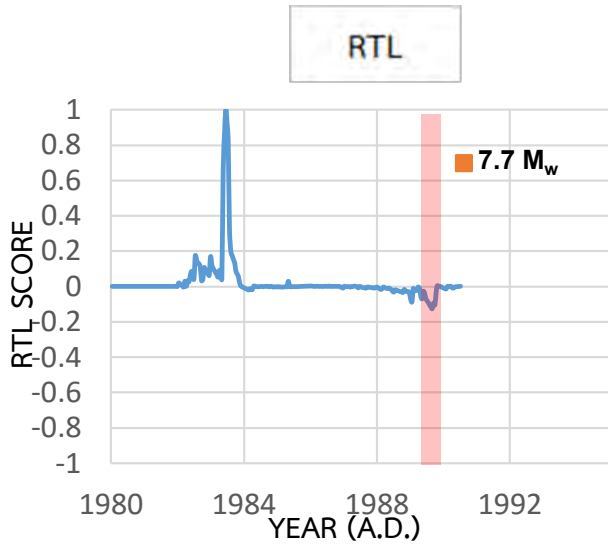
(9) Mw = 7.3, Date = 14/06/1990

QD = 1.76 y (1986.53–1988.29)



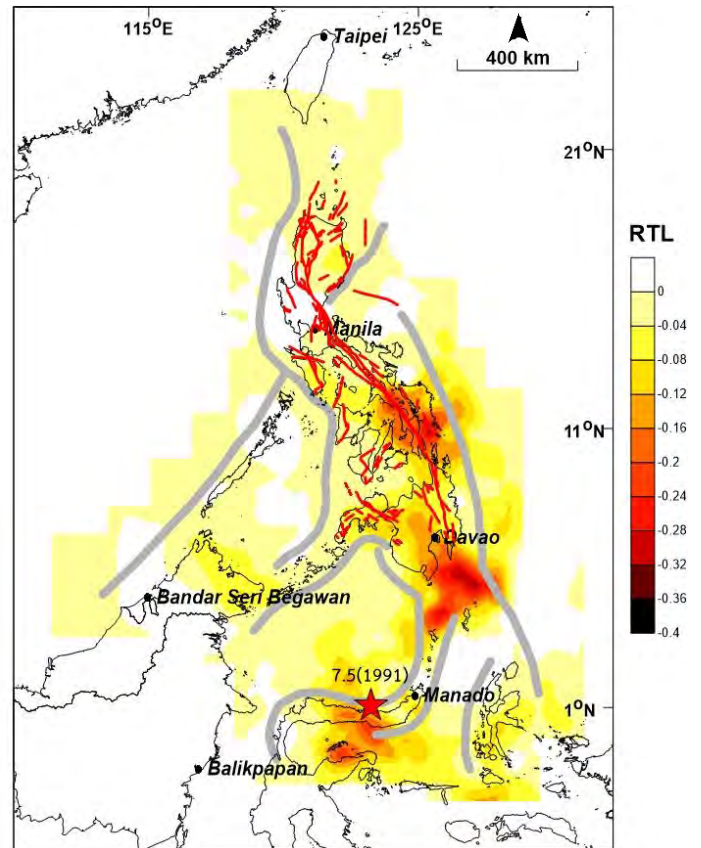
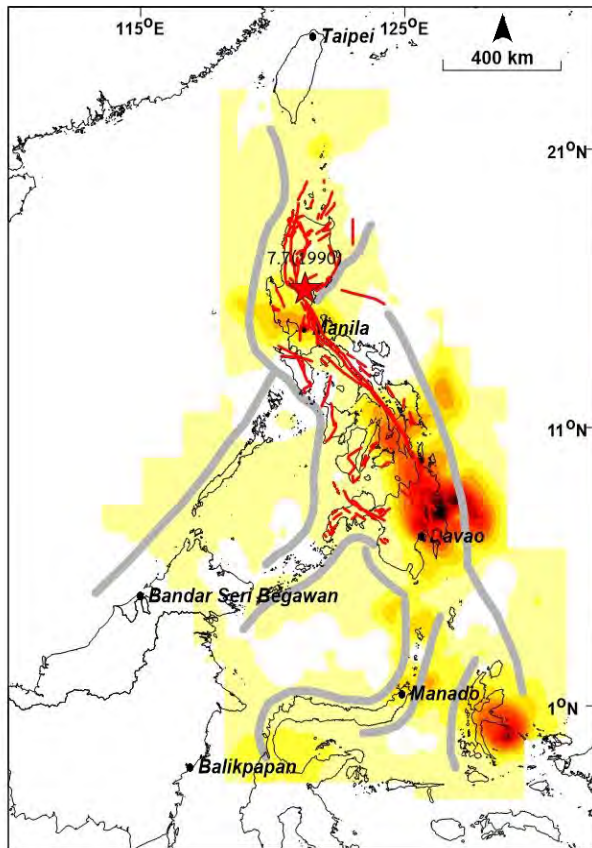
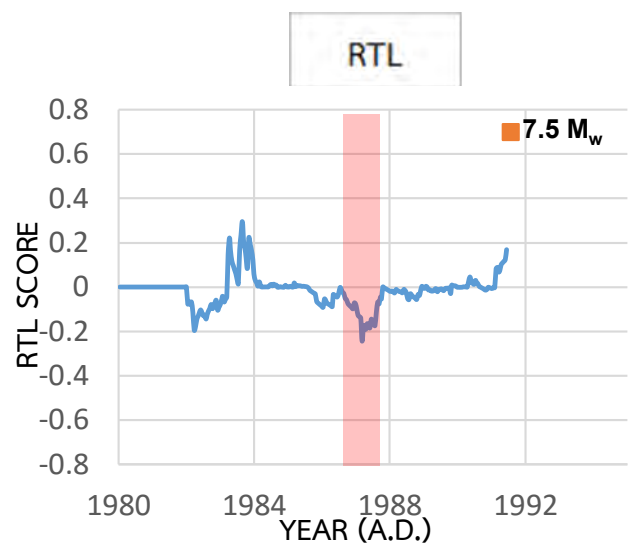
เหตุการณ์ที่ 10

(10) Mw = 7.7, Date = 16/07/1990
 QD = 0.69 y (1989.10–1989.79)



เหตุการณ์ที่ 11

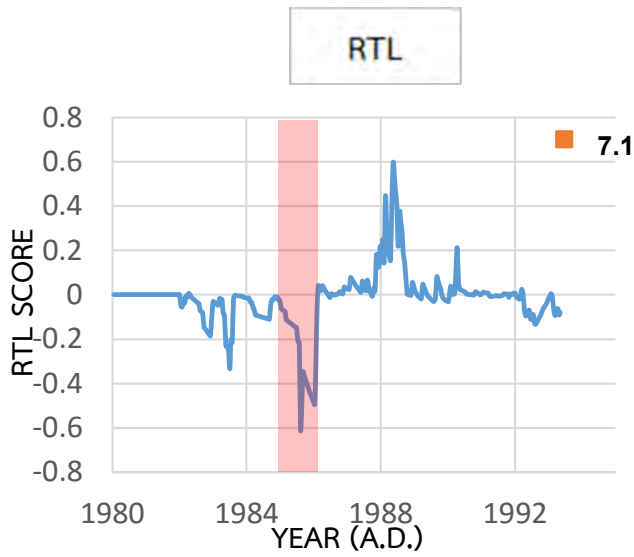
(11) Mw = 7.5, Date = 20/06/1991
 QD = 1.23 y (1986.41–1987.64)



เหตุการณ์ที่ 12

(12) Mw = 7.1, Date = 18/05/1993

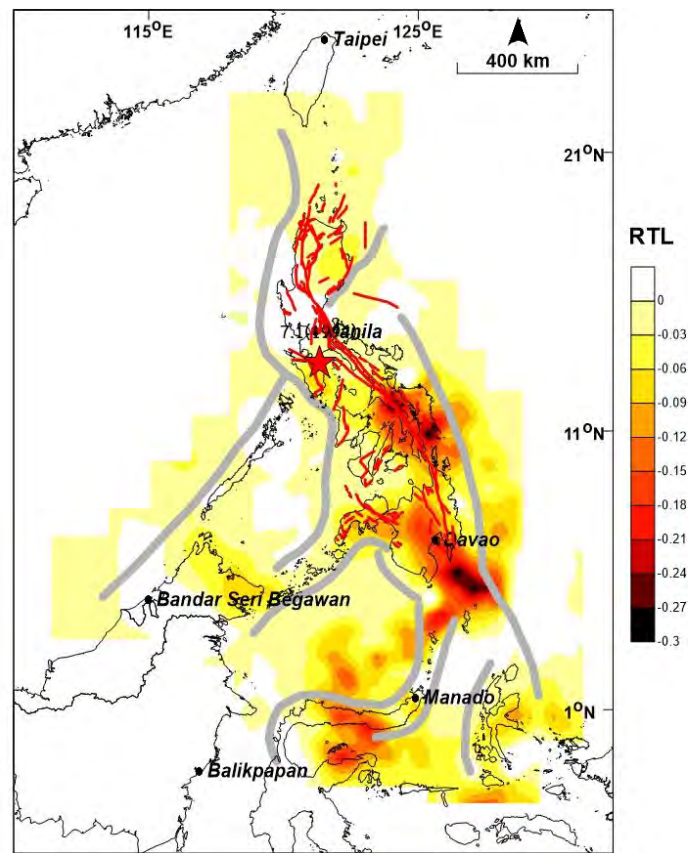
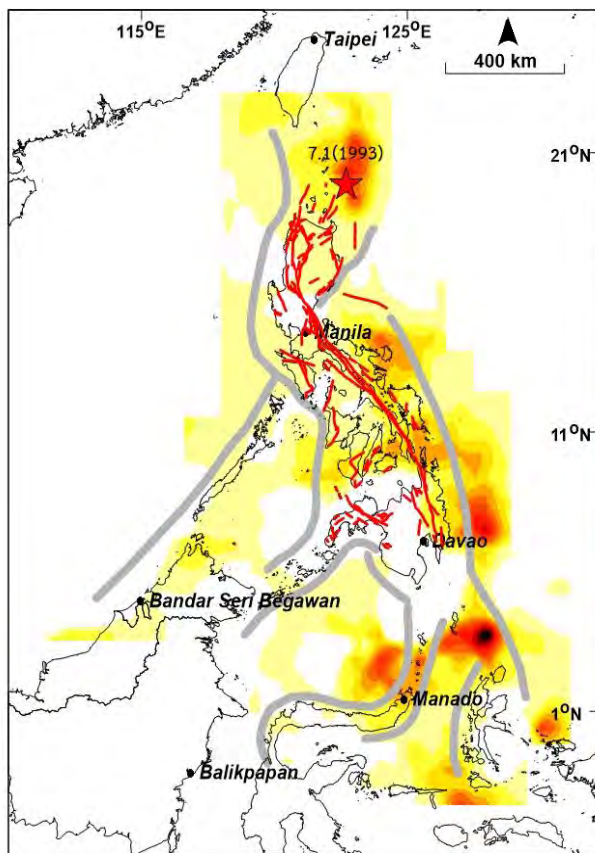
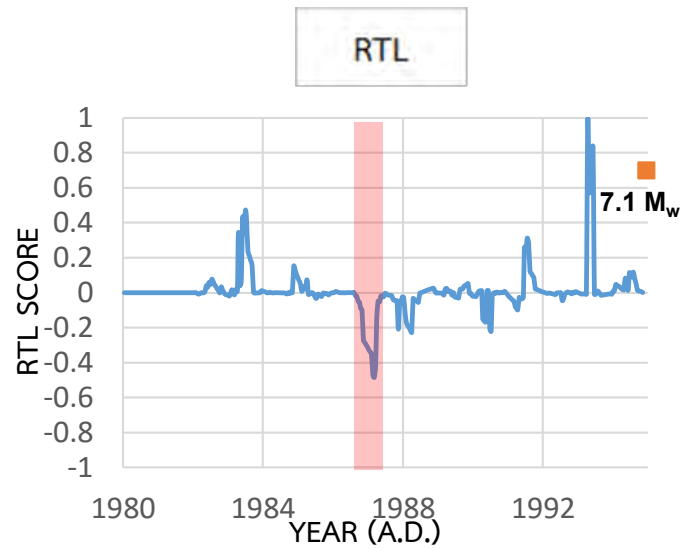
QD = 1.42 y (1984.72–1986.14)



เหตุการณ์ที่ 13

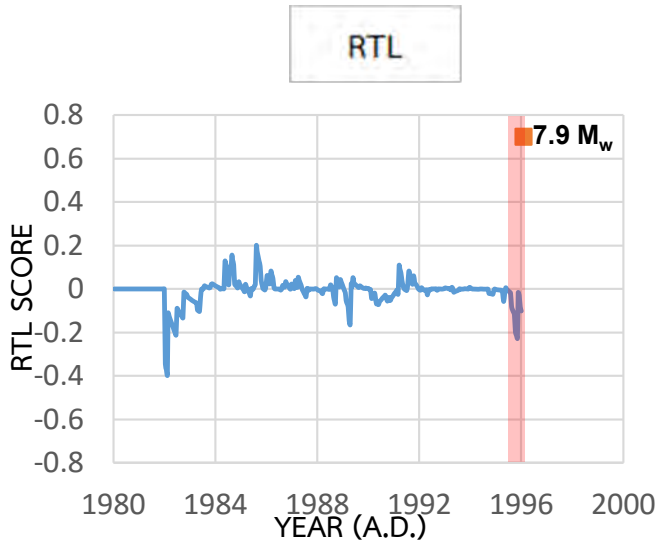
(13) Mw = 7.1, Date = 14/11/1994

QD = 0.88 y (1986.41–1987.29)



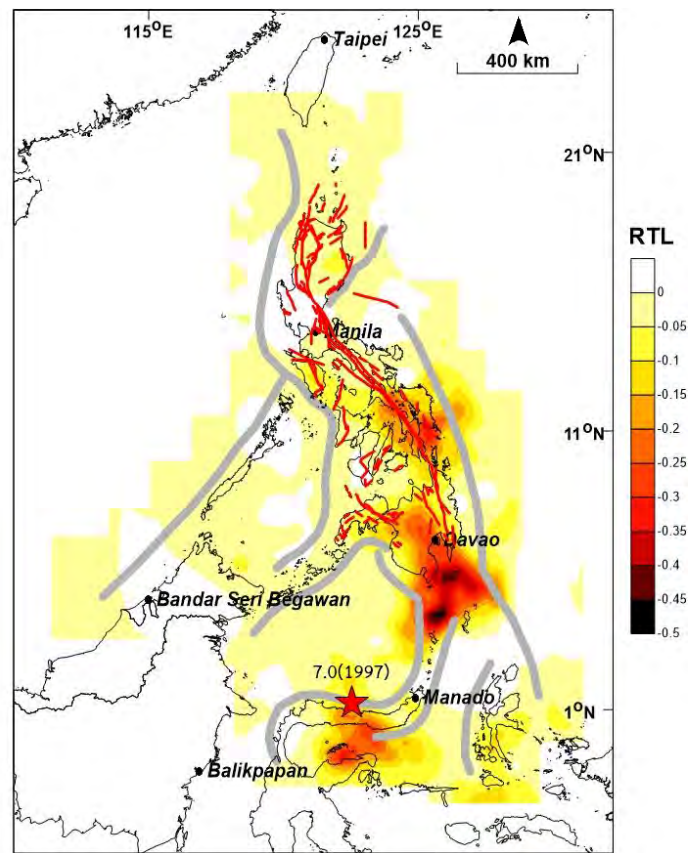
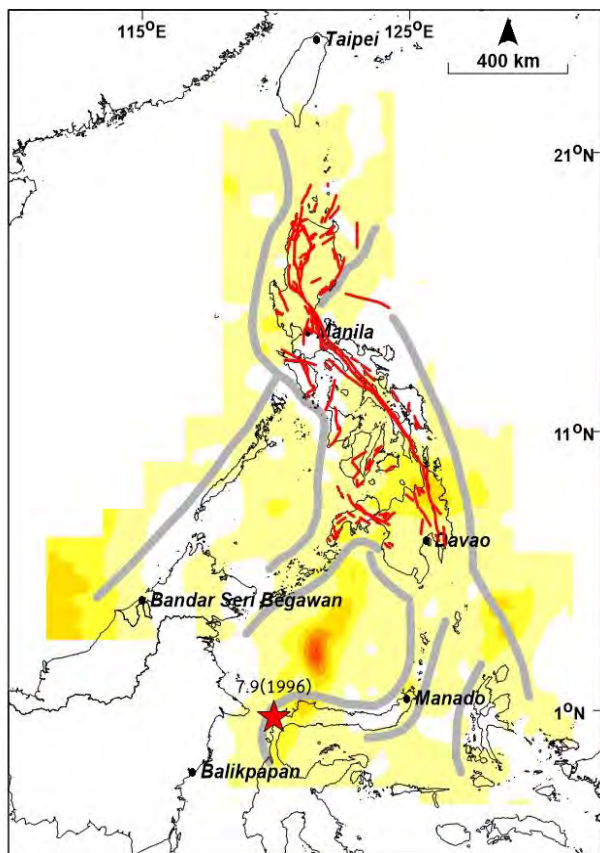
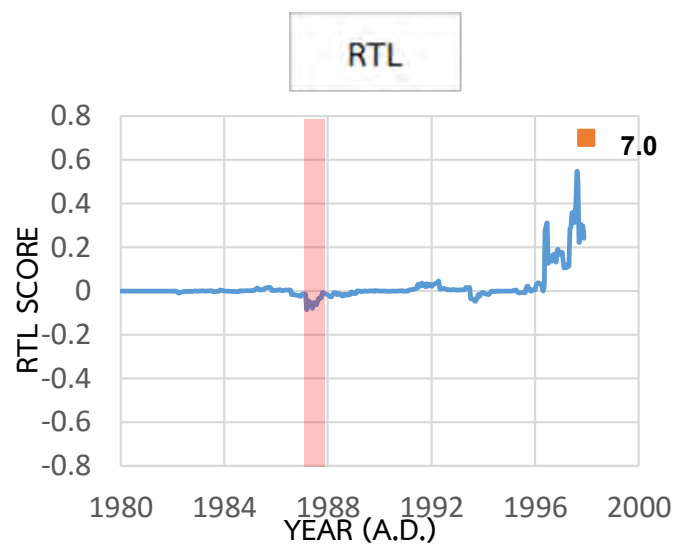
เหตุการณ์ที่ 14

(14) $M_w = 7.9$, Date = 01/01/1996
 QD = 0.69 y (1995.19–1995.88)



เหตุการณ์ที่ 15

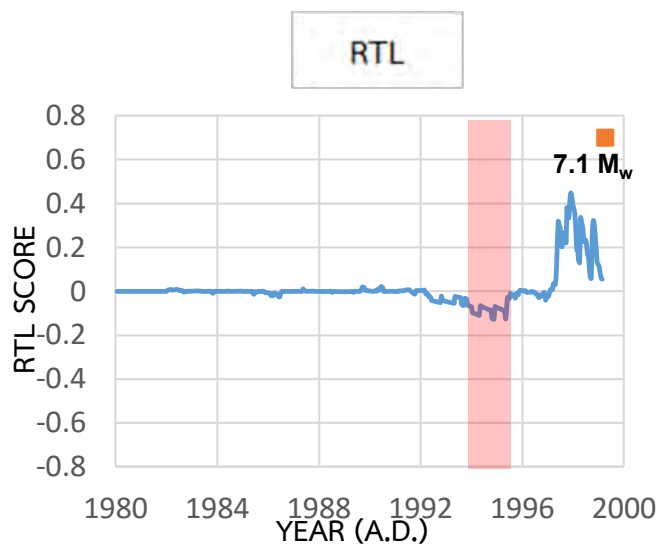
(15) $M_w = 7.1$, Date = 25/11/1997
 QD = 0.66 y (1986.79–1987.45)



เหตุการณ์ที่ 16

(16) Mw = 7.1, Date = 04/03/1999

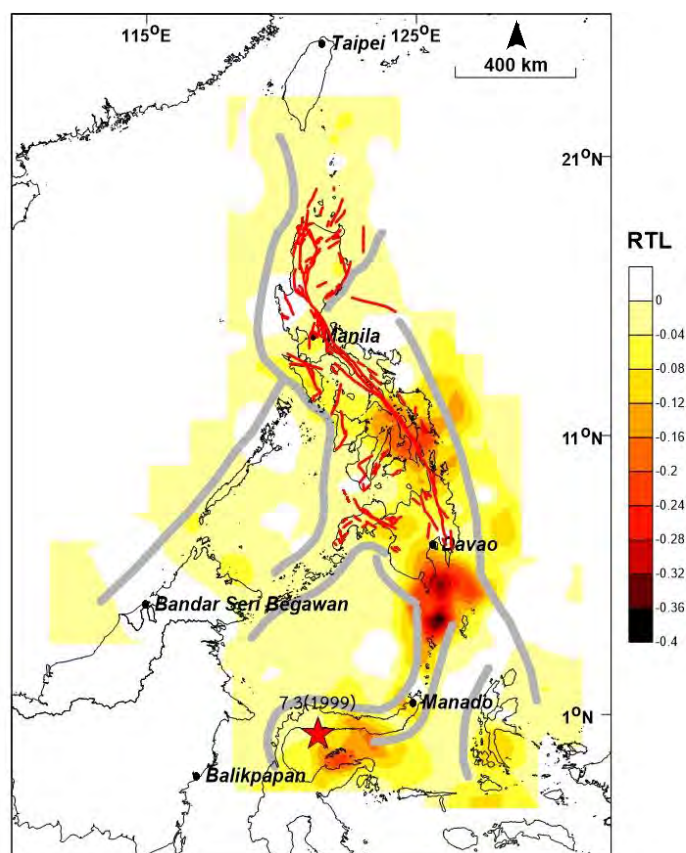
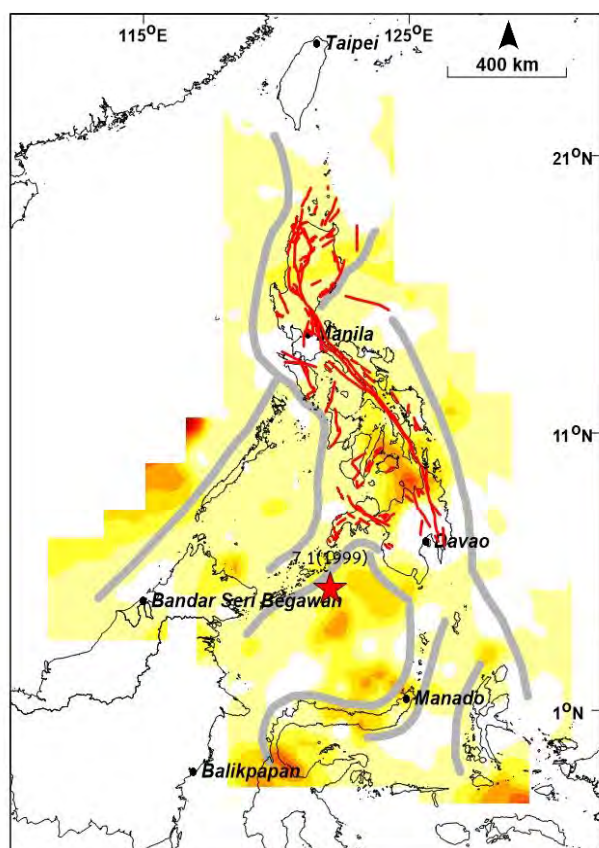
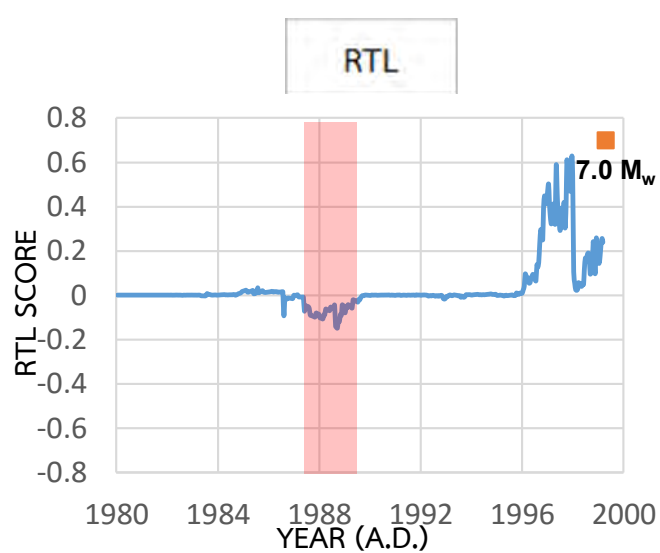
QD = 1.50 y (1993.58–1995.08)



เหตุการณ์ที่ 17

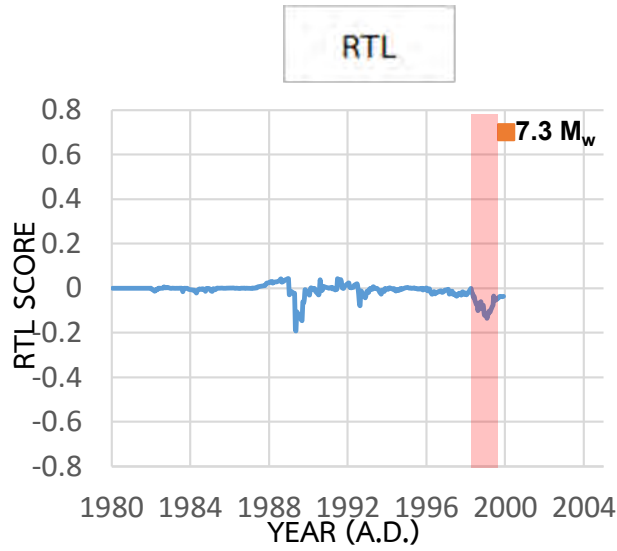
(17) Mw = 7.0, Date = 18/03/1999

QD = 2.11 y (1986.79–1988.90)



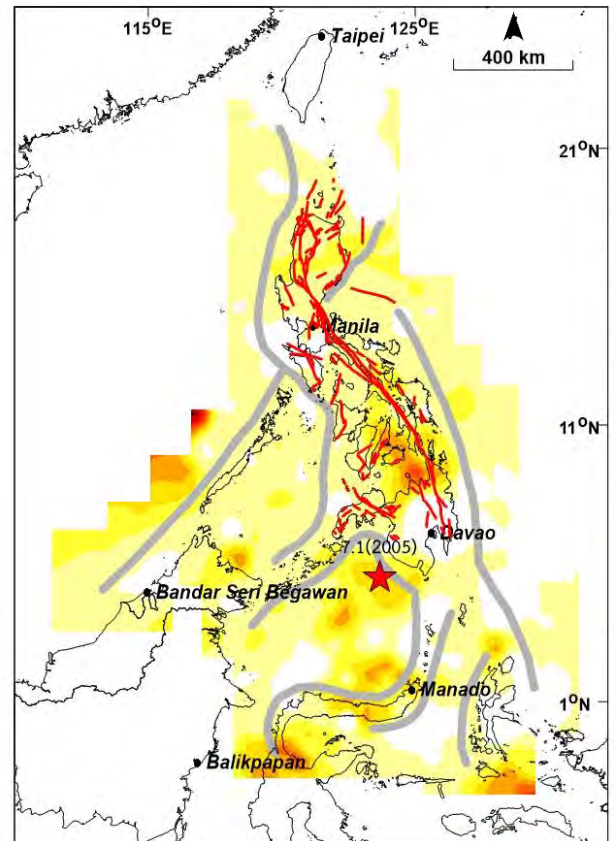
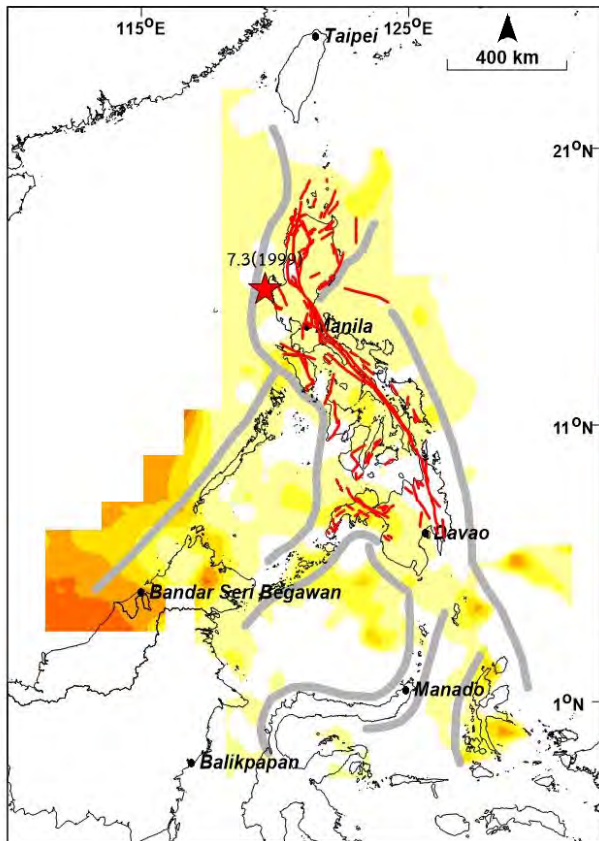
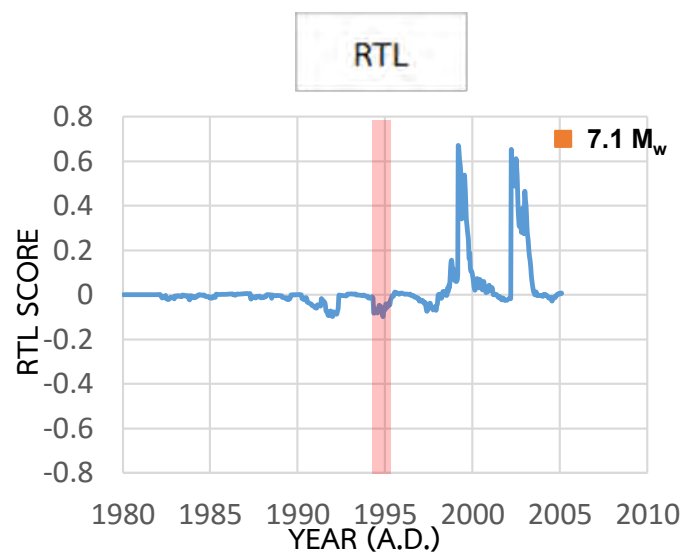
เหตุการณ์ที่ 18

(18) Mw = 7.3, Date = 11/12/1999
 QD = 1.15 y (1997.57–1998.72)



เหตุการณ์ที่ 21

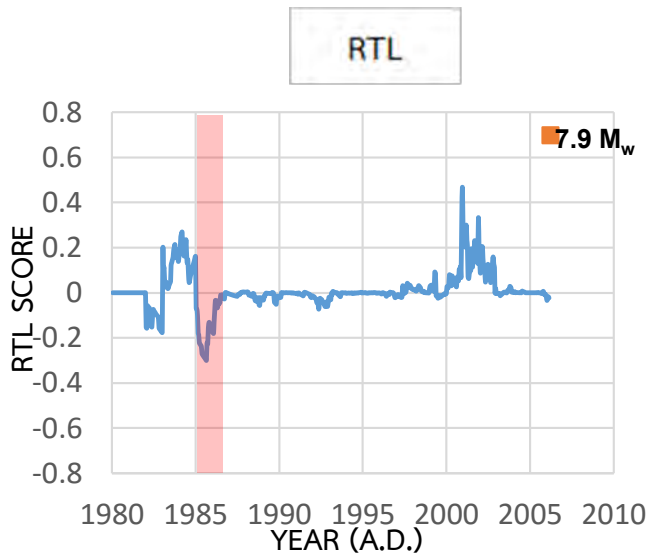
(21) Mw = 7.1, Date = 05/02/2005
 QD = 1.31 y (1993.62–1994.93)



เหตุการณ์ที่ 22

(22) Mw = 7.9, Date = 15/02/2006

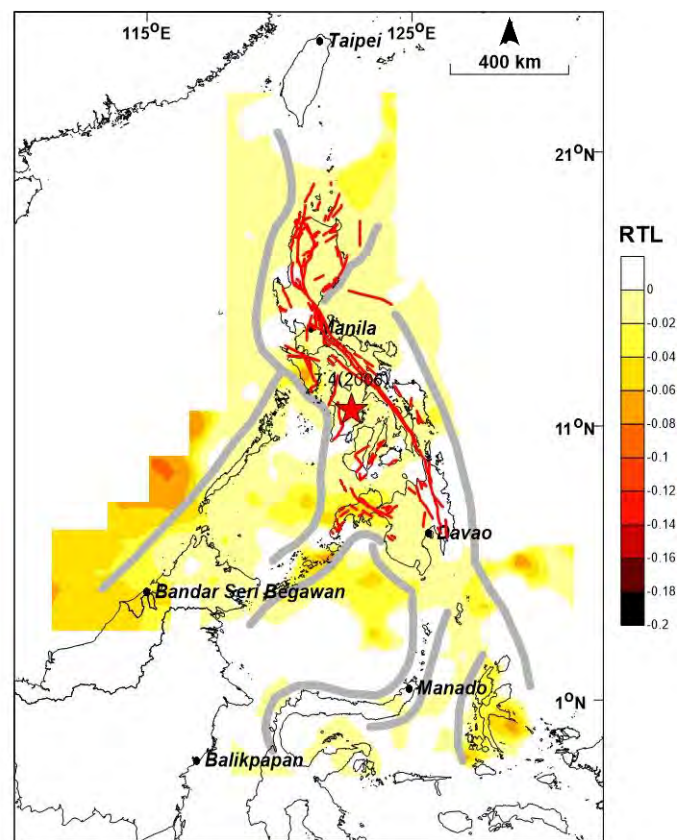
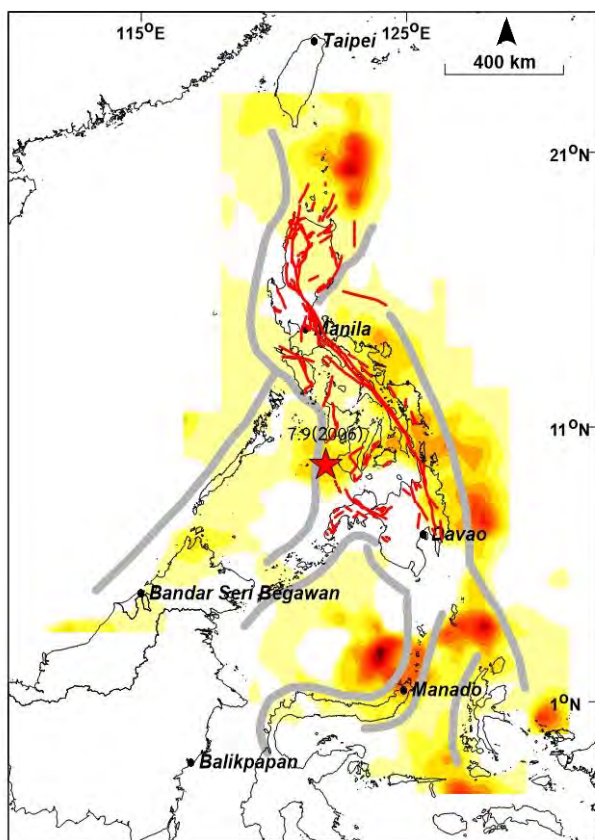
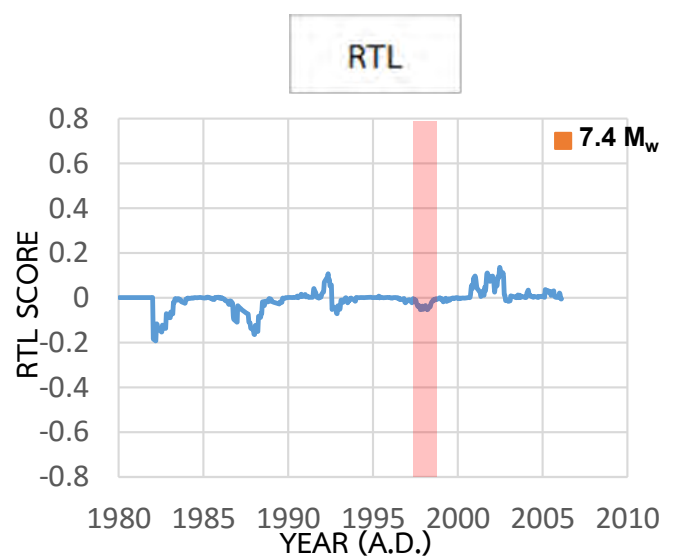
QD = 1.15 y (1985.03–1986.18)



เหตุการณ์ที่ 23

(23) Mw = 7.4, Date = 15/02/2006

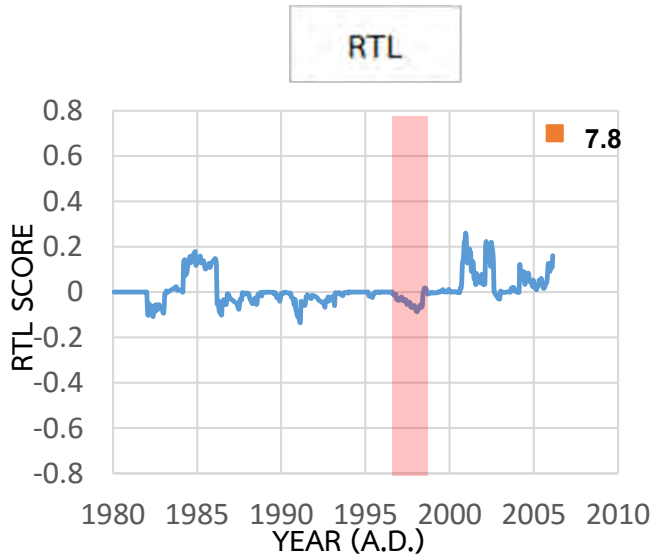
QD = 1.42 y (1996.77–1998.19)



เหตุการณ์ที่ 24

(24) Mw = 7.8, Date = 26/02/2006

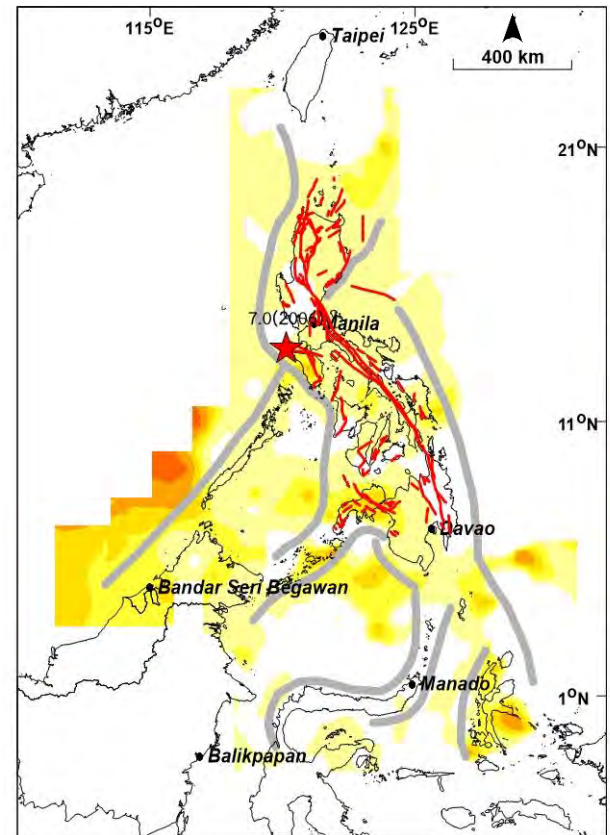
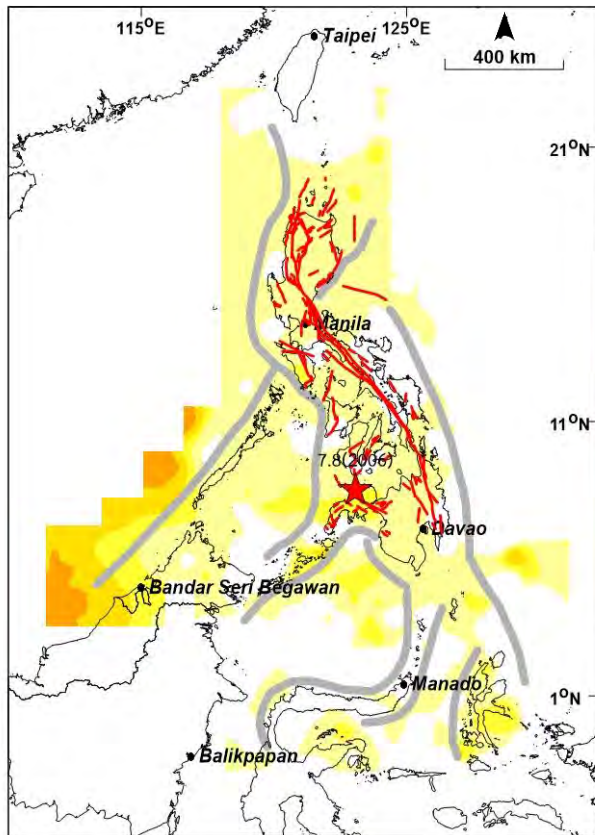
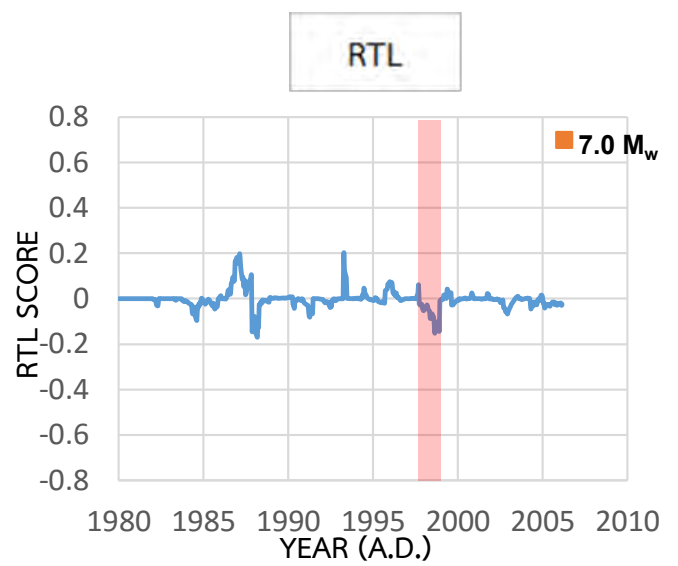
QD = 2.50 y (1995.92–1998.42)



เหตุการณ์ที่ 25

(25) Mw = 7.0, Date = 03/03/2006

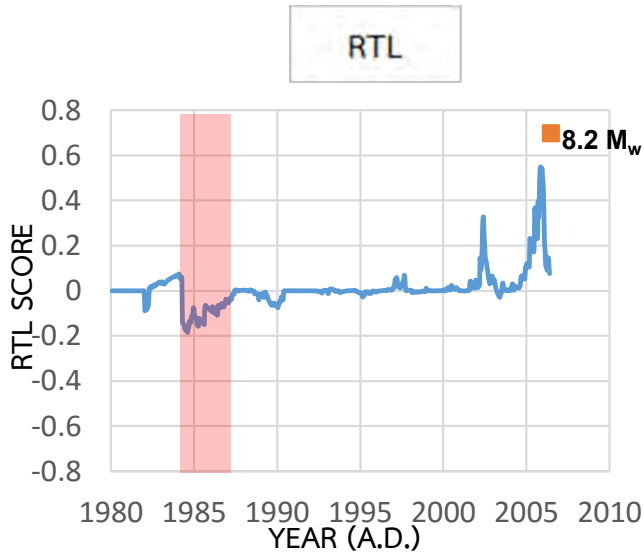
QD = 1.15 y (1997.19–1998.34)



เหตุการณ์ที่ 26

(26) Mw = 8.2, Date = 26/05/2006

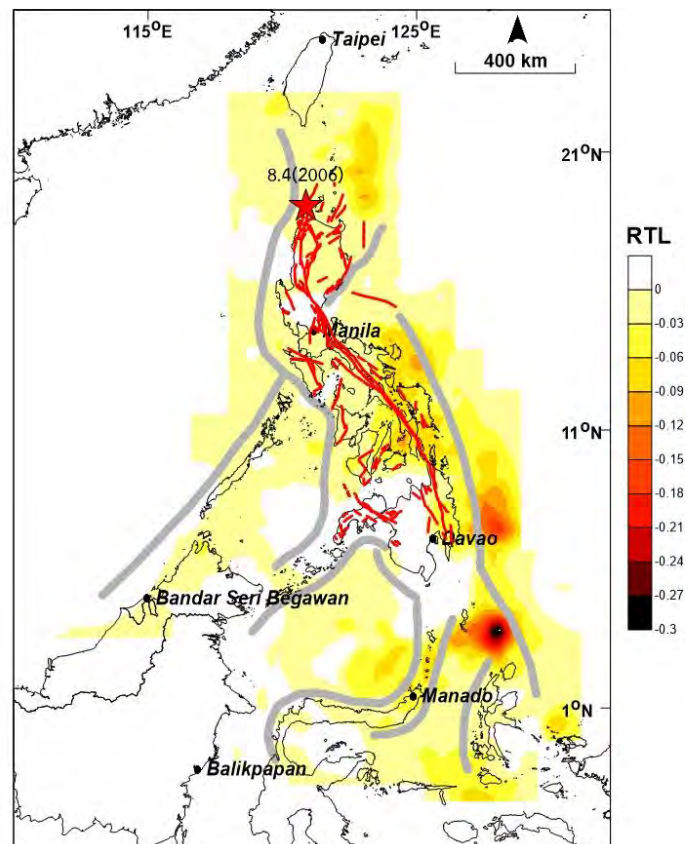
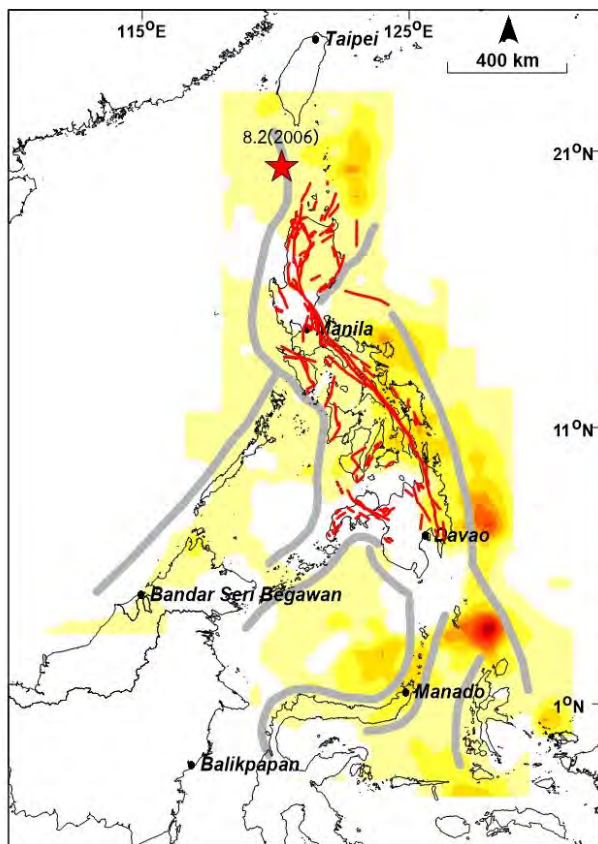
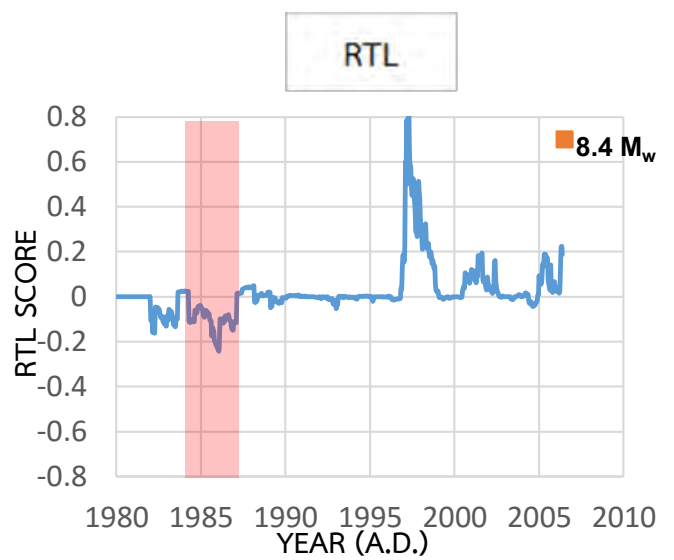
QD = 2.34 y (1984.30–1986.64)



เหตุการณ์ที่ 27

(27) Mw = 8.4, Date = 01/06/2006

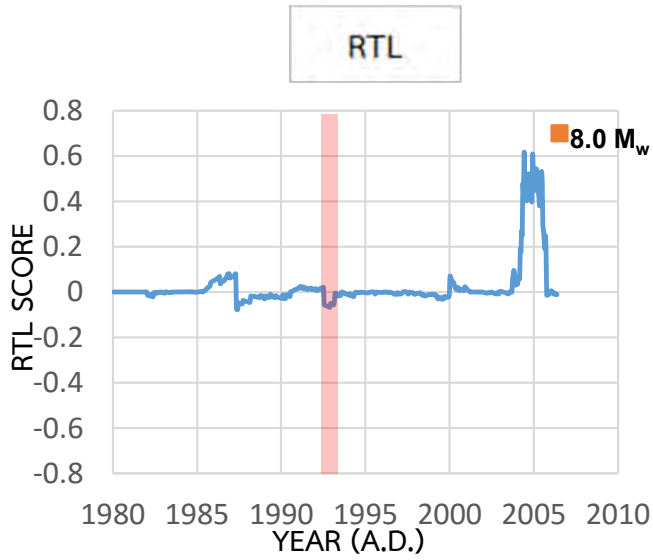
QD = 2.69 y (1983.80–1986.49)



เหตุการณ์ที่ 28

(28) Mw = 8.0, Date = 05/06/2006

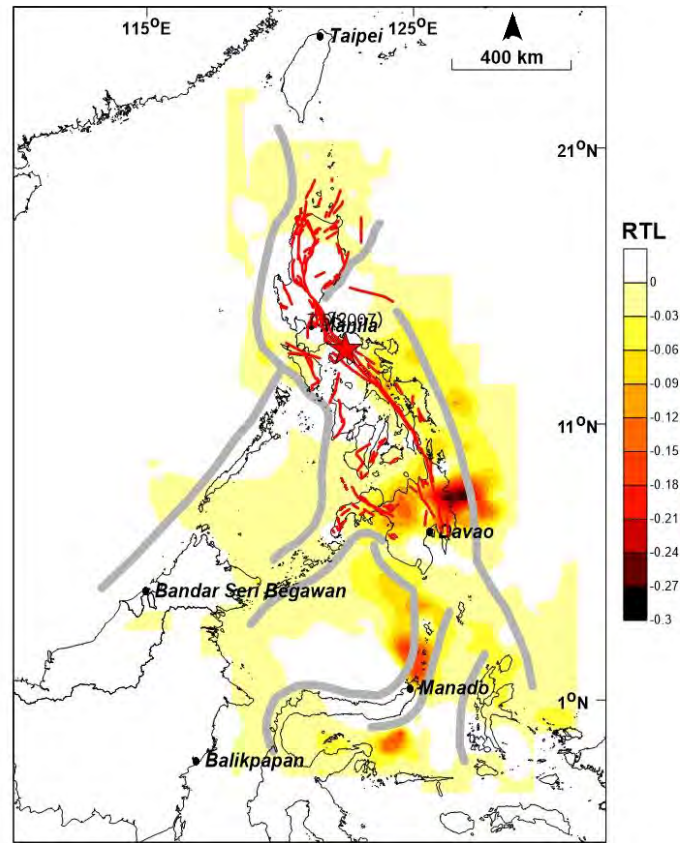
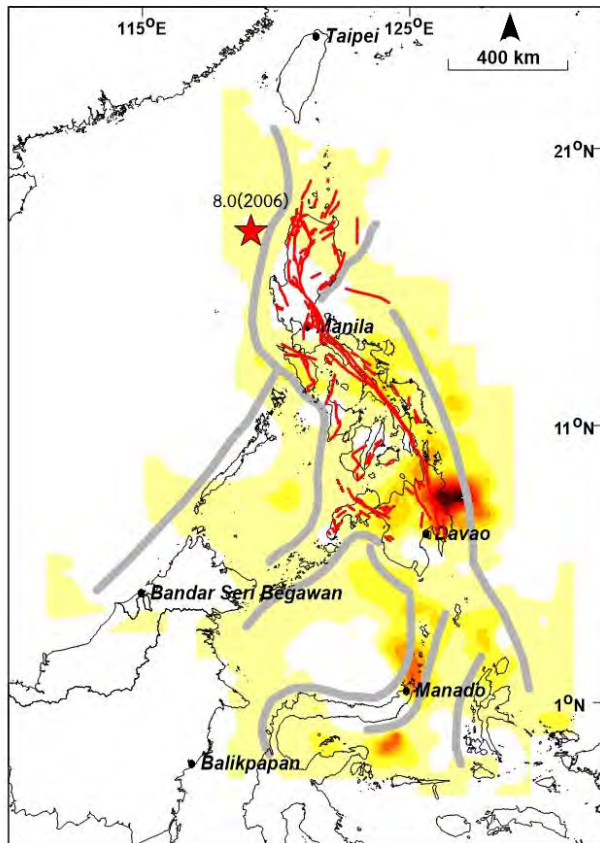
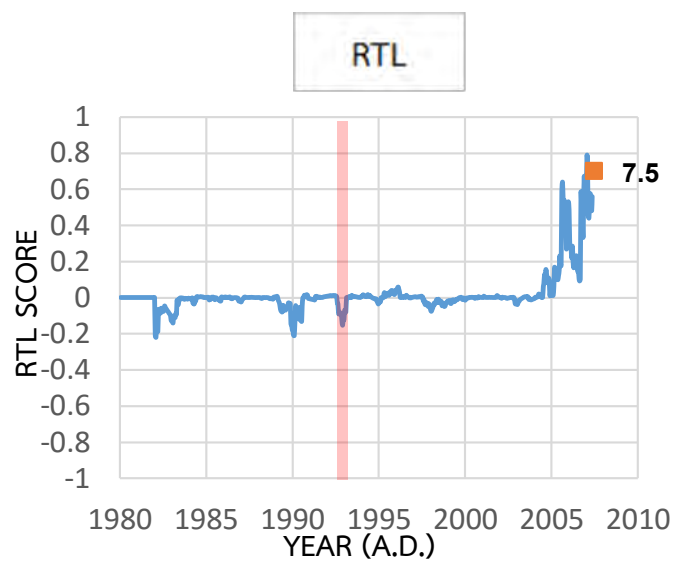
QD = 0.96 y (1991.97–1992.93)



เหตุการณ์ที่ 30

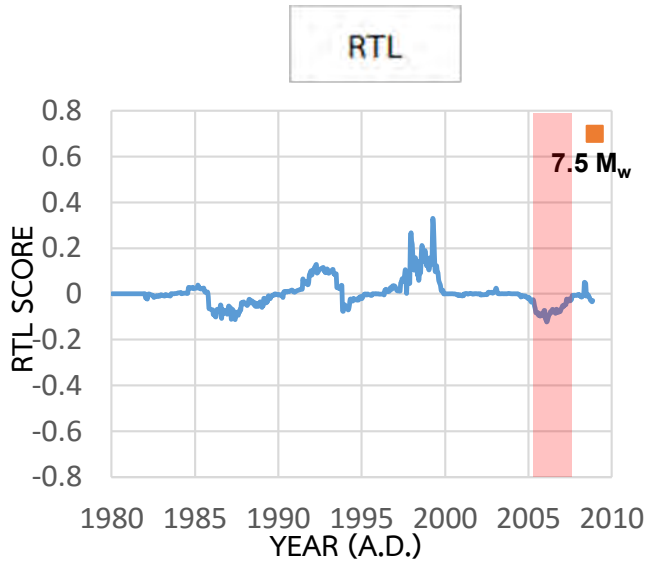
(30) Mw = 7.5, Date = 21/05/2007

QD = 0.50 y (1992.01–1992.51)



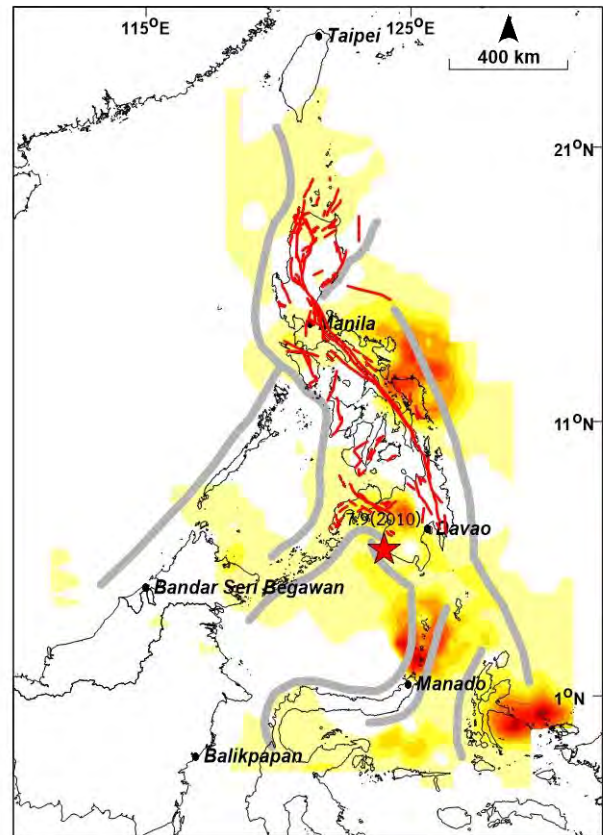
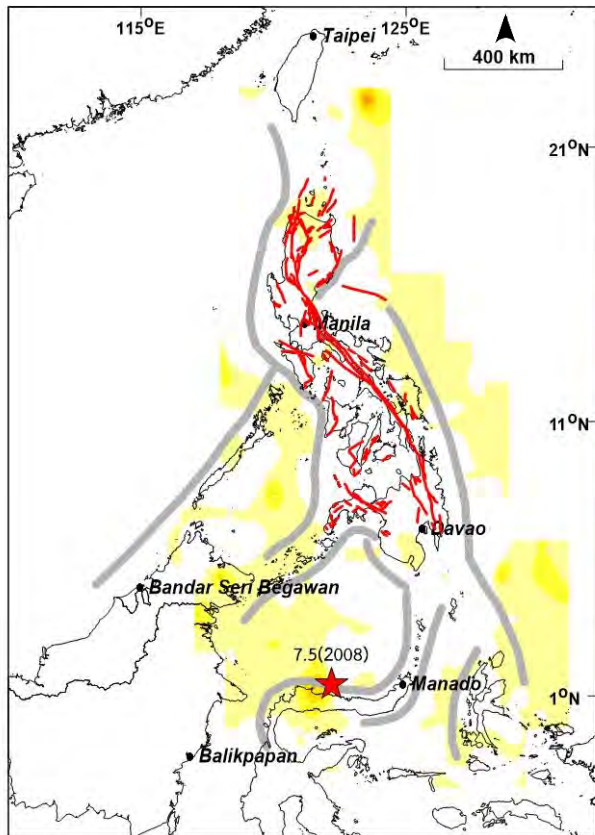
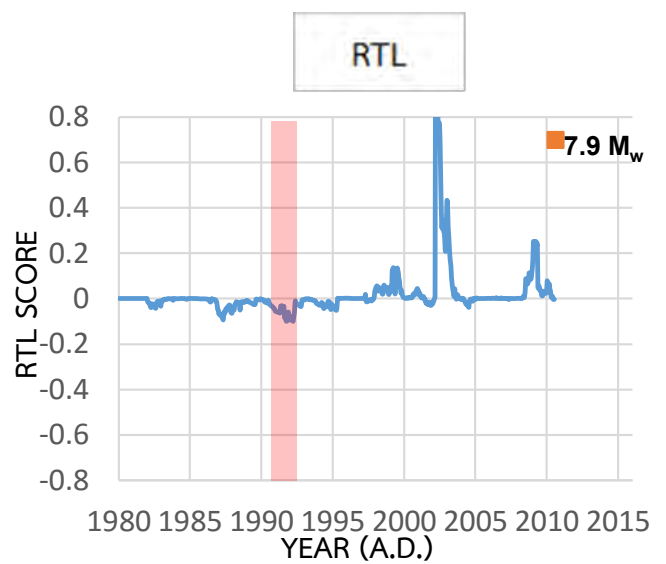
เหตุการณ์ที่ 31

(31) Mw = 7.5, Date = 16/11/2008
 QD = 1.88 y (2004.78–2006.66)



เหตุการณ์ที่ 32

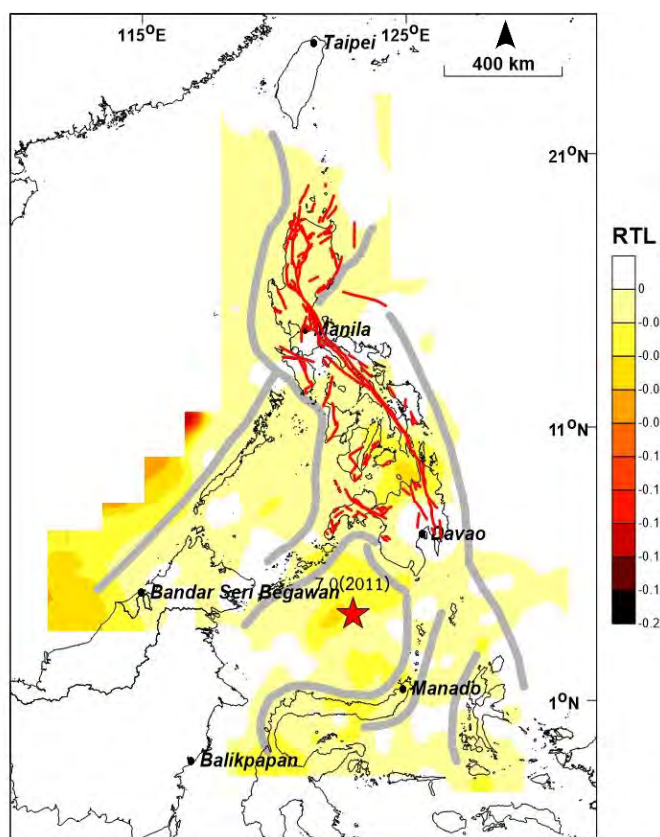
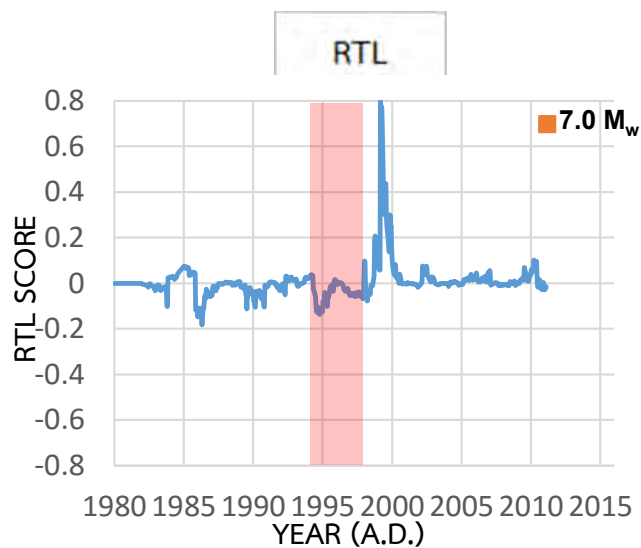
(32) Mw = 7.9, Date = 23/07/2010
 QD = 1.77 y (1990.05–1991.82)



เหตุการณ์ที่ 33

(33) $M_w = 7.0$, Date = 10/02/2011

QD = 3.69 y (1993.58–1997.27)



รูป 4.2

แผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติที่ได้จากเงื่อนไขที่กำหนด

จากผลการศึกษากราฟ RTL พบว่าเจอภาวะเจ็บสงบของแผ่นดินไหวทั้งหมด 29 เหตุการณ์ จาก 34 เหตุการณ์ เช่น เหตุการณ์ที่ 2, เหตุการณ์ที่ 12 และเหตุการณ์ที่ 16 เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบภาวะกระตุ้นในบางกราฟ เช่น เหตุการณ์ที่ 2, เหตุการณ์ที่ 6 และเหตุการณ์ที่ 18 เป็นต้น แต่บางเหตุการณ์ไม่เจอภาวะเจ็บสงบของแผ่นดินไหวเลย คือ เหตุการณ์ที่ 1, เหตุการณ์ที่ 19, เหตุการณ์ที่ 20, เหตุการณ์ที่ 29 และเหตุการณ์ที่ 34 จึงเป็นเหตุให้ผู้ศึกษาคัดเลือกกรณีศึกษามา 29 เหตุการณ์ มาวิเคราะห์เพื่อจัดทำแผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติ

จากแผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติ ซึ่งมีการกำหนดโทนสีเทียบกับค่า RTL ดังนี้ โทนสีเข้มแสดงถึงค่า RTL ที่มีค่าน้อย หรือก็คือ มีอัตราการเกิดแผ่นดินไหวน้อย โทนสีอ่อนแสดงถึงค่า RTL ที่มีค่ามาก หรือมีอัตราการเกิดแผ่นดินไหวมาก ดังนั้นพื้นที่ที่มีอัตราการเกิดแผ่นดินไหวน้อยมีโอกาสที่จะเกิดแผ่นดินไหวในอนาคตได้ เนื่องจากเป็นช่วงที่กำลังสะสมพลังงานเอาไว้มากเพื่อรอการปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว

เมื่อทำการแปลผลจากแผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติ ในบริเวณพื้นที่ศึกษาพบว่า มีบริเวณที่มีค่า RTL ต่ำมาก ซึ่งจะแสดงในโทนของสีส้มอ่อนถึงสีส้มเข้ม ทั้งหมด 9 เหตุการณ์ที่พบภาวะเจ็บสงบของแผ่นดินไหว คือ เหตุการณ์ที่ 8, เหตุการณ์ที่ 10, เหตุการณ์ที่ 11, เหตุการณ์ที่ 12, เหตุการณ์ที่ 15, เหตุการณ์ที่ 17, เหตุการณ์ที่ 21, เหตุการณ์ที่ 31 และเหตุการณ์ที่ 32 ซึ่งบริเวณที่พบภาวะเจ็บสงบนั้นอยู่ทางตอนเหนือของกรุงเทพมหานคร บริเวณด้านตะวันตกและตะวันตกเฉียงใต้ของเมืองดาเวา และทางตะวันตกของเมืองมานาโด ซึ่งเป็นบริเวณที่มีโอกาสที่จะเกิดแผ่นดินไหวขึ้นได้ในอนาคตและอาจส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ แต่อย่างไรก็ตามยังมีอีกหลายเหตุการณ์ที่ไม่พบภาวะเจ็บสงบของแผ่นดินไหว เช่น เหตุการณ์ที่ 7 บริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวอยู่ที่ด้านตะวันออกเฉียงใต้ของกรุงเทพมหานคร แต่ภาวะเจ็บสงบที่พบอยู่ตรงบริเวณเมืองดาเวา และเหตุการณ์ที่ 27 ที่มีศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ตรงบริเวณทะเลจีนใต้ แต่พบภาวะเจ็บสงบที่บริเวณตะวันออกเฉียงเหนือของเมืองมานาโด เป็นต้น

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล (DISCUSSION AND CONCLUSION)

5.1 ฐานข้อมูลแผ่นดินไหวทั้งหมด (Earthquake Catalogue)

จากการรวบรวมฐานข้อมูลแผ่นดินไหวจากทั้ง 3 ฐานข้อมูลได้แก่ ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว National Earthquake Information (NEIC) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว International Seismological Center (ISC) และฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Global CMT Catalogue (GCMT) พบว่าข้อมูลแผ่นดินไหวทั้งหมดมีทั้งสิ้น 542,726 เหตุการณ์ โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1962–วันที่ 31 ธันวาคม ค.ศ. 2015 ซึ่งมีขนาดของข้อมูลแผ่นดินไหวตั้งแต่ 0.0-9.5 ริคเตอร์ และความลึกของการเกิดแผ่นดินไหว 0-782.3 เมตร

5.2 การปรับเทียบขนาดแผ่นดินไหว (Magnitude Conversion)

ข้อมูลจากฐานข้อมูลแผ่นดินไหว National Earthquake Information (NEIC) ฐานข้อมูลแผ่นดินไหว International Seismological Center (ISC) และฐานข้อมูลแผ่นดินไหว Global CMT Catalogue (GCMT) การปรับเทียบขนาดแผ่นดินไหวจะทำการแปลงจาก มาตรวัดแผ่นดินไหวท้องถิ่น (ML) ไปเป็น มาตรวัดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (Mb) หลังจากนั้นจะแปลงจาก มาตรวัดแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวโลก (Ms) และมาตรวัดแผ่นดินไหวจากคลื่นเนื้อโลก (Mb) ไปเป็น มาตรวัดแผ่นดินไหวโมเมนต์ (Mw) โดยอาศัยสมการความสัมพันธ์นี้ดังตาราง 5.1

ตาราง 5.1 ตารางแสดงถึงสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแผ่นดินไหวแต่ละประเภท

Mb-Mw	$Mw = 0.18(Mb)^2 - 1.00(Mb) + 5.60$
Ms-Mw	$Mw = 0.07(Ms)^2 - 0.17(Ms) + 4.41$
ML-Mb	$Mb = 0.11(ML)^2 - 0.34(ML) + 3.5148$

5.3 การคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหวหลัก (Earthquake Declustering)

จากการนำแนวคิดของ Gardner และ Knopoff (1974) ที่นำมาใช้ในการคัดเลือกข้อมูลแผ่นดินไหวหลัก กำจัดแผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตาม รวมถึงเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่มีการรายงานซ้ำซ้อนในพื้นที่ที่ศึกษา ทำให้สามารถจัดกลุ่มแผ่นดินไหวเดียวกันได้ทั้งสิ้น 18,061 กลุ่มแผ่นดินไหว และประกอบด้วยข้อมูลขนาดแผ่นดินไหวทั้งสิ้น 542,726 เหตุการณ์ โดยเป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวนำและแผ่นดินไหวตาม 510,705 เหตุการณ์ ซึ่งคิดเป็น 94.1% ของเหตุการณ์ทั้งหมด จากการวิเคราะห์ดังกล่าว จำแนกเป็นแผ่นดินไหวหลัก 32,021 เหตุการณ์ ดังตาราง 5.2

ตาราง 5.2 ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลแผ่นดินไหวก่อนและหลังการคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหว

ข้อมูลแผ่นดินไหว	ก่อนการคัดเลือกข้อมูล	หลังการคัดเลือกข้อมูล
แผ่นดินไหว(เหตุการณ์)	542,726	32,021
ช่วงเวลาเริ่มต้นของข้อมูล(ปี)	1962.6092	1962.6092
ช่วงเวลาสิ้นสุดของข้อมูล	2015.8207	2015.8207
ขนาดของแผ่นดินไหว	0-9.5	0-9.5
ช่วงความลึก(เมตร)	0-782.3	0-782.3

5.4 การตรวจสอบและกำจัดแผ่นดินไหวที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Man-made Seismicity)

นำแนวคิดของ Habermann (1983; 1987) มาใช้ในการกำจัดเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ พบว่า คัดเลือกช่วงของข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่กว่า 3.8 ริคเตอร์ในช่วงปี ค.ศ. 1980-2015 ซึ่งมีการตรวจวัดด้วยอัตราเดียวกันอย่างต่อเนื่องมาเป็นตัวแทนของพฤติกรรมการเกิดแผ่นดินไหวได้ ดังนั้นจึงเหลือข้อมูลแผ่นดินไหวทั้งสิ้น 19,296 เหตุการณ์ จาก 32,021 เหตุการณ์ โดยแสดงรายละเอียดข้อมูลแผ่นดินไหวในตาราง 5.3

ตาราง 5.3 ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลแผ่นดินไหวก่อนและหลังการคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหว และหลังการกำจัดผลจากกิจกรรมของมนุษย์

ข้อมูลแผ่นดินไหว	ก่อนการคัดเลือกข้อมูล	หลังการคัดเลือกข้อมูล	หลังการกำจัดผลจากกิจกรรมของมนุษย์
แผ่นดินไหว(เหตุการณ์)	542,726	32,021	19,296
เวลาเริ่มต้นของข้อมูล(ปี)	1962.6092	1962.6092	1977.0773
เวลาสิ้นสุดของข้อมูล(ปี)	2015.8207	2015.8207	2014.8901
ขนาดของแผ่นดินไหว	0-9.5	0-9.5	3.8-9.5
ช่วงความลึก(เมตร)	0-782.3	0-782.3	0-782.3

5.5 การคัดเลือกระดับของแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์ (Magnitude of Completeness)

จากการกำหนดค่าขนาดแผ่นดินไหวที่ต่ำที่สุดที่มีความสมบูรณ์ในการตรวจวัดแผ่นดินไหวจากเครื่องมือ หรือ Magnitude of completeness (Mc) (Woessner และ Wiemer, 2005) พบว่า Mc มีค่าอยู่ที่ 5.0 และหลังจากการทำการกระบวนกรนี้ ทำให้ได้ข้อมูลแผ่นดินไหวทั้งสิ้น 4,925 เหตุการณ์ โดยแสดงรายละเอียดข้อมูลแผ่นดินไหวในตาราง 5.4

ตาราง 5.4 ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลแผ่นดินไหวก่อนและหลังการคัดเลือกกลุ่มแผ่นดินไหว หลังการกำจัดผลจากกิจกรรมของมนุษย์ รวมถึงหลังจากคัดเลือกระดับของแผ่นดินไหว ที่มีความสมบูรณ์

ข้อมูลแผ่นดินไหว	ก่อนคัดเลือกข้อมูล	หลังคัดเลือกข้อมูล	หลังการกำจัดผลจากกิจกรรมของมนุษย์	หลังจากคัดเลือกระดับของแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์
แผ่นดินไหว(เหตุการณ์)	542,726	32,021	19,296	4,925
เวลาเริ่มต้นของข้อมูล(ปี)	1962.6092	1962.6092	1977.0773	1977.0773
เวลาสิ้นสุดของข้อมูล(ปี)	2015.8207	2015.8207	2014.8901	2014.8901
ขนาดของแผ่นดินไหว	0-9.5	0-9.5	3.8-9.5	5.0-9.5
ช่วงความลึก(เมตร)	0-782.3	0-782.3	0-782.3	0-782.3

5.6 การทดสอบย้อนกลับ (Retrospective Test)

จากการคัดเลือกเหตุการณ์ที่จะนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา พบว่ามีทั้งหมด 34 เหตุการณ์ โดยแต่ละเหตุการณ์มีขนาดแผ่นดินไหวโมเมนต์มากกว่าหรือเท่ากับ 7.0 ริกเตอร์ขึ้นไป ซึ่งแสดงดังตาราง 5.5

ตาราง 5.5 ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลของเหตุการณ์แผ่นดินไหวทั้ง 34 เหตุการณ์ที่เลือกมาเป็นกรณีศึกษา

Event	Longitude	Latitude	Year	Month	Day	MW	Depth	Hour	Min
1	124.358	13.752	1982	1	11	7.2	19.0	6	10
2	123.762	8.147	1984	3	5	7.3	651.0	3	33
3	121.400	7.400	1984	3	5	7.2	33.0	3	32
4	122.380	-0.290	1984	8	6	7.4	252.8	12	2
5	119.700	17.700	1985	4	23	7.3	189.0	16	15
6	120.610	15.344	1985	4	23	7.0	191.0	16	15
7	124.616	13.477	1988	2	24	7.2	37.0	3	52
8	123.350	1.310	1990	4	18	7.6	33.2	13	39
9	121.899	11.760	1990	6	14	7.0	20.0	7	40
10	121.230	15.970	1990	7	16	7.7	15.0	7	26
11	123.230	1.040	1991	6	20	7.5	15.0	5	19
12	122.700	19.860	1993	5	18	7.1	189.0	10	19
13	121.320	13.440	1994	11	14	7.1	15.0	19	15
14	119.930	0.740	1996	1	1	7.9	15.0	8	5

15	122.536	1.241	1997	11	25	7.0	18.0	12	14
16	122.030	5.380	1999	3	4	7.1	18.0	8	52
17	121.350	0.300	1999	3	18	7.3	0.0	1	58
18	119.640	15.870	1999	12	11	7.3	35.1	18	3
19	124.250	5.920	2002	3	5	7.5	28.7	21	16
20	121.134	4.644	2002	3	5	7.2	18.2	21	16
21	123.670	5.470	2005	2	5	7.1	530.6	12	23
22	121.950	9.624	2006	2	15	7.9	2.0	18	29
23	122.727	11.571	2006	2	15	7.4	96.0	10	10
24	123.086	8.472	2006	2	26	7.8	31.0	22	31
25	120.148	13.640	2006	3	3	7.0	36.0	14	41
26	120.217	20.393	2006	5	26	8.2	4.0	15	57
27	120.884	19.054	2006	6	1	8.4	13.0	18	57
28	119.075	17.992	2006	6	5	8.0	124.0	0	50
29	121.117	18.974	2006	10	9	9.5	11.0	19	6
30	122.440	13.660	2007	5	21	7.5	0.0	16	55
31	122.190	1.390	2008	11	16	7.5	36.0	17	2
32	123.980	6.324	2010	7	23	7.9	520.5	22	51
33	122.981	4.137	2011	2	10	7.0	346.3	14	41
34	124.117	9.880	2013	10	15	7.1	19.0	0	12

เมื่อทำการกำหนดค่า Rmax และค่า Tmax แล้ว จึงคัดเลือกเงื่อนไขที่สนใจมาทั้งหมด 1 เงื่อนไขดังตาราง 5.6

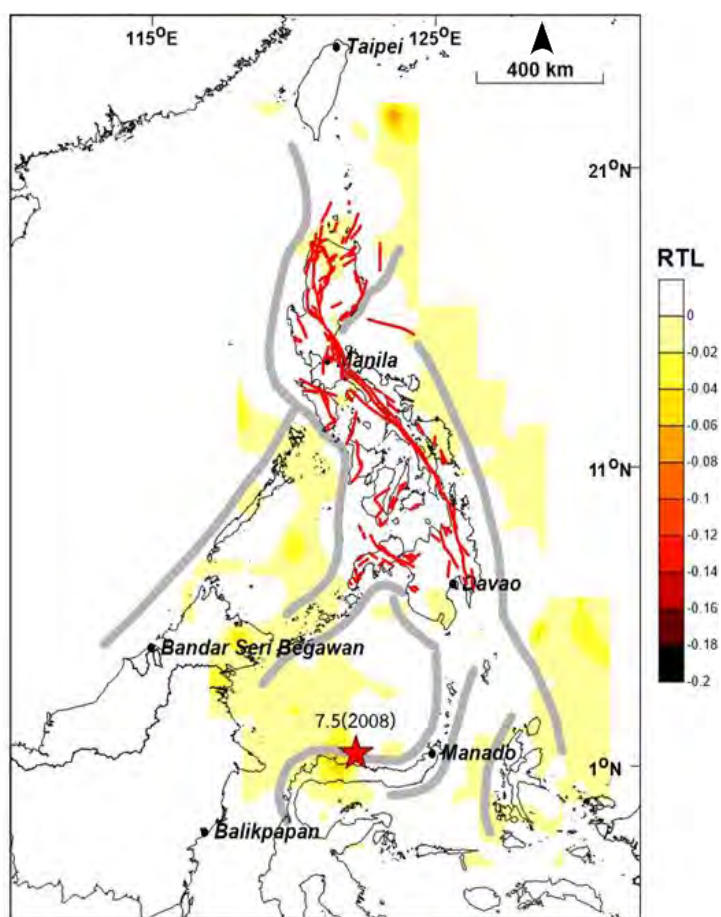
ตาราง 5.6 ตารางแสดงเงื่อนไข ค่า Rmax และค่า Tmax และเหตุการณ์กรณีศึกษาที่สนใจ

เงื่อนไข	Rmax (กม.)	Tmax (ปี)	จำนวนเหตุการณ์กรณีศึกษา
18	190	2.0	19 เหตุการณ์

5.7 การประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว (Evaluation of Prospective Area)

จากแผนที่แสดงการกระจายตัวของค่าความผิดปกติในบริเวณพื้นที่ศึกษาที่วิเคราะห์ด้วยวิธี ขั้นตอนวิธีบริเวณ-เวลา-ความยาวรอยเลื่อน จากชุดข้อมูลแผ่นดินไหว 10 ปี ล่าสุด โดยตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006-2016 ดังรูป 5.1 พบว่ามีบริเวณที่มีค่า RTL ต่ำมาก ซึ่งแสดงในโทนของสีส้มอ่อนถึงสีส้มเข้ม พบภาวะเสียบสงบของแผ่นดินไหวบริเวณทางตะวันออกของประเทศไต้หวัน ตะวันออกของเมืองดาเวา ตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันออกของเมืองบันดาร์ เสรี เบกาวัน ซึ่งบริเวณดังกล่าวถือว่าเป็นพื้นที่เสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหวได้ในอนาคต และอาจส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินได้

แต่อย่างไรก็ตามค่าความผิดปกติที่พบนั้นมีค่าต่ำมาก ทำให้แผนที่เสี่ยงภัยนี้เป็นแค่ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ทำนายการเกิดแผ่นดินไหวในอนาคตได้ ซึ่งไม่ค่อยแม่นยำมากนัก ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยการทำแผนที่แสดงภาวะเสียบสงบของแผ่นดินไหวในทุกๆ ครั้งปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006-2016 เพื่อดูค่า RTL ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เพื่อนำมาวิเคราะห์เป็นแผนที่ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูป 5.1 แผนที่แสดงภาวะเสียบสงบของแผ่นดินไหว

เอกสารอ้างอิง

(REFERENCES)

- Chen, C., Wu, Y., 2006. An improved region-time-length algorithm applied to the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Geophys. J. Int.*: pp.1144-1147.
- Ekström, G., Dziewoński, A.M., Maternovskaya, N.N., and Nettles, M., 2005, Global seismicity of 2003: centroid-moment-tensor solutions for 1087 earthquakes: *Phys. Earth Planet. In.*, v. 148, p. 327-351.
- Gambino, S., Laudani, A., and Mangiagli, S. 2014. Seismicity Pattern Changes before the M=4.8 Aeolian Archipelago (Italy) Earthquake of August 16, 2010. *The Scientific World Journal* 2014: 8 p.
- Gardner, J.K., and Knopoff, L. 1974. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?. *Bulletin of the Seismological Society of America* 64(1): pp.363-367.
- Habermann, R. E. 1987. Man-made changes of Seismicity rates. *Bulletin of the Seismological Society of America* 77: pp.141-159.
- Habermann, R. E. and Wyss, M. 1984. Earthquake triggering during preparation for great earthquakes. *Geophysical Research Letters* 11: pp.291-294.
- Huang, Q. 2004. Seismicity Pattern Changes Prior to Large Earthquakes-An approach of the RTL algorithm. *TAO* 15: pp.461-491.
- Huang, Q., Sobolev, G. A., and Nagao, T. 2001. Characteristics of the seismic quiescence and activation patterns before the M = 7.2 Kobe earthquake, January 17, 1995. *Tectonophysics* 337: pp.99-116.
- Huang, Q., Sobolev, G. A., 2002. Precursory seismicity changes associated with the Nemuro Peninsula earthquake, January 20, 2000. *Journal of Asian Earth Sciences* 21: pp.135-146.
- International Seismological Centre (2001) *Bulletin disk 1-9 [CD-ROM]*, International Seismological Centre, Thatcham, UK.

- Perez, O. J., and Scholz, C. H. 1984. Heterogeneities of the instrumental seismicity catalog (1904-1980) for strong shallow earthquakes . Bulletin of the Seismological Society of America 74: pp.669-686.
- Shashidhar, D., Kumar, N., Mallika, K., and Gupta, H. 2010. Characteristics of seismicity patterns prior to the M~5 earthquakes in the Koyna Region, Western India – application of the RTL algorithm. Episodes 33: pp.83 - 89.
- Sipkin, S. A., W. J. Person, and B. W. Presgrave (2000). Earthquake bulletins and catalogs at the USGS National Earthquake Information Center. IRIS Newsletter 2000,2-4.
- Sobolev, G. A., 1995. Fundamental of Earthquake Prediction. Electromagnetic Research Centre, Moscow: 161 p.
- Sobolev, G. A., and Tyupkin, Y. S. 1997. Low-seismicity precursors of large earthquake in Kamchatka. Volcanology and Seismology 18: pp.433-446.
- Well, D. L., and Coppersmith, K. J. 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America 84: pp.974-1002.
- Wiemer, S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. Seismological Research Letters 72(2): pp.373-382.
- Woessner, J., and Wiemer, S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. Bulletin of the Seismological Society of America 95: pp.684-698.
- Wyss, M. 1991. Reporting history of the central Aleutians Seismograph network and the quiescence preceding the 1986 Andreanof Island earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America 81: pp.1231-1254.
- Wyss, M., and Habermann, R. E. 1988. Precursory seismic quiescence. Pure and Applied Geophysics 126: pp319-332.