

ความบอบบางของอาคารที่เสียหายในเหตุการณ์สึนามิวันที่ 26 ธันวาคม 2547



นายปิยะวัชร ฝอยทอง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

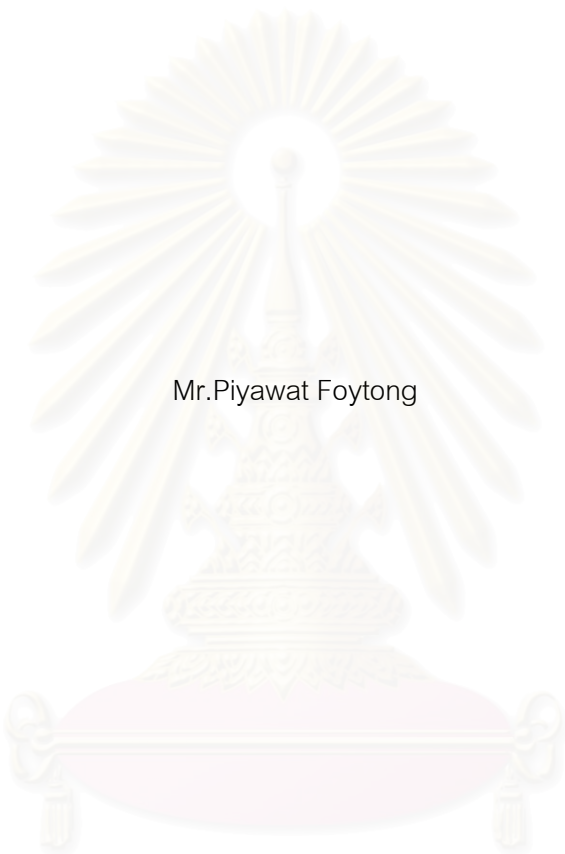
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FRAGILITY OF BUILDINGS DAMAGED IN THE 26 DECEMBER 2004 TSUNAMI

Mr.Piyawat Foytong



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

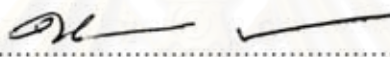
Faculty of Engineering Chulalongkorn University

Academic Year 2006

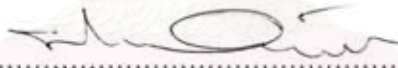
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ความบอบบางของอาคารที่เสียหายในเหตุการณ์สึนามิ
วันที่ 26 ธันวาคม 2547
โดย นายปิยะวัชร ฝอยทอง
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัมย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ ไชจิสกร)

ปิยะวัชร ฝอยทอง : ความบอบบางของอาคารที่เสียหายในเหตุการณ์สึนามิวันที่ 26 ธันวาคม 2547.
(FRAGILITY OF BUILDINGS DAMAGED IN THE 26 DECEMBER 2004 TSUNAMI):
อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.อาณัติ เรืองรัมย์, 228 หน้า.

เหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547 ได้ทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างทางวิศวกรรมอย่างมาก การสำรวจภาคสนามทำให้ทราบถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นอาคาร, สะพาน, ท่าเรือและโครงสร้างกำแพงกันดิน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงของโครงสร้างจากสึนามิในอนาคต ในการวิเคราะห์ ความเสี่ยงจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายของอาคารกับความสูงของคลื่นหรือความเร็ว กระแสน้ำ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยมีบริเวณที่ศึกษา 2 บริเวณคือเขาหลัก จังหวัดพังงาและหาด กมลา จังหวัดภูเก็ตซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับ ความเสียหายมาก

จากข้อมูลการสำรวจมีจำนวนข้อมูลอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด 94 ข้อมูล โดยเสาของอาคารที่ไม่เสียหายเลยจนถึงพังทลายมีขนาดโดยทั่วไป 0.15 ม. x 0.15 ม. ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบเสาขนาดหน้าตัดดังกล่าว พบค่าแรงต้านข้างสูงสุดของเสาเท่ากับ 5.7 kN. และได้หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว กับค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาคูดซับซึ่งมีความสัมพันธ์ในลักษณะเอ็กโปเนนเชียล อัตราส่วนพลังงานนี้ใช้เป็นค่าน้ำหนัก (Weight factor) ในการเฉลี่ยความเสียหายของเสาในโครงสร้าง

จากนั้นได้ทำการจำลองสึนามิเพื่อหาความเร็วกระแสน้ำ ในลำดับแรกได้ทำการสอบเทียบแบบจำลองกับ ข้อมูลคลื่นจากสถานีวัดน้ำ, ข้อมูลการสำรวจค่าความสูงคลื่น, และบริเวณที่น้ำท่วมถึง จากแบบจำลองพบว่าบริเวณ เขาหลัก จังหวัดพังงามีคลื่นสูงประมาณ 8 ม. เทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิ มีความเร็วประมาณ 5 ม./วินาที และบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ตมีคลื่นสูงประมาณ 5 ม. มีความเร็วประมาณ 2.5 ม./วินาที จากนั้นได้ศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายของอาคารกับระดับความสูงของคลื่นหรือความเร็ว ระดับความเสียหายของ อาคารได้มาจาก 1) ความเสียหายเฉลี่ยที่คำนวณจากความเสียหายของเสา และ 2) ความเสียหายโดยรวม จากการ ศึกษาพบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสามีค่ามากเมื่อความเร็วมีค่ามากกว่า 1.7 ม./วินาที แต่ความเสียหายไม่มี แนวโน้มที่ชัดเจนกับความเร็วกระแสน้ำ ส่วนความเสียหายโดยรวมมีแนวโน้มที่ชัดเจนกับความสูงคลื่น ผู้วิจัยได้เสนอ เส้นโค้งความบอบบาง (Fragility curve) โดยใช้ฟังก์ชันควรจะเป็นมากที่สุด (Maximum likelihood function) เพื่อการ วิเคราะห์ความเสี่ยงต่อไป

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา.....
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา A-nt

4770358021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : TSUNAMI / NUMERICAL SIMULATION / DAMAGE LEVEL / FRAGILITY CURVE

PIYAWAT FOYTONG: FRAGILITY OF BUILDINGS DAMAGED IN THE 26 DECEMBER 2004

TSUNAMI: THESIS ADVISOR: ASST.PROF. ANAT RUANGRASSAMEE, Ph.D., 228 pp.

The 26 December 2004 tsunami caused severe damage to engineering structures. A series of field survey was conducted by researchers to learn about the damage to buildings, bridges, ports, and retaining walls. The collected damage database is useful for tsunami risk analysis in the future. The risk analysis needs to information about the relationship of damage level of buildings and inundation height or current velocity. This study develops the relationships based on data obtained from hardest hit areas: Khaolak area in Phungnga and Kamala Beach in Phuket.

There are 94 reinforced concrete buildings in the damage database,. The column size of buildings with damage levels ranging from no damage up to collapse is about 0.15 m. x 0.15 m. Hence, the test was conducted on a column with the section size. It is found that the maximum lateral force capacity is 5.74 kN and the relationship between crack width and energy absorption ratio is in an exponential form. The energy absorption ratio is defined as a weight factor, which is used to calculate the average damage of all columns in a building.

Tsunami simulation is conducted to evaluate current velocity. The tsunami numerical simulation is verified by tide gauge data, wave height, and inundation area from observed data. From the tsunami numerical simulation, the wave height about the sea level at the time of the tsunami is about 8 m and the current velocity is about 5 m/s in Khaolak area. The wave height is about 5 m and the current velocity is about 2.5 m/s at Kamala Beach. The relationships of damage level of buildings and inundation height or current velocity are investigated. The damage level of a building is obtained from 1) the average damage of all columns in the building using weighting factors and 2) overall damage of the building from visual observation. The damage is large when the current velocity is larger than 1.7 m/s. There is no clear correlation between damage levels and current velocity. Since there is good correlation between the overall damage level and inundation height, the fragility curve is developed using the maximum likelihood function.

DepartmentCIVIL ENGINEERING. Student's signature
 Field of study .CIVIL ENGINEERING. Advisor's signature
 Academic year2006.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์เป็นอย่างยิ่งจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ในฐานะประธานกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ไชยศิริ ในฐานะกรรมการสอบที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอกราบขอบคุณ อ. ดร. วีระ เหมืองสิน ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงเพื่อการวิเคราะห์แบบจำลองในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ นาวาเอกคมสัน กลิ่นสุคนธ์ และกรรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชยนาวี (กรมเจ้าท่า) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลการจดบันทึกของสถานีวัดน้ำในเหตุการณ์สึนามิ เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547 และขอขอบคุณ เรือเอกสุขสันต์ สือสกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลลักษณะพื้นที่ท้องน้ำบริเวณริมชายฝั่งจังหวัดพังงา และจังหวัดภูเก็ต ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ และคณะที่อนุเคราะห์ข้อมูลการสำรวจพื้นที่ของการท่วมถึงของสึนามิ, รองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะที่อนุเคราะห์ข้อมูลสำรวจภาคตัดขวางความสูง ซึ่งใช้ในการสอบเทียบผลจากแบบจำลองสึนามิในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนทั้งในอดีตและปัจจุบันและที่สำคัญผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจรวมทั้ง เพื่อนๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องทุกท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. สมบูรณ์ เชียงฉิน ที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 หลักการทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ลักษณะทางกายภาพของสึนามิ.....	5
2.2 การจำลองสึนามิ.....	6
2.3 หลักการการคำนวณ.....	13
2.4 ความเสถียรในการคำนวณ.....	22
2.5 ความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ.....	24
2.6 การกำหนดค่าเริ่มต้นและสภาวะที่ขอบ.....	25
2.7 สภาพขอบของการไหลขึ้นบนชายฝั่ง.....	27
2.8 การหาค่าความเร็วของอนุภาคน้ำ.....	30
2.9 ค่าเริ่มต้นของการเกิดสึนามิ.....	30
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 ความเสียหายของอาคาร.....	78
3.1 รูปแบบการจดบันทึกข้อมูลในการสำรวจ.....	78
3.2 ระบบฐานข้อมูล.....	85
3.3 ข้อมูลความเสียหายของอาคาร.....	86
บทที่ 4 การทดสอบ.....	89
4.1 การทดสอบเสา.....	89

4.2 การปรับแก้ผลการทดสอบ	91
4.3 ผลการทดสอบเสา.....	92
บทที่ 5 แบบจำลองสีนามิ	103
5.1 ทฤษฎีที่ใช้ในการจำลอง.....	103
5.2 ขอบเขตในการวิเคราะห์.....	103
5.3 ข้อมูลภูมิประเทศและความลึกท้องน้ำ	105
5.4 การเลือกช่วงเวลาแต่ละชั้น.....	111
5.5 ลักษณะของรอยเลื่อน.....	118
5.6 การกำหนดตำแหน่งจุดตรวจวัดต่างๆที่ใช้พิจารณา.....	119
5.7 การสอบเทียบแบบจำลอง	122
5.8 ผลการวิเคราะห์.....	128
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นกับความเร็วกระแสน้ำ.....	157
5.10 การเปรียบเทียบความเร็วของหน้าคลื่น.....	158
บทที่ 6 ความบอบบางของโครงสร้าง	166
6.1 ความบอบบางของเสา	166
6.2 ความบอบบางของอาคาร.....	167
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย	175
รายการอ้างอิง.....	177
ภาคผนวก	180
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	228

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลสถานีวัดคลื่น 7 สถานีที่กระจายอยู่บริเวณชายฝั่งของประเทศไทย (จาก Siripong และคณะ, 2005)	34
2.2 เกณฑ์การแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่ (จาก Papadopoulos และ Imamura, 2001)	42
2.3 การเปรียบเทียบการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่กับการแบ่งระดับของ Shuto (จาก Shuto, 1991).....	47
2.4 ค่าขนาดความกว้างของช่องกริดที่กว้างที่สุดโดยขึ้นอยู่กับความลาดชันของพื้นที่และคาบ ของคลื่น (จาก Shigihara และ Fujima, 2005).....	52
2.5 ค่าลักษณะต่างๆของรอยเลื่อน (จาก Shigihara และ Fujima, 2005).....	53
2.6 ค่าลักษณะต่างๆ ของรอยเลื่อน (จาก Koshimura และ Takashima, 2005).....	60
2.7 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนตัวของ รอยเลื่อนและระยะเวลาที่รอยเลื่อนใช้ในการยกตัว (จาก Fujii และ Sarake, 2006).....	64
2.8 ค่ามุมต่างๆ, ตำแหน่งและความลึกของรอยเลื่อนย่อย (จาก Fujii และ Sarake, 2006).....	64
2.9 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนย่อยที่ค่าความเร็วการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนต่างๆ (จาก Fujii และ Satake, 2006).....	65
2.10 คุณสมบัติของตัวอย่างชนิด A (จาก Makhlof และ Malhas, 1996).....	74
2.11 คุณสมบัติของตัวอย่างชนิด B (จาก Makhlof และ Malhas, 1996).....	74
3.1 ดัชนีความเสียหายของเสา.....	79
4.1 รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบ.....	93
4.2 คำนำน้หนักสำหรับแต่ละระดับความเสียหาย.....	100
5.1 การเปรียบเทียบช่วงเวลาแต่ละขั้นตามความลึกของท้องน้ำของขอบเขตการคำนวณต่างๆ....	112
5.2 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 1.....	113
5.3 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 2, 3 และ 4.....	113
5.4 ค่าลักษณะต่างๆ ของรอยเลื่อน (จาก Koshimura และ Takashima, 2005).....	118
5.5 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 1.....	120
5.6 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 2.....	120
5.7 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	120
5.8 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต.....	121

ตารางที่	หน้า
5.9 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	121
5.10 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต.....	121
5.11 การวิเคราะห์แบบจำลองได้เปรียบเทียบกับความเร็วหน้าคลื่นกับความเร็วกระแสน้ำซึ่งได้จาก ผลการวิเคราะห์แบบจำลองและความเร็วคลื่นที่ได้จากการคำนวณ จากวิธีทัศน์.....	165
6.1 ค่ามัธยฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหาย ที่ระดับที่พิจารณามีค่าสูงที่สุดของแต่ละระดับความเสียหาย.....	169
6.2 ค่ามัธยฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหาย ของเสาในที่ระดับที่พิจารณามีค่าสูงที่สุดของแต่ละระดับความเสียหายของเสา.....	170



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 รูปที่ 1.1 ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแผ่นไหวและอาฟเตอร์ช็อค (จาก http://www.rpi.edu/~mccafr/sumatra04).....	1
1.2 แผนภูมิอธิบายโครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	3
2.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของคลื่น (จาก http://www.vcharkarn.com).....	5
2.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของคลื่นเข้าสู่ชายฝั่ง (จาก http://www.vcharkarn.com).....	5
2.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของคลื่นเข้าสู่ชายฝั่ง (จาก http://www.vcharkarn.com).....	6
2.4 มวลน้ำในระบบพิกัดฉาก.....	6
2.5 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการคลื่นน้ำตื้น (จาก Imamura, 1996).....	10
2.6 การจัดเรียงตำแหน่งของจุดต่างๆในการคำนวณด้วยหลักการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด (จาก Imamura, 1996)	16
2.7 การไหลแบบคงที่ในรางน้ำเปิด (จาก Joseph และ John, 2002).....	18
2.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลาย (Truncation errors) กับค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปัดเศษ (Rounding-off errors) สำหรับขนาดความกว้างของช่องกริดขนาดต่างๆ (จาก Imamura, 1996).....	25
2.9 แสดงลักษณะความแตกต่างของอัตราการไหลระหว่าง η ที่มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง รูปของ N_2 (จาก Imamura และ Shuto, 1992).....	26
2.10 สภาวะขอบของคลื่นส่วนหน้า (จาก Imamura, 1996).....	27
2.11 การประมาณคลื่นส่วนหน้า (จาก Imamura, 1996).....	28
2.12 หลักการการคำนวณอัตราการไหลระหว่างระหว่างช่องกริดที่อยู่เหนือผิวน้ำ และช่องกริดที่อยู่ใต้ผิวน้ำ (จาก Imamura, 1996)	29
2.13 ลักษณะรอยเลื่อนและตำแหน่งอ้างอิง (จาก Mansinha และ Smylie).....	30
2.14 ผลการสำรวจตำแหน่งและการกระจายตัวของความสูงคลื่นบนชายฝั่งในประเทศไทย (จาก Choi และคณะ, 2005).....	33
2.15 ช่องกริดแบบสามเหลี่ยมในการทำแบบจำลองสึนามิ (จาก Choi และคณะ, 2005).....	33
2.16 ผลการกระจายตัวของความสูงคลื่นบนชายฝั่งในประเทศไทยจากแบบจำลอง (จาก Choi และคณะ, 2005).....	33
2.17 แผนที่แสดงแนวรอยเลื่อนบริเวณตอนเหนือของมหาสมุทรอินเดีย (จาก Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005).....	35

รูปที่	หน้า
2.18 ซากปรักหักพังจากโครงสร้างไม้หลักจากเกิดสึนามิ (จาก Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005).....	36
2.19 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบตามหลักวิศวกรรม (จาก Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005).....	36
2.20 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการออกแบบตามหลักวิศวกรรม (จาก Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005).....	36
2.21 การวิบัติด้วยแรงเฉือนทะเลของกำแพงอิฐ (จาก Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005).....	37
2.22 ความเสียหายของเสาเนื่องจากแรงกระทำจากคลื่น (จาก Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005).....	37
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของอาคาร, ระดับความรุนแรงของสึนามิและระดับความสูง ของคลื่น โดยที่วงกลมคืออาคารยังสามารถต้านทานได้, สีเหลี่ยมคืออาคารได้รับ ความเสียหายบางส่วน, กากบาทคืออาคารถูกพัดพาไปกับน้ำ (จาก Shuto, 1991).....	39
2.24 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการที่ 2.98, 2.99 และ 2.100 (จาก Imamura, 1996)...	48
2.25 ตำแหน่งศูนย์กลางของแผ่นดินไหวและตำแหน่งของสถานีวัดคลื่น (จาก Titov และ Gonzalez, 1997).....	49
2.26 ลักษณะของการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกที่ใช้ในแบบจำลอง (จาก Titov และ Gonzalez, 1997).....	50
2.27 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทำแบบจำลองและข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดคลื่น (จาก Titov และ Gonzalez, 1997).....	51
2.28 การเปรียบเทียบข้อมูลระดับความสูงของคลื่นกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจบริเวณชายฝั่งของ เกาะโอกุชิริ (Okushiri) (จาก Titov และ Gonzalez, 1997).....	51
2.29 ภาพตัดขวางของแหล่งกำเนิดสึนามิจากแบบจำลอง (จาก Shigihara และ Fujima, 2005)....	53
2.30 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการที่ 2.102, 2.103, 2.104 และ 2.105 (จาก Imamura, 1996).....	54
2.31 การเปรียบเทียบระดับความสูงของคลื่นที่ได้จากแบบจำลองกับที่ได้จากการสำรวจ (จาก Shigihara และ Fujima, 2005).....	55
2.32 การกำหนดพื้นที่การคำนวณการเคลื่อนที่ของสึนามิในแบบจำลอง (จาก ปราโมทย์ และคณะ, 2005).....	58

รูปที่	หน้า
2.33 แผนที่ชายฝั่งทะเลอันดามัน แสดงตำแหน่งของสถานีวัดคลื่น 7 แห่ง (จาก ปราโมทย์ และคณะ, 2005)	59
2.34 วิธีการโคจรของดาวเทียม Jason-1 (จาก Koshimura และ Takashima, 2005).....	60
2.35 ลักษณะและตำแหน่งของรอยเลื่อน (จาก Koshimura และ Takashima, 2005).....	61
2.36 การสอบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการสำรวจจากดาวเทียม Jason-1 (จาก Koshimura และ Takashima, 2005).....	61
2.37 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำและวิธีการโคจรของดาวเทียมที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง (จาก Fujii และ Satake, 2006).....	62
2.38 หมายเลยและตำแหน่งของรอยเลื่อนย่อย (จาก Fujii และ Satake, 2006).....	63
2.39 ผลการสอบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลจากสถานีวัดน้ำ (จาก Fujii และ Satake, 2006).....	66
2.40 ผลการสอบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (จาก Fujii และ Satake, 2006).....	66
2.41 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างของค่า PGV สำหรับโครงสร้างชนิดต่างๆ (จาก Yamazaki และ Murao, 2000).....	67
2.42 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างของค่า PGV สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และ อาคารเหล็ก (จาก Yamazaki และ Murao, 2000).....	68
2.43 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็น ที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่ 3 กับค่าอัตราส่วนของการเสียรูป (จาก Aslani และ Miranda, 2005).....	69
2.44 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างสำหรับความสัมพันธ์ 3 ค่าระหว่างความน่าจะเป็นที่จะเกิด ความเสียหายในระดับที่ 3, ค่าอัตราส่วนของการเสียรูปและอัตราส่วนแรงเฉือนแนวตั้ง (จาก Aslani และ Miranda, 2005).....	70
2.45 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างที่เกิดความเสียหายในแต่ละระดับสำหรับกรณี SAME-MEDIUM (จาก Saxena และคณะ, 2000).....	72
2.46 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายที่ระดับ 3 หรือมากกว่าที่กรณีต่างๆ (จาก Saxena และคณะ, 2000).....	72
2.47 ตัวอย่างทดสอบชนิด A (จาก Makhlof และ Malhas, 1996).....	73
2.48 ตัวอย่างทดสอบชนิด B (จาก Makhlof และ Malhas, 1996)	73
2.49 การติดตั้งตัวอย่างในการทดสอบ (จาก Makhlof และ Malhas, 1996).....	74
2.50 ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างชนิด B: G1, G2 และ G3 (จาก Makhlof และ Malhas, 1996).....	75

รูปที่	หน้า
2.51 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวกับความหนาของคอนกรีตหุ้ม (จาก Makhlouf และ Malhas, 1996).....	77
3.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 0.....	80
3.2 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 1.....	80
3.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 2.....	81
3.4 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 3.....	81
3.5 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 4.....	82
3.6 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 5.....	82
3.7 ความเสียหายโดยรวมของอาคารระดับไม่เกิดความเสียหาย.....	83
3.8 ความเสียหายโดยรวมของอาคารระดับเสียหายในชั้นส่วนรอง.....	84
3.9 ความเสียหายโดยรวมของอาคารระดับเสียหายในชั้นส่วนหลัก.....	84
3.10 ความเสียหายโดยรวมของอาคารระดับโครงสร้างวิบัติ.....	85
3.11 หน้าต่างของข้อมูลความเสียหายของอาคารและรูปของอาคาร (จาก http://evr.eng.chula.ac.th/earthquake/damagesurvey/view.asp).....	86
3.12 การกระจายตัวของข้อมูลความเสียหาย.....	87
3.13 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง.....	88
4.1 รายละเอียดหน้าตัดเสา.....	90
4.2 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ.....	90
4.3 ภาพประกอบการปรับแก้เนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนสมการที่ 4.1.....	92
4.4 รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกระทำด้านข้างที่ยังไม่ปรับแก้ และปรับแก้แล้วกับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา.....	94
4.5 ตำแหน่งและสัญลักษณ์ของเหล็กยื่นของหน้าตัดเสา.....	94
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง NE กับอัตราการเสียรูปของเสา.....	95
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง SE กับอัตราการเสียรูปของเสา.....	95
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง NW กับอัตราการเสียรูปของเสา.....	95
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง SW กับอัตราการเสียรูปของเสา.....	95
4.10 รูปแบบการแตกร้าวของเสาที่อัตราการเสียรูปต่างๆ.....	97
4.11 ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวของเสาที่สภาวะสุดท้าย (ณ อัตราการเสียรูป 6.6%).....	98
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยแตกร้าวในสภาวะที่มีแรงด้านข้างกระทำและ ที่ไม่มีแรงด้านข้างกระทำ.....	99

รูปที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยการแตกร้าวกับอัตราการเสียรูปของเสา.....	100
4.14 อธิบายการหาค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับ.....	100
4.15 การแบ่งพื้นที่ได้การเพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับ.....	101
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวกับค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับ.....	102
5.1 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณและตำแหน่งจุดตรวจวัดบริเวณเสาหลัก จังหวัดพังงา.....	104
5.2 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.1.....	106
5.3 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.1.....	106
5.4 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 2 และตำแหน่งจุดตรวจวัด.....	107
5.5 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.2.....	107
5.6 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.2.....	107
5.7 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเสาหลัก จังหวัดพังงา และตำแหน่งจุดตรวจวัด.....	108
5.8 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.7.....	108
5.9 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต และตำแหน่งจุดตรวจวัด.....	109
5.10 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.9.....	110
5.11 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเสาหลัก จังหวัดพังงา และตำแหน่งจุดตรวจวัด.....	110
5.12 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต และตำแหน่งจุดตรวจวัด.....	111
5.13 หมายเลขของรอยเล็กน้อยและตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 1.....	114
5.14 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 2.....	114
5.15 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 1 ที่จุด 1.....	115
5.16 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 1 ที่จุด 2.....	115
5.17 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 1 ที่จุด 3.....	115
5.18 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 1 ที่จุด 4.....	116
5.19 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 2 ที่จุด 1.....	116
5.20 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 2 ที่จุด 2.....	116
5.21 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 2 ที่จุด 3.....	117

รูปที่	หน้า
5.22 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 2 ที่จุด 4.....	117
5.23 แนววางตัวและตำแหน่งของรอยเลื่อน (จาก Koshimura และ Takashima, 2005).....	118
5.24 รูปตัดขวางการยกตัวของพื้นเนื่องจากรอยย่อยที่ 1 (Latitude = 5°).....	119
5.25 รูปตัดขวางการยกตัวของพื้นเนื่องจากรอยย่อยที่ 2 (Latitude = 8°).....	119
5.26 เปรียบเทียบข้อมูลจากสถานีวัดน้ำทะเลปานกลางกับผลที่ได้จากแบบจำลอง	122
5.27 เปรียบเทียบข้อมูลจากสถานีวัดน้ำคุระบุรีกับผลที่ได้จากแบบจำลอง.....	123
5.28 เปรียบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นจากแบบจำลองกับข้อมูลการสำรวจโดย DPRI บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	124
5.29 เปรียบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นจากแบบจำลองกับข้อมูลการสำรวจโดย DPRI บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต.....	124
5.30 เปรียบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นบริเวณบ้านบางเนียง จังหวัดพังงาสำรวจโดย รองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะ.....	125
5.31 เปรียบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาสำรวจโดย รองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะ.....	125
5.32 เปรียบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นบริเวณหาดบางเทา จังหวัดภูเก็ตสำรวจโดย รองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะ.....	125
5.33 เปรียบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นบริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ตสำรวจโดย รองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะ.....	126
5.34 เปรียบเทียบพื้นที่ของการท่วมถึงจากแบบจำลองกับข้อมูลการสำรวจโดย รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ และคณะบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	127
5.35 เปรียบเทียบพื้นที่ของการท่วมถึงจากแบบจำลองกับข้อมูลการสำรวจโดย รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ และคณะบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต.....	128
5.36 ความสูงคลื่นที่จุด 2 ในขอบเขตการคำนวณที่ 1.....	129
5.37 ความสูงคลื่นที่จุด 5 ในขอบเขตการคำนวณที่ 1.....	129
5.38 ความสูงคลื่นที่จุด 9 ในขอบเขตการคำนวณที่ 1.....	129
5.39 ความสูงคลื่นที่จุด 3 ในขอบเขตการคำนวณที่ 2.....	130
5.40 ความสูงคลื่นที่จุด 5 ในขอบเขตการคำนวณที่ 2.....	130
5.41 ความสูงคลื่นที่จุด 6 ในขอบเขตการคำนวณที่ 2.....	130
5.42 ความสูงคลื่นที่จุด 7 ในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	131
5.43 ความสูงคลื่นที่จุด 8 ในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	131

รูปที่	หน้า
5.73 ความสูงที่มวลน้ำขึ้นบนชายฝั่งโดยวัดจากระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิ ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	142
5.74 ความสูงคลื่นริมชายฝั่งโดยวัดจากระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิในขอบเขต การคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต.....	143
5.75 ความสูงที่มวลน้ำขึ้นบนชายฝั่งโดยวัดจากระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิ ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต.....	143
5.76 ความสูงคลื่นจากพื้นดินในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก.....	144
5.77 ความสูงคลื่นจากพื้นดินในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา.....	145
5.78 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 1 จุดที่ 3.....	146
5.79 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 1 จุดที่ 6.....	146
5.80 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 2 จุดที่ 3.....	146
5.81 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 2 จุดที่ 5.....	146
5.82 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา จุดที่ 1.....	147
5.83 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา จุดที่ 3.....	147
5.84 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต จุดที่ 4.....	147
5.85 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต จุดที่ 6.....	147
5.86 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา จุดที่ 2.....	148
5.87 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา จุดที่ 3.....	148
5.88 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต จุดที่ 1.....	148
5.89 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต จุดที่ 3.....	148
5.90 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 1.....	149
5.91 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 1 (ไม่มีสเกล).....	150

รูปที่	หน้า
5.92 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 2.....	151
5.93 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 2 (ไม่มีสเกล).....	151
5.94 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	152
5.95 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา (ไม่มีสเกล).....	152
5.96 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต.....	153
5.97 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต (ไม่มีสเกล)	153
5.98 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	154
5.99 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา (ไม่มีสเกล).....	154
5.100 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต.....	155
5.101 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต (ไม่มีสเกล)	155
5.102 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.98.....	156
5.103 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.98.....	156
5.104 ภาพตัดขวางหน้าตัด 3-3 ของรูปที่ 5.98.....	156
5.105 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.100.....	157
5.106 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.100.....	157
5.107 ภาพตัดขวางหน้าตัด 3-3 ของรูปที่ 5.100.....	157
5.108 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นกับความเร็วกระแส.....	158
5.109 ตำแหน่งจุดสอบเทียบความเร็วกระแสน้ำ บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา.....	159
5.110 ตำแหน่งจุดสอบเทียบความเร็วกระแสน้ำ บริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต.....	159
5.111 เฟรมต่างๆ ที่แสดงคลื่นยักษ์เคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่งโดยแต่ละเฟรมห่างกัน 1/25 วินาที.....	160
5.112 เฟรมต่างๆ ที่แสดงสึนามิเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่ง จุดที่ 1 บริเวณหาดป่าตอง โดยแต่ละเฟรมห่างกัน 1/25 วินาที.....	161
5.113 การวัดระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดที่ใช้คำนวณหาความเร็วคลื่นจากวีดีทัศน์ จุดที่ 1 บริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต.....	161

รูปที่	หน้า
5.114 เฟอร์นิเจอร์ที่แสดงสึนามิเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่ง จุดที่ 2 บริเวณหาดป่าตอง โดยแต่ละเฟอร์นิเจอร์ห่างกัน 1/25 วินาที.....	162
5.115 การวัดระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดที่ใช้คำนวณหาความเร็วคลื่นจากวิดีโอที่ จุดที่ 2 บริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต.....	162
5.116 ตำแหน่งจุดในแบบจำลองที่ใช้หาความเร็วหน้าคลื่น.....	163
5.117 หน้าคลื่นลูกที่ 1 ในบริเวณเขากลาง จังหวัดพังงา ของทั้ง 6 จุด จากจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 6 ตามลำดับ.....	164
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายเฉลี่ยของเสาในอาคารหลังนั้นๆ กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1.....	166
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายเฉลี่ยของเสาในอาคารหลังนั้นๆ กับค่าความเร็วคลื่น.....	167
6.3 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายโดยรวมของอาคารในระดับความเสียหาย ในโครงอาคารรองกับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1.....	169
6.4 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายโดยรวมของอาคารในระดับความเสียหาย ในโครงอาคารหลักกับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1.....	169
6.5 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายโดยรวมของอาคารในระดับความเสียหาย โครงสร้างวิบัติกับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1.....	170
6.6 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 1 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1.....	171
6.7 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 2 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1.....	171
6.8 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 3 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1.....	171
6.9 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 4 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1.....	172
6.10 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 5 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1.....	172
6.11 ความน่าจะเป็นที่เกิดความเสียหายโดยรวมในระดับความเสียหายในโครงอาคารรอง กับค่าความเร็วคลื่น.....	173
6.12 ความน่าจะเป็นที่เกิดความเสียหายโดยรวมในระดับความเสียหายในโครงอาคารหลัก กับค่าความเร็วคลื่น.....	173

รูปที่

หน้า

6.13 ความน่าจะเป็นที่เกิดความเสียหายโดยรวมในระดับความเสียหายโครงสร้างวิบัติกับ ค่าความเร็วคลื่น.....	174
---	-----



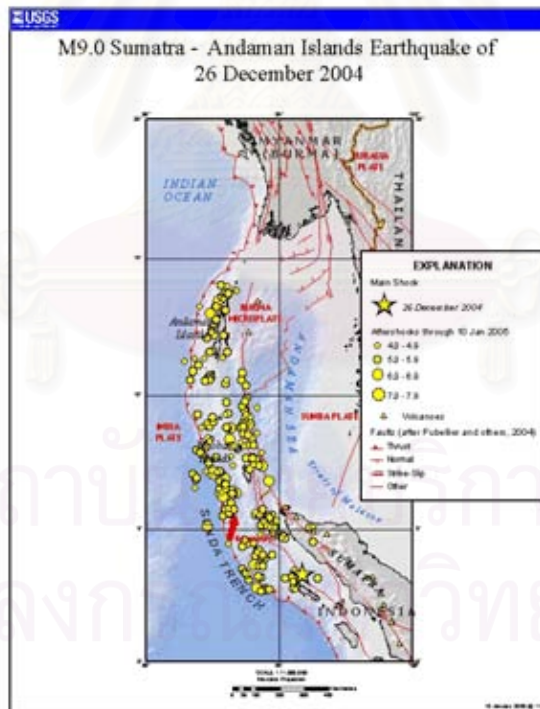
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

เมื่อวันอาทิตย์ที่ 26 ธันวาคม 2547 เวลา 00:58:50 (UTC) หรือเวลาในประเทศไทย 07:58 น. ได้เกิดปรากฏการณ์แผ่นดินไหวขนาด 9.0 ริกเตอร์ จากข้อมูลการบันทึกของ USGS แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นครั้งนี้จัดเป็นอันดับ 4 ของโลก จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่บริเวณตอนเหนือของเกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย (3.298°N, 95.779°E) จากการที่พื้นท้องทะเลยกตัวขึ้นหลายเมตรทำให้น้ำปริมาณมากได้เคลื่อนตัวอย่างทันทีทันใดทำให้เกิดสึนามิ (Tsunami) ในมหาสมุทรอินเดียซึ่งได้สร้างความเสียหายอย่างรุนแรงบริเวณชายฝั่งตะวันตกบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย ระดับความสูงของคลื่นประมาณ 8-12 เมตร ในบริเวณจังหวัดพังงาและจังหวัดภูเก็ต



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวและอาฟเตอร์ช็อค

(<http://www.rpi.edu/~mccafr/sumatra04/>)

จากข้อมูลการสำรวจภาคสนามทำให้ทราบถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นอาคาร, สะพาน, ท่าเรือและโครงสร้างกำแพงกันดิน การสำรวจภาคสนามทำให้ได้ข้อมูลความเสียหายของอาคารและลักษณะต่างๆของสึนามิซึ่งได้แก่ ระดับความเสียหายของโครงสร้าง ระดับความสูงของคลื่นและระยะห่างของโครงสร้างจากชายฝั่ง เป็นต้น ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงของโครงสร้างจากสึนามินั้นจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายกับระดับความสูงของคลื่นหรือความเร็วคลื่น เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองสึนามิ (Tsunami simulation) โดยใช้หลักการการแพร่กระจายของคลื่นน้ำตื้น เพื่อหาข้อมูลความเร็วคลื่นของสึนามิ และทำการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของสมรรถนะของโครงสร้างกับผลการสำรวจในภาคสนามซึ่งวัดขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง จากนั้นได้พัฒนาเส้นโค้งความบอบบาง (Fragility curve) ที่แสดงระดับความเสียหายโดยรวมของโครงสร้างกับความสูงคลื่นและความเร็วคลื่น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. เพื่อพัฒนาเส้นโค้งความบอบบาง (Fragility curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายโดยรวมกับความสูงและความเร็วของคลื่นบนชายฝั่งเพื่อสามารถประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างจากสึนามิ
2. เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเสียหายของเสากับขนาดความกว้างของรอยแตกกว้างของโครงสร้างซึ่งได้จากการทดสอบ
3. เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายของเสากับความสูงคลื่นและความเร็วคลื่น

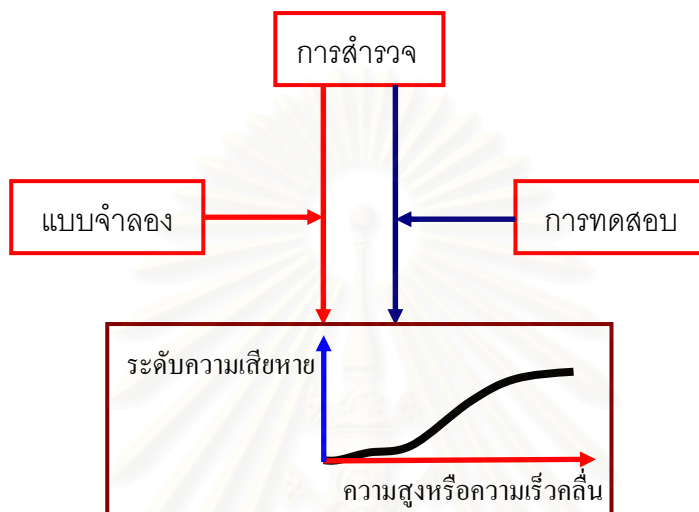
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.15 ม. x 0.15 ม. ซึ่งเป็นขนาดของเสาที่ใช้กันโดยทั่วไปในพื้นที่ที่ประสบภัยสึนามิ
2. ทำการวิเคราะห์แบบจำลองสึนามิโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ใน 2 บริเวณคือบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ตและบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาเนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดความเสียหายมาก

1.4 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างเพื่อใช้ในการประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างเนื่องจากสึนามิ ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ข้อมูลการสำรวจ (Observed data), การทดสอบ (Testing) และแบบจำลอง (Simulation)



รูปที่ 1.2 แผนภูมิอธิบายโครงสร้างวิทยานิพนธ์

1.4.1 การสำรวจ

จากการสำรวจภาคสนามในเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547 ได้จัดบันทึกข้อมูลความเสียหายของอาคารและโครงสร้างต่างๆ ค่าพิกัดตำแหน่งของอาคาร, ค่าความสูงคลื่นเหนือพื้นที่ 1 ของอาคารเป็นต้น ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเสียหายโดยรวมของอาคารและความเสียหายของเสา รายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 3

1.4.2 การทดสอบ

เนื่องจากอาคาร 1 หลังมีจำนวนเสาหลายต้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยความเสียหายของเสาของอาคารหลังนั้นๆ จึงได้ทำการทดสอบเสานขนาดหน้าตัด 0.15 ม. x 0.15 ม. เพื่อหาค่าน้ำหนัก (Weight factor) สำหรับแต่ละระดับความเสียหายของเสาในการหาค่าเฉลี่ยความเสียหายของเสา ซึ่งหาได้จากพฤติกรรมการต้านแรงกระทำด้านข้างของเสา รายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 4

1.4.3 แบบจำลองสี่นามิ

จากข้อมูลการสำรวจสามารถจัดบันทึกลักษณะของสี่นามิได้เพียงค่าความสูงคลื่น สำหรับค่าความเร็วคลื่นนั้นสามารถหาได้จากแบบจำลองสี่นามิ ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษา 2 บริเวณได้แก่บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาและบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับความเสียหายมากจากเหตุการณ์สี่นามิที่เกิดขึ้น รายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 5

1.4.4 เส้นโค้งความบอบบาง

จากผลการศึกษาในหัวข้อข้างต้น งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเส้นโค้งความบอบบาง ดังแสดงในบทที่ 6



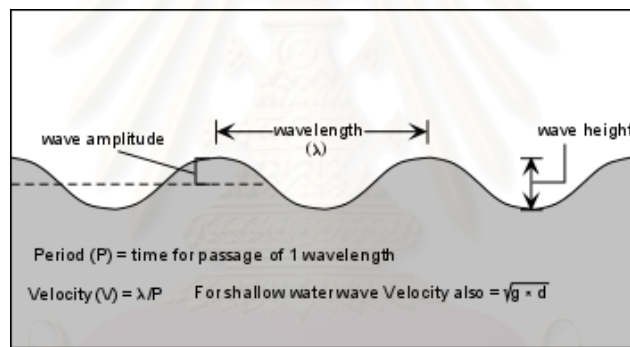
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

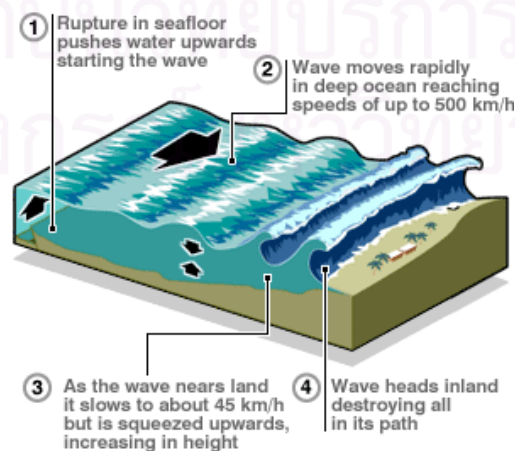
หลักการทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ลักษณะทางกายภาพของสึนามิ

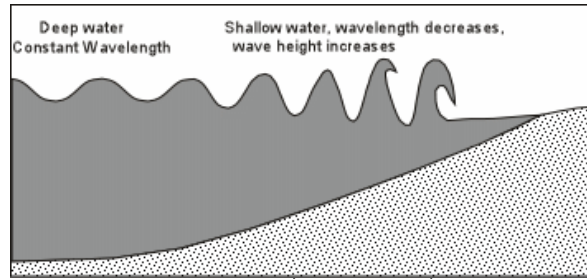
สึนามิส่วนใหญ่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกใต้ทะเลอย่างฉับพลัน อาจจะเป็น การเกิดแผ่นดินถล่มยุบตัวลง หรือเปลือกโลกถูกดันขึ้นหรือยุบตัวลง ทำให้มีน้ำทะเลปริมาตร มหาศาลถูกดันขึ้นหรือยุบตัวลงอย่างฉับพลัน พลังงานจำนวนมหาศาลก็ถ่ายเททำให้เกิดการ เคลื่อนตัวของน้ำทะเลเป็น สึนามิในทะเลลึก ลักษณะของคลื่นแสดงดังรูป 2.1 ความเร็วของสึนามิ ขึ้นอยู่กับความลึกของทะเล เมื่อสึนามิเดินทางมาถึงชายฝั่งทะเลที่ตื้นขึ้นก็จะทำให้ความเร็วของ คลื่นลดลงแต่มีความสูงมากขึ้น ในชายฝั่งที่แคบสึนามิอาจจะมี ความสูงได้หลายเมตร ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของคลื่น (<http://www.vcharkarn.com>)



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของคลื่นเข้าสู่ชายฝั่ง (<http://www.vcharkarn.com>)



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของคลื่นเข้าสู่ชายฝั่ง (<http://www.vcharkarn.com>)

2.2. การจำลองสึนามิ (Tsunami Simulation)

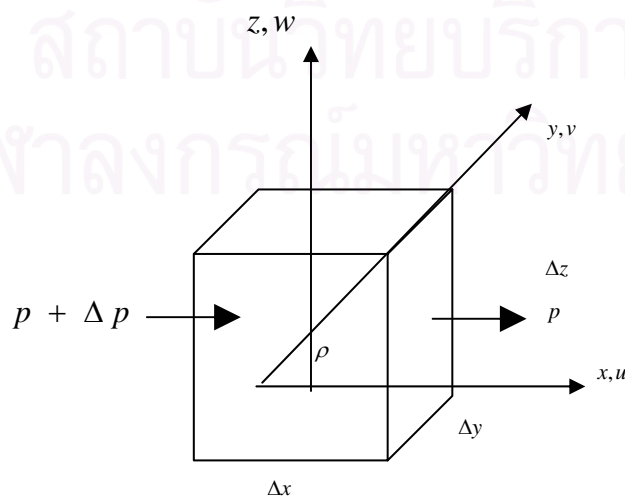
ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหลซึ่งเป็นการวิเคราะห์สมการคลื่นน้ำตื้นที่ใช้ในการศึกษาสึนามิ ซึ่งมีสมมติฐานในการจำลองดังนี้ (Synolakis และ Yalicer, 2006)

1) ไม่คำนึงผลของความเร่งในแนวดิ่งของอนุภาคน้ำ เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

2) ความเร็วของคลื่นในทิศทาง x และ y ไม่ขึ้นกับความลึก โดยความเร็วในแนวระนาบในสมการนี้เป็นค่าความเร็วในแนวระนาบเฉลี่ยตลอดความลึก

เริ่มจากสมการการเคลื่อนที่มาจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตันโดยสมมติอนุภาคน้ำมีขนาดเล็ก ความกว้าง (Δx) ความยาว (Δy) ความสูง (Δz) ดังรูปที่ 2.4 แรงกระทำคิดเฉพาะผลจากแรงดัน ไม่คิดผลแรงเสียดทานระหว่างของไหล, ของไหลไม่มีการยุบตัวและกำหนดรูปเวกเตอร์พิกัดฉากของสนามความเร็วที่แปรผันในระยะทางและเวลาเท่ากับ \vec{V} ซึ่งเคลื่อนที่ใน 3 ทิศทางคือ

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.4 มวลน้ำในระบบพิกัดฉาก

โดยที่

- u คือ ความเร็วของมวลน้ำในทิศทาง x
 v คือ ความเร็วของมวลน้ำในทิศทาง y
 w คือ ความเร็วของมวลน้ำในทิศทาง z

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$F = ma = \rho \Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{D\vec{V}}{Dt} \right) \quad (2.2)$$

โดยที่

- F คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อมวลน้ำ
 m คือ น้ำหนักของมวลน้ำ
 a คือ ความเร่งของมวลน้ำ
 ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ
 $\frac{D\vec{V}}{Dt}$ คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วเทียบกับเวลา

พิจารณาการเคลื่อนที่ในทิศทาง x

$$F_x = ma = \rho \Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{Du}{Dt} \right) \quad (2.3)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ของของไหลที่มีการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง u ในเวลา t จะได้ สมการอนุพันธ์ย่อย (Partial derivative) หาได้จากสมการดังนี้

$$\frac{Du}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \Delta t) - u(x, y, z, t)}{\Delta t} \quad (2.4)$$

การคำนวณอนุพันธ์ย่อย $\frac{Df}{Dt}$ เมื่อ $f(x, t)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาและระยะทาง x สามารถเขียนขยายในเทอมได้ดังสมการ

$$\frac{Df}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, t + \Delta t) - f(x, t)}{\Delta t} \quad (2.5)$$

จากพื้นฐานของแคลคูลัสจะได้

$$f(x + \Delta x, t + \Delta t) \approx f(x, t) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t \quad (2.6)$$

$$\frac{Df}{Dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(x, t) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t - f(x, t)}{\Delta t} = \frac{\partial f}{\partial x} \left[\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \right] + \frac{\partial f}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial t} \frac{dt}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} u + \frac{\partial f}{\partial t} \quad (2.8)$$

การเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศทาง x เทียบกับเวลา จะได้ดังนี้

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$= u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.10)$$

แทนค่าสมการที่ 2.10 ลงในสมการที่ 2.3 จะได้

$$F_x = \rho \Delta x \Delta y \Delta z \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2.11)$$

แรงกระทำ (F) ที่ทำให้มวลน้ำเกิดการเคลื่อนตัว ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะแรงที่เกิดจากแรงดันน้ำในทิศทาง x โดยสมมติให้แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g , Gravity) กระทำในทิศทาง z ดังนั้นในทิศทาง x จึงไม่พิจารณาผลของแรงโน้มถ่วงของโลกและไม่คิดผลของแรงเนื่องจากการหมุนของโลก (Coriolis forces) ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมาก แรงดันที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่นี้เกิดจากผลต่างของแรงดัน (Δp) ระหว่างด้านหน้ากับด้านหลังของมวลน้ำในทิศทาง x กระทำบนพื้นที่เท่ากับ $\Delta y \cdot \Delta z$ ซึ่งทำให้เกิดแรงลัพธ์เท่ากับ $\Delta p \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำเทียบกับระยะทาง ได้ดังนี้

$$\Delta p = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \quad (2.12)$$

ดังนั้นค่าแรงดันในสมการที่ 2.3 คือ

$$F_x = \Delta p \Delta y \Delta z = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.13)$$

แทนค่าแรงที่ได้จากสมการที่ 2.13 ลงในสมการที่ 2.11 จะได้

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t}) \quad (2.14)$$

ในการทำงานเดียวกันพิจารณาการเคลื่อนที่ในทิศทาง y จะได้สมการในลักษณะเดียวกันกับการพิจารณาการเคลื่อนที่ในทิศทาง x ดังนั้นจึงสามารถรวมสมการการเคลื่อนที่ในแนวราบได้ดังนี้

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t}) \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = (u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t}) \quad (2.16)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ในทิศทาง z พิจารณาแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกหรือน้ำหนักของมวลน้ำ (w) รวมด้วยซึ่งเป็นในแรงกระทำ F_z ในแนวดิ่ง จะได้สมการการเคลื่อนที่ในทิศทาง z ดังนี้

$$\text{weight} = \rho(\Delta x \Delta y \Delta z) g \quad (2.17)$$

$$F_z = \frac{\partial p}{\partial z} \Delta z \Delta x \Delta y + \rho \Delta x \Delta y \Delta z \cdot g \quad (2.18)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right) = \rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t}) \quad (2.19)$$

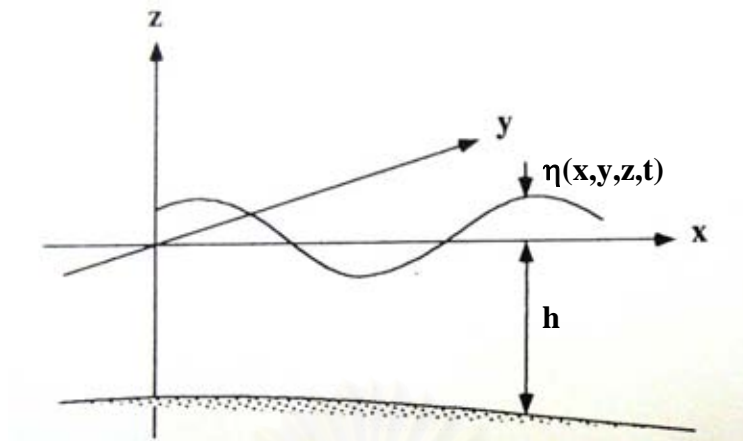
จะได้

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right) = (u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t}) \quad (2.20)$$

จากสมมติฐานของคลื่นน้ำตื้น (Shallow water wave) สำหรับการคำนวณการเคลื่อนที่ของสื่อนามีสมมติความเร็วในแนวดิ่งมีค่าน้อยมากดังนั้น

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right) = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการคลื่นน้ำตื้น (Imamura, 1996)

พิจารณาค่าความดันน้ำที่ความลึกใดๆ ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้คลื่นเกิดการเคลื่อนที่ โดยมีความดันน้ำการกระจายตัวขึ้นกับความลึก (Hydrostatic) ซึ่งค่าความลึกน้ำที่พิจารณารวมค่าความสูง (Amplitude) ของคลื่น $\eta(x, y, z, t)$ ด้วยดังนั้นค่าความดันที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ความลึก z หาได้ดังนี้

$$p = \int \rho g dz + const. = \rho g [\eta(x, y, t) + z] \quad (2.23)$$

แทนสมการที่ 2.23 ลงในสมการที่ 2.15 และ 2.16 จะได้

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} = -g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \quad (2.24)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} = -g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \quad (2.25)$$

จากการศึกษาทราบว่าค่าความเร็วของคลื่นในทิศทาง x และ y มีการแปรเปลี่ยนตามความลึก (z) น้อยมากดังนั้นจึงกำหนดสมมติฐานว่าค่าความเร็วในแนวระนาบไม่ขึ้นกับความลึก โดยความเร็วในแนวระนาบในสมการนี้เป็นค่าความเร็วในแนวระนาบเฉลี่ยตลอดความลึก ซึ่งจะได้สมการการเคลื่อนที่ (Equations of motion) ของคลื่นน้ำตื้น คือ

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.26)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.27)$$

สมการการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation) สามารถหาได้โดยพิจารณาว่าตลอดความลึกเป็นปริมาตรควบคุมขนาด $\Delta x \cdot \Delta y (h + \eta)$ และใช้ความสัมพันธ์เชิงปริมาตรควบคุมพื้นฐาน, หลักความสัมพันธ์การอนุรักษ์มวล, การเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับเวลาเป็นศูนย์ และปริมาณน้ำไหลเข้าเท่ากับไหลออกซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\frac{dm}{dt} = 0 ; \quad \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho dw + \int_s \rho V ds = 0 \quad (2.28)$$

ถ้าพิจารณาการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน w

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho dw = \rho \frac{d\eta}{dt} \quad (2.29)$$

พิจารณาการเคลื่อนที่ใน 2 ทิศทางแกน x, y

$$\int_s \rho V ds = \rho u \frac{\partial(h + \eta)}{\partial x} + \rho v \frac{\partial(h + \eta)}{\partial y} \quad (2.30)$$

แทนค่าสมการที่ 2.29 และ 2.30 ลงในสมการที่ 2.28

$$\rho \frac{\partial \eta}{\partial t} + \rho u \frac{\partial(h + \eta)}{\partial x} + \rho v \frac{\partial(h + \eta)}{\partial y} = 0 \quad (2.31)$$

จะได้สมการหลักของคลื่นน้ำตื้นคือ

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.32)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(u(h+\eta))}{\partial x} + \frac{\partial(v(h+\eta))}{\partial y} = 0 \quad (2.34)$$

พิจารณาการไหลในทิศทาง x และ y กำหนดให้

$$M = u(h+\eta) = uD \quad (2.35)$$

$$N = v(h+\eta) = vD \quad (2.36)$$

โดยที่

- D คือ ความสูงของน้ำทั้งหมด เท่ากับ ความลึก + ความสูงคลื่น
 M คือ อัตราการไหลของน้ำที่หน้าตัดในทิศทาง x
 N คือ อัตราการไหลของน้ำที่หน้าตัดในทิศทาง y

สมการหลักของคลื่นเมื่อคิดผลของแรงเสียดทานพื้นน้ำและไม่คิดผลของแรงเนื่องจากการหมุนของโลกจะได้ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.39)$$

โดยที่

- g คือ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก
 n คือ ความขรุขระของแมนนิ่ง

สึนามิเป็นคลื่นน้ำที่จัดอยู่ประเภทคลื่นน้ำตื้น เป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นยาวมากมีค่าหลายร้อยกิโลเมตร ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกใต้ทะเลอย่างฉับพลัน อาจจะเป็นการเกิดแผ่นดินถล่มยุบตัวลง หรือเปลือกโลกถูกดันขึ้นหรือยุบตัวลง ทำให้มีน้ำทะเลปริมาตรมหาศาลถูกดันขึ้นหรือหลุดตัวลงอย่างฉับพลัน พลังงานจำนวนมหาศาลก็ถ่ายเทไปให้เกิดการเคลื่อนตัวของน้ำทะเลที่เหนือทะเลลึก สึนามิถูกจัดว่าเป็นคลื่นน้ำตื้นคือ คลื่นที่ค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกของน้ำและความยาวคลื่นต่ำมาก ซึ่งในการจำลองสำหรับการวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎี คลื่นยาวซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับสึนามิ โดยในที่นี้จะสมมติให้ความเร่งของมวลน้ำในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ ค่า g คือ ค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก

2.3 หลักการการคำนวณ (Numerical scheme)

2.3.1 หลักการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สำหรับการทำแบบจำลองสึนามิ

Imamura (1996) ได้พัฒนาการคำนวณเพื่อใช้ในการทำแบบจำลองวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) โดยใช้หลักการอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor expansion series) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณพื้นฐานและได้รับการยอมรับมากที่สุด ในหลักการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์นั้นเป็นการแบ่งพื้นที่ที่สนใจออกเป็นพื้นที่เล็กๆและทำการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง (Continuous) ดังนั้นการหาอนุพันธ์ (Derivative) จึงสามารถหาค่าได้โดยการประมาณโดยใช้ผลของความแตกต่างในลักษณะพีชคณิตของสมการผลต่างอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ จนกระทั่งปัจจุบันหลักการการคำนวณในลักษณะวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ได้มีผู้คิดค้นวิธีการอย่างมากมายซึ่งมีข้อควรระวังต่างๆเช่น ข้อควรระวังในหลักการพิจารณา, ข้อควรระวังในการแบ่งขนาดความกว้างของช่องกริด (Grid size), สภาวะความเสถียร (Stability condition), ค่าคลาดเคลื่อนที่ใช้ในการกระจายตัวแปร (Discretization errors) และค่าอื่นๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ถูกต้อง (Exact solution) มากที่สุดโดยใช้สมการผลต่างอนุพันธ์ย่อย

ในการศึกษาหลักการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ประการแรกจะทำการพิจารณาหลักการคำนวณที่ขึ้นกับเวลาโดยสามารถแบ่งหลักการออกเป็น 2 ลักษณะคือ การคำนวณในลักษณะหลักการที่ชัดเจน (Explicit scheme) เป็นหลักการสำหรับสมการผลต่าง (Difference equation) ที่มีตัวแปรเพียงตัวแปรเดียว ซึ่งสามารถจัดรูปตัวแปรให้อยู่ในรูปตัวแปรอื่นที่ทราบค่าได้และการคำนวณในลักษณะหลักการปริยาย (Implicit scheme) เป็นหลักการสำหรับสมการผลต่างที่มีตัวแปรหลายตัวแปรซึ่งต้องการสมการหลายสมการที่มีตัวแปรเหล่านั้นเพื่อใช้ในการหาผลเฉลยในขั้นตอนเดียว

หลักการการคำนวณผลต่าง (Difference numerical scheme) ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่ใช้ในการคำนวณการทำให้แบบจำลองคลื่นยาวมี 3 หลักการได้แก่ หลักการการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด (Staggered leap-frog scheme), หลักการของ Crank-Nicholson และหลักการ 2 ขั้นตอน (Two-step) ของ Lax-Wendroff สำหรับแบบจำลองในการศึกษาซึ่งนี้เป็นแบบจำลอง TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunami) ได้ใช้หลักการการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดดโดยใช้หลักการที่ชัดเจน (Explicit scheme) ในการคำนวณและมีการประมาณอนุพันธ์อันดับที่ 2 ซึ่งเป็นหลักการที่ไม่ต้องการเวลาในการประมวลผลของหน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit, CPU) ของเครื่องคอมพิวเตอร์มากสำหรับการคำนวณ 1 ขั้นตอนและมีเงื่อนไข (Criteria) เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่เสถียร (Stable results) สำหรับหลักการของ Crank-Nicholson ที่มีหลักการพื้นฐานเกือบทั้งหมดเป็นหลักการปริยาย (Implicit scheme) ดังนั้นจึงต้องการเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มี CPU สูงๆและมีความจำมากๆ ซึ่งในปัจจุบันหลักการของ Crank-Nicholson ที่เป็นต้นแบบนั้นไม่มีการนำมาใช้แล้วและสำหรับหลักการ 2 ขั้นตอน (Two-step) ของ Lax-Wendroff นั้นถูกนำมาใช้เพื่อการคำนวณคลื่นกระแทก (Shock wave) หรือเพื่อการคำนวณความสูงคลื่นบนชายฝั่งที่มีความชันมากเนื่องจากมีข้อดีในการลดความแกว่งกวัด (Oscillation) ของการคำนวณที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องจากการคำนวณจากการกระจายตัวแปรเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่เสถียร

2.3.2 หลักการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด (Staggered leap-frog scheme)

Imamura (1996) ได้แสดงตัวอย่างในเบื้องต้นสำหรับการอธิบายหลักการนี้เป็นสมการหลัก (Governing equation) ในช่วงที่เป็นทะเลลึกของการเคลื่อนที่ของคลื่นยาวแบบเชิงเส้น (Linearized long wave) ที่ปราศจากผลของความเสียดทานของท้องน้ำ (Bottom friction) สำหรับการเคลื่อนที่ใน 1 มิติซึ่งเขียนได้โดย

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial t} + C_0^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2.40)$$

โดยที่

C_0 คือ ค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ (Propagation velocity) ของคลื่นยาวแบบเชิงเส้น

จากหลักการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดดสามารถทำการกระจายตัวแปรได้ดังสมการที่ 2.41

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\left[\eta_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{j+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} \right]}{\Delta t} + \frac{\left[M_{j+1}^n - M_j^n \right]}{\Delta x} + O(\Delta x^2) = 0 \\ \frac{\left[M_j^{n+1} - M_j^n \right]}{\Delta t} + g \frac{\left(h_{j+\frac{1}{2}} + h_{j-\frac{1}{2}} \right)}{2} \frac{\left[\eta_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right]}{\Delta x} + O(\Delta x^2) = 0 \end{array} \right. \quad (2.41)$$

โดยที่

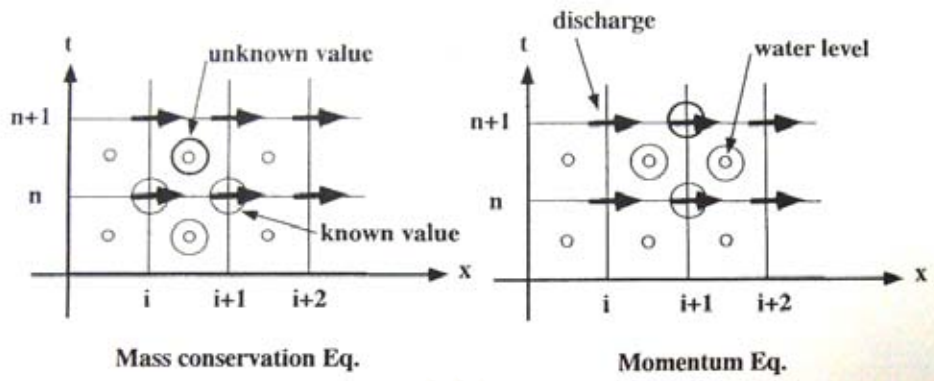
$\Delta x, \Delta t$ = ขนาดความกว้างของช่องกริด (Grid size) ในทิศทาง x และขนาดความกว้างของช่วงเวลา

$O(\Delta x^2)$ = ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการตัดปลาย (Truncation error) สำหรับการประมาณอนุพันธ์อันดับที่ 2

สำหรับในการกระจายตัวแปรในการคำนวณสำหรับตัวแปร $\eta(x, y)$ และ $M(x, t)$ สามารถแสดงได้โดยใช้หลักการกบกระโดดได้ดังสมการ

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(x, t) = \eta\left(\left(j + \frac{1}{2}\right)\Delta x, \left(n + \frac{1}{2}\Delta t\right)\right) = \eta_{j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \\ M(x, t) = M(j\Delta x, n\Delta t) = M_j^n \end{array} \right. \quad (2.42)$$

หลักการในการคำนวณของหลักการนี้สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.6 ยกตัวอย่างเช่นสมการที่ 2.41 การสับหลักช่วงว่าง (Staggered in space) และเวลาซึ่งต่างจากหลักการชนิดอื่นๆของหลักการแบบกบกระโดด การสับหลักในช่วงว่างจะสับหลักเฉพาะการประมาณอนุพันธ์อันดับที่ 2 และการสับหลักในช่วงเวลาจะสับหลักเฉพาะการประมาณอนุพันธ์อันดับที่ 1



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตำแหน่งของจุดต่างๆในการคำนวณด้วยหลักการสับเปลี่ยนแบบกบกระโดด (Imamura, 1996)

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางตัวเลขขนาดกริดนี้จะกำหนดให้เหมาะสมกับเงื่อนไขของ Imamura number (I_m) โดยจะกำหนดให้มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง

$$I_m = \Delta x / 2h\sqrt{1 - K^2} \quad (2.43)$$

$$K = \sqrt{gh} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.44)$$

และพิจารณาตามเงื่อนไขของ CFL (Courant-Friedrichs-Levy condition) คือ

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \sqrt{2gh_{\max}} \quad (2.45)$$

โดยที่

- K คือ คอเรนตัมเบอร์ (Courant Number)
- h คือ ความลึกเฉลี่ยของท้องน้ำ บริเวณที่พิจารณา
- h_{\max} คือ ความลึกมากที่สุดของท้องน้ำ บริเวณที่พิจารณา
- Δt คือ ช่วงเวลาคำนวณ แต่ละครั้ง

2.3.3 หลักการสำหรับความเสียดทานของท้องน้ำ (Scheme for bottom friction)

Imamura (1996) ได้เสนอว่าพจน์ความเสียดทาน (Friction) ทำให้เกิดความไม่เสถียร (Instability) เมื่อใช้การกระจายตัวแปรโดยใช้หลักการที่ชัดเจน (Explicit scheme) ในการคำนวณ เพื่อทำการศึกษาความไม่เสถียรอย่างง่าย ๆ นี้ยกตัวอย่างเช่นสมการโมเมนตัมเชิงเส้นซึ่งไม่มีพจน์การกระจายตัวของคลื่น (Convection terms) ต่อไปนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M |M| = 0 \quad (2.46)$$

สามารถเขียนในรูปของหลักการที่ชัดเจนได้ดังนี้

$$M^{n+1} = \left[1 - \frac{\Delta t gn^2 |M|}{D^{7/3}} \right] M^n - gD \Delta t \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (2.47)$$

เมื่อความเร็วมีค่ามากขึ้นหรือความถี่รวมมีค่าน้อยลงค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์ (Absolute of coefficient) ของพจน์แรกด้านขวามือของสมการที่ 2.47 มีค่ามากกว่าค่าอื่น ๆ ในสมการที่ซึ่งคูณด้วยค่าความเร็วและทำให้เกิดความไม่เสถียรในการคำนวณ ในการลดปัญหานี้สามารถทำได้โดยทำการกระจายตัวแปรโดยใช้หลักการปริยาย (Implicit scheme) สำหรับพจน์ความเสียดทาน ยกตัวอย่างเช่นรูปแบบความเสถียรอย่างง่าย (Simple implicit form)

$$M^{n+1} = \frac{M^n}{\left[1 + \frac{\Delta t gn^2 |M|}{D^{7/3}} \right]} - \frac{gD \Delta t \frac{\partial \eta}{\partial x}}{\left[1 + \frac{\Delta t gn^2 |M|}{D^{7/3}} \right]} \quad (2.48)$$

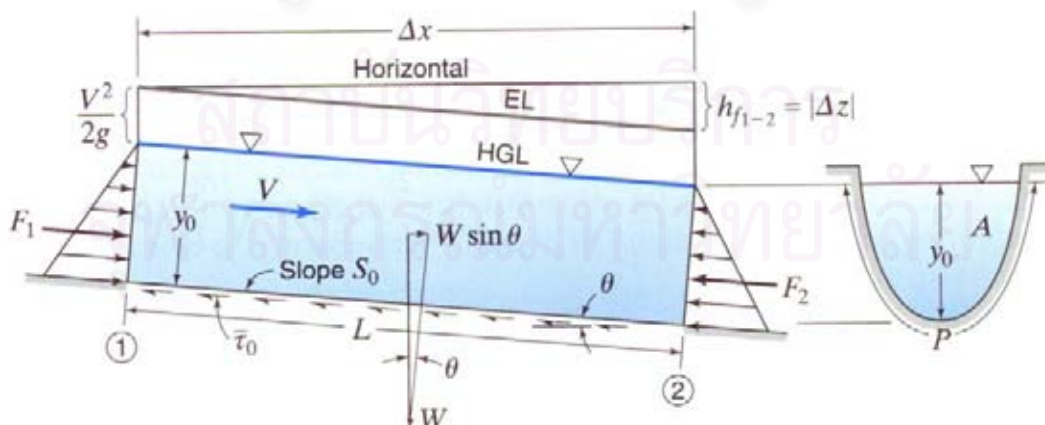
เป็นที่สังเกตเห็นได้ถึงความเสถียรของการคำนวณ มีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากตัวคูณในด้านขวามือของสมการที่ 2.48 นั้นมีค่าน้อยกว่าพจน์อื่นๆ อย่างไรก็ตามผลจากความเสียดทานของคลื่นในบริเวณน้ำตื้นนั้นมีความจำเป็นเพื่อให้ผลเฉลยจากการคำนวณได้ค่าที่เหมาะสมถึงแม้จะทำให้เกิดความไม่เสถียรในการคำนวณ สำหรับรูปแบบปริยาย (Implicit form) อีกรูปแบบหนึ่งคือรูปแบบที่รวมพจน์ความเสียดทานเข้าไปด้วยและทำการกระจายตัวแปรได้ดังสมการ

$$M^{n+1} = M^n \left[\frac{1 - \frac{\Delta t g n^2 |M|}{2D^{7/3}}}{1 + \frac{\Delta t g n^2 |M|}{2D^{7/3}}} \right] - gD\Delta t \frac{\partial \eta}{\partial x} \left[\frac{1}{1 + \frac{\Delta t g n^2 |M|}{2D^{7/3}}} \right] \quad (2.49)$$

จะเห็นได้ว่าผลเฉลยที่ได้จากหลักการนี้มีความเสถียรในการคำนวณเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากตัวคูณขยาย (Amplification factor) ยังคงมีค่าน้อยกว่าค่าอื่น ๆ แต่มีค่ามากกว่าตัวคูณในสมการที่ 2.48 นั้นหมายความว่าผลจากการคำนวณโดยการกระจายเชิงตัวเลข (Numerical dissipation) มีผลทำให้ผลเฉลยที่ได้มีค่ามากขึ้น

จากหลักการข้างต้นนี้จะเกิดความแกว่งในการคำนวณ (Numerical oscillation) เมื่อพิจารณาคลื่นส่วนหน้า (Wave front) เนื่องจากตัวคูณนั้นจะมีค่าติดลบในช่วงน้ำตื้นที่ซึ่งความลึกรวมมีค่าน้อย นั่นคือมวลของน้ำจะถูกผลักไปด้านหลังด้วยพจน์ความเสียดทานที่มีค่ามากซึ่งไม่เป็นความจริง ดังนั้นจึงควรเลือกขั้นตอนที่จะทำการกระจายตัวแปรโดยหลักการปริยายเพื่อใช้สำหรับพจน์ความเสียดทานของท้องน้ำ โดยที่พจน์ความเสียดทานของท้องน้ำนั้นก็คือค่าความขรุขระของ Manning (Manning's roughness)

ค่าความขรุขระของ Manning (Manning's roughness) สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาการไหลแบบคงที่ (Uniform flow) ในรางน้ำเปิดดังรูปที่ 2.7 โดยที่หน้าตัดของรางน้ำและความเร็วในการไหลคงที่ พิจารณาแรงในแกน x



รูปที่ 2.7 การไหลแบบคงที่ในรางน้ำเปิด (Joseph และ John, 2002)

$$\sum F_x = 0; \quad w \sin \theta = \bar{\tau}_0 PL \quad (2.50)$$

$$\gamma AL \sin \theta = \bar{\tau}_0 PL \quad (2.51)$$

โดยที่

w คือ มวลของน้ำ

$\bar{\tau}_0$ คือ ค่าหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ย $= f \rho \frac{v^2}{2}$

P คือ ความยาวของผิวว่างน้ำ

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

v คือ ความเร็วของการไหล

γ คือ ความถ่วงจำเพาะของน้ำ

ดังนั้นสามารถหาพลังงานที่หายไปจากการไหล (h_f) ได้

$$\gamma A \frac{h_f}{L} = \bar{\tau}_0 P \quad (2.52)$$

$$h_f = \frac{\bar{\tau}_0 PL}{\gamma A} \quad (2.53)$$

แทนค่าหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ยลงในสมการที่ 2.53

$$h_f = f \rho \frac{v^2}{2} \frac{PL}{\gamma A} \quad (2.54)$$

จาก $\gamma = \rho g$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.54 จะได้

$$h_f = f \frac{PL}{A} \frac{v^2}{2g} \quad (2.55)$$

$$v^2 = \frac{2gAS}{f \cdot P} \quad (2.56)$$

โดยที่

S คือ ความชัน $\frac{h_f}{L}$ ซึ่งสำหรับรางน้ำเปิด $S_0 = S$

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{\frac{1}{3}}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad v^2 = \frac{2gAS_0}{f \cdot P} \quad (2.57)$$

$$v = \sqrt{\frac{2gAS_0}{f \cdot P}} \quad (2.58)$$

จากสมการของแมนนิง

$$v = \frac{1}{n} \left[\frac{A}{P} \right]^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.59)$$

แทนค่าสมการที่ 2.59 ในสมการที่ 2.58

$$\frac{1}{n} \left[\frac{A}{P} \right]^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{2gAS_0}{f \cdot P}} = \sqrt{\frac{2g}{f}} \left[\frac{A}{P} \right]^{\frac{1}{2}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.60)$$

$$\frac{1}{n} \left[\frac{A}{P} \right]^{\frac{1}{6}} = \sqrt{\frac{2g}{f}} \quad (2.61)$$

$$n = \sqrt{\frac{f}{2g}} \left[\frac{A}{P} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.62)$$

สำหรับกรณีการไหลในรางน้ำสี่เหลี่ยมกว้าง b ลึก y

$$A = by; \quad P = b + 2y \quad (2.63)$$

$$\frac{A}{P} = \frac{by}{b + 2y} = \frac{y}{1 + \frac{2y}{b}} \quad (2.64)$$

ในกรณีคลื่นน้ำตื้น $\frac{b}{y} \rightarrow \infty$ ดังนั้น

$$\frac{A}{P} = y \quad (2.65)$$

แทนค่าสมการที่ 2.65 ในสมการที่ 2.62

$$n = \sqrt{\frac{f}{2g}} y^{\frac{1}{3}} \quad (2.66)$$

ให้ความลึกน้ำ $y = D$ ดังนั้น

$$n^2 = \frac{f}{2g} D^{\frac{1}{3}} \quad (2.67)$$

$$f = \frac{2gn^2}{D^{\frac{1}{3}}} \quad (2.68)$$

จาก $\tau_0 = f\rho \frac{v^2}{2}$ แทนค่า f จากสมการที่ 2.68

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{2gn^2}{D^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{v^2}{2} = \frac{gn^2}{D^{\frac{1}{3}}} v^2 \quad (2.69)$$

สำหรับสมการที่ 2.69 เป็นการไหลในทิศทางเดียวดังนั้นเมื่อพิจารณาการไหลใน 2 ทิศทาง

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{\frac{1}{3}}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.70)$$

โดยที่

u คือ ความเร็วในทิศทาง x

v คือ ความเร็วในทิศทาง y

ดังนั้นเมื่อเขียนในรูปอัตราการใช้ในทิศทาง x (M) และ y (N) โดยกำหนดให้

$$M = uD; \quad N = vD \quad (2.71)$$

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{\frac{7}{3}}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.72)$$

สำหรับแกน y พิจารณาในทำนองเดียวกันซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{\frac{7}{3}}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.73)$$

2.4 ความเสถียรในการคำนวณ (Stability)

เนื่องจากการเคลื่อนตัว (Propagation) ของสัญญาณเป็นการรวมปัญหาในหลายด้าน แนวความคิดที่ทำให้เกิดความเสถียรในการคำนวณนั้นมีความจำเป็นมากเพื่อให้ได้ผลเฉลยจากการคำนวณที่สมเหตุสมผล (Reasonable results) จากการศึกษาการคำนวณแบบจำลองที่ผ่านมาในการผลเฉลยนั้นไม่พิจารณาผลของขนาดความกว้างของช่องกริดและลำดับขั้นเวลา (Time step) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความไม่เสถียร (Instability) ในการคำนวณ เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่เสถียรนี้จึงได้กำหนดเงื่อนไขเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นว่าการคำนวณมีความเสถียรในแต่ละขั้นตอนการคำนวณ จากหลักการของฟูเรียร์ (Fourier) หรือหลักการของวอนนิวแมนน์ (von Nuemann) ซึ่งเป็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อให้ได้เงื่อนไขความเสถียรสำหรับการคำนวณต่างๆ ซึ่งในการวิเคราะห์ได้ใช้หลักการการคำนวณแบบเชิงเส้นดังสมการ

$$F = D + \varepsilon \quad (2.74)$$

โดยที่

F = ผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณจริง

D = ผลเฉลยที่แม่นยำตรง (Exact solution) ของสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

ε = ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปัดเศษ (Rounding-off error) ในการคำนวณ

ผลเฉลยจากการคำนวณ, (F), จะต้องสอดคล้องกับสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ที่กำหนดไว้ ยกตัวอย่างเช่น การใช้หลักการความแตกต่างจากจุดกลาง (Central difference scheme) สำหรับสมการการพาของคลื่น (Convection equation)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + C \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (2.75)$$

จะได้

$$D_j^{n+1} + \varepsilon_j^{n+1} = D_j^n + \varepsilon_j^n - C \frac{\Delta t}{2\Delta x} [D_{j+1}^n + \varepsilon_{j+1}^n - D_{j-1}^n - \varepsilon_{j-1}^n] \quad (2.76)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลเฉลยที่ถูกต้อง, (D), จะต้องสอดคล้องตามสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์และเมื่อพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการปัดเศษ

$$\varepsilon_j^{n+1} = \varepsilon_j^n - C \frac{\Delta t}{2\Delta x} [\varepsilon_{j+1}^n - \varepsilon_{j-1}^n] \quad (2.77)$$

นั่นคือ D และ ε จะต้องสอดคล้องตามสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สมการเดียวกัน โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนจากการคำนวณและผลเฉลยที่ถูกต้องต่างขึ้นอยู่กับพจน์ของเวลาซึ่งมีความสำคัญมากเพื่อให้ได้การวิเคราะห์ที่เสถียร สำหรับปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear problem) หลักการข้างต้นนี้ไม่สามารถใช้ได้ ดังนั้นจึงใช้อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) ในการหาค่าคลาดเคลื่อนสำหรับปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้ ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$\varepsilon(x, t) = \sum_m^{\infty} e^{at} e^{ik_m x} \quad (2.78)$$

โดยที่

k = จำนวนจริงหรืออาจเป็นจำนวนเชิงซ้อน

i = $\sqrt{-1}$ (เฉพาะในหัวข้อนี้)

เมื่อแทนสมการที่ 2.78 ลงในสมการที่ 2.77 จะได้

$$e^{a\Delta t} = 1 - \frac{r}{2} [e^{ik_m \Delta x} - e^{-ik_m \Delta x}] = 1 - r \cos \beta \quad (2.79)$$

โดยที่

$$r = \text{ค่าการแบ่งส่วน (Ration) ของความเร็วของคลื่น (Wave celerity) เพื่อความรวดเร็วในการคำนวณหรือเรียกว่า Courant number}$$

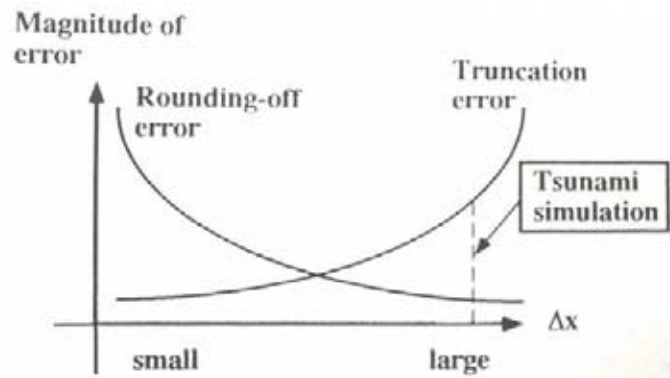
$$\beta = k_m \Delta x = \text{Non-dimensional wave number}$$

$$|e^{a\Delta t}| = \text{อัตราส่วนของค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการบิดเศษจากขั้นตอน 1 ต่อค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการบิดเศษที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนก่อนหน้า}$$

ดังนั้นถ้าค่า $|e^{a\Delta t}|$ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 นั่นคือไม่เกิดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการบิดเศษระหว่าง 2 ขั้นตอนนั้นหรือเรียกได้ว่าระหว่างขั้นตอน 2 ขั้นตอนนี้สอดคล้องตามเงื่อนไขความเสถียร อย่างไรก็ตามค่า $|e^{a\Delta t}|$ ในสมการที่ 2.79 ไม่ได้สอดคล้องตามเงื่อนไขความเสถียรเสมอไป

2.5 ค่าคลาดเคลื่อนในการคำนวณ (Numerical errors)

ค่าคลาดเคลื่อนในการคำนวณโดยทั่วไปเกิดขึ้นจาก 2 สาเหตุหลัก คือ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการบิดเศษ (Rounding-off errors) และค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลาย (Truncation errors) ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพื่อให้ได้มาซึ่งความถูกต้องในการคำนวณแบบจำลอง ผลเฉลยจากการคำนวณต่างๆอาจได้รับผลจากการบิดเศษเพื่อให้ได้ตัวเลขที่มีนัยสำคัญตามที่กำหนดไว้ในแต่ละขั้นตอนการคำนวณ ซึ่งเป็นสาเหตุของค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการบิดเศษ สำหรับการคำนวณในแบบจำลองสินค้านี้ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการบิดเศษจะมากขึ้นอยู่กับจำนวนช่องกริดที่แบ่งไว้ในขอบเขตการคำนวณ สำหรับค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลายเกิดขึ้นตอนการกระจายตัวแปรเพื่อแทนอนุพันธ์ย่อย (Partial differentiation) ด้วยไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.79 ขนาดของค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลายสามารถแทนด้วย Δx^n ดังนั้นการแบ่งช่องกริดให้มีความละเอียดสูงมากจะทำให้ลดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลาย แต่จะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการบิดเศษนั้นเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลาย (Truncation errors) กับค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปัดเศษ (Rounding-off errors) สำหรับขนาดความกว้างของช่องกริดขนาดต่างๆ (Imamura, 1996)

ตัวอย่างผลเฉลยจากการศึกษาแบบจำลองสึนามิใน 1 มิติ ซึ่งทราบได้ว่าขนาดของค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปัดเศษอยู่ในช่วง 10^{-4} ถึง 10^{-2} โดยทำการคำนวณด้วยนัยสำคัญ 7 ตำแหน่งซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดปลายซึ่งมีค่า 10^{-1} ถึง 10^1 ถึงแม้ว่าในการคำนวณนี้จะสอดคล้องตามเงื่อนไขความเสถียร (Stability condition) ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปัดเศษจึงสามารถละเว้นได้ในการคำนวณแบบจำลองสึนามิ

ค่าคลาดเคลื่อนในการคำนวณแบบจำลองอาจเกิดจากสาเหตุอื่นยกตัวอย่างเช่น การคำนวณการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดบริเวณรอยต่อของเปลือกโลกตามแนวชายฝั่งซึ่งจะทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนที่สูงมากถ้าหากใช้การคำนวณแบบช่องกริดสี่เหลี่ยม (Rectangular grids) และการใช้ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศที่ไม่ถูกต้องซึ่งก็จะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนมีค่าสูงมากในการประมาณความสูงของคลื่นบนชายฝั่ง

2.6 การกำหนดค่าเริ่มต้นและสภาวะที่ขอบ (Initial and Boundary Conditions)

2.6.1 การกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition)

การวิเคราะห์หาระดับความสูงของน้ำที่ยกตัวที่เกิดจากการเคลื่อนของพื้นน้ำในบริเวณที่ทำการพิจารณาโดยใช้หลักการของ Mansinha และ Smylie (1971) โดยการวิเคราะห์จะต้องรู้ค่ากลไกต่างๆของแผ่นดินไหว

2.6.2 สภาวะที่ขอบ (Boundary conditions)

การกำหนดสภาวะที่ขอบบนพื้นดิน จะกำหนดให้มีการสะท้อนกลับหมด ความเร็วที่บริเวณติดกับพื้นดินมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนการกำหนดขอบบริเวณที่เป็นพื้นน้ำ จะกำหนดให้มีการไหลได้อย่างอิสระ ในรูปของอัตราการไหล (Q) และสมมุติให้ $\eta \ll h$ ดังสมการ

$$Q = \sqrt{\frac{(M_1 + M_2)^2}{4} + N_2^2} \quad (2.80)$$

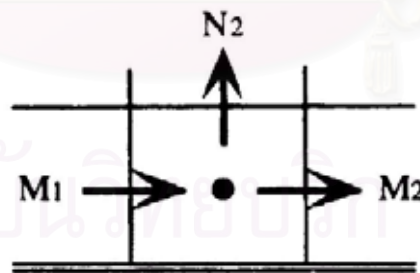
สำหรับ η ที่มีค่าเพิ่มขึ้น

$$\eta = +Q/\sqrt{gh} \quad (2.81)$$

สำหรับ η ที่มีค่าลดลง

$$\eta = -Q/\sqrt{gh} \quad (2.82)$$

ในทีค่าบวกหรือลบของอัตราไหล จะแสดงได้ตามรูปที่ 2.9 จะได้ผลของอัตราการไหลและ η ที่จะมีค่าเพิ่มหรือลดลง ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหล ของ N_2



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะความแตกต่างของอัตราการไหลระหว่าง η ที่มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง รูปของ N_2 (Imamura และ Shuto, 1992)

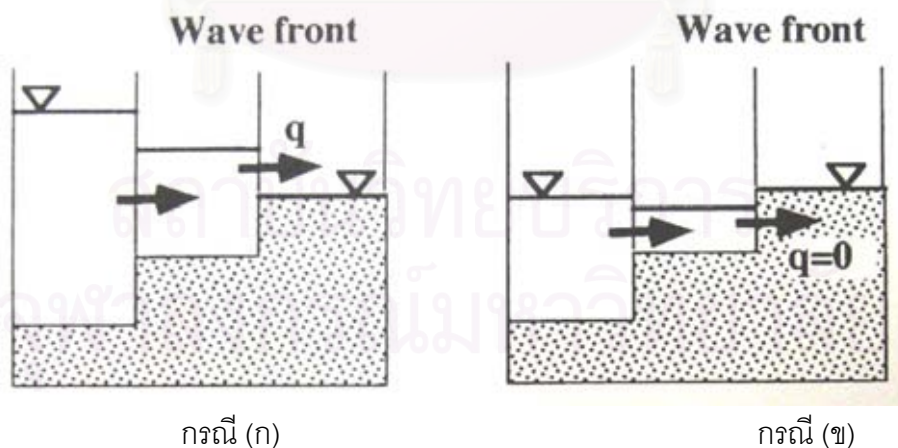
2.7 สภาพขอบของการไหลขึ้นบนชายฝั่ง (Boundary condition for a runup)

2.7.1 สภาพและการประมาณคลื่นส่วนหน้า (Condition of wave front and its estimation)

การไหลขึ้นบนชายฝั่งของสึนามิ (Runup) จะพิจารณาเฉพาะการคำนวณแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear computation) เนื่องจากในทฤษฎีการคำนวณที่เป็นแบบเชิงเส้นไม่สามารถใช้กับบริเวณน้ำตื้นหรือบนพื้นดินได้ สำหรับเงื่อนไขในการกำหนดว่าช่องกริดนั้นจะอยู่เหนือผิวน้ำ (Dry) หรืออยู่ใต้ผิวน้ำ (Submerged) ได้กำหนดไว้ดังนี้

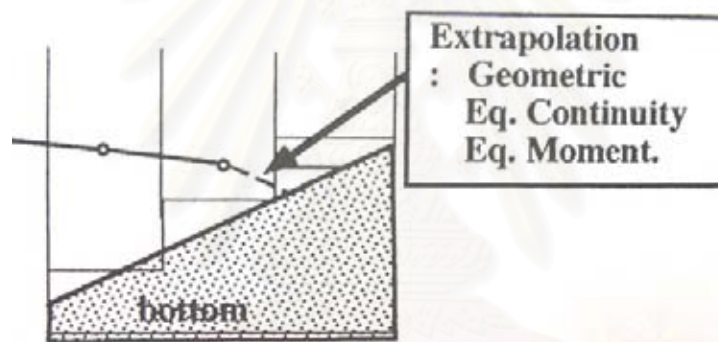
$$\begin{cases} D = h + \eta > 0, \\ D = h + \eta \leq 0, \end{cases} \quad (2.83)$$

รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างการสับหลักแบบข้ามช่องว่าง (Space) และเวลา (Time) ณ ตำแหน่ง $j + \frac{1}{2}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของช่องกริดที่อยู่เหนือผิวน้ำ (Dry) ในขณะที่ ณ ตำแหน่ง $j - \frac{1}{2}$ นั้นตำแหน่งของช่องกริดอยู่ใต้ผิวน้ำซึ่งคลื่นส่วนหน้า (Wave front) ควรอยู่ที่ตำแหน่งระหว่างช่องกริดที่อยู่เหนือผิวน้ำและอยู่ใต้ผิวน้ำ สำหรับแบบจำลองนี้ในการคำนวณอัตราการไหล (Discharge) ตามแนวขอบเขตระหว่างช่องกริด 2 ลักษณะนี้จะทำการคำนวณเมื่อระดับความสูงของพื้นดินที่อยู่ในช่องกริดที่อยู่เหนือผิวน้ำนั้นต่ำกว่าระดับความสูงของคลื่นที่อยู่ในช่องกริดที่อยู่ใต้ผิวน้ำดังรูปที่ (2.10ก)



รูปที่ 2.10 สภาพขอบของคลื่นส่วนหน้า (Imamura, 1996)

จากการที่ได้กล่าวข้างต้นในการคำนวณสำหรับคลื่นส่วนหน้าหรือตำแหน่งของช่องกริดที่เป็นขอบเขตแนวชายฝั่งสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการหาค้นส่วนหน้าที่ติดกับแนวชายฝั่งโดยการฉายภาพเงา (Projection) ความสูงของคลื่นในแนวราบของจุดที่อยู่ใต้ผิวน้ำก่อนหน้านั้น 1 จุด จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการเสนอหลักการในการคำนวณสำหรับคลื่นส่วนหน้าได้แก่ การใช้สมการความต่อเนื่อง (Equation of continuity) หรือสมการการเคลื่อนที่ (Equation of motion), การใช้การประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) ความสูงของคลื่นที่จุดที่อยู่เหนือผิวน้ำโดยอ้างอิงจากสมการความต่อเนื่อง, การใช้ค่าความเสียดทานและค่าความเฉื่อยในการประเมินซึ่งเป็นค่าที่มีความสำคัญในการศึกษาคลื่นส่วนหน้า โดยหาค้นส่วนหน้าจากสมมติฐานของ Whitham ซึ่งเป็นวิธีการประมาณที่ดีสำหรับการประมาณอย่างคร่าวๆ ในบริเวณที่อยู่เหนือผิวน้ำและการใช้สมการการเคลื่อนที่รวมผลของหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) ที่อยู่บนพื้นท้องน้ำและค่าความเฉื่อยในการคำนวณ



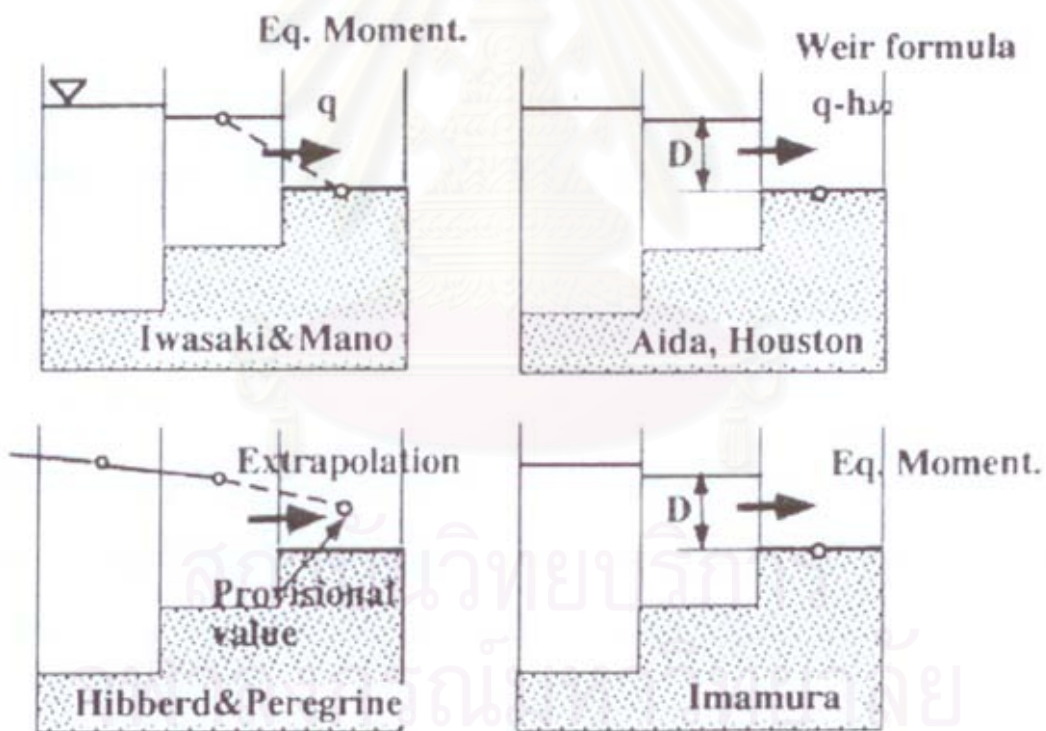
รูปที่ 2.11 การประมาณคลื่นส่วนหน้า (Imamura, 1996)

2.7.2 การคำนวณอัตราการไหล (Calculation of discharge)

สำหรับกรณีของการสับหลักช่องว่างและเวลานั้นไม่ต้องการที่จะคำนวณหาตำแหน่งที่แท้จริง (Exact location) ของคลื่นส่วนหน้าสำหรับบริเวณที่เชื่อมระหว่างช่องกริดที่อยู่เหนือผิวน้ำและช่องกริดที่อยู่ใต้ผิวน้ำ อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาอีกหนึ่งประการในการคำนวณอัตราการไหลระหว่างจุด 2 จุดนี้เนื่องจากในการคำนวณนั้นได้รับผลจากระดับน้ำในลำดับขั้นเวลาต่อไปเป็นอย่างมาก ต่อไปนี้เป็นข้อสรุปวิธีการประมาณอัตราการไหลในตำแหน่งที่ใกล้กับคลื่นส่วนหน้าดังแสดงในรูปที่ 2.12 วิธีของ Iwasaki & Mano ได้กำหนดว่าแนวเชื่อมต่อ (Line connecting) ระหว่างระดับความสูงของน้ำกับความสูงของพื้นดินนั้นสามารถประมาณด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 1 ดังนั้นจากสมการโมเมนตัมที่ไม่มีพจน์ของการพา (Convection term) จึงสามารถใช้ในการคำนวณอัตราการไหลนี้ได้ สำหรับวิธีของ Hibberd & Peregrine นั้นให้ระดับน้ำชั่วคราว (Provisional water level) ในบริเวณที่อยู่เหนือผิวน้ำโดยการประมาณพื้นผิวของน้ำแบบเชิงเส้น

ดังนั้นอัตราการไหลจึงคำนวณได้จากระดับน้ำชั่วคราวนี้ ข้อควรระวังคือในการคำนวณนั้นจะต้องแทนระดับน้ำชั่วคราวที่ได้กำหนดไว้ด้วยระดับน้ำที่คำนวณได้ สำหรับวิธีของ Aida ได้ทำการประมาณอัตราการไหลของช่องกริดที่อยู่เหนือฝื่อน้ำโดยใช้หลักการ Broad-crested weir ซึ่งเป็นการแทนระดับความลึกของน้ำของช่องกริดที่อยู่ใต้ฝื่อน้ำด้วยสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลต่อค่า \sqrt{gh} โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์นี้หาได้จาก Froud number ($= \frac{u}{\sqrt{gh}}$) และวิธีของ Imamura ได้ทำการประมาณอัตราการไหลโดยใช้สมการโมเมนต์โดยตรงซึ่งให้ค่าความลึกของน้ำของช่องกริดที่อยู่เหนือฝื่อน้ำจุดแรกนั้นเท่ากับศูนย์

ในแบบจำลองนี้ค่าระดับความลึกรวมของช่องกริดที่อยู่ใต้ฝื่อน้ำที่มีอัตราการไหลสามารถหาได้โดยผลต่างระหว่างระดับความสูงของพื้นดินของช่องกริดที่อยู่เหนือฝื่อน้ำกับระดับความสูงของน้ำของช่องกริดที่อยู่ใต้ฝื่อน้ำแล้วจึงทำการคำนวณอัตราการไหลโดยวิธีของ Iwasaki & Mano



รูปที่ 2.12 หลักการการคำนวณอัตราการไหลระหว่างระหว่างช่องกริดที่อยู่เหนือฝื่อน้ำและช่องกริดที่อยู่ใต้ฝื่อน้ำ (Imamura, 1996)

2.8 การหาค่าความเร็วของอนุภาคน้ำ (Particle velocities)

การหาค่าความเร็วของอนุภาคน้ำ หาได้จากสมการ 2.4 และ 2.5 จะได้ว่า

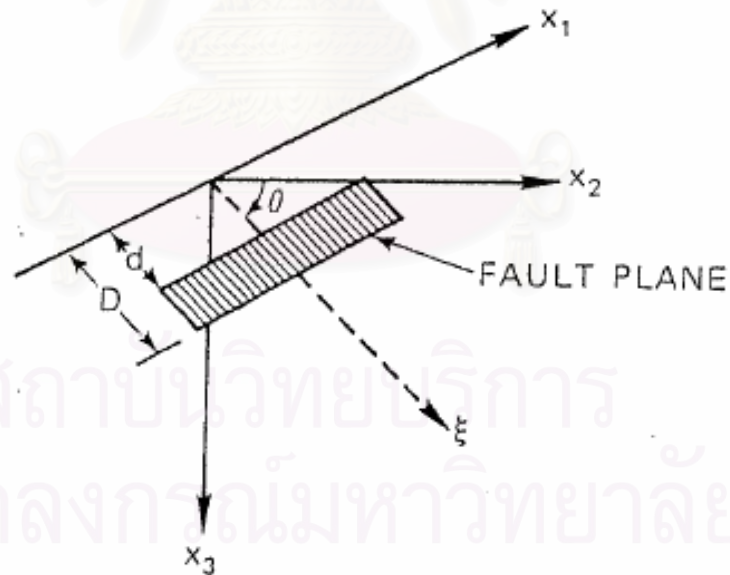
$$u = \frac{M}{D} \quad \text{และ} \quad v = \frac{N}{D} \quad (2.84)$$

การหาค่าความเร็วของอนุภาคน้ำกลางทะเล v เท่ากับ

$$v = \eta \sqrt{g/h} \quad (2.85)$$

2.9 ค่าเริ่มต้นของการเกิดสึนามิ

การหาขนาดของการยกตัวที่จะใช้ในการหาค่าเริ่มต้นของความสูงคลื่นที่เป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดสึนามินั้น โดยทั่วไปจะใช้หลักการการของ Mansinha และ Smylie (1971) ซึ่งได้เสนอสมการหลักดังนี้



รูปที่ 2.13 ลักษณะรอยเลื่อนและตำแหน่งอ้างอิง (Mansinha และ Smylie, 1971)

2.9.1 ระยะเวลาขุดสำหรับการเคลื่อนที่แบบรอยเลื่อนตามแนวระดับ (Strike-slip)

$$\begin{aligned}
 12\pi \frac{u_3}{U_1} = & \cos \theta \left[\ln(R + r_3 - \xi) + (1 + 3 \tan^2 \theta) \ln(Q + q_3 + \xi) - 3 \tan \theta \sec \theta \ln(Q + x_3 + \xi_3) \right] \\
 & + \frac{2r_2 \sin \theta}{R} + 2 \sin \theta \frac{(q_2 + x_2 \sin \theta)}{Q} - \frac{2r^2 \cos \theta}{R(R + r_3 - \xi)} \\
 & + \frac{4q_2 x_3 \sin^2 \theta - 2(q_2 + x_2 \sin \theta)(x_3 + q_3 \sin \theta)}{Q(Q + q_3 + \xi)} \\
 & + 4q_2 x_3 \sin \theta \frac{[(x_3 + \xi_3) - q_3 \sin \theta]}{Q^3} - 4q_2^2 q_3 x_3 \cos \theta \sin \theta \frac{(2Q + q_3 + \xi)}{Q^3 (Q + q_3 + \xi)^2}
 \end{aligned} \tag{2.86}$$

2.9.2 ระยะเวลาขุดสำหรับการเคลื่อนที่แบบรอยเลื่อนแยกตามมุมเท (Dip-slip)

$$\begin{aligned}
 12\pi \frac{u_3}{U} = & \sin \theta \left[(x_2 - \xi_2) \left\{ \frac{2(x_3 - \xi_3)}{R(R + x_1 - \xi_1)} + 4 \frac{(x_3 - \xi_3)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} \right. \right. \\
 & \left. \left. - 4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3) \left(\frac{2Q + x_1 - \xi_1}{Q^3 (Q + x_1 - \xi_1)^2} \right) \right\} - 6 \tan^{-1} \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi)}{q_2 Q} \right\} \right] \\
 & + \cos \theta \left[\ln(R + x_1 - \xi_1) - \ln(Q + x_1 - \xi_1) - 2 \frac{(x_3 - \xi_3)^2}{R(R + x_1 - \xi_1)} \right. \\
 & \left. - 4 \frac{\{(x_3 + \xi_3)^2 - \xi_3 x_3\}}{Q(Q + x_1 + \xi_1)} + 4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3)^2 \left(\frac{2Q + x_1 - \xi_1}{Q^3 (Q + x_1 - \xi_1)^2} \right) \right] \\
 & + 6x_3 \left[\cos \theta \sin \theta \left\{ \frac{2(q_3 + \xi)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} + \frac{x_1 - \xi_1}{Q(Q + q_3 + \xi)} - q_2 \frac{(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} \right\} \right]
 \end{aligned} \tag{2.87}$$

$$R = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2} \tag{2.88}$$

$$Q = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2} \tag{2.89}$$

$$r_2 = x_2 \sin \theta - x_3 \cos \theta, \quad q_2 = x_2 \sin \theta + x_3 \cos \theta \tag{2.90}$$

$$r_3 = x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta, \quad q_3 = -x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta \tag{2.91}$$

โดยที่

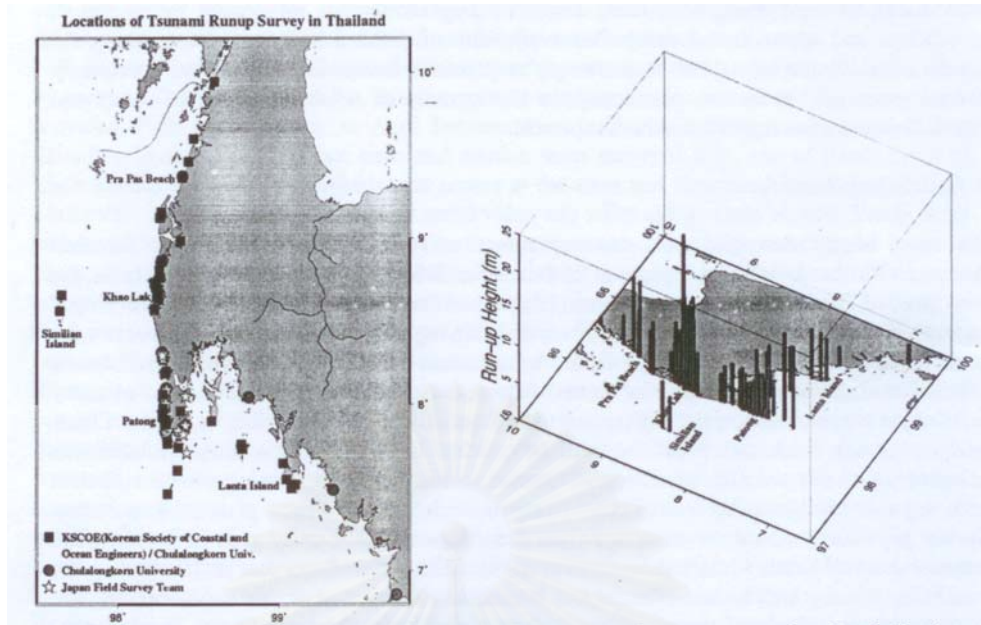
- u_3 คือ ระยะยกตัวในแนวตั้งที่พิกัด (x_1, x_2, x_3)
 U_1 คือ ระยะเคลื่อนที่ในแนว x_1
 U คือ ระยะเคลื่อนที่ในแนว ξ
 θ คือ มุมเท ของรอยเลื่อน
 ξ_1, ξ_2, ξ_3 คือ จุดที่แรงกระทำในระนาบรอยเลื่อน

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

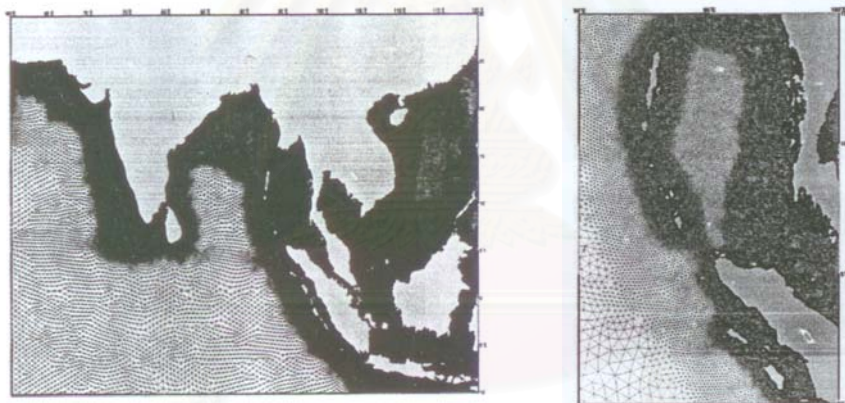
2.10.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของสึนามิต่อชายฝั่งตะวันตกภาคใต้ของประเทศไทย

Choi และคณะ (2005) ได้ทำการสำรวจระดับความสูงของสึนามิ, ความเสียหายและระยะที่น้ำท่วมถึงในบริเวณชายฝั่งของประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลจากการสำรวจที่ทีมสำรวจของประเทศไทยและประเทศญี่ปุ่นได้ทำไว้แล้วซึ่งการสำรวจครั้งนี้จะมุ่งเน้นที่การสำรวจระดับความสูงของคลื่นบริเวณริมชายฝั่งเป็นหลักดังรูปที่ 2.14 จากการศึกษานี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองการแพร่ของสึนามิในมหาสมุทรอินเดียโดยจะทำการแบ่งพื้นที่ที่สนใจเป็นช่องกริดแบบสามเหลี่ยมซึ่งจะแบ่งที่บริเวณริมชายฝั่งดังรูปที่ 2.15 แต่แบบจำลองนี้ไม่สามารถจำลองการเคลื่อนตัวของสึนามิบนชายฝั่งให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547 ได้ โดยแบบจำลองนี้ใช้ข้อมูลระดับความลึกของท้องทะเลจาก ETOPO2 และใช้ข้อมูลลักษณะของรอยเลื่อนของผิวเปลือกโลกจาก Japanese NAIST ซึ่งผลจากการทำแบบจำลองได้ผลดังรูปที่ 2.16 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำแบบจำลองกับผลที่ได้จากการสำรวจจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากแต่ผลที่ได้จากแบบจำลองมีการกระจายตัวทั่วทั้งพื้นที่

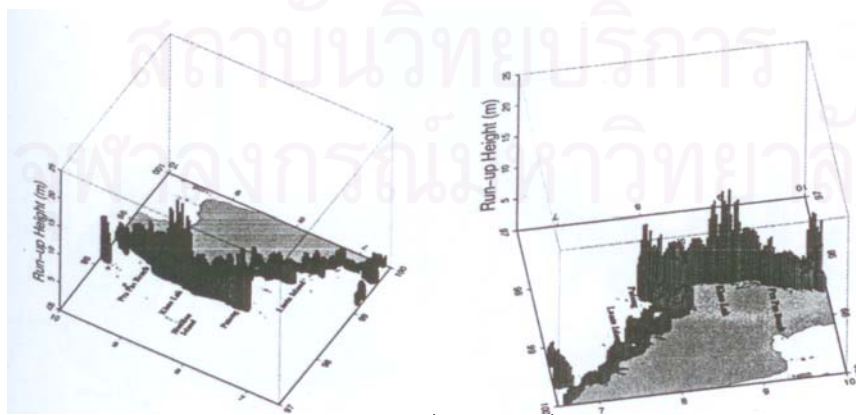
สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.14 ผลการสำรวจตำแหน่งและการกระจายตัวของความสูงคลื่นบนชายฝั่งในประเทศไทย
(Choi และคณะ, 2005)



รูปที่ 2.15 ช่องกริดแบบสามเหลี่ยมในการทำแบบจำลองสึนามิ (Choi และคณะ, 2005)



รูปที่ 2.16 ผลการกระจายตัวของความสูงคลื่นบนชายฝั่งในประเทศไทยจากแบบจำลอง (Choi
และคณะ, 2005)

Siripong และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงบริเวณชายฝั่งของประเทศไทย เนื่องจากสึนามิโดยใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมจาก Landsat TM, ลักษณะภูมิประเทศบริเวณชายฝั่ง, ข้อมูลจากสถานีวัดคลื่น, ระยะน้ำท่วมถึงและการสำรวจภาคสนาม จากการสำรวจพบว่าระดับความสูงของคลื่นประมาณ 8-12 เมตร ในบริเวณจังหวัดพังงา, จังหวัดภูเก็ตและเกาะราชา โดยที่ระดับความสูงของคลื่นที่สูงที่สุดที่ทำการสำรวจได้คือ 20.4 เมตร ที่โรงแรมโดโด ปาล์ม จังหวัดพังงา ซึ่งอยู่ห่างจากชายฝั่ง 50 เมตร จากข้อมูลสถานีวัดคลื่น 7 สถานีที่กระจายอยู่บริเวณชายฝั่งของประเทศไทยพบว่าคลื่นใช้เวลาในการเดินทางถึงจังหวัดภูเก็ต 1.52 ชม. จังหวัดพังงา 2.32 ชม. และจังหวัดกระบี่ 2.42 ชม. โดยที่คาบของคลื่นประมาณ 45-180 นาทีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลสถานีวัดคลื่น 7 สถานีที่กระจายอยู่บริเวณชายฝั่งของประเทศไทย (Siripong และคณะ, 2005)

Tide gauge station	Tsunami onset time (UTC, since earthquake)	Ave. period of the 1 st three waves (min)	Time of highest wave (UTC, since earthquake)	Wave height above MSL	Sequence of the highest wave
Ranong	4:01 (3:02)	53.3	5:20 (4:21)	0.672	First
Kuraburi	3:31 (2:32)	85.3	7:30 (6:31)	0.759	Third
Phuket	2:51 (1:52)	32.5	3:10 (2:11)	0.800	First
Krabi	3:41 (2:42)	63.3	4:50 (3:51)	1.287	First
Kantang	4:56 (3:57)	82.8	5:50 (4:51)	0.780	First
Tarutao	3:31 (2:32)	32.5	4:00 (3:01)	1.073	First
Satun	5:25 (4:26)	68.8	6:37 (5:38)	0.468	First

Ghobarah, Saatcioglu และ Nistor (2005) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมและผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหวและสึนามิ สึนามิที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547 ในบริเวณทิศตะวันตกของเกาะสุมาตราประเทศอินโดนีเซียซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกแผ่นอินเดียน (Indian plate) เคลื่อนที่ซ้อนใต้แผ่นพม่า (Burma plate) ทำให้เกิดการยกตัวขึ้นของระดับน้ำทะเลประมาณ 7.0-10.0 ม. จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลตอนเหนือของเกาะสุมาตราไปทางทิศตะวันตก 155 กม. และห่างจากเมืองอาเจะ (Aceh) ประเทศอินโดนีเซียไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ประมาณ 255 กม. จุดกำเนิดแผ่นดินไหวอยู่ลึกลงไปจากผิวโลก 30 กม. เนื่องจากแนวรอยเลื่อนที่เกือบจะอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ ดังรูปที่ 2.17 ทำให้เกิดสึนามิเคลื่อนที่ออกไปในทิศตะวันออกและทิศตะวันตกด้วยความเร็ว 500-800 กม./ชม. และเมื่อ

เคลื่อนที่เข้าใกล้ชายฝั่งความเร็วจะลดลงเหลือ 20-40 กม./ชม. ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศในพื้นที่นั้น สำหรับบริเวณชายฝั่งของประเทศไทยบริเวณที่เกิดความเสียหายมากได้แก่

- ก) เขาหลัก จ.พังงาซึ่งวัดระดับความสูงของคลื่นบนชายฝั่งได้ 6-12 ม.
- ข) เกาะพีพี จ.กระบี่วัดระดับความสูงของคลื่นบนชายฝั่งได้ 3-6 ม.
- ค) หาดป่าตอง จ.ภูเก็ตวัดระดับความสูงของคลื่นบนชายฝั่งได้ 4-6 ม.

ซึ่งในการวัดความสูงของคลื่นบนชายฝั่งนี้วัดจากคราบน้ำที่หลงเหลืออยู่ตามโครงสร้างต่างๆ สำหรับผลกระทบต่อโครงสร้างนั้นได้แก่ อาคารที่อยู่อาศัย, โรงแรม, สำนักงานของรัฐและโรงงานอุตสาหกรรม ในการศึกษานี้ได้ศึกษาโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบจากสึนามิที่มีความสูงมากกว่าหรือเท่ากับ 4-12 ม. และได้ทำการศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างชนิดต่างๆ รูปที่ 2.18 แสดงภาพโครงสร้างที่ได้รับความเสียหายเนื่องจากสึนามิซึ่งพบเห็นได้ทั้งในประเทศไทยและอินโดนีเซียโดยที่โครงสร้างหลักเป็นโครงสร้างไม้ทั้งหมด โครงสร้างนี้แทบไม่ได้รับความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหวแต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากสึนามิ

A. Ghojarah et al. / Engineering Structures 28 (2006) 312–326



รูปที่ 2.17 แผนที่แสดงแนวรอยเลื่อนบริเวณตอนเหนือของมหาสมุทรอินเดีย (Ghojarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005)



รูปที่ 2.18 ซากปรักหักพังจากโครงสร้างไม้หลักจากเกิดสึนามิ (Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005)



รูปที่ 2.19 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบตามหลักวิศวกรรม (Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005)



รูปที่ 2.20 โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการออกแบบตามหลักวิศวกรรม (Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005)



รูปที่ 2.21 การวิบัติด้วยแรงเฉือนของกำแพงอิฐ (Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005)

รูปที่ 2.19 แสดงภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบตามหลักวิศวกรรมซึ่งสามารถพบเห็นได้ทั้งในประเทศไทยและประเทศอินเดียเช่นกันโดยที่คานและเสาของโครงสร้างนี้เป็นหน้าตัดที่เล็กและมีเหล็กเสริมน้อยกว่าที่มาตรฐานได้กำหนดในการออกแบบเป็นเสาหน้าตัด 200x200 มม. เหล็กเสริมเป็นเหล็กกลมขนาด 8 มม. 4 เส้นดังนั้นโครงสร้างนี้จึงเกิดความเสียหายมากเนื่องจากสึนามิเพราะเสาหน้าตัดดังกล่าวไม่สามารถต้านทานแรงดัดที่เกิดจากสึนามิได้ สำหรับกำแพงเป็นกำแพงอิฐหนา 50 มม. ซึ่งได้รับความเสียหายจากสึนามิในลักษณะการวิบัติด้วยแรงเฉือน อาคารชนิดนี้ได้ทำการสำรวจส่วนมากได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงหรือวิบัติส่วนน้อยที่ยังคงรูปโครงสร้างไว้ได้แต่คานและเสาที่วิบัติแล้ว รูปที่ 2.20 แสดงภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการออกแบบตามหลักวิศวกรรมซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวและได้รับความเสียหายเล็กน้อยเนื่องจากสึนามิ



รูปที่ 2.22 ความเสียหายของเสาเนื่องจากแรงกระทำจากคลื่น (Ghobarah, Saatcioglu, และ Nistor, 2005)

ในการศึกษาได้ทำการสำรวจผลกระทบต่อนั้นส่วนต่างๆของโครงสร้างเนื่องจากสึนามิซึ่งจะเห็นได้ดังรูปที่ 2.21 กำแพงอิฐได้รับความเสียหายในลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทะลุ (Punching shear) โดยที่เป็นการวิบัติที่บริเวณกลางกำแพงมุมที่ 4 ด้านของกำแพงไม่ได้รับความเสียหาย สำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเสาดังรูปที่ 2.22 เป็นอาคารที่ได้เกิดความเสียหายจากระดับความสูงคลื่น 6 ม. โดยความเสียหายของเสานี้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างจากคลื่น

2.10.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการกำหนดการแบ่งระดับความรุนแรง (Intensity) ของสึนามิ

Shuto (1991) ได้ทำการศึกษากำหนดการแบ่งระดับความรุนแรง (Intensity) ของสึนามิ โดยพิจารณาจากระดับความรุนแรงและระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นซึ่งค่า 2 คำนับเป็นตัวแปรในการบอกถึงลักษณะของสึนามิโดยที่ความรุนแรงของสึนามิเป็นตัวแปรที่เกี่ยวกับความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งได้จากการสำรวจและขนาดของสึนามิเป็นตัวแปรที่เกี่ยวกับพลังงานทั้งหมด (Total energy) ของสึนามิโดยอธิบายในลักษณะของขนาดของสึนามิโดยที่ได้เสนอความสัมพันธ์ในการหาขนาดของสึนามิดังสมการ 2.92

$$i = \log_2 H \quad (2.92)$$

ในการศึกษานี้ได้เสนอการกำหนดระดับความสูงของสึนามิที่วัดได้บนชายฝั่งในบริเวณที่ทำการพิจารณา, (H), ซึ่งแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของการประเมินความเสียหายโดยกำหนดไว้ดังนี้

- i คือ ค่าระดับความรุนแรงของสึนามิ
- H คือ ความสูงของยอดคลื่นเหนือพื้นดินบนชายฝั่งสำหรับการวัดความสูงและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเรือประมง
- H คือ ระดับความสูงของน้ำที่ท่วมสำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารบ้านเรือนและผลจากการยับยั้งสึนามิโดยแนวป่า

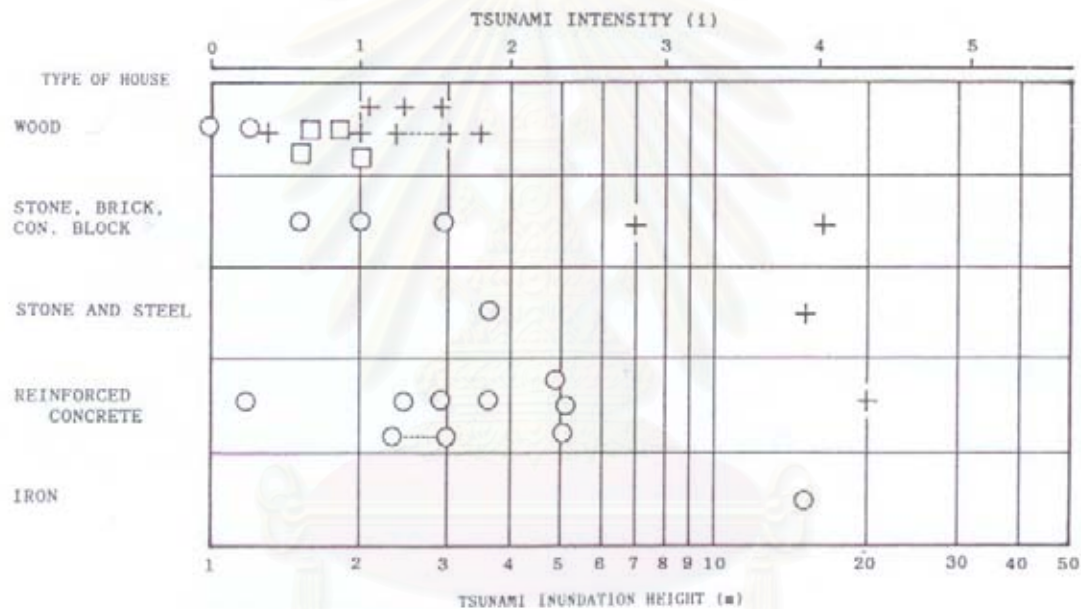
ดังนั้นจึงสามารถทำการกำหนดการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิออกเป็น 6 ระดับโดยแบ่งเป็นช่วงจาก 0 ถึง 5 การจัดเรียงนี้ได้จัดเรียงตามความเสียหายที่เกิดขึ้นหรือการทำลายล้างดังเช่นลักษณะของ H ที่ได้กำหนดไว้ สำหรับความเสียหายของอาคารได้กำหนดในลักษณะอัตราร้อยละ (R_{HD}) โดยที่เป็นความสัมพันธ์จากความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากสึนามิซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R_{HD} = (a + 0.5b)/(a + b + c) \quad (2.93)$$

โดยที่

- a = จำนวนอาคารที่ถูกน้ำพัดพาไปและพังทลายโดยสมบูรณ์
- b = จำนวนอาคารที่ได้รับความเสียหายบางส่วน
- c = จำนวนอาคารที่น้ำท่วมถึง

Shuto ได้ใช้ตัวแปรดังกล่าวในการกำหนดระดับความรุนแรงของสึนามิที่เกิดขึ้นโดยใช้ข้อมูลจากการจัดบันทึกเหตุการณ์การเกิดสึนามิในครั้งต่างๆ จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความรุนแรงของสึนามิกับชนิดของโครงสร้างและระดับความสูงของคลื่นดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของอาคาร, ระดับความรุนแรงของสึนามิและระดับความสูงของคลื่น โดยที่วงกลมคืออาคารยังสามารถต้านทานได้, สีเหลี่ยมคืออาคารได้รับความเสียหายบางส่วน, กากบาทคืออาคารถูกพัดพาไปกับน้ำ (Shuto, 1991)

Papadopoulos และ Imamura (2001) ได้ทำการศึกษาระเบียงระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่ ซึ่งการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิ อย่างไรก็ตามก็ยังเป็นเรื่องที่ยังยากจึงได้มีการเสนอระดับการแบ่งมากมายเพื่อวัดขนาดของสึนามิโดยวัดจากความรุนแรง, ความสูงของคลื่นหรือทั้ง 2 อย่างรวมกัน ในการศึกษาได้นำเสนอการศึกษาระเบียงระดับที่ผ่านมาเป็นเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยแสดงให้เห็นถึงการแบ่งระดับจากความรุนแรงของสึนามิเพียงอย่างเดียว ซึ่งอยู่ในหลักการพื้นฐานและเงื่อนไขที่ได้ทำการปรับปรุง เป็นเหตุผลที่ทำให้ได้ข้อกำหนดหลักการพื้นฐานและการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่ ในการเสนอการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิในยุคแรก ได้ทำการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิโดยได้แบ่งเป็น 6 ระดับ คล้ายคลึงกับการแบ่งระดับสำหรับแผ่นดินไหว นั่นคือ ไม่ได้แบ่งจากการสำรวจลักษณะของสึนามิที่เกิดขึ้นหรือการประมาณตัวแปรทางธรรมชาติ เช่น ความสูงของคลื่น เป็นต้น แต่จะแบ่งจากความเสียหายที่เกิดขึ้น จนกระทั่งได้ทำการพัฒนาแนวคิดการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิโดยการแบ่งตามขนาดของสึนามิ, (m), โดยใช้ระดับความสูงของคลื่นที่สูงที่สุดในการคำนวณหาขนาดของสึนามิโดยใช้สมการ

$$m = \log_2 H_{\max} \quad (2.94)$$

โดยที่

$$H_{\max} = \text{ระดับความสูงของคลื่นที่สูงที่สุดที่สามารถวัดได้บนชายฝั่งหรือระดับตรวจวัดได้จากสถานีวัดคลื่น}$$

การแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามินี้ได้ทำการแบ่งระดับความรุนแรงโดยการแบ่งตามขนาดของสึนามิ โดยแบ่งออกเป็น 6 ระดับ จากระดับ -1 ถึง 4 ซึ่งเป็นการแบ่งระดับที่ใช้มากกว่าขนาดความสูงของคลื่นเป็นเกณฑ์ จากนั้นได้ทำการปรับปรุงการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิโดยใช้ตัวแปรใหม่ในการกำหนด นั่นคือแบ่งโดยใช้ระดับความรุนแรงของสึนามิ, (i_s), โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$i_s = \log(2\sqrt{2}H) \quad (2.95)$$

โดยที่

$$H = \text{ค่าเฉลี่ยของระดับความสูงของสึนามิที่วัดได้บนชายฝั่ง}$$

แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงเป็นการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิโดยใช้ขนาดของสึนามิเนื่องจากใช้ข้อมูลจากความเสียหายที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีการแบ่งระดับโดยใช้ปริมาณทางธรรมชาติ เช่น ความสูงของคลื่น ซึ่งทำการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิที่แบ่งระดับโดยใช้ขนาดของสึนามิ (Tsunami magnitude), M_t หรือ m โดยที่สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$M_t = a \log H + b \log \Delta + D \quad (2.96)$$

โดยที่

H = ความสูงของคลื่นที่สูงที่สุดที่วัดได้จากสถานีวัดคลื่น (m.)

Δ = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวถึงสถานีวัดคลื่น (km)

a, b, D = ค่าคงที่

จากนั้นได้ทำการพัฒนาซึ่งเสนอการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิโดยใช้ขนาดของสึนามิที่แตกต่างซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$ML = 2(\log E - 19) \quad (2.97)$$

โดยที่

E = พลังงานของสึนามิ (Tsunami potential energy)

ในการศึกษากำหนดการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่นี้ได้ทำการแบ่งระดับโดยใช้หลักการ 3 หลักการได้แก่

ก) Independence คือความไม่ขึ้นแก่กันของตัวแปรต่างๆ ทางธรรมชาติ เช่น การทำการสำรวจความสูงของคลื่นด้วยการวัดหรือมองด้วยตาเปล่าทั้งสำหรับแหล่งกำเนิดสึนามิและผลกระทบบนชายฝั่ง หรือระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากแหล่งกำเนิดถึงจุดสำรวจต่างๆ

ข) Sensitivity นั่นคือ รวมการแบ่งระดับสำหรับกรณีที่เกิดผลกระทบจากสึนามิแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

ค) Detailed description ในการแบ่งแต่ละระดับโดยพิจารณาความเป็นไปได้ทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อประชาชน, สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ, ความเสียหายของโครงสร้าง ฯลฯ โดยแบ่งออกเป็น 12 ระดับ ซึ่งจัดเรียงตามผลกระทบต่างๆ ได้แก่ ผลกระทบต่อประชาชน, ผลกระทบต่อวัตถุซึ่งรวมไปถึงเรือขนาดต่างๆและธรรมชาติและ ความเสียหายของอาคารโดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์การแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่ (Papadopoulos และ Imamura, 2001)

ระดับ	ผลกระทบต่อประชาชน	ผลกระทบต่อวัตถุ ซึ่งรวมไปถึงเรือ ขนาดต่างๆและ ธรรมชาติ	ความเสียหายของ อาคาร
1) Not felt	ประชาชนส่วนมาก ไม่รู้สึกรู้หาย	ไม่มีผลกระทบ	ไม่เกิดความ เสียหาย
2) Scarcely felt	ประชาชนที่อยู่บน เรือขนาดเล็กรู้สึกได้ แต่ไม่สามารถ สังเกตได้บนชายฝั่ง	ไม่มีผลกระทบ	ไม่เกิดความ เสียหาย
3) Weak	ประชาชนที่อยู่บน เรือขนาดเล็กเกือบ ทั้งหมดรู้สึกได้ ประชาชนสามารถ สังเกตได้บนชายฝั่ง	ไม่มีผลกระทบ	ไม่เกิดความ เสียหาย
4) Largely observed	ประชาชนที่อยู่บน เรือขนาดเล็ก ทั้งหมดรู้สึกได้และ ประชาชนบางส่วนที่ อยู่บนเรือขนาดใหญ่ ประชาชน เกือบทั้งหมด สามารถสังเกตได้ บนชายฝั่ง	เรือเล็กบางลำถูก พัดขึ้นบนชายฝั่ง	ไม่เกิดความ เสียหาย

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) เกณฑ์การแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่ (Papadopoulos และ Imamura, 2001)

ระดับ	ผลกระทบต่อประชาชน	ผลกระทบต่อวัตถุซึ่งรวมไปถึงเรือขนาดต่างๆและธรรมชาติ	ความเสียหายของอาคาร
5) Strong	ประชาชนที่อยู่บนเรือขนาดใหญ่รู้สึกได้ทั้งหมด ประชาชนทั้งหมดสามารถสังเกตได้บนชายฝั่งประชาชนบางส่วนตื่นตกใจและวิ่งขึ้นบนที่สูง	เรือขนาดเล็กจำนวนมากถูกพัดอย่างรุนแรงขึ้นบนชายฝั่ง ซึ่งบางส่วนเกิดการปะทะกันหรือพลิกคว่ำ เห็นร่องรอยการแยกชั้นของทราย การท่วมของน้ำถึงพื้นที่ทำการเพาะปลูก	การท่วมของน้ำเกิดการท่วมภายนอกของโครงสร้างใกล้ชายฝั่ง
6) Slightly damaging	ประชาชนจำนวนมากตื่นตกใจและวิ่งขึ้นบนที่สูง	เรือขนาดเล็กเกือบทั้งหมดถูกพัดอย่างรุนแรงขึ้นบนชายฝั่ง, เกิดการปะทะกันอย่างรุนแรงหรือพลิกคว่ำ	เกิดความเสียหายในโครงสร้างไม้บางส่วน อาคารที่เป็นอิฐส่วนมากสามารถต้านทานได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) เกณฑ์การแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่ (Papadopoulos และ Imamura, 2001)

ระดับ	ผลกระทบต่อประชาชน	ผลกระทบต่อวัตถุซึ่งรวมไปถึงเรือขนาดต่างๆและธรรมชาติ	ความเสียหายของอาคาร
7) Damaging	ประชาชนเกือบทั้งหมดตื่นตกใจและพยายามวิ่งขึ้นบนที่สูง	เรือขนาดเล็กจำนวนมากเสียหาย เรือขนาดใหญ่บางส่วนเกิดการแกว่ง วัตถุขนาดต่างๆ เกิดการพลิกคว่ำและถูกพัดพาไปกับน้ำ การแยกชั้นของทรายและการทับถมกันของก้อนกรวดหลงเหลือให้เห็น	โครงสร้างไม้จำนวนมากเสียหายและบางส่วนถูกพัดพาไปกับน้ำ เกิดความเสียหายระดับ 1 กับอาคารอีกบางส่วน
8) Heavily damaging	ประชาชนทั้งหมดทำการอพยพขึ้นบนที่สูง โดยมีบางส่วนถูกพัดพาไปกับน้ำ	เรือขนาดเล็กจำนวนมากเสียหายและถูกพัดพาไปกับน้ำ เรือขนาดใหญ่บางส่วนถูกพัดพาขึ้นบนชายฝั่งหรือเกิดการปะทะกับสิ่งอื่นที่อยู่บริเวณนั้นๆ วัตถุขนาดใหญ่ถูกพัดพาไปกับน้ำ ชายหาดถูกกัดเซาะเกิดน้ำท่วมเป็นบริเวณกว้างขึ้น	โครงสร้างไม้เกือบทั้งหมดถูกพัดพาไปกับน้ำ เกิดความเสียหายระดับ 2 กับอาคารอิฐ บางส่วน อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนมากได้รับความเสียหาย บางส่วนเกิดความเสียหายระดับ 1

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) เกณฑ์การแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่ (Papadopoulos และ Imamura, 2001)

ระดับ	ผลกระทบต่อประชาชน	ผลกระทบต่อวัตถุซึ่งรวมไปถึงเรือขนาดต่างๆและธรรมชาติ	ความเสียหายของอาคาร
9) Destructive	ประชาชนจำนวนมากถูกพัดพาไปกับน้ำ	เรือขนาดเล็กเกือบทั้งหมดพังทลายหรือถูกพัดพาไปกับน้ำ เรือขนาดใหญ่จำนวนมากถูกพัดขึ้นบนชายฝั่ง บางลำเกิดความเสียหาย เกิดการกัดเซาะของชายหาด เป็นบริเวณกว้างขึ้น พื้นดินจมอยู่ใต้น้ำ	เกิดความเสียหายระดับ 3 กับอาคาร อีฐจำนวนมาก อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กบางส่วนเกิดความเสียหายระดับ 2
10) Very destructive	เกิดความหวาดผวากับประชาชนทั่วไป ประชาชนเกือบทั้งหมดถูกพัดพาไปกับน้ำ	เรือขนาดใหญ่เกือบทั้งหมดถูกพัดพาขึ้นบนชายฝั่งและจำนวนมากเกิดความเสียหายหรือเกิดการปะทะกับอาคาร ปะการังขนาดเล็กจากห้องทะเลถูกพัดพาขึ้นบนชายฝั่ง รถยนต์พลิกคว่ำและถูกพัดพาไปกับน้ำ เกิดเพลิงไหม้ พื้นดินจมอยู่ใต้น้ำเป็นบริเวณกว้าง	เกิดความเสียหายระดับ 4 กับอาคาร อีฐจำนวนมาก อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กบางส่วนเกิดความเสียหายระดับ 3 เชื้อนกัณดิน วิบัติ ทำเรือเกิดความเสียหาย

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) เกณฑ์การแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่ (Papadopoulos และ Imamura, 2001)

ระดับ	ผลกระทบต่อประชาชน	ผลกระทบต่อวัตถุซึ่งรวมไปถึงเรือขนาดต่างๆและธรรมชาติ	ความเสียหายของอาคาร
11) Devastating	เกิดความหวาดผวากับประชาชนทั่วไป ประชาชนเกือบทั้งหมดถูกพัดพาไปกับน้ำ	เกิดการตัดขาดจากสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิต เกิดเพลิงไหม้มากขึ้น รถยนต์และวัตถุอื่นๆ ถูกพัดพาลงไปในทะเล ปะการังขนาดใหญ่ จากท้องทะเลถูกพัดพาขึ้นบนชายฝั่ง	เกิดความเสียหายระดับ 5 กับอาคารอิฐจำนวนมาก อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กบางส่วนเกิดความเสียหายระดับ 4 โดยที่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวนมากเกิดความเสียหายระดับ 3
12) Completely devastating	เกิดความหวาดผวากับประชาชนทั่วไป ประชาชนเกือบทั้งหมดถูกพัดพาไปกับน้ำ	เกิดการตัดขาดจากสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิต เกิดเพลิงไหม้มากขึ้น รถยนต์และวัตถุอื่นๆ ถูกพัดพาลงไปในทะเล ปะการังขนาดใหญ่ จากท้องทะเลถูกพัดพาขึ้นบนชายฝั่ง	อาคารอิฐทั้งหมดถูกพัดพาไปกับน้ำ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดความเสียหายอย่างน้อยระดับ 3

จากการแบ่งระดับทั้ง 12 ระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่นี้สามารถเปรียบเทียบกับระดับความสูงของคลื่นและเปรียบเทียบกับการแบ่งระดับของ Shuto (1991) ซึ่งได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบการแบ่งระดับความรุนแรงของสึนามิใหม่กับการแบ่งระดับของ Shuto (1991)

I (ระดับความรุนแรง)	H (ม.)	i
1-5	<1.0	0
6	2.0	1
7-8	4.0	2
9-10	8.0	3
11	16.0	4
12	32.0	5

2.10.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองสึนามิ (Tsunami simulation)

Titov และ Gonzalez (1997) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสึนามิที่ใช้หลักการการกำเนิดตามทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงเส้น (Elastic deformation theory) ของเปลือกโลก แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับการจำลองสึนามิจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ใกล้อาลาสกา ซึ่งทำให้เกิดสึนามิบนชายฝั่งทะเลของหมู่เกาะฮาวาย การศึกษานี้ได้ทำการกำหนดส่วนประกอบในการทำแบบจำลองสึนามิโดยวิธีการเคลื่อนตัวของสึนามิ (MOST model) ซึ่งประกอบด้วย

1. การกำเนิด (Generation) โดยการทำให้เกิดการยกตัวของแผ่นเปลือกโลกซึ่งมีผลให้น้ำเกิดการยกตัวเริ่มต้นของน้ำซึ่งก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของน้ำในแนวรัศมีของแหล่งกำเนิด ในแบบจำลองนี้ได้สมมติให้แนวการยกตัวของน้ำมีลักษณะเหมือนกับการยกตัวของแผ่นเปลือกโลก
2. การเคลื่อนตัว (Propagation) เนื่องจากแบบจำลองนี้ได้ทำการจำลองการเคลื่อนตัวตัวของสึนามิจากแหล่งกำเนิดถึงบริเวณชายฝั่งที่พิจารณาเป็นระยะทางหลายพันกิโลเมตร ดังนั้นจึงรวมผลของความโค้งของผิวเปลือกโลกและตัวแปรอื่นๆ ที่สำคัญ เช่น แรงที่เกิดจากการหมุนของโลก (Coriolis force) และการแยกตัวของคลื่น (Dispersion) เป็นต้น การแยกตัวของคลื่นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคลื่น ซึ่งทำให้เกิดคลื่นที่มีความเร็วที่ต่างกัน เนื่องจากความถี่ที่แตกต่างกัน การเคลื่อนตัวของสึนามิในแบบจำลองนี้ได้ใช้สมการคลื่นน้ำตื้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นในพิกัดทรงกลม (Non-linear shallow-water wave equation in spherical coordinates) ซึ่งรวมผลของแรงที่เกิดจากการหมุนของโลก (Coriolis force)

$$h_t + \frac{(uh)_\lambda + (vh \cos \Phi)_\Phi}{R \cos \Phi} = 0 \quad (2.98)$$

$$u_t + \frac{uu_\lambda}{R \cos \Phi} + \frac{vu_\Phi}{R} + \frac{gh_\lambda}{R \cos \Phi} = \frac{gd_\lambda}{R \cos \Phi} + fv \quad (2.99)$$

$$v_t + \frac{uv_\lambda}{R \cos \Phi} + \frac{vv_\Phi}{R} + \frac{gh_\Phi}{R} = \frac{gh_\Phi}{R} - fu \quad (2.100)$$

โดยที่

λ, Φ = ลองติจูด, ละติจูด

h = ความลึกรวม = $h(\lambda, \Phi, t) + d(\lambda, \Phi, t)$

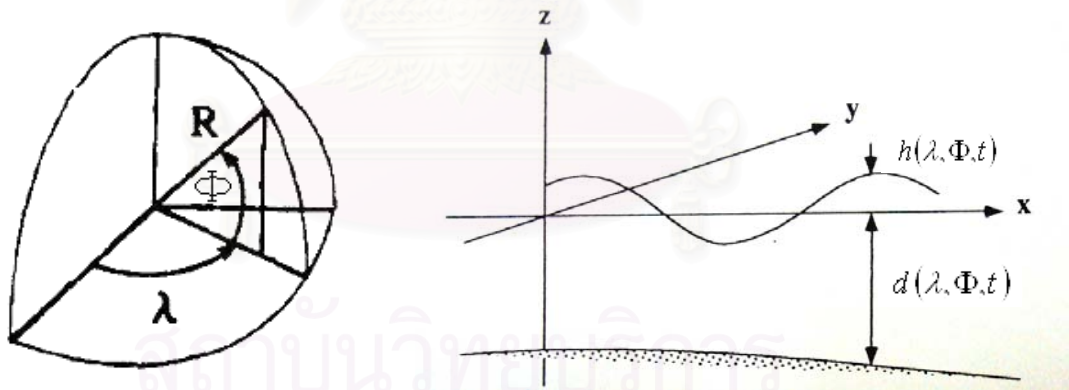
$h(\lambda, \Phi, t), d(\lambda, \Phi, t)$ = ความสูงของคลื่น, ระดับความลึกของน้ำปกติ

$u(\lambda, \Phi, t), v(\lambda, \Phi, t)$ = ความเร็วเฉลี่ยในทิศทางลองติจูด, ละติจูด

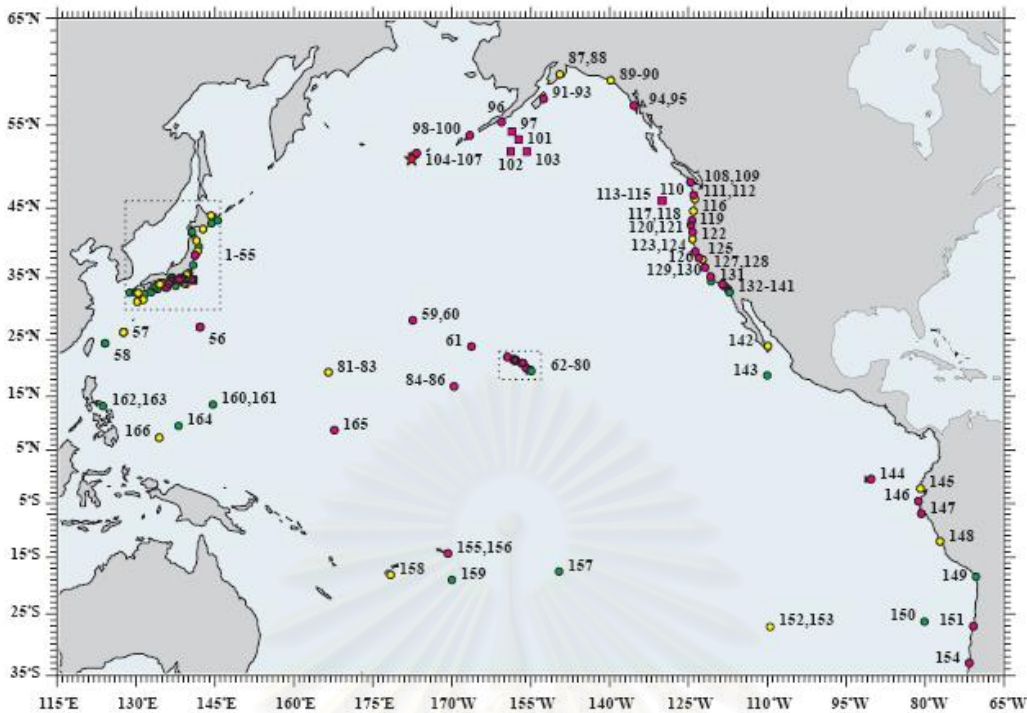
g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

f = ค่าคงที่ Coriolis ($f = 2\omega \sin \Phi$)

R = รัศมีของโลก



รูปที่ 2.24 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการที่ 2.98, 2.99 และ 2.100 (Imamura, 1996)



รูปที่ 2.25 ตำแหน่งศูนย์กลางของแผ่นดินไหวและตำแหน่งของสถานีวัดคลื่น (Titov และ Gonzalez, 1997)

3. การทดสอบการสร้างแหล่งกำเนิดและการเคลื่อนตัวของคลื่น (Testing of generation and propagation) ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจโดยเปรียบเทียบจากลักษณะของคลื่นที่สามารถทำการจดบันทึกจากเครื่องวัดความดันใต้น้ำ (Bottom Pressure Recorder, BPR) รูปที่ 2.25 แสดงตำแหน่งศูนย์กลางของแผ่นดินไหวและตำแหน่งของสถานีวัดคลื่น ในการศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลจากสถานีวัดคลื่นหมายเลข 97, 101 - 103, 113 - 115 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ โดยที่ลักษณะของการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกที่ใช้ในแบบจำลองมีลักษณะดังนี้

strike = 260°

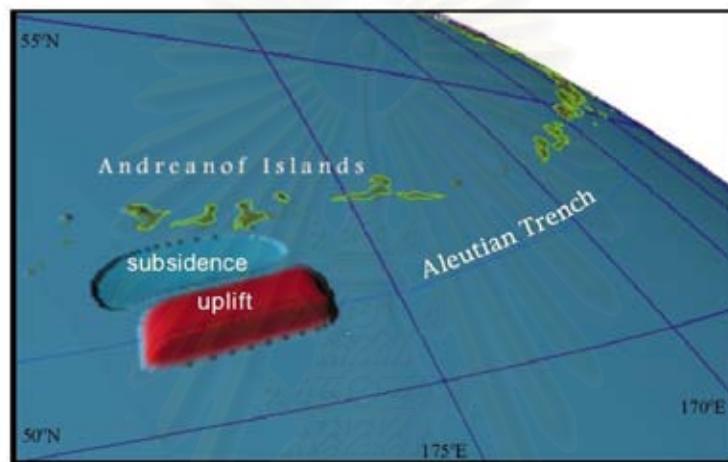
dip = 20°

slip = 108°

ความยาวของรอยเลื่อน = 140 กม.

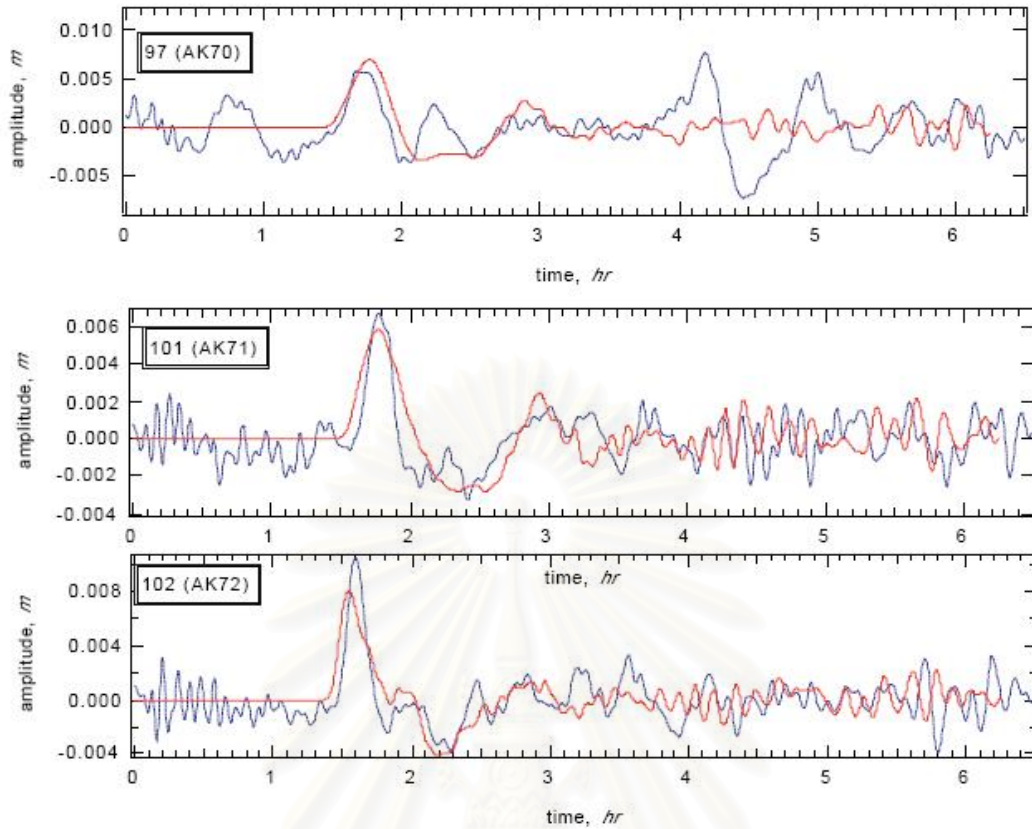
ความกว้างของรอยเลื่อน = 70 กม.

จากรูปที่ 2.26 แสดงขอบเขตในการทำแบบจำลองคือ 15 N ถึง 65 N และ 180 W ถึง 120 W สำหรับข้อมูลความลึกของท้องทะเลมีความละเอียด 4 ลิปดา รูปที่ 2.27 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทำแบบจำลองและข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดคลื่น โดยผลที่ได้จากการเปรียบเทียบคือข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดคลื่นในช่วงเวลาที่มากกว่า 1 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 2 ชั่วโมงครึ่งและจากรูปที่ 2.27 จะเห็นได้ว่าข้อมูลสถานีวัดคลื่นหมายเลข 97 และ 101 สามารถตรวจวัดคลื่นยาวบางชนิดที่ไม่ใช้สินามิซึ่งเดินทางมาถึงก่อนที่สินามิจะเคลื่อนตัวมาถึง

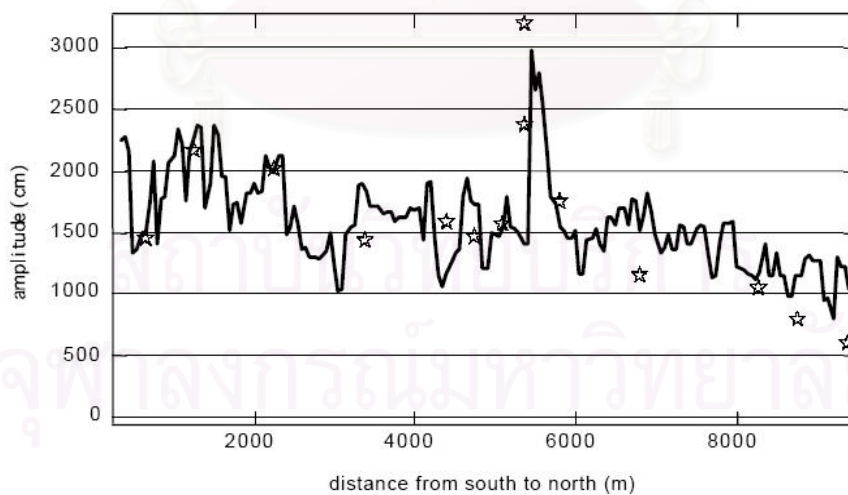


รูปที่ 2.26 ลักษณะของการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกที่ใช้ในแบบจำลอง (Titov และ Gonzalez, 1997)

4. การท่วมบนชายฝั่ง (Inundation) ในแบบจำลองหลายๆ แบบจำลองจะไม่รวมผลของสินามิบนชายฝั่งเนื่องจาก 2 เหตุผลหลักคือ การขาดการสำรวจภาคสนามที่มีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการขาดข้อมูลลักษณะภูมิประเทศที่มีความละเอียดสูง ในปัจจุบันปัญหานี้ได้ลดลงเนื่องจากได้มีการทำการบันทึกข้อมูลหลังจากเกิดสินามิบนชายฝั่งอย่างจริงจัง โดยศูนย์วิจัยวิศวกรรมชายฝั่งทะเล (Coastal Engineering Research Center, CERC) ของประเทศสหรัฐอเมริกาและจากทีมงานสำรวจหลังจากเกิดสินามิอื่นๆ สำหรับปัญหาการขาดข้อมูลลักษณะภูมิประเทศที่มีความละเอียดสูงซึ่งใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองโดยมีความละเอียดของขนาดช่องกริดคือ 10-50 ม. ในการศึกษานี้ได้ทำการปรับแก้แบบจำลองโดยใช้ข้อมูลบริเวณเกาะโอกุชิริ (Okushiri) ประเทศญี่ปุ่น ทีมมหาวิทยาลัยโทโฮกุได้ทำการสำรวจไว้ รูปที่ 2.28 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลระดับความสูงของคลื่นกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจบริเวณชายฝั่งของเกาะโอกุชิริ (Okushiri) ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงข้อมูลที่ได้จากการสำรวจอย่างมาก



รูปที่ 2.27 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทำแบบจำลองและข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดคลื่น
(Titov และ Gonzalez, 1997)



รูปที่ 2.28 การเปรียบเทียบข้อมูลระดับความสูงของคลื่นกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจบริเวณ
ชายฝั่งของเกาะโอกุชิริ (Okushiri) (Titov และ Gonzalez, 1997)

Shigihara และ Fujima (2005) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสึนามิเพื่อหาความสูงของคลื่นบริเวณริมชายฝั่งด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีความถูกต้องสูงในมหาสมุทรอินเดียที่หมู่เกาะมัลดีฟและดิเอโกการ์เซีย โดยทำการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจซึ่งให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% เนื่องจากได้ใช้ขนาดช่องกริดที่เหมาะสมจาก Goto และ Shuto (1983) ได้เสนอไว้ดังสมการที่ 2.101

$$\Delta X = 4 \times 10^{-4} \alpha g T^2 \quad (2.101)$$

โดยที่

ΔX = ขนาดช่องกริด

α = ความลาดชันของพื้นที่

T = คาบของคลื่น

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ค่า α ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ขนาดความกว้างของช่องกริดที่กว้างที่สุดดังแสดงในตารางที่ 2.4

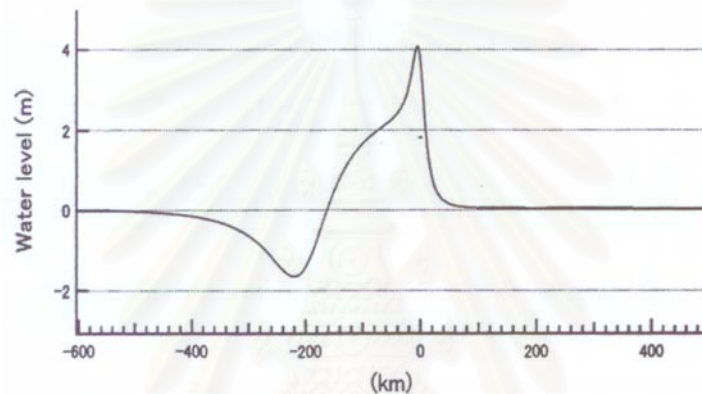
ตารางที่ 2.4 ค่าขนาดความกว้างของช่องกริดที่กว้างที่สุดโดยขึ้นอยู่กับความลาดชันของพื้นที่และคาบของคลื่น (Shigihara และ Fujima, 2005)

Model case	Slope α	Period of incident wave T (min)	Δx
Male' and Gan	0.2	40	4.51
		30	2.54
		25	1.76
Hanimadhoo	0.1	40	2.26
		30	1.27
		25	0.88

ตารางที่ 2.5 ค่าลักษณะต่างๆของรอยเลื่อน (Shigihara และ Fujima, 2005)

No.	N	E	d	θ	δ	λ	L	W	U
1	2.5	94.8	10	329	15	90	500	150	11
2	6.5	92.3	10	329	15	90	400	150	11

ขอบเขตของแบบจำลองที่ทำการศึกษาคือ 70°E ถึง 110°E , -10°N ถึง -25°N ซึ่งได้กำหนดค่าตัวแปรต่างๆของรอยเลื่อนไว้ดังตารางที่ 2.5 รูปที่ 2.29 แสดงภาพตัดขวางของแหล่งกำเนิดสึนามิจากแบบจำลอง



รูปที่ 2.29 ภาพตัดขวางของแหล่งกำเนิดสึนามิจากแบบจำลอง (Shigihara และ Fujima, 2005)

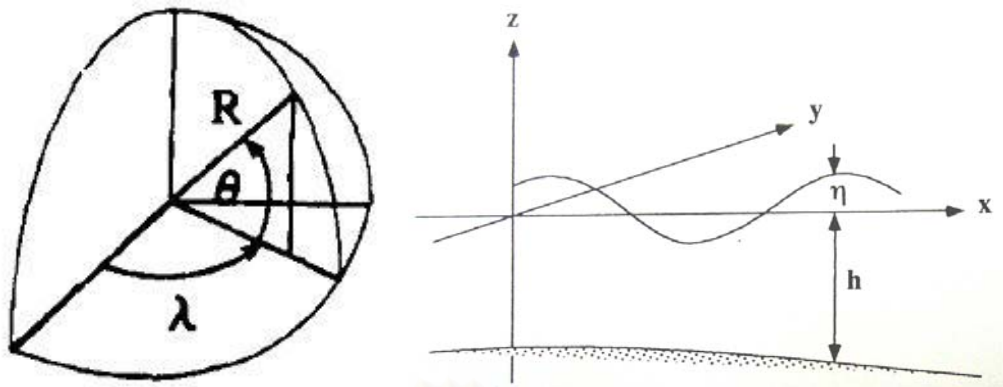
เนื่องจากบริเวณที่ทำการศึกษาอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดมากดังนั้นจึงต้องพิจารณาผลของความโค้งของโลกด้วยโดยใช้สมการหลักเป็นสมการการเคลื่อนตัวของคลื่นแบบเชิงเส้นโดยคิดผลของความโค้งของโลกด้วยดังสมการ

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0 \quad (2.102)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{c_0^2}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = \frac{h}{R \cos \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} + fN \quad (2.103)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{c_0^2}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} = \frac{h}{R} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} - fN \quad (2.104)$$

$$\phi = \frac{h}{3R \cos \theta} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial \lambda \partial t} + \frac{\partial^2}{\partial \theta \partial t} (N \cos \theta) \right] \quad (2.105)$$



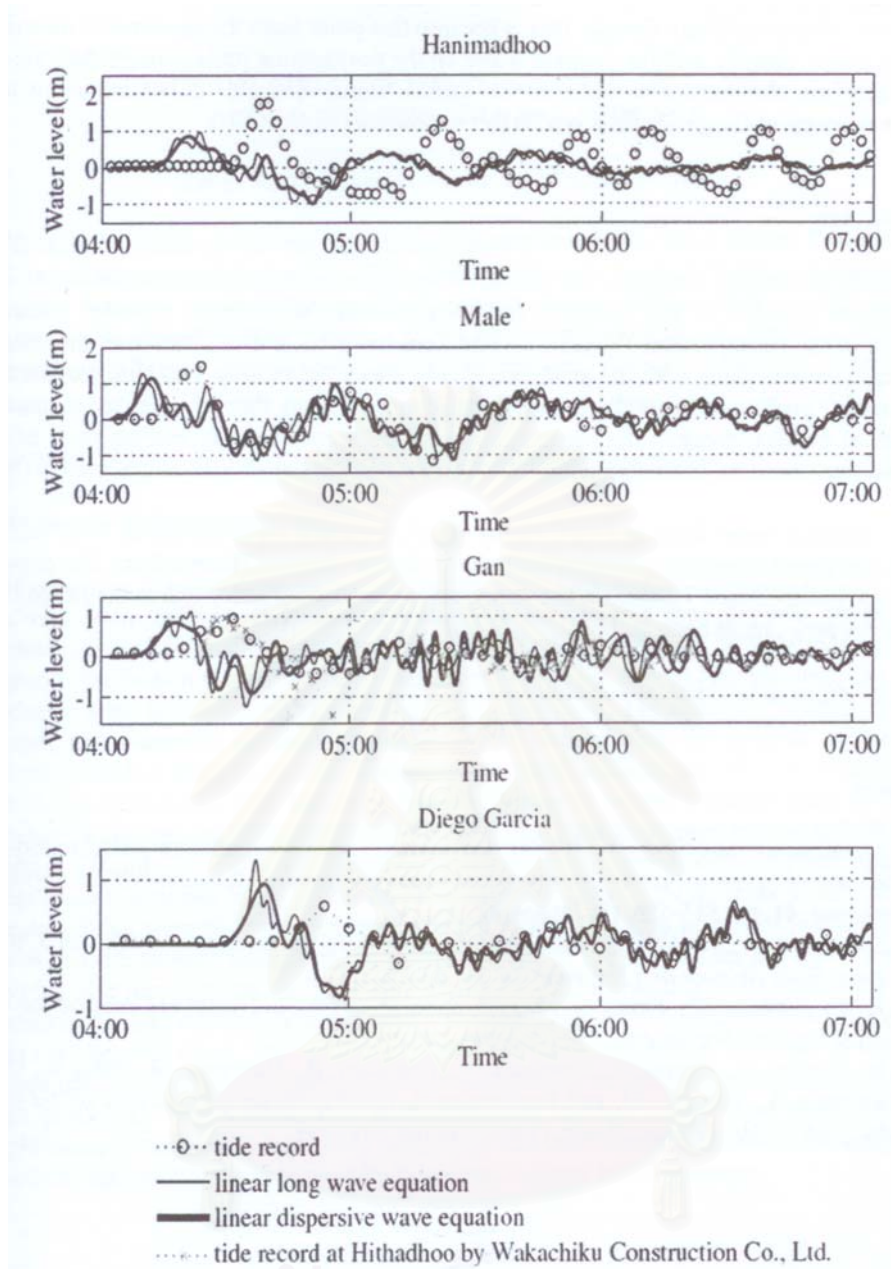
รูปที่ 2.30 ตำแหน่งและทิศทางของตัวแปรในสมการที่ 2.102, 2.103, 2.104 และ 2.105
(Imamura, 1996)

โดยที่

- R = รัศมีของโลก
- λ, θ = เส้นลองติจูดและเส้นละติจูด ตามลำดับ
- M, N = อัตราการเคลื่อนตัวในทิศทาง X และ Y ตามลำดับ
- η = ระยะจากผิวน้ำถึงยอดคลื่น
- h = ระดับความลึกท้องน้ำ
- g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
- c_0 = Wave celerity
- f = Coriolis term

เมื่อแทนสมการที่ 2.103 และ 2.104 ในสมการที่ 2.105 จะได้สมการการเคลื่อนตัวเชิงเส้น

$$\phi - \frac{ah^2}{R^2 \cos^2 \theta} \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial \lambda^2} + \cos \theta \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (\phi \cos \theta) \right] = - \frac{ahc_0^2}{R^2 \cos^2 \theta} \left[\frac{\partial^2 \eta}{\partial \lambda^2} + \cos \theta \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (\eta \cos \theta) \right] \quad (2.106)$$



รูปที่ 2.31 การเปรียบเทียบระดับความสูงของคลื่นที่ได้จากแบบจำลองกับที่ได้จากการสำรวจ (Shigihara และ Fujima, 2005)

สำหรับเงื่อนไขของสภาพขอบนั้นให้คลื่นถูกดูดซับหายไปสำหรับสภาพขอบที่เป็นน้ำและให้คลื่นสะท้อนกลับคล้ายกับกระทบกำแพงสำหรับสภาพขอบที่เป็นพื้นดินเมื่อนำผลที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสำรวจ ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทำแบบจำลองในบริเวณประเทศมาลี ได้ผลค่าความสูงของคลื่นใกล้เคียงกับค่าความสูงของคลื่นที่ได้จากการสำรวจมาก

Choi และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสี่นามิเพื่อหาความสูงของคลื่นบริเวณริมชายฝั่งด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับประเทศในบริเวณมหาสมุทรอินเดียโดยแบ่งลักษณะการเคลื่อนตัวของคลื่นเป็น 2 ลักษณะคือการเคลื่อนตัวของคลื่นในมหาสมุทรและการเคลื่อนตัวของคลื่นใกล้ชายฝั่ง โปรแกรมที่ใช้ในการทำแบบจำลองได้อ้างอิงจากโปรแกรม TUNAMI ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในประเศญี่ปุ่นสำหรับความละเอียดของข้อมูลระดับความลึกของท้องน้ำใช้ความละเอียดที่ 1° โดยมีลักษณะของรอยเลื่อนดังนี้

$$\text{ความยาวของรอยเลื่อน} = 666 \text{ กม.}$$

$$\text{ความกว้างของรอยเลื่อน} = 90 \text{ กม.}$$

$$\text{ความลึกของจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว} = 7 \text{ กม.}$$

$$\text{มุมของแนวรอยเลื่อนวัดจากทิศเหนือ} = 340^\circ$$

$$\text{มุมความชันของแนวรอยเลื่อน} = 13^\circ$$

$$\text{มุมการเคลื่อนตัวของแนวรอยเลื่อน} = 55^\circ$$

ซึ่งทำให้เกิดการยกตัวเริ่มต้นของระดับน้ำทะเล 3.4-7.2 ม. สำหรับการเคลื่อนตัวของคลื่นในมหาสมุทรนั้นใช้ระบบสมการของคลื่นน้ำตื้นและคิดผลของความโค้งของโลกดังสมการ

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = fN \quad (2.107)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N^2 \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = -fM \quad (2.108)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0 \quad (2.109)$$

โดยที่

η = ระดับความสูงของคลื่น

M, N = อัตราการเคลื่อนตัวของคลื่นในทิศทาง θ (ละติจูด) และ λ (ลองจิจูด)

D = ระดับความสูงทั้งหมดของน้ำ คือระยะความลึกท้องน้ำบวกกับระดับความสูงของคลื่น

G = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

R = รัศมีของโลก

f = พารามิเตอร์โคริโอลิส (Coriolis parameter) ($f = 2\Omega \sin \theta$)

Ω = ค่าความถี่การหมุนของโลก

สำหรับการเคลื่อนตัวของคลื่นในบริเวณใกล้ชายฝั่งได้ทำการจำลองโดยใช้หลักการการเคลื่อนตัวของคลื่นน้ำตื้นในแนวระนาบ ซึ่งทำให้เกิดการความต้านทานจากการไหลอย่างแปรปรวนของพื้นที่ตื้นน้ำดังแสดงในสมการ

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{k}{2D^2} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2.110)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{k}{2D^2} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2.111)$$

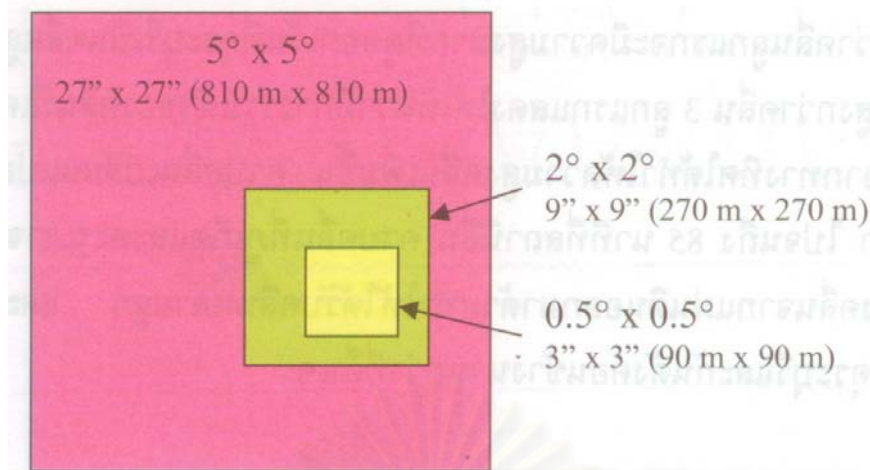
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.112)$$

โดยที่

$$k = \text{สัมประสิทธิ์ค่าความต้านทานจากการไหลอย่างแปรปรวนของพื้นที่ตื้นน้ำ} \\ (k = 0.0025)$$

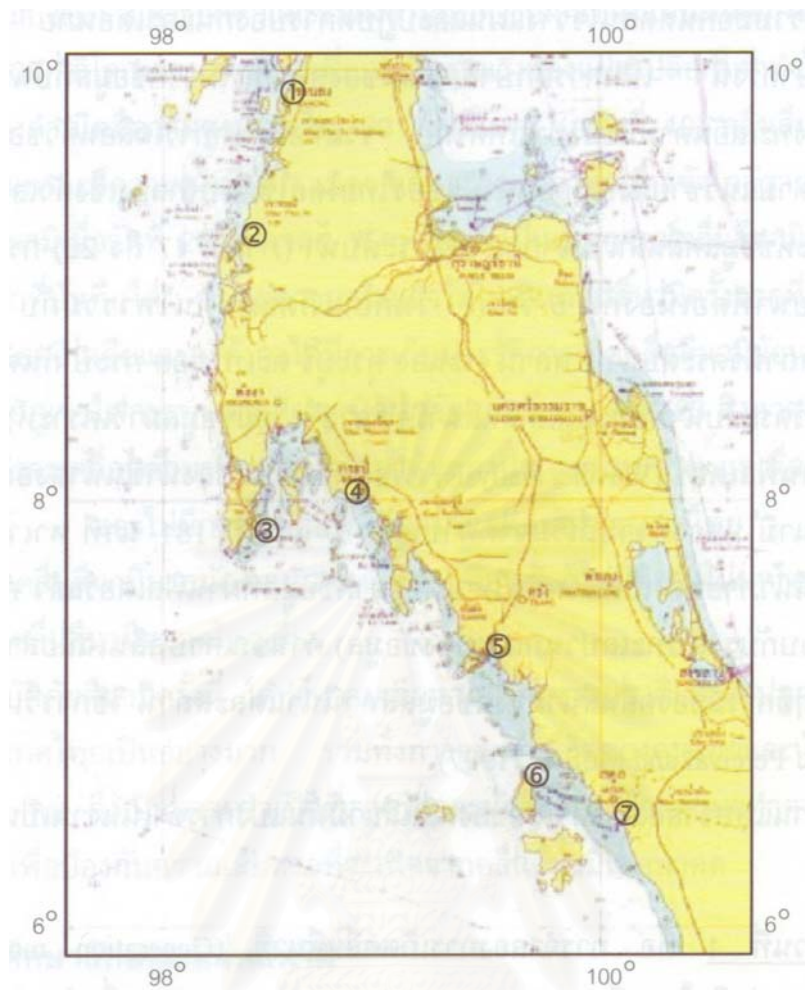
จากผลการทำแบบจำลองพบว่าคลื่นใช้เวลาในการเดินทางถึงประเทศไทยประมาณ 1 ชม., ประเทศอินเดียและประเทศศรีลังกา 2 ชม., ประเทศโซมาเลีย 7 ชม., ทวีปแอฟริกาใต้ 12 ชม., ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ

ปราโมทย์ และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของสึนามิเมื่อเข้าสู่ชายฝั่งประเทศไทย โดยใช้แบบจำลองของ NOAA/PMEL หรือ แบบจำลอง MOST (Method Of Splitting Tsunami model) ซึ่งได้แบ่งขนาดของช่องกริดออกเป็น 3 ขอบเขตเรียงลำดับจากหยาบไปหาละเอียดได้แก่ ขอบเขตที่ 1 มีความละเอียด 5°, ขอบเขตที่ 2 มีความละเอียด 2° และขอบเขตที่ 3 มีความละเอียด 0.5° ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 การกำหนดพื้นที่การคำนวณการเคลื่อนตัวของสึนามิในแบบจำลอง (ปราโมทย์ และคณะ, 2005)

จากการศึกษาแบบจำลองพบว่าภายในเวลา 560 วินาทีหลังจากเกิดแผ่นดินไหวก็เริ่มมีสึนามิเข้ามาในทะเลอันดามันโดยท้องคลื่นเข้ามาก่อน แล้วยอดคลื่นตามเข้ามา 2 ทางด้วยกันคือที่ช่องแคบเหนือเกาะสุมาตรา และทางช่องแคบหมู่เกาะนิโคบาร์ โดยภายในเวลา 46 นาทีหลังแผ่นดินไหวคลื่นรวมตัวเป็นแนวเดียวกัน ภายในเวลา 1 ชั่วโมง 11 นาที ท้องคลื่นเข้าปะทะหมู่เกาะสิมิลัน หลังจากนั้นอีก 15 นาทียอดคลื่นจึงได้ปะทะหมู่เกาะสิมิลัน ท้องคลื่นเข้าปะทะปลายเกาะภูเก็ตเป็นแห่งแรกในเวลา 1 ชั่วโมง 31 นาทีหลังจากเกิดแผ่นดินไหว หลังจากนั้นอีก 20 นาทีสันคลื่นก็เข้าปะทะปลายเกาะภูเก็ต อีก 15 นาทีต่อมาสันคลื่นได้ปะทะอ่าวกระตะ กระรน ป่าตอง กมลา บางเทา ไนยาง และคลื่นได้ทำการเคลื่อนตัวไปพื้นที่ต่างๆ จากผลจากแบบจำลองนี้เมื่อนำไปทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดน้ำที่กระจายอยู่ตามแนวชายฝั่งดังรูปที่ 2.33 พบว่าได้ค่าที่ใกล้เคียงมากแต่สำหรับข้อมูลบางค่าได้ค่าที่แตกต่างกันเช่น ระดับความสูงของคลื่นที่วัดได้จากสถานีวัดน้ำจะได้ค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองดังนั้นแบบจำลองนี้จึงได้ทำการสอบเทียบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลองทั้งในด้านการเคลื่อนตัว (Propagation), การแทรกสอด (Interference), การหักเห (Refraction) ของสึนามิและการท่วมบนพื้นดินของน้ำ (Inundation) ตามชายฝั่ง ซึ่งได้เหตุผลสำหรับการแตกต่างของค่าความสูงคลื่นคือ

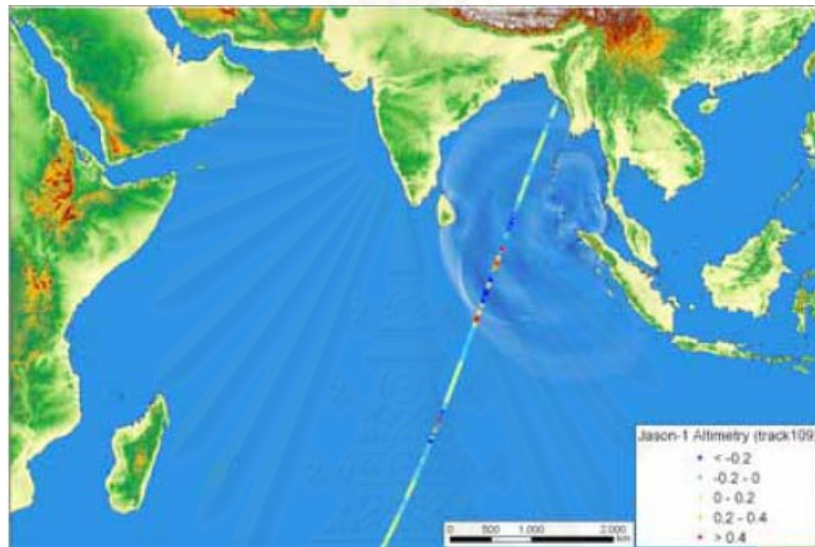


รูปที่ 2.33 แผนที่ชายฝั่งทะเลอันดามัน แสดงตำแหน่งของสถานีวัดคลื่น 7 แห่ง (ปราโมทย์ และคณะ, 2005)

- ก) ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดคลื่นอยู่ในปากแม่น้ำซึ่งลึกเข้าไปในแผ่นดิน เพื่อต้องการหลบอิทธิพลจากคลื่นทะเล
- ข) ความสามารถของเครื่องมือวัดระดับน้ำแบบตัวเลข (Analog) ที่ใช้อยู่ปัจจุบันเป็นการบันทึกระดับน้ำขึ้นลงบนกระดาษ มีหุ่นลอยน้ำอยู่ในท่อสำหรับตรวจวัดระดับน้ำโดยเจาะรูเล็กๆ ข้างท่อ 3 รูให้น้ำเข้ามาอย่างช้าๆ ดังนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านอย่างรวดเร็วระดับน้ำในท่อจึงขยับขึ้นไม่ทันความสูงคลื่นที่บันทึกได้จึงต่ำกว่าความเป็นจริง

2.10.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะรอยเลื่อนของแหล่งกำเนิดสุมาตราสึนามิ 2004

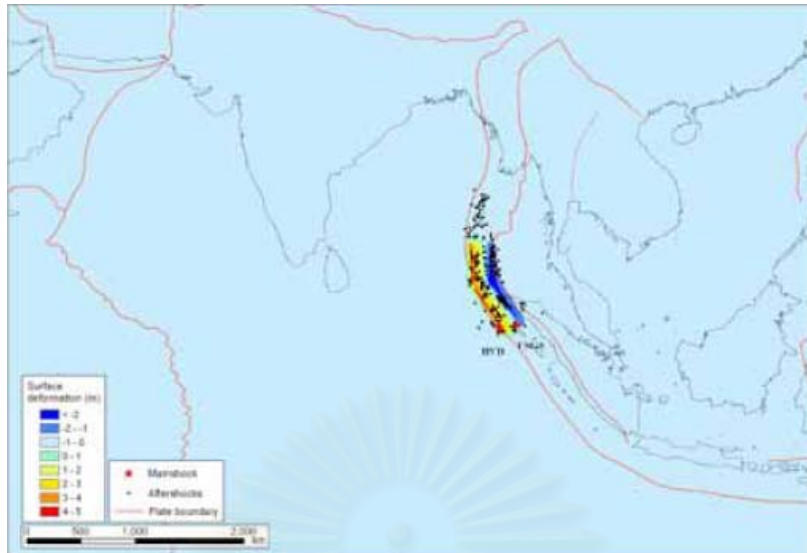
Koshimura และ Takashima (2005) ได้ทำการศึกษาหาลักษณะรอยเลื่อนของแหล่งกำเนิดสุมาตราสึนามิ 2004 โดยใช้ผลจากการสำรวจของดาวเทียม Jason-1 ซึ่งเป็นดาวเทียมที่โคจรผ่านบริเวณมหาสมุทรอินเดียหลังจากเกิดแผ่นดินไหว 2 ซม. โดยได้ถ่ายภาพไว้ 109 ภาพสำหรับวิธีการโคจรของดาวเทียม Jason-1 ได้แสดงดังรูปที่ 2.34 จากผลการศึกษานี้ได้ลักษณะของรอยเลื่อน 2 แนว ลักษณะของรอยเลื่อนได้แสดงดังตารางที่ 2.6 สามารถแสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.34 วิธีการโคจรของดาวเทียม Jason-1 (Koshimura และ Takashima, 2005)

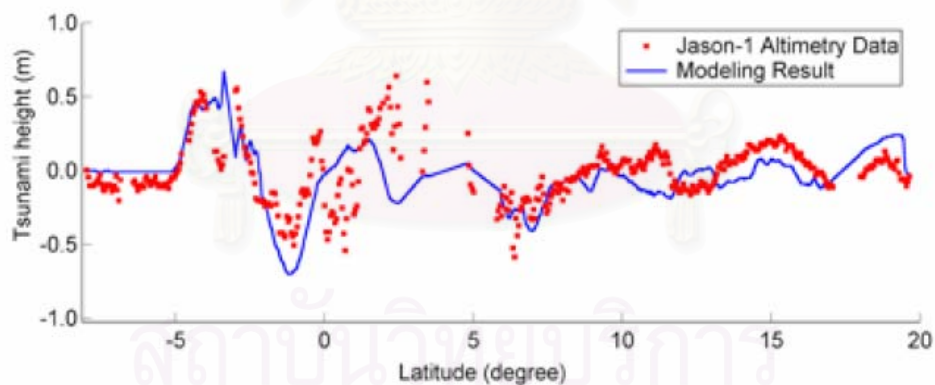
ตารางที่ 2.6 ค่าลักษณะต่างๆ ของรอยเลื่อน (Koshimura และ Takashima, 2005)

Characteristic	Southern Segment	Northern Segment
L / W (km)	500 / 150	400 / 150
Strike / Dip / Slip (degree)	329 / 15 / 90	358 / 15 / 90
Depth (km)	10	10
Dislocation (m)	11	11
Origin (Longitude / Latitude)	94.8E / 2.5 N	92.0E / 6.5N



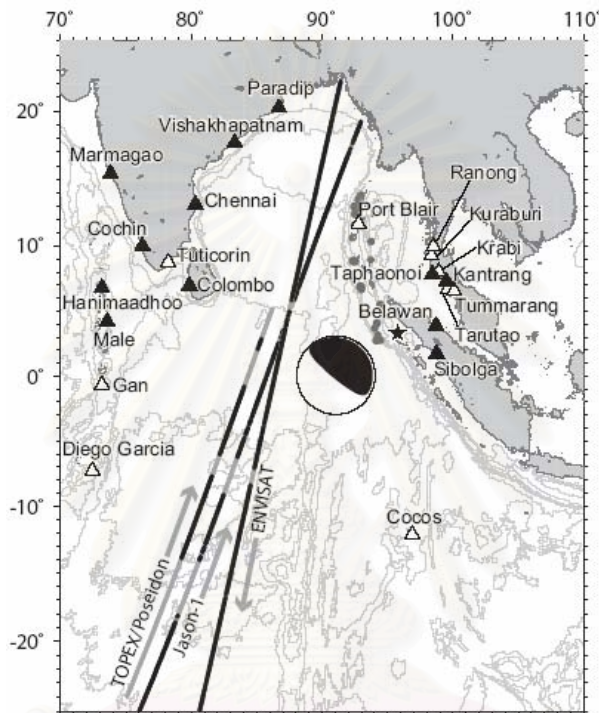
รูปที่ 2.35 ลักษณะและตำแหน่งของรอยเลื่อน (Koshimura และ Takashima, 2005)

ในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองสึนามิเพื่อสอบเทียบกับผลการสำรวจที่ได้จากดาวเทียม Jason-1 โดยใช้ข้อมูลลักษณะของท้องน้ำ (Bathymetry) ของ ETOPO2 ซึ่งมีขนาดความกว้างของช่องกริด 2 ลิปตา ผลของการสอบเทียบได้แสดงดังรูปที่ 2.36



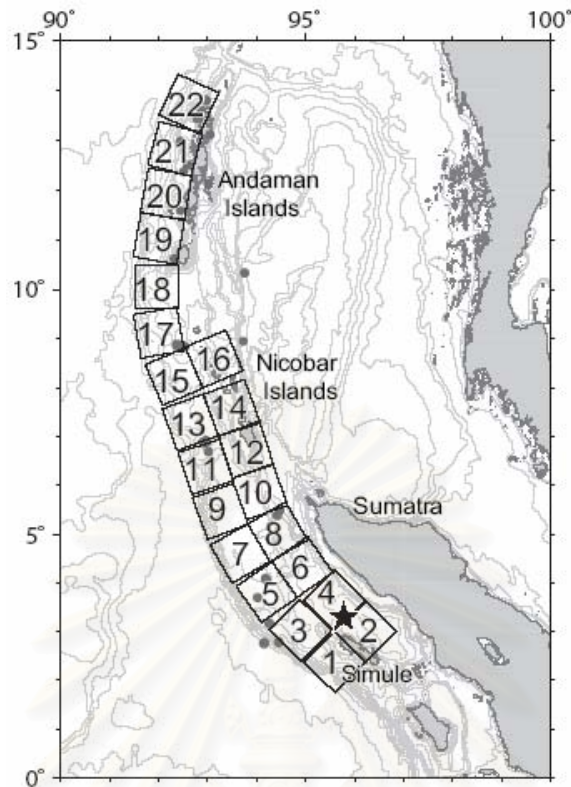
รูปที่ 2.36 การสอบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการสำรวจจากดาวเทียม Jason-1 (Koshimura และ Takashima, 2005)

Fujii และ Sarake (2006) ได้ทำการศึกษาลักษณะรอยเลื่อนของแหล่งกำเนิดสุมาตราสึนามิ 2004 โดยใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion) จากข้อมูลจากสถานีวัดน้ำ (Tide gauge data) ในประเทศต่างๆ ในแถบมหาสมุทรอินเดียและจากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม 3 ดวงซึ่งประกอบด้วยดาวเทียม Jason-1, TOPEX/Poseidon และ Envisat ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำและวิธีการโคจรของดาวเทียมทั้ง 3 ดวงได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำและวิธีการโคจรของดาวเทียมที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง (Fujii และ Satake, 2006)

ในการศึกษานี้ได้แบ่งรอยเลื่อนออกเป็น 22 รอยเลื่อนย่อย (Subfault) ที่วางตัวครอบคลุมพื้นที่ที่เกิดการสั่นสะเทือนที่ตามมาทีหลัง (Aftershock) หลังจากเกิดแผ่นดินไหว 1 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2.38 ขนาดของแต่ละรอยเลื่อนย่อยกำหนดให้มีขนาดเท่ากันคือ 100 กม. x 100 กม. ซึ่งจะทำให้การแปรเปลี่ยนเฉพาะค่าการเลื่อนตัวของแต่ละรอยเลื่อนย่อยแต่จะกำหนดค่ามุมเท (Dip angle) เท่ากับ 10 องศา โดยที่ค่ามุมเทนี้ได้มาจากการสำรวจลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ของน้ำ



รูปที่ 2.38 หมายถึงและตำแหน่งของรอยเลื่อนย่อย (Fujii และ Satake, 2006)

ในการคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลจากสถานีวัดน้ำได้กำหนดให้การยกตัวของผิวน้ำทะเล (Sea surface heights) แปลผันเป็นแบบเส้นตรงกับลักษณะของคลื่นสึนามิ (Tsunami waveforms) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการการเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหว (Coseismic displacement) และจากสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นยาวแบบเชิงเส้น (Linear long wave propagation) สำหรับค่าการเคลื่อนตัวทำการคำนวณย้อนกลับโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ซึ่งไม่พิจารณาค่าการเคลื่อนตัวที่เป็นค่าลบ ในการศึกษาให้รอยเลื่อนมีค่าความเร็วในการเคลื่อนตัวในแนวของรอยเลื่อนและมีระยะเวลาในการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง จากผลการศึกษาโดยการหาค่าคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดได้ผลดังตารางที่ 2.7 สำหรับค่าความเร็วในการจากการคำนวณย้อนกลับได้ตำแหน่งและค่าลักษณะของรอยเลื่อนย่อยต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนและระยะเวลาที่รอยเลื่อนใช้ในการยกตัว (Fujii และ Sarake, 2006)

ความเร็ว (กม./วินาที)	1 นาที	2 นาที	3 นาที
0.5	22.0	20.1	18.3
1.0	29.8	31.0	32.1
1.5	26.8	27.3	27.8
2.0	27.2	27.3	27.4
2.5	25.0	25.2	25.6
3.0	24.9	25.2	25.6

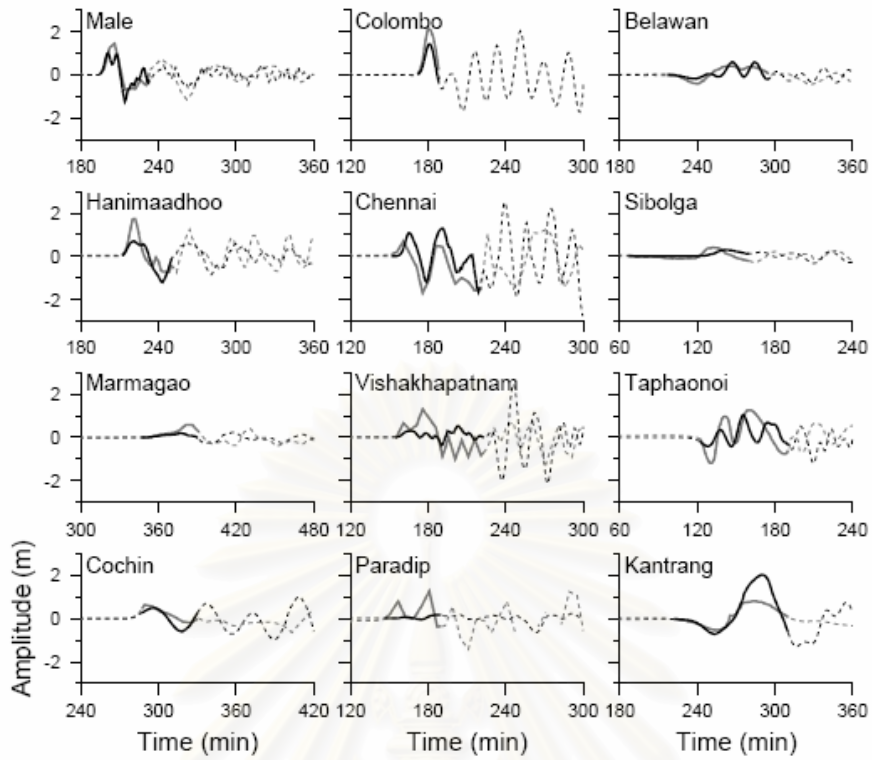
ตารางที่ 2.8 ค่ามุมต่างๆ, ตำแหน่งและความลึกของรอยเลื่อนย่อย (Fujii และ Sarake, 2006)

ลำดับ	มุมแนวระดับ (Strike) (°)	มุมเท (Dip) (°)	มุมเลื่อนถล่ม (Rake) (°)	ละติจูด (°N)	ลองจิจูด (°E)	ความลึก (km)
1	315	10	95	1.75	95.60	3
2	315	10	95	2.38	96.23	20
3	315	10	95	2.40	94.90	3
4	315	10	95	3.00	95.60	20
5	325	10	100	3.20	94.10	3
6	325	10	100	3.71	94.83	20
7	330	10	105	4.00	93.50	3
8	330	10	105	4.44	94.27	20
9	340	10	105	4.90	93.00	3
10	340	10	105	5.30	93.80	20
11	342	10	100	5.82	92.68	3
12	342	10	100	6.15	93.50	20
13	340	10	95	6.72	92.38	3
14	340	10	95	7.02	93.22	20
15	337	10	85	7.64	92.08	3
16	337	10	85	8.00	92.90	20
17	350	10	99	8.60	91.64	3
18	0	10	106	9.60	91.51	3
19	10	10	115	10.66	91.48	3
20	10	10	115	11.56	91.63	3
21	15	10	120	12.51	91.78	3
22	25	10	130	13.51	92.01	3

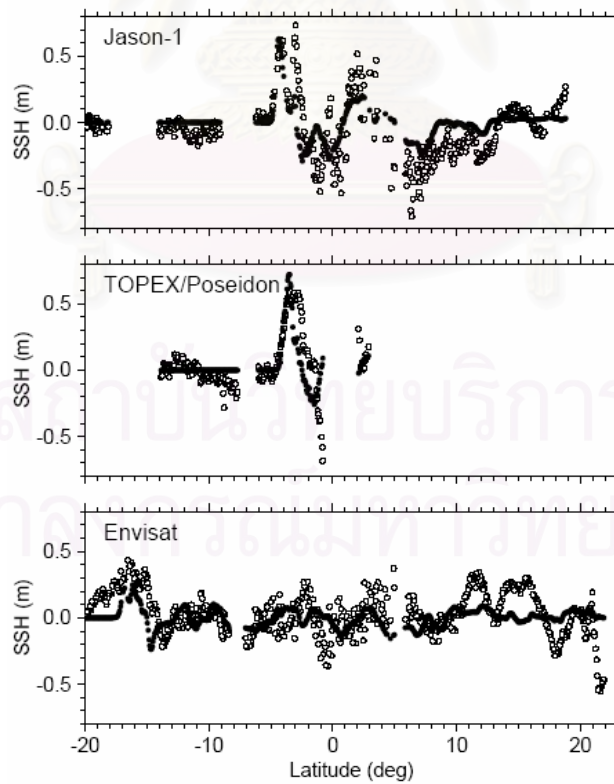
สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการสอบเทียบใช้ข้อมูลลักษณะท้องน้ำจาก ETOPO2 ขนาดความกว้างของช่องกริด 2 ลิปดา ในบริเวณที่ใกล้ชายฝั่งได้เพิ่มความละเอียดขนาดความกว้างของช่องกริดเป็น 24 พิลิปดา ขอบเขตในการคำนวณคือ 25°S ถึง 25°N และ 70°E ถึง 110°E ลำดับขั้นเวลา (Time step) ในการคำนวณ 2 วินาที จากผลการศึกษาได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าความเร็วของการแพร่กระจายตัวในแนวรอยเลื่อน 1 กม./วินาที ค่าระยะเวลาที่รอยเลื่อนเคลื่อนตัวในแนวตั้ง 3 นาที และได้ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนย่อยดังแสดงในตารางที่ 2.9 สำหรับการสอบเทียบผลจากแบบจำลองกับข้อมูลจากสถานีวัดน้ำและจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.39 และ 2.40

ตารางที่ 2.9 ค่าการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนย่อยที่ค่าความเร็วการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนต่างๆ (Fujii และ Sarake, 2006)

ลำดับ	1.0 กม./วินาที	1.5 กม./วินาที	2.0 กม./วินาที
1	0.0±0.2	0.0±0.4	0.0±1.4
2	4.3±2.2	15.8±7.8	19.6±16.6
3	24.6±13.7	18.6±10.3	16.4±7.0
4	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
5	24.6±9.8	26.6±11.5	25.5±10.2
6	12.3±5.5	7.1±3.2	3.9±3.8
7	12.8±7.6	15.1±7.0	16.8±8.0
8	1.8±2.8	6.0±3.2	4.7±2.3
9	1.9±3.9	0.0±0.4	0.8±0.4
10	4.5±2.0	3.0±1.3	3.3±1.7
11	6.0±3.3	1.0±1.1	0.0±0.5
12	3.2±3.7	3.2±3.7	2.7±3.4
13	6.5±2.6	2.4±1.1	0.0±0.5
14	0.0±0.0	0.1±0.2	0.9±2.2
15	7.1±2.9	3.6±3.2	0.2±0.2
16	3.5±3.5	4.1±1.4	2.7±1.6
17	3.2±1.9	0.0±0.0	0.0±0.0
18	2.7±1.9	4.3±2.5	4.0±2.2
19	0.0±0.3	1.7±1.0	1.8±1.0
20	0.0±0.3	0.0±0.0	0.0±0.0
21	0.0±0.1	0.0±0.1	0.0±0.4
22	1.0±0.4	2.3±1.1	2.6±1.3



รูปที่ 2.39 ผลการสอบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลจากสถานีวัดน้ำ (Fujii และ Satake, 2006)



รูปที่ 2.40 ผลการสอบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (Fujii และ Satake, 2006)

2.10.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้าง (Fragility curve)

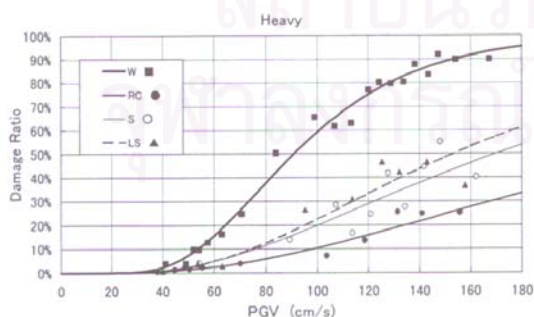
Yamazaki และ Murao (2000) ได้ทำการศึกษการปรับปรุงเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้าง (Fragility curves) ของค่าความเร็วที่พื้นดิน (Peak ground velocity, PGV) จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ ประเทศญี่ปุ่น (1995) เนื่องจากข้อมูลค่าดัชนีการคลื่อนตัวของพื้นดินที่ทำการจดบันทึกได้โดยนำข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามเช่น ชนิดของโครงสร้าง, ระดับความเสียหายของโครงสร้าง, อายุของโครงสร้าง, ชนิดหลังคาเป็นต้น เพื่อเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างให้มีความถูกต้องมากขึ้นโดยใช้ความสัมพันธ์ลักษณะลอกกาลิทึมเพื่อหาค่าที่ปรับใหม่ดังสมการ

$$P_R(PGV) = \Phi((\ln PGV - \lambda) / \xi) \tag{2.113}$$

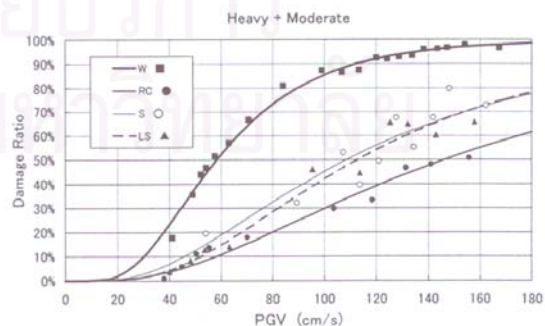
โดยที่

- $P_R(PGV)$ = ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่พิจารณาที่ค่า PGV นั้นๆ
- Φ = ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่พิจารณา
- λ = ค่าเฉลี่ยของค่า $\ln(PGV)$
- ξ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า $\ln(PGV)$

จากการศึกษานี้ได้ทำการเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้าง (Fragility curves) ของค่า PGV ที่แปรผันกับชนิดของโครงสร้างและอายุของโครงสร้างจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมืองโกเบ (1995) ดังรูปที่ 2.41 และรูปที่ 2.42



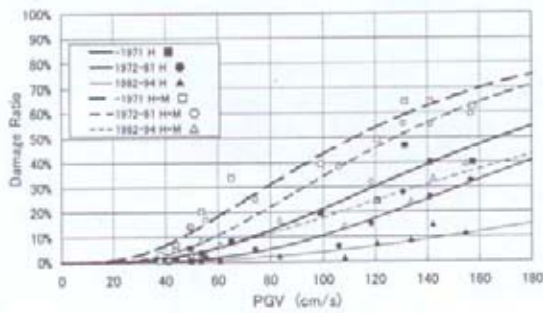
(ก) เสียหายมาก



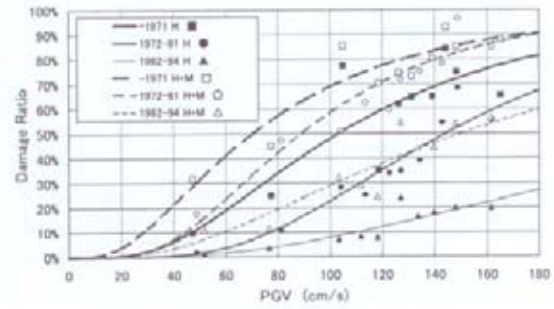
(ข) เสียหายปานกลางถึงมาก

รูปที่ 2.41 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างของค่า PGV สำหรับโครงสร้างชนิดต่างๆ

(Yamazaki และ Murao, 2000)



(ก) อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก



(ข) อาคารเหล็ก

รูปที่ 2.42 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างของค่า PGV สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และอาคารเหล็ก (Yamazaki และ Murao, 2000)

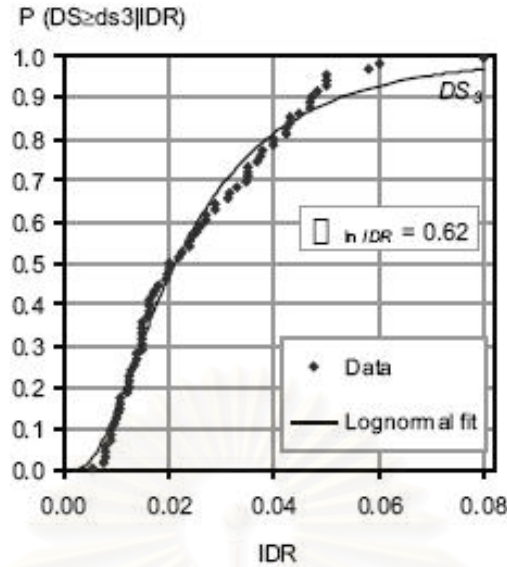
Aslani และ Miranda (2005) ได้ทำการศึกษาการเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างเพื่อประเมินระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นในจุดต่อระหว่างแผ่นพื้นและเสาเนื่องจากแผ่นดินไหวโดยได้แบ่งระดับความเสียหายเป็น 4 ระดับได้แก่

- ก) แตกร้าวเล็กน้อยคือ ขนาดของรอยแตกร้าวน้อยกว่า 0.3 มม.
- ข) แตกร้าวมากคือ ขนาดของรอยแตกร้าวมากกว่า 0.3 มม. แต่น้อยกว่า 2 มม.
- ค) วิบัติเนื่องจากการเฉือนทะลุคือ เกิดการแตกร้าวรอบแนวรัศมีของเสา
- ง) การสูญเสียการต้านทานแรงในแนวตั้ง

จากการทดสอบพบว่าระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นแปรผันกับอัตราส่วนเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ซึ่งได้ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายระดับที่พิจารณาตั้งสมการ ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ในลักษณะลอกการิทึม

$$P(DS \geq ds_i | IDR = idr) = \Phi \left[\frac{\ln(idr) - \ln(IDR)}{\sigma_{\ln(IDR)}} \right] \quad (2.114)$$

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.43 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่ 3 กับค่าอัตราส่วนของการเสียรูป (Aslani และ Miranda, 2005)

สำหรับความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่ 3 ได้แสดงได้ดังรูปที่ 2.43 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.115 จากการศึกษายังพบอีกว่าเมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนแรงเฉือนแนวตั้งด้วยจะให้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\overline{IDR}_{DS3} = 0.014 + 0.03e^{\left[-4440\left(\frac{V_g}{V_0}\right)^8\right]} \quad (2.115)$$

$$\overline{\sigma}_{Ln(IDR_{DS3})} = 0.62 - 0.4e^{\left[-11.6\left(\frac{V_g}{V_0}\right)^{2.9}\right]} \quad (2.116)$$

โดยที่

$P(DS \geq ds_i | IDR = idr)$ = ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่พิจารณา

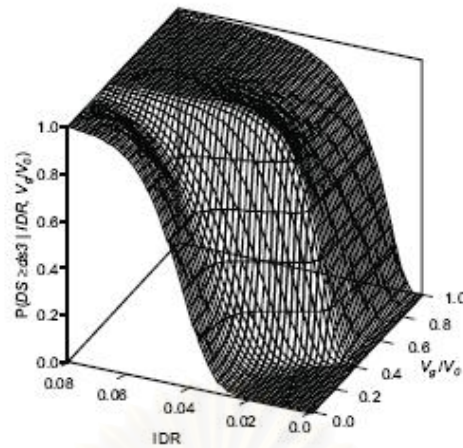
IDR = ค่ามัธยฐานของอัตราส่วนของการเสียรูปที่สถานะความเสียหายที่ i

$\sigma_{Ln(IDR)}$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า $\ln(IDR)$

Φ = ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่พิจารณา

V_g = แรงเฉือนแนวตั้งที่หน้าตัดวิกฤติของพื้น

V_0 = ค่าแรงเฉือนทะลุที่ยอมให้



รูปที่ 2.44 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างสำหรับความสัมพันธ์ 3 ค่าระหว่างความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่ 3, ค่าอัตราส่วนของการเสียรูปและอัตราส่วนแรงเฉือนแนวตั้ง (Aslani และ Miranda, 2005)

รูปที่ 2.44 แสดงเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างสำหรับความสัมพันธ์ 3 ค่าระหว่างความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่ 3, ค่าอัตราส่วนของการเสียรูปและอัตราส่วนแรงเฉือนแนวตั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าอัตราส่วนแรงเฉือนมีค่าน้อยกว่า 0.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่ 3 กับค่าอัตราส่วนของการเสียรูปนั้นไม่เป็นไปตามสมการที่ 2.114 ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนแรงเฉือนด้วยแล้วจะทำได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามที่มีค่าความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

Saxena และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาความน่าจะเป็นของความเสียหายของสะพานที่มีหลายช่วงโดยการพัฒนาเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างซึ่งให้เกิดการเคลื่อนที่ของจตุรรองรับต่างกัน 5 แบบได้แก่

- | | |
|-----------------|---|
| ก) DIFF | คือการเคลื่อนที่ของฐานรองรับอยู่บนดินต่างชนิดกันโดยที่เป็นดินแข็งปานกลาง (Medium) และดินอ่อน (Soft) |
| ข) SAME-MEDIUM | คือการเคลื่อนที่ของฐานรองรับอยู่บนดินแข็งปานกลางทั้งหมด |
| ค) IDENT-MEDIUM | คือการเคลื่อนที่ของฐานรองรับบนดินแข็งปานกลางทั้งหมดแต่เกิดการเคลื่อนที่ของดินด้วยการสั่นที่ต่างกัน |
| ง) SAME-SOFT | คือการเคลื่อนที่ของฐานรองรับอยู่บนดินอ่อนทั้งหมด |
| จ) IDENT-SOFT | คือการเคลื่อนที่ของฐานรองรับเป็นดินอ่อนทั้งหมดแต่เกิดการเคลื่อนที่ของดินด้วยการสั่นที่ต่างกัน |

และได้แบ่งระดับความเสียหายออกเป็น 5 ระดับได้แก่

- ก) ไม่เกิดความเสียหาย (No damage)
- ข) เสียหายเล็กน้อย (Slight damage) คือคอนกรีตเกิดการแตกร้าวและหลุดร่อน
- ค) เสียหายปานกลาง (Moderate damage) คือสูญเสียการเชื่อมเกาะระหว่างเหล็กกับคอนกรีต
- ง) เสียหายมาก (Extensive damage) คือเสาคอม่อเริ่มวิบัติ
- จ) วิบัติโดยสมบูรณ์ (Complete collapse)

จากการศึกษาได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปรในลักษณะลอกกาลิทึมในการเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างและใช้วิธีความน่าจะเป็นที่มากที่สุดในการประเมินซึ่งวิธีความน่าจะเป็นที่มากที่สุดนี้ได้แสดงไว้ดังสมการที่ 2.117

$$M = \prod_{k=1}^N [F(a_k)]^{y_k} [1 - F(a_k)]^{1-y_k} \quad (2.117)$$

โดยที่

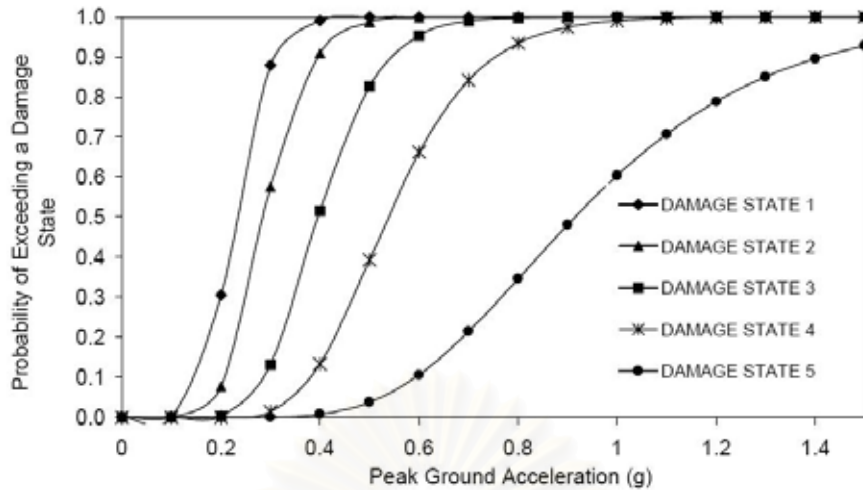
- M = ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายที่ระดับที่พิจารณา
- F (a) = เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างสำหรับความเสียหายที่ระดับที่พิจารณา
- a_k = ค่า PGA ค่าที่ k ของค่าที่บันทึกได้
- y_k = ค่า Bernoulli Random โดยที่ $y_k=1$ เมื่อเกิดความเสียหาย $y_k=0$ เมื่อไม่เกิดความเสียหายที่ค่า PGA = a_k
- N = จำนวนเวลารวมทั้งหมด

F (a) หาได้จากความสัมพันธ์

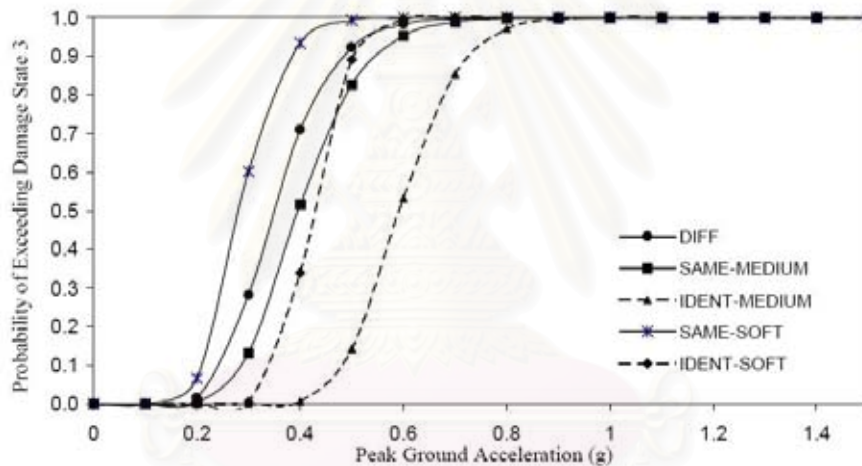
$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln \frac{a}{\alpha}}{\beta} \right] \quad (2.118)$$

โดยที่

- a = ค่า PGA
- Φ = ค่าการกระจายตัวมาตรฐาน (Standard normal distribution)
- α = ค่ากลางของค่า ln (M) ที่มากที่สุด
- β = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า ln (M) ที่มากที่สุด



รูปที่ 2.45 เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างที่เกิดความเสียหายในแต่ละระดับสำหรับกรณี SAME-MEDIUM (Saxena และคณะ, 2000)



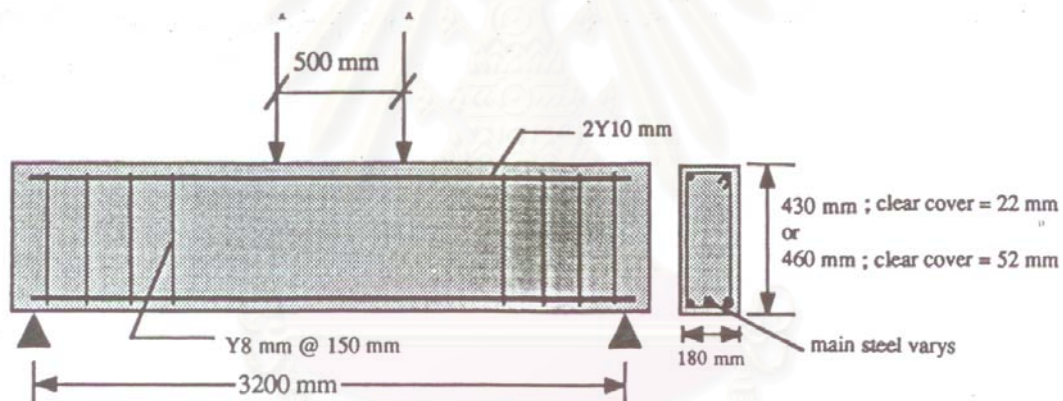
รูปที่ 2.46 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายที่ระดับ 3 หรือมากกว่าที่กรณีต่างๆ (Saxena และคณะ, 2000)

รูปที่ 2.45 คือเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างที่เกิดความเสียหายในแต่ละระดับสำหรับกรณี SAME-MEDIUM ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.117 รูปที่ 2.46 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายที่ระดับ 3 หรือมากกว่าที่กรณีต่างๆ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.118 ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความน่าจะเป็นที่มากที่สุดได้ดังสมการที่ 2.119

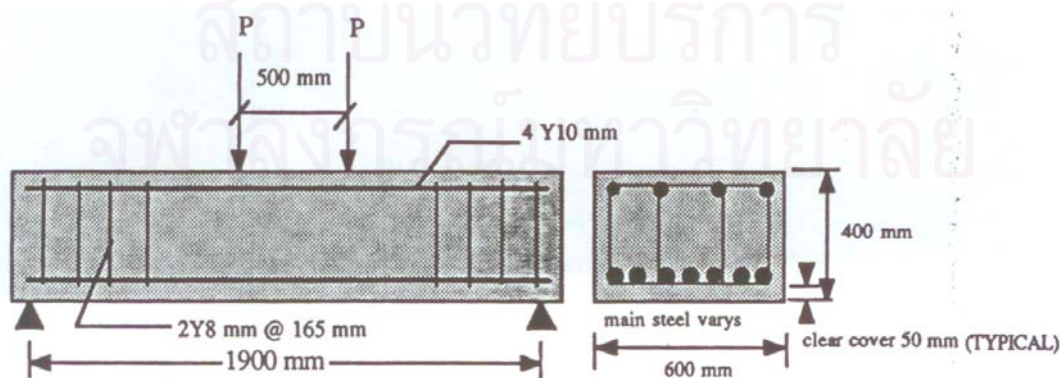
$$\frac{d \ln M}{d \alpha} = \frac{d \ln M}{d \beta} = 0 \quad (2.119)$$

2.10.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาขนาดความกว้างของรอยแตกกว้างของเสาภายใต้แรงดัด

Makhlouf และ Malhas (1996) ได้ทำการศึกษาค่าผลของความหนาของคอนกรีตหุ้ม (Thick concrete cover) ที่มีผลต่อความกว้างของรอยแตกกว้าง (Crack width) ของโครงสร้างในบริเวณทะเลอาราเบีย โดยทำการทดสอบคานหน้าตัด 4 เหลี่ยม 24 ตัวอย่างโดยแบ่งเป็น ชนิด A 16 ตัวอย่างและชนิด B 8 ตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ชนิด A แบ่งเป็นคานที่มีระยะหุ้ม 22 มม. 8 ตัวอย่างและคานที่มีระยะหุ้ม 52 มม. 8 ตัวอย่างโดยที่หน้าตัดรับน้ำหนักบรรทุกทุกดังรูปที่ 2.47 มีรายละเอียดของหน้าตัดชนิดต่างๆดังตารางที่ 2.10 และชนิด B เป็นคานที่มีระยะหุ้ม 50 มม. หน้าตัดรับน้ำหนักบรรทุกทุกดังรูปที่ 2.48 มีรายละเอียดของหน้าตัดชนิดต่างๆดังตารางที่ 2.11 ในการวัดขนาดความกว้างของรอยแตกกว้างทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดด้วยสายตาที่มีกำลังขยาย 40 เท่า และทำการวัดทั้ง 2 ข้างของคาน บริเวณที่ทำการวัดอยู่เหนือจากท้องคาน 10 ซม. โดยทำการอ่านค่าความกว้างของรอยแตกกว้างตามค่าน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดไว้ ซึ่งกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกอยู่ในช่วง 80%-110% ของค่าน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ออกแบบ



รูปที่ 2.47 ตัวอย่างทดสอบชนิด A (Makhlouf และ Malhas, 1996)



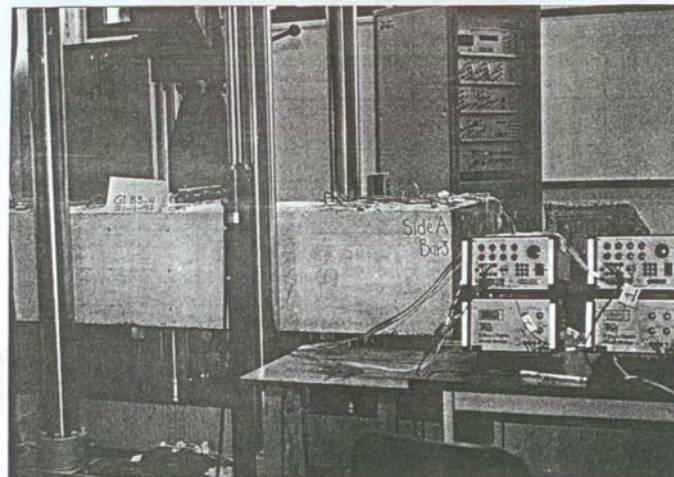
รูปที่ 2.48 ตัวอย่างทดสอบชนิด B (Makhlouf และ Malhas, 1996)

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของตัวอย่างชนิด A (Makhlouf และ Malhas, 1996)

Specimen	T. steel bars	ρ	b, mm	h, mm	d, mm	f'_c , Mpa	f_y , Mpa
GA11	2Y12	0.0031	180	430	400	34	425
GA12	2Y16	0.0056	180	430	400	34	425
GA13	2Y20	0.0087	180	430	400	34	425
GA14	2Y25	0.0136	180	430	400	34	425
GA21	2Y12	0.0031	180	460	400	34	425
GA22	2Y16	0.0056	180	460	400	34	425
GA23	2Y20	0.0087	180	460	400	34	425
GA24	2Y25	0.0136	180	460	400	34	425

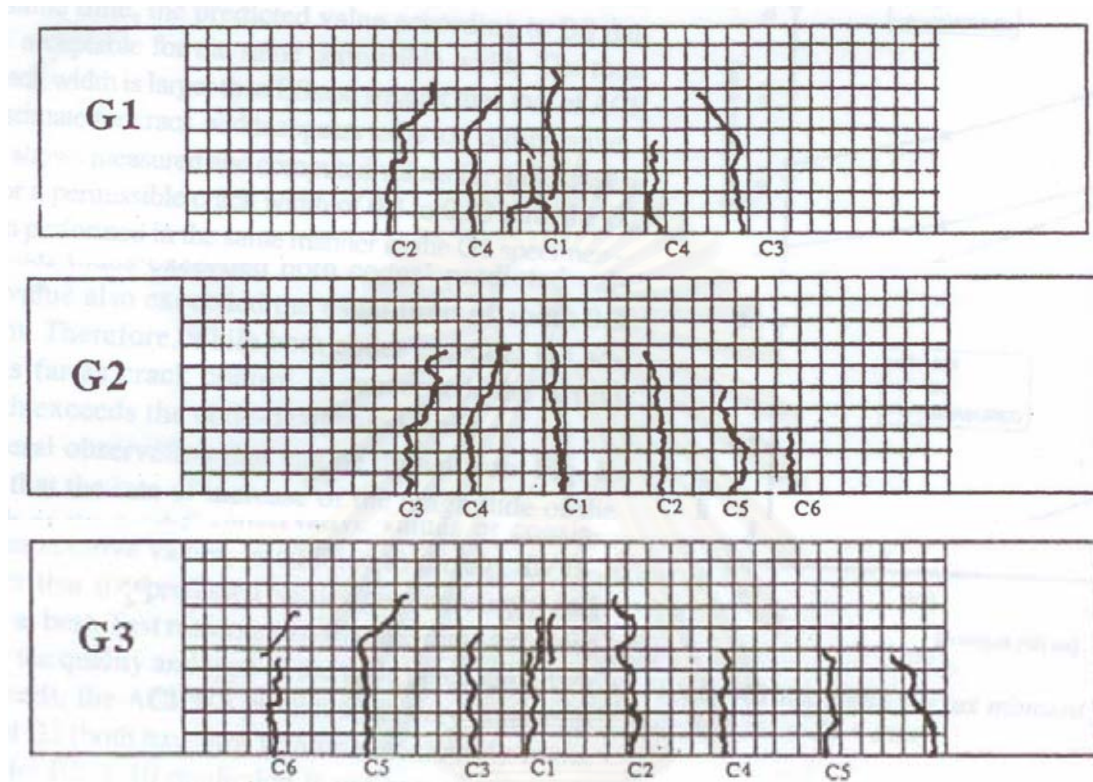
ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของตัวอย่างชนิด B (Makhlouf และ Malhas, 1996)

Specimen	T. steel bars	ρ	b, mm	h, mm	d, mm	f'_c , Mpa	f_y , Mpa
G1	4Y14 2Y20	0.00533	600	400	338	40	430
G2	6Y20	0.00938	600	400	336	40	430
G3	9Y20	0.0014	600	400	336	40	430



รูปที่ 2.49 การติดตั้งตัวอย่างในการทดสอบ (Makhlouf และ Malhas, 1996)

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 2.50 แสดงลำดับและลักษณะของรอยแตกร้าวของคานชนิด G1, G2 และ G3 ที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่ารอยแตกร้าวจะเกิดบริเวณกึ่งกลางคานก่อนแล้วจึงกระจายออก คานที่มีอัตราส่วนเหล็กเสริม (Reinforcement ratio) มากจะเกิดรอยแตกร้าวมาก



รูปที่ 2.50 ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างชนิด B: G1, G2 และ G3 (Makhlouf และ Malhas, 1996)

ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลของขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่ได้จากการทดสอบ กับขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่ได้จากการคำนวณตามเงื่อนไข ACI 318-89 และ BS 8110-85 โดยจะทำการคำนวณหาขนาดของความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุด สำหรับการคำนวณตามเงื่อนไข ACI 318-89 สามารถคำนวณได้จาก

$$W_{\max} = \frac{0.076^3 \sqrt{t_s A}}{1 + \frac{2 t_s}{3 h_1}} f_s \times 10^{-6} \quad (\text{นิ้ว}) \quad (2.120)$$

โดยที่

- t_s = ระยะจากขอบด้านข้างถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาวที่ใกล้ที่สุด
- A = ค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของคอนกรีตที่รับแรงดึงรอบเหล็กเสริมตามยาวแต่ละเส้น
- f_s = หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมตามยาว
- h_1 = ระยะจากจุดศูนย์กลางรวม (Centroid) ของพื้นที่เหล็กเสริมตามยาวที่รับแรงดึงถึงแกนกลางของหน้าตัดคาน (Neutral axis)

สำหรับการคำนวณตามเงื่อนไข BS 8110-85 สามารถคำนวณได้จาก

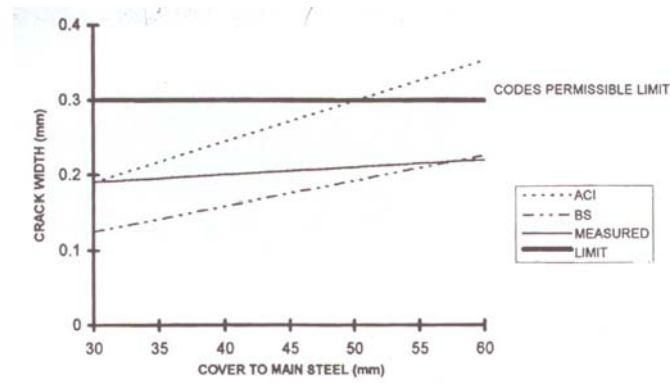
$$W_{\max} = \frac{3c\varepsilon_m}{1 + 2(c - c_0)/(h - kd)} \quad (2.121)$$

$$\varepsilon_m = \left(\varepsilon_s - 2.5 \frac{bh}{A_s} \times 10^{-6} \right) \frac{h - kd}{d - kd}$$

โดยที่

- ε_s = ค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามยาวขณะเกิดการแตกร้าว
- b = ความกว้างของหน้าตัดคาน
- h = ความลึกของหน้าตัดคาน
- A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง
- d = ค่าความลึกประสิทธิภาพ (Effective depth)
- kd = ระยะจากผิวบนของคานถึงแกนกลางของหน้าตัด (Neutral axis)
- ε_m = ค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมขณะเกิดการแตกร้าวที่ทำการปรับแก้ เนื่องจากผลของแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะเกิดการแตกร้าว

จากผลที่ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความกว้างของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนระยะหุ้มของคอนกรีตดังรูปที่ 2.51 จะเห็นได้ว่าค่าความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่คำนวณได้ตามเงื่อนไข ACI 318-89 นั้นมีความชันมากที่สุดนั่นคือผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าความปลอดภัยสูงโดยเส้นกราฟมีความชัน (Slope) 86% สำหรับค่าความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่คำนวณได้ตามเงื่อนไข BS 8110-85 เส้นกราฟมีความชัน 80% และผลที่ได้จากการทดสอบเส้นกราฟมีความชันเพียง 16%



รูปที่ 2.51 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวกับความหนาของคอนกรีตหุ้ม
(Makhlouf และ Malhas, 1996)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ความเสียหายของอาคาร

จากเหตุการณ์สึนามิได้เกิดความเสียหายต่ออาคารในบริเวณริมชายฝั่งภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้มีหน่วยงานต่างๆได้ทำการสำรวจเพื่อจัดบันทึกข้อมูลความเสียหายต่างๆ เช่นความเสียหายของอาคาร, ถนน, กำแพงกันดิน เป็นต้นซึ่งในงานวิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจเหล่านี้ด้วย

3.1 รูปแบบการจัดบันทึกข้อมูลในการสำรวจ

เพื่อทำการประเมินความเสียหายของอาคารหลังจากเกิดสึนามิจำเป็นต้องใช้ข้อมูลพื้นฐานของโครงสร้างและความเสียหายที่ได้ทำการจัดบันทึกไว้ในรูปแบบเดียวกัน สำหรับแบบฟอร์มในการสำรวจ, ข้อมูลทั้งหมดและตัวอย่างของหน้าต่างในฐานข้อมูลนั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ซึ่งมีส่วนที่สำคัญดังนี้

3.1.1 ตำแหน่งของอาคาร

ตำแหน่งของอาคารสามารถทราบได้จากเครื่องรับส่งสัญญาณ GPS โดยการใช้การอ้างอิงแบบ WGS84 ตำแหน่งของอาคารมีความจำเป็นเพื่อใช้ในการกลับมาสำรวจซ้ำอีกครั้งในภายหลัง เนื่องจากจะเป็นการเสียเวลามากถ้าหากต้องทำการวัดระยะห่างของโครงสร้างจากชายฝั่งในการสำรวจภาคสนามและตำแหน่งของโครงสร้างยังสามารถใช้ในการคำนวณหาระยะห่างจากชายฝั่งทะเลได้โดยใช้โปรแกรม GIS

3.1.2 ระดับความสูงของคลื่นที่ท่วม

ในอาคารส่วนมากสึนามิที่ร่องรอยเหลือไว้เพียงแค่คราบน้ำบนกำแพงในระหว่างทำการสำรวจควรทำการสำรวจระดับความสูงของคลื่นของแต่ละอาคารซึ่งระดับความสูงของคลื่นในรายงานฉบับนี้อ้างอิงกับระดับพื้นที่ ที่ 1

3.1.3 รูปแบบของโครงสร้าง

ข้อมูลพื้นฐานของรูปแบบของโครงสร้างจำเป็นต้องทำการจัดบันทึกซึ่งได้แก่ ชนิดของอาคาร, ชนิดของโครงสร้าง, ชนิดของฐานราก, ชนิดของผนังและชนิดของหลังคา

3.1.4 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาและคาน

เสาเป็นชิ้นส่วนหลักของอาคาร ความเสียหายในเสาสามารถทำให้เกิดการวิบัติของทั้งโครงสร้างได้ ดัชนีความเสียหายของเสาได้ถูกแบ่งออกเป็น 6 ระดับซึ่งอ้างอิงมาจาก Architectural Institute of Japan (AIJ) (2000) ดังตารางที่ 3.1 ดัชนีความเสียหายนี้อ้างอิงจากขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนเสา ซึ่งได้แสดงรูปความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาทั้ง 6 ระดับดังรูปที่ 3.1 - 3.6 ตามลำดับ ส่วนความเสียหายที่เกิดขึ้นบนคานนั้นได้ถูกแบ่งออกเป็น 1) ไม่เสียหาย, 2) เกิดการแตกร้าว, 3) เกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตและ 4) วิบัติ

ตารางที่ 3.1 ดัชนีความเสียหายของเสา

ระดับความเสียหาย	รายละเอียด
0	ไม่มีการแตกร้าว
1	ขนาดของรอยแตกร้าว ≤ 0.2 มม.
	(จะมองเห็นรอยแตกร้าวก็ต่อเมื่อเข้าไปอยู่ใกล้ชิ้นส่วนนั้น)
2	0.2 มม. \leq ขนาดของรอยแตกร้าว ≤ 1.0 มม.
	(เห็นรอยแตกร้าวได้อย่างชัดเจน)
3	1.0 มม. \leq ขนาดของรอยแตกร้าว ≤ 2.0 มม.
	(ขนาดรอยแตกกว้างเนื่องจากคอนกรีตหลุดร่อน)
4	ขนาดของรอยแตกร้าว ≥ 2.0 มม.
	(คอนกรีตหลุดร่อนและสามารถมองเห็นเหล็ก)
5	เหล็กโก่งหรือขาด



รูปที่ 3.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 0



รูปที่ 3.2 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 1



รูปที่ 3.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 2



รูปที่ 3.4 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 3



รูปที่ 3.5 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 4



รูปที่ 3.6 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาระดับที่ 5

3.1.5 ความเสียหายโดยรวมของอาคาร

ความเสียหายโดยรวมได้ถูกแบ่งออกเป็น 1) ไม่เกิดความเสียหาย, 2) เกิดความเสียหายในชั้นส่วนรอง, 3) เกิดความเสียหายในชั้นส่วนหลักและ 4) โครงสร้างวิบัติ ความเสียหายในชั้นส่วนรองหมายถึงเกิดความเสียหายที่ผนังหรือหลังคา ความเสียหายในชั้นส่วนหลักหมายถึงเกิดการแตกร้าวที่เสาบางต้นหรือบางคานแต่โครงสร้างยังสามารถรับน้ำหนักตัวเองได้และสามารถซ่อมแซมได้ ซึ่งได้แสดงรูปความเสียหายโดยรวมของอาคารทั้ง 4 ระดับดังรูปที่ 3.7 - 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ความเสียหายโดยรวมของอาคารระดับไม่เกิดความเสียหาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ความเสียหายโดยรวมของอาคารระดับเสียหายในชั้นส่วนรอง



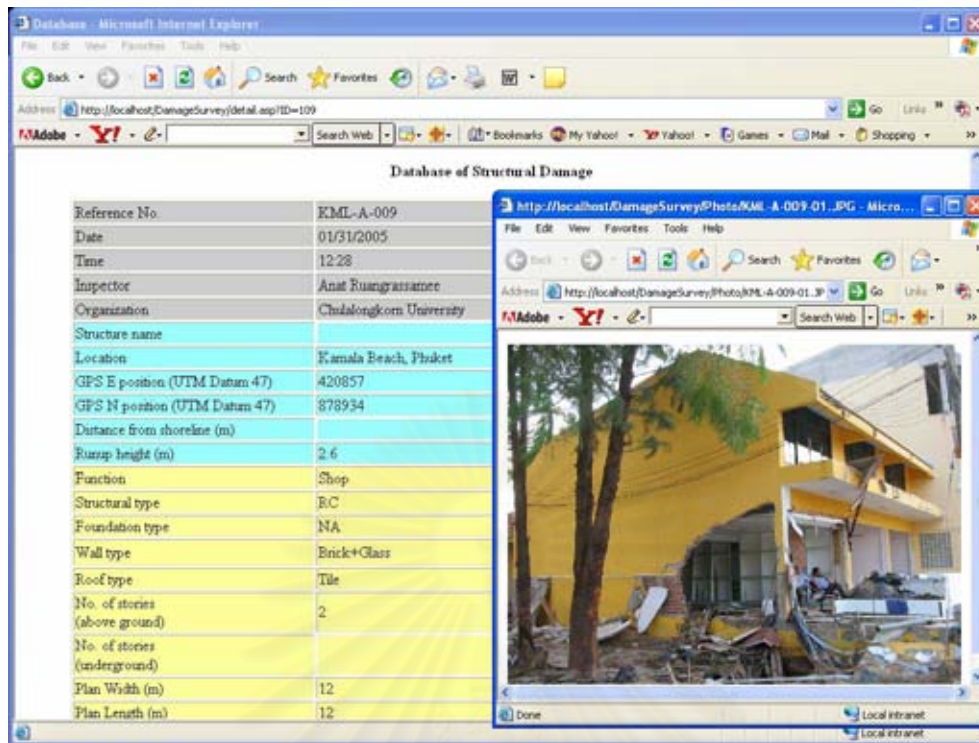
รูปที่ 3.9 ความเสียหายโดยรวมของอาคารระดับเสียหายในชั้นส่วนหลัก



รูปที่ 3.10 ความเสียหายโดยรวมของอาคารระดับโครงสร้างวิบัติ

3.2 ระบบฐานข้อมูล

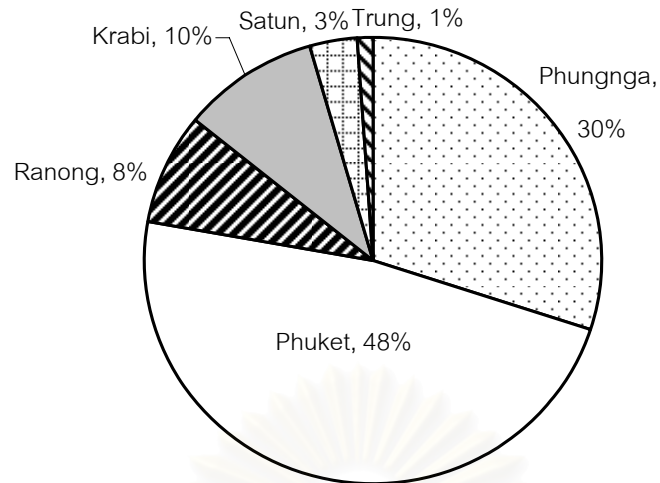
เพื่อความสะดวกได้จัดระบบในการบันทึกข้อมูลความเสียหายระบบจัดเก็บฐานข้อมูลจึงได้ถูกพัฒนาขึ้น ฐานข้อมูลได้ถูกจัดเก็บในรูปแบบ MS Access ข้อมูลที่ได้บันทึกนั้นสามารถแสดงข้อมูลเพิ่มเติมลบข้อมูลผ่านทางเว็บไซต์ สำหรับการบันทึกและการลบข้อมูลสามารถทำได้เฉพาะผู้ที่จัดทำเท่านั้น รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่างของข้อมูลความเสียหายของอาคารและรูปของอาคาร ฐานข้อมูลสามารถแสดงข้อมูลจากเว็บไซต์ของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านแผ่นดินไหวและการสั่นสะเทือนแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (<http://evr.chula.ac.th/DamageSurvey/view.asp>) ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลความเสียหายจากการสำรวจของมหาวิทยาลัยต่างๆ ได้แก่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยมหิดล, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และมหาวิทยาลัยรามคำแหง รวมทั้งหมด 172 ข้อมูล



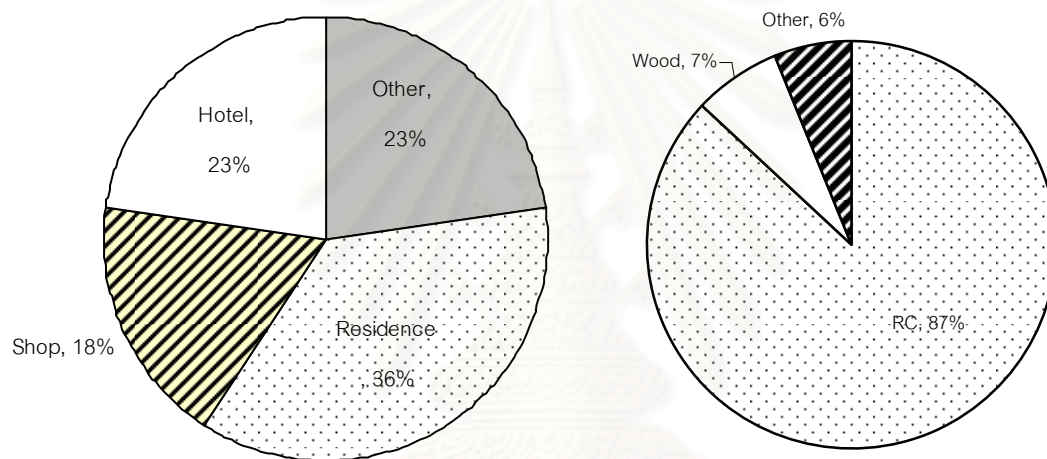
รูปที่ 3.11 หน้าต่างของข้อมูลความเสียหายของอาคารและรูปของอาคาร
(<http://evr.eng.chula.ac.th/earthquake/damagesurvey/view.asp>)

3.3 ข้อมูลความเสียหายของอาคาร

จากข้อมูลที่ทำกรจดบันทึกความเสียหายของอาคารมีข้อมูลได้รวบรวมและจำแนกข้อมูลความเสียหายในลักษณะต่างๆดังนี้ ตำแหน่งของข้อมูลที่ทำกรสำรวจ, ลักษณะการใช้งาน, ลักษณะของโครงสร้าง, ความเสียหายโดยรวมที่เกิดกับโครงสร้างและความเสียหายของผนัง ดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 โดยมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 172 ข้อมูล สำหรับตำแหน่งของโครงสร้างส่วนมากอยู่ในจังหวัดภูเก็ต 85 ข้อมูลรองลงมาคือจังหวัดพังงา 52 ข้อมูล, จังหวัดกระบี่ 16 ข้อมูล, จังหวัดระนอง 11 ข้อมูล, จังหวัดตรัง 6 ข้อมูลและจังหวัดสตูล 2 ข้อมูล ซึ่งลักษณะของโครงสร้างส่วนมากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก และความเสียหายโดยรวมของโครงสร้างแบ่งได้เป็น ไม่เสียหาย 13%, เสียหายในโครงอาคารรอง 31%, เสียหายในโครงอาคารหลัก 32% และโครงสร้างวิบัติ 24%



(ก) ตำแหน่งของโครงสร้าง

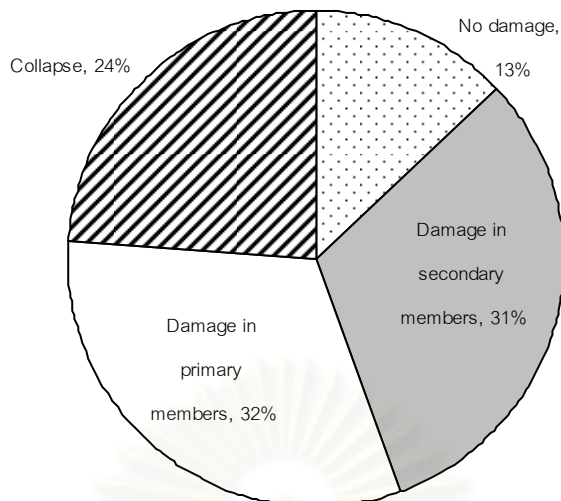


(ข) ลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง

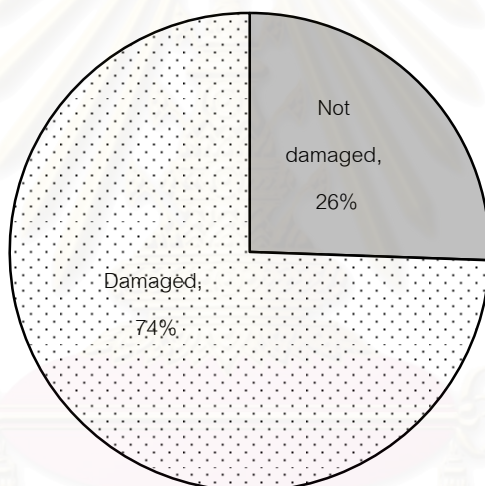
(ค) ลักษณะของโครงสร้าง

รูปที่ 3.12 การกระจายตัวของข้อมูลความเสียหาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ความเสียหายโดยรวมของโครงสร้าง



(ข) ความเสียหายของผนัง

รูปที่ 3.13 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง

จากข้อมูลที่จัดบันทึกความเสียหายมีข้อมูลที่จัดบันทึกความเสียหายของเสาโดยละเอียดที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของเสาสามารถใช้ได้เพียง 92 ข้อมูล และในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์เสานาหน้าตัด 0.15 ม. x 0.15 ม. ดังนั้นต้องเลือกข้อมูลจากข้อมูลที่จัดบันทึกความเสียหายของเสาโดยละเอียดที่บันทึกข้อมูลขนาดเสา 0.15 ม. x 0.15 ม. ดังนั้นจึงมีข้อมูล 26 ข้อมูลที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์

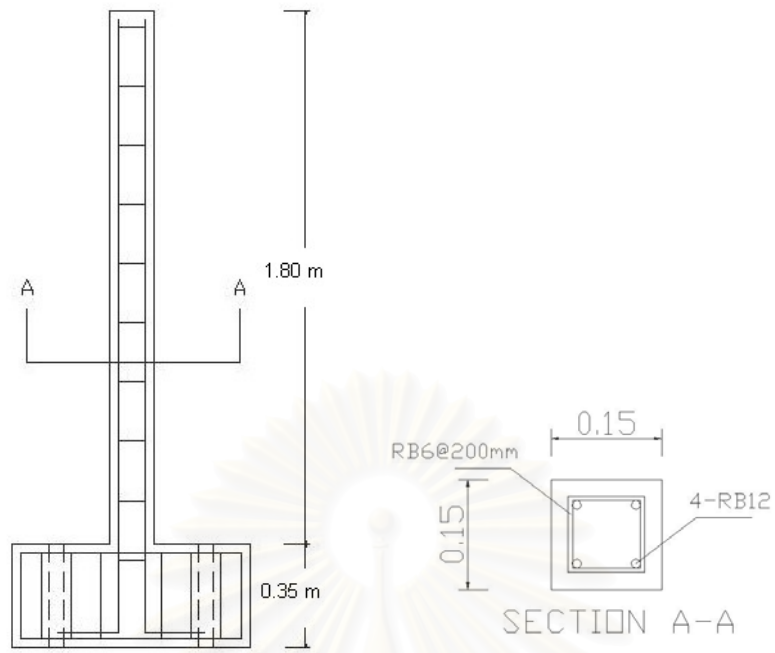
บทที่ 4

การทดสอบ

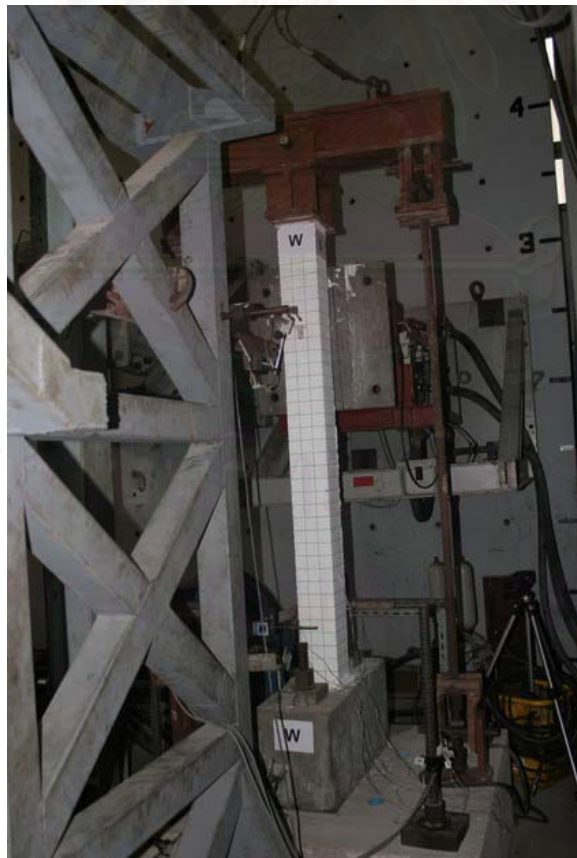
จากความเสียหายจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547 อาคารจำนวนมากที่ได้รับความเสียหาย ในการประเมินความเสียหายของอาคารนั้นสามารถทำการประเมินได้จากลักษณะความเสียหายโดยรวมและความเสียหายขององค์อาคารหลัก (Primary members) ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบเสาเพื่อประเมินความเสียหายเนื่องจากสึนามิ

4.1 การทดสอบเสา

จากการสำรวจเป็นที่ทราบอาคารที่อยู่ติดกับชายฝั่งซึ่งเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนมากเกิดความเสียหาย ขนาดเสา 0.15 ม. x 0.15 ม. ในอาคาร 1 และ 2 ชั้น ได้เกิดระดับความเสียหายทั้ง 6 ระดับจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาความต้านทานของเสาน้ำตัดนี้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการทดสอบเสาน้ำตัด 0.15 ม. x 0.15 ม. รูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดของหน้าตัดเสา ทำการทดสอบโดยใช้เหล็กยื่นเป็นเหล็กกลม 4 เส้น ขนาด 6 มม. เหล็กปลอกเป็นเหล็กกลม ขนาด 6 มม. โดยตัดเป็นชนิด 4 เหลี่ยม มีระยะเรียง 200 มม. ตลอดความยาวเสา ของอ 90 องศา ที่มุม ซึ่งเป็นแบบที่ใช้โดยทั่วไปในท้องถิ่น กำลังครากของเหล็กคือ 330 MPa. กำลังอัดของคอนกรีต ณ วันทดสอบคือ 17.4 MPa. จากการสำรวจพบว่าเสาที่ใช้กันโดยทั่วไปมีความสูง 2.6-2.8 ม. จากรูปที่ 4.2 เป็นการติดตั้งเสาตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบโดยมีฐานยึดแน่นและให้แรงกระทำด้านข้างที่ความสูง 1.4 ม. จากฐานซึ่งให้ค่าอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนเท่ากับ 9.3 นั้นหมายถึงจุดดัดกลับที่กึ่งกลางเสา ให้แรงตามแนวแกนที่จุดยอดของเสา 50 kN. โดยใช้เหล็กรับแรงดึง (Tension rod) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แรงกระทำด้านข้างกระทำโดยเครื่องให้แรง ขนาด 500 kN ทำการทดสอบโดยควบคุมระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Lateral displacement control) การให้แรงด้านข้างให้โดยควบคุมการเสียรูปซึ่งเพิ่มอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Drift ratio) ที่ละ 0.1% จนกระทั่งถึง 1.0% หลังจากนั้นเพิ่มทีละ 0.2% ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบจนกระทั่งอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างถึง 6.6% โดยทำการจัดบันทึกรูปแบบของการแตกร้าวและขนาดของรอยแตกร้าวในแต่ละขั้นตอน



รูปที่ 4.1 รายละเอียดหน้าตัดเสา



รูปที่ 4.2 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

4.2 การปรับแก้ผลการทดสอบ

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบโดยต้องทำการปรับแก้ต่างๆ ดังนี้การปรับแก้เนื่องจากการเลื่อนไถลของฐานราก, การหมุนเอียงของฐานรากและผลเนื่องจากแรงอัดตามแนวแกน

4.2.1 การปรับแก้เนื่องจากการเลื่อนไถลของฐานราก

ผลของการเลื่อนไถลของฐานรากทำให้ค่าระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสามีค่ามากกว่าค่าที่กระทำต่อเสาโดยตรง ซึ่งการปรับแก้สามารถทำได้โดยนำค่าการเลื่อนไถลของฐานรากลบออกจากค่าระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาที่สภาวะนั้นๆ

4.2.2 การปรับแก้เนื่องจากการหมุนของฐานราก

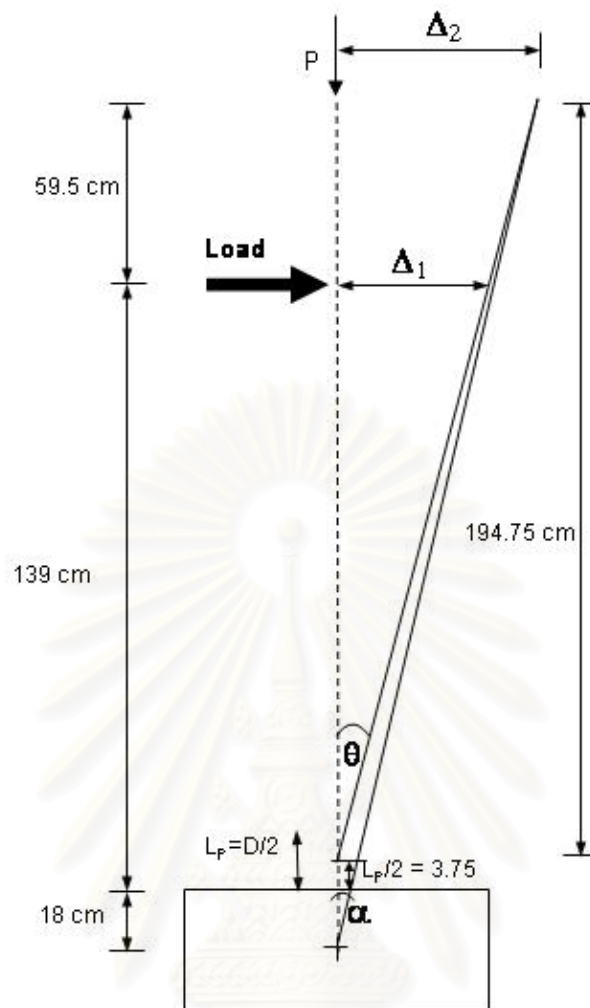
ผลของการหมุนของฐานรากทำให้ค่าระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสามีค่ามากกว่าค่าที่กระทำต่อเสาโดยตรง ซึ่งการปรับแก้สามารถทำได้โดยคำนวณหาค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากมุมหมุนนำไปลบออกจากค่าระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาที่ปรับแก้ผลเนื่องจากการเลื่อนไถลแล้วที่สภาวะนั้นๆ

4.2.3 การปรับแก้เนื่องจากแรงอัดตามแนวแกน

ผลของแรงอัดตามแนวแกนจะมีค่ามากเมื่อเสามีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างมากทำให้เสาสามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้มากกว่าค่าที่กระทำต่อเสาโดยตรง ซึ่งการปรับแก้ทำได้โดยให้จุดหมุนของเสาอยู่เหนือจากฐานรากเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวของช่วงที่เกิดความเสียหายแบบพลาสติกของเสา (Plastic length, L_p) ดังรูปที่ 4.3 และคำนวณการปรับแก้ได้ดังสมการ 4.1

$$\left. \begin{aligned} \Delta_2 &= \frac{(194.75 \times \Delta_1)}{135.25} \\ \alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_2}{10 \times 216.5} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

แรงที่ปรับแก้ = แรงก่อนปรับแก้ - ($P \sin \theta$)



รูปที่ 4.3 ภาพประกอบการปรับแก้เนื่องจากแรงอัดตามแนวแกนสมการที่ 4.1

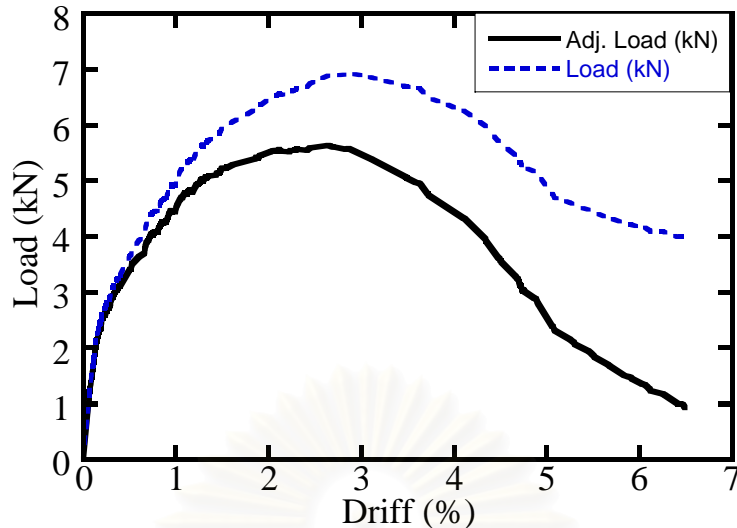
4.3 ผลการทดสอบเสา

4.3.1 ความต้านทานแรงกระทำด้านข้างของเสา

ผลการทดสอบเมื่อทำการปรับแก้แล้วได้ค่าความต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของเสาคือ 5.74 kN ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง 2.64% ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกระทำด้านข้างของเสากับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาได้ดังรูปที่ 4.4 และความต้านทานแรงกระทำด้านข้างจะลดลงเหลือ 70% ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง 4.37% นั้นหมายความว่าเสาได้วิบัติแล้ว ตารางที่ 4.1 แสดงรูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง 0.4%, 1%, 2.2%, 3% และ 4% สำหรับลักษณะความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆได้แสดงในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.1 รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบ

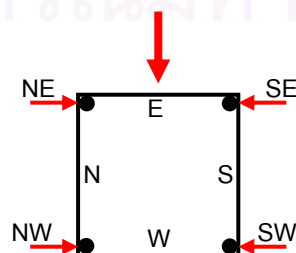
อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
0.4	5.6	3.3	เริ่มเกิดการแตกร้าวที่ด้าน E	
1.0	13.9	4.8	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นที่ฐานด้าน N	
2.2	30.6	6.3	ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 0.4 มม.	
3.0	41.7	6.6	รอยแตกร้าวที่ฐานด้าน E ขยายมากขึ้น, ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 1.0 มม.	
4.0	55.6	4.8	เกิดรอยแตกร้าวด้านรับแรงอัดมากขึ้น, ด้าน N รอยแตกร้าวเชื่อมต่อกันเป็นแนวยาว ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 2.4 มม.	



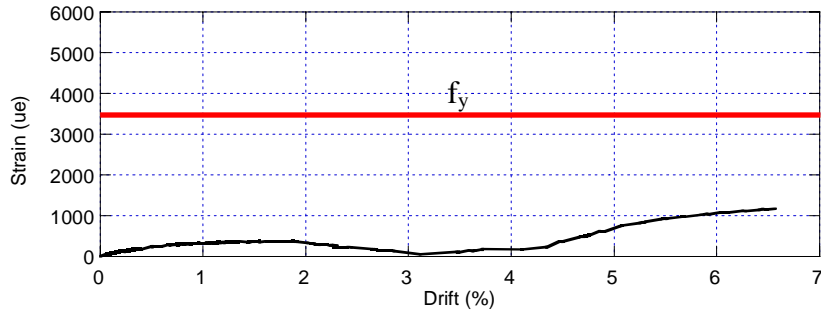
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกระทำด้านข้างที่ยังไม่ปรับแก้และปรับแก้แล้ว กับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา

4.3.2 ความเครียด (Strain) ในเหล็กยื่น

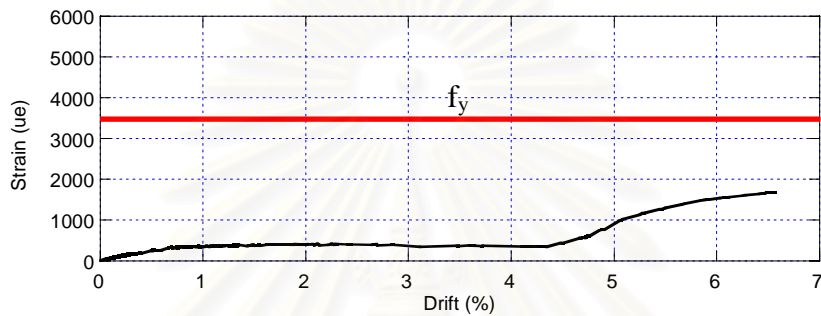
จากการทดสอบโดยการควบคุมระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Lateral displacement control) ซึ่งให้แรงในทิศตะวันออกค่าความเครียดในเหล็กยื่นทั้ง 4 เส้นนั้นได้แสดงในลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่งต่างๆกับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาดังรูปที่ 4.6 – 4.9 ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ค่าความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง NE และ SE ซึ่งมีพฤติกรรมรับแรงดึงนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากในการศึกษานี้ทำการทดสอบจนกระทั่งเสาวิบัติแต่เหล็กยื่นทั้ง 2 เส้นยังไม่เกิดการคราก (Yield) ซึ่งมีค่าความเครียดที่จุดคราก $3460 \mu\epsilon$ สาเหตุเนื่องจากเหล็กยื่นที่ใช้เป็นเหล็กกลมผิวเรียบดังนั้นจึงอาจเกิดการลื่นไถล (Slip) ได้สำหรับเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง NW และ SW ซึ่งมีพฤติกรรมรับแรงอัดนั้นจากความสัมพันธ์ทราบได้ว่าเหล็กจะเกิดการครากที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างประมาณ 4.2% เนื่องจากที่สภาวะนั้นคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการอัด (Crushing crack) ดังนั้นเหล็กยื่นจึงมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นมากในสภาวะดังกล่าว



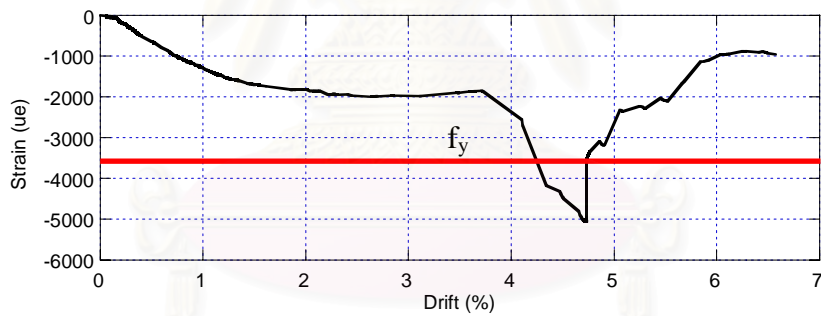
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งและสัญลักษณ์ของเหล็กยื่นของหน้าตัดเสา



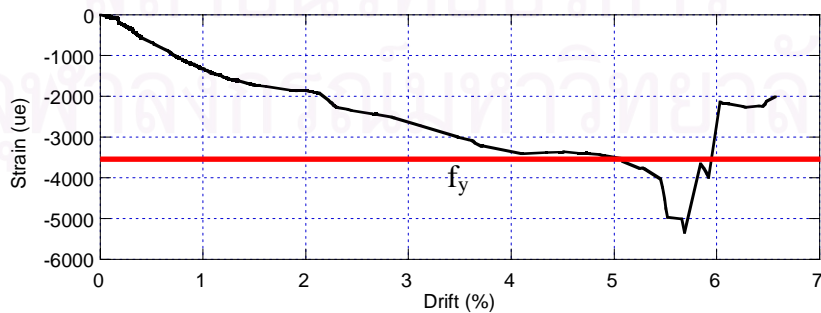
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง NE กับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง SE กับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา



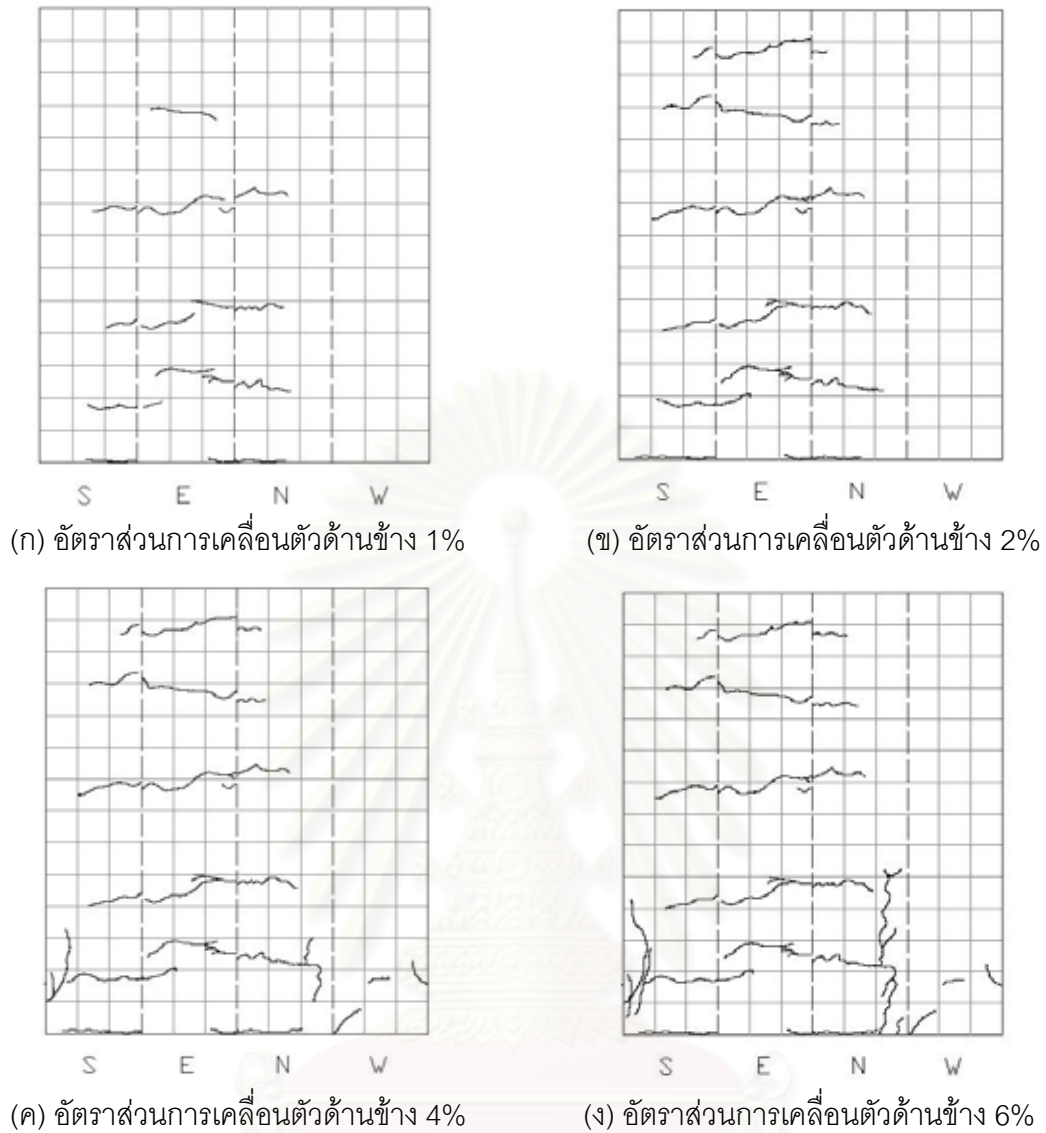
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง NW กับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กยื่นที่ตำแหน่ง SW กับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา

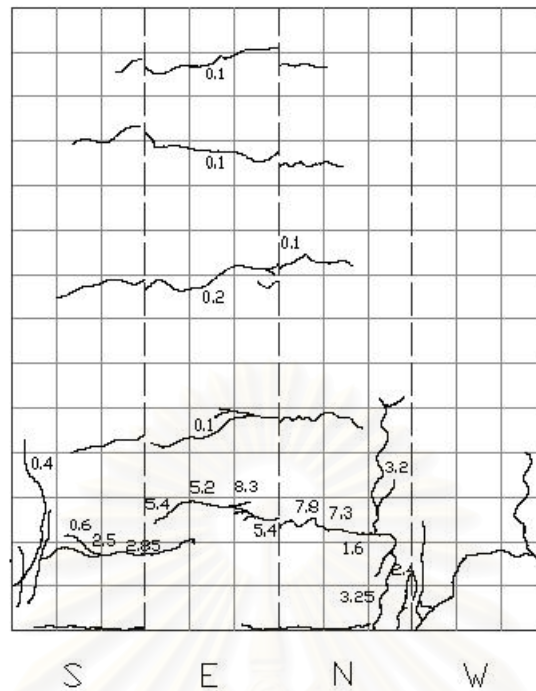
4.3.3 ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวของเสา

จากการทดสอบเสาโดยการควบคุมระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเสา (Lateral displacement control) เสาเริ่มเกิดการแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง 0.39% ซึ่งเป็นการแตกร้าวที่สามารถมองเห็นด้วยตา มีขนาดความกว้าง 0.1 mm. ทำการวัดโดยใช้กล้องส่องวัดรอยแตกร้าวรูปที่ 4.10 แสดงลักษณะของรอยการแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง 1%, 2%, 4% และ 6% เนื่องจากได้ทำการผลักเสาไปทางทิศตะวันตก รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงตามแนวนอนเกิดขึ้นบนด้านทิศตะวันออกของเสาและได้กระจายไปในด้านทิศเหนือและทิศใต้ของเสาด้วย ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง 4% ได้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการอัด (Crushing crack) และเกิดรอยแตกร้าวตามขวางจะเกิดขึ้นซึ่งทำให้ทราบถึงการเริ่มต้นของการเสียรูปของเหล็กยื่น ในการวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งระดับความเสียหายของเสาจากค่าความกว้างของการแตกร้าวในสถานะที่ไม่มีแรงด้านข้างกระทำซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยแตกร้าวในสถานะที่มีแรงด้านข้างกระทำ (Crack width under loading) และขนาดของรอยแตกร้าวในสถานะที่ไม่มีแรงด้านข้างกระทำ (Crack width without load) รูปที่ 4.11 ได้แสดงขนาดของรอยแตกร้าวที่สถานะสุดท้ายที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง 6.6% สถานะที่มีแรงด้านข้างกระทำและสถานะที่ไม่มีแรงด้านข้างกระทำเป็นที่สังเกตได้ว่าขนาดของรอยแตกร้าวที่มีขนาดน้อยกว่า 2 mm. จะแนบสนิทเมื่อไม่มีแรงกระทำด้านข้างซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยแตกร้าวในสถานะที่มีแรงด้านข้างกระทำและที่ไม่มีแรงด้านข้างกระทำได้ดังรูปที่ 4.12

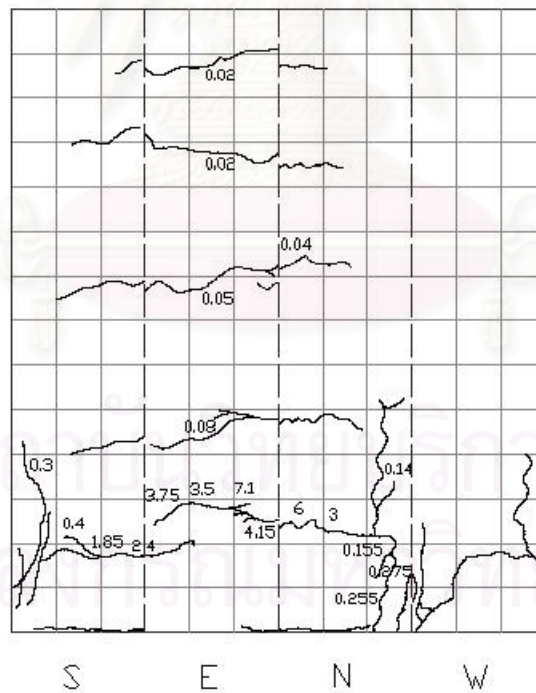


รูปที่ 4.10 รูปแบบการแตกตัวของเสาที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

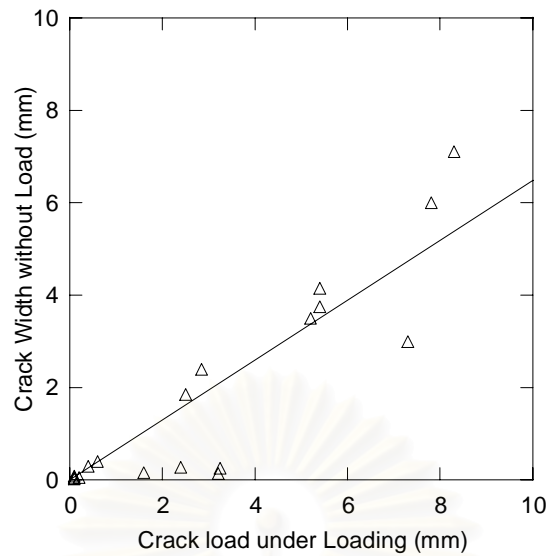


(ก) สภาวะมีแรงต้านข้างกระทำ



(ข) สภาวะไม่มีแรงต้านข้างกระทำ

รูปที่ 4.11 ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้างของเสาที่สภาวะสุดท้าย (ณ อัตราส่วนการเคลื่อนตัว ด้านข้าง 6.6%)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยแตกร้าวในสภาวะที่มีแรงด้านข้างกระทำและที่ไม่มีแรงด้านข้างกระทำ

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 4.2

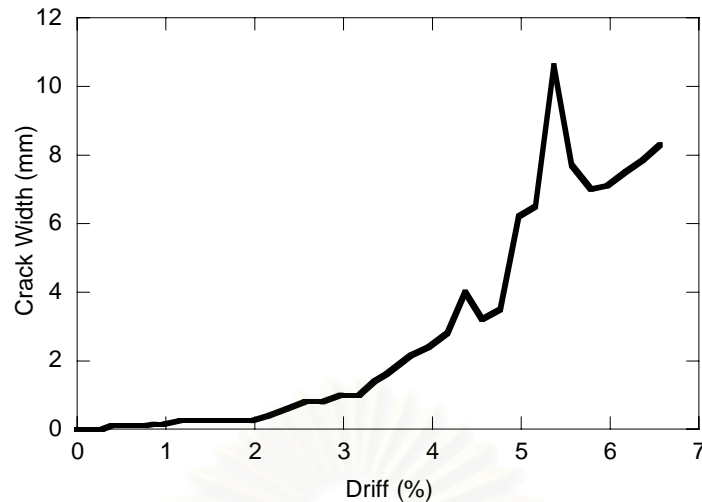
$$C_{NL} = 0.648C_L \quad (4.2)$$

โดยที่

C_L คือ ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวในสภาวะที่มีแรงด้านข้างกระทำ

C_{NL} คือ ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวในสภาวะที่ไม่มีแรงด้านข้างกระทำ

จากการปรับแก้ค่าความกว้างของรอยแตกร้าวสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวของเสากับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาได้ดังรูปที่ 4.13 สำหรับรูปแบบของการแตกร้าวที่สภาวะอื่นๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค.



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยการแตกร้าวกับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา

4.3.4 ค่าน้ำหนัก (Weight factor) สำหรับแต่ละระดับความเสียหาย

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบเสาเพื่อหาค่าน้ำหนักสำหรับแต่ละระดับความเสียหายของเสา ซึ่งความเสียหายของเสาจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานที่เสาได้รับ ดังนั้นในการหาค่าเฉลี่ยระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาของอาคารจึงใช้ค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับ (Energy absorption ratio) เป็นตัวกำหนด โดยค่าอัตราส่วนพลังงานนี้ได้รับโดยหาจากพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกระทำด้านข้างของเสากับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาที่สถานะต่างๆ ส่วนด้วยสภาวะสุดท้ายคือสภาวะที่เสาวิบัติ ซึ่งอธิบายได้ดังรูปที่ 4.14 และสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.3



(ก) ค่าพลังงานที่เสาได้รับที่สภาวะที่ i (ข) ค่าพลังงานที่เสาได้รับที่สภาวะสุดท้าย

รูปที่ 4.14 อธิบายการหาค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับ

$$R_E = \frac{E_i}{E_T} \quad (4.3)$$

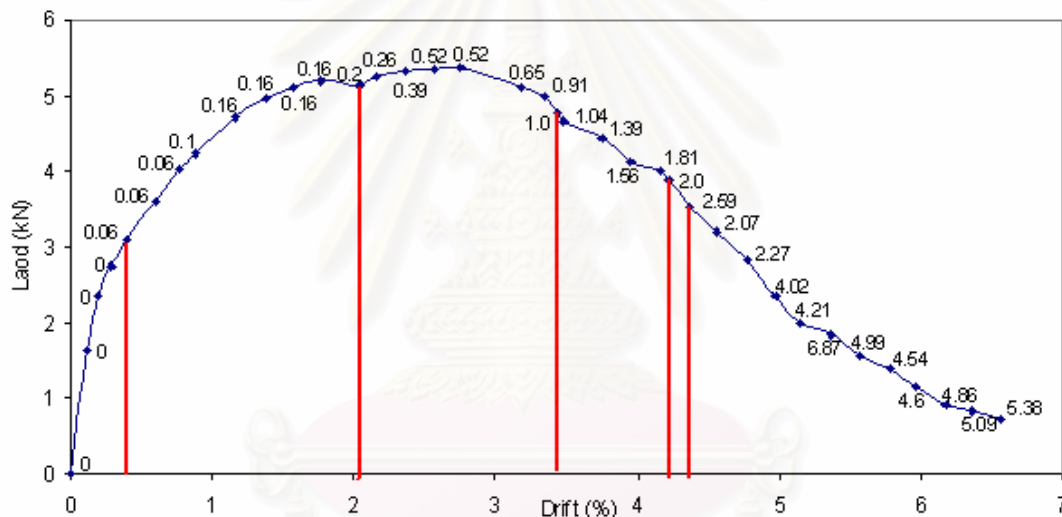
โดยที่

E_i คือ ค่าพลังงานที่เสาได้รับที่สภาวะที่ i ที่เสาได้รับ

E_T คือ ค่าพลังงานที่เสาได้รับที่สภาวะสุดท้ายที่เสาได้รับ

R_T คือ อัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับ

ในการศึกษานี้ได้แบ่งสภาวะต่างๆ ตามการขึ้นตอนที่ทำการวัดขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว ขณะทดสอบโดยให้สภาวะสุดท้ายคือสภาวะที่เสาวิบัติ มีค่าความต้านทานแรงกระทำด้านข้างของเสาลดลง 30% ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับ ณ สภาวะต่างๆ ได้ รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกระทำด้านข้างของเสากับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา



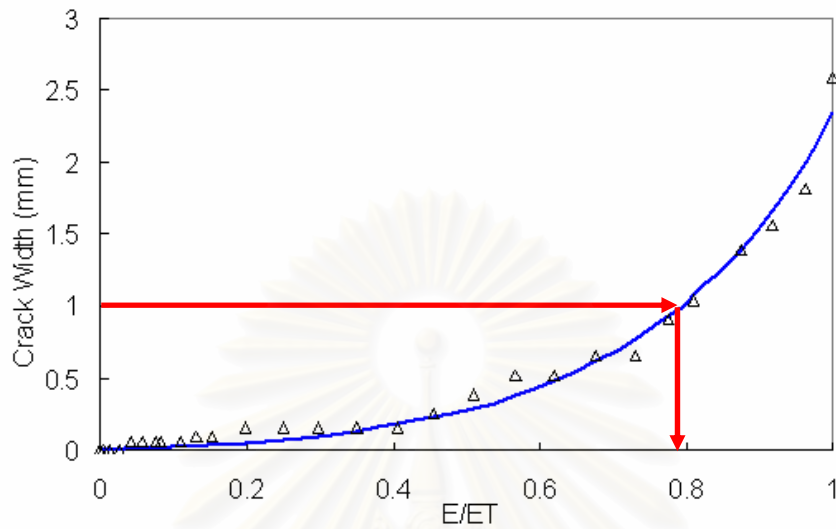
รูปที่ 4.15 การแบ่งพื้นที่ได้การเพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับ

ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวกับค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับได้ดังรูปที่ 4.16 และสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 4.4 เมื่อพิจารณาขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวของเสาแต่ละระดับดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยแบ่งตามขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวของเสาที่ใช้ในการสำรวจ เพื่อใช้ในการหาค่าน้ำหนักสำหรับแต่ละระดับความเสียหายของเสา และสามารถหาค่าน้ำหนักสำหรับแต่ละระดับความเสียหายได้ดังตารางที่ 4.2

$$C = -0.04433 + e^{(-3.116+3.987(E/E_T))} \quad (4.4)$$

โดยที่

C คือ ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวกับค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาะ
ได้รับ

ตารางที่ 4.2 คำนวณสำหรับแต่ละระดับความเสียหาย

ระดับความเสียหาย	ค่านำหนักสำหรับแต่ละระดับ ความเสียหาย
1	0.226
2	0.428
3	0.792
4	0.961
5	1.000

บทที่ 5

แบบจำลองสึนามิ

จากข้อมูลการสำรวจภาคสนามในเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547 สามารถจัด
บันทึกข้อมูลความเสียหายของโครงสร้างและความสูงคลื่นความสูงคลื่น ในงานวิจัยนี้ต้องการ
ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายของโครงสร้างกับความเร็วคลื่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้อง
ศึกษาแบบจำลองสึนามิเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นที่ตำแหน่งของอาคาร

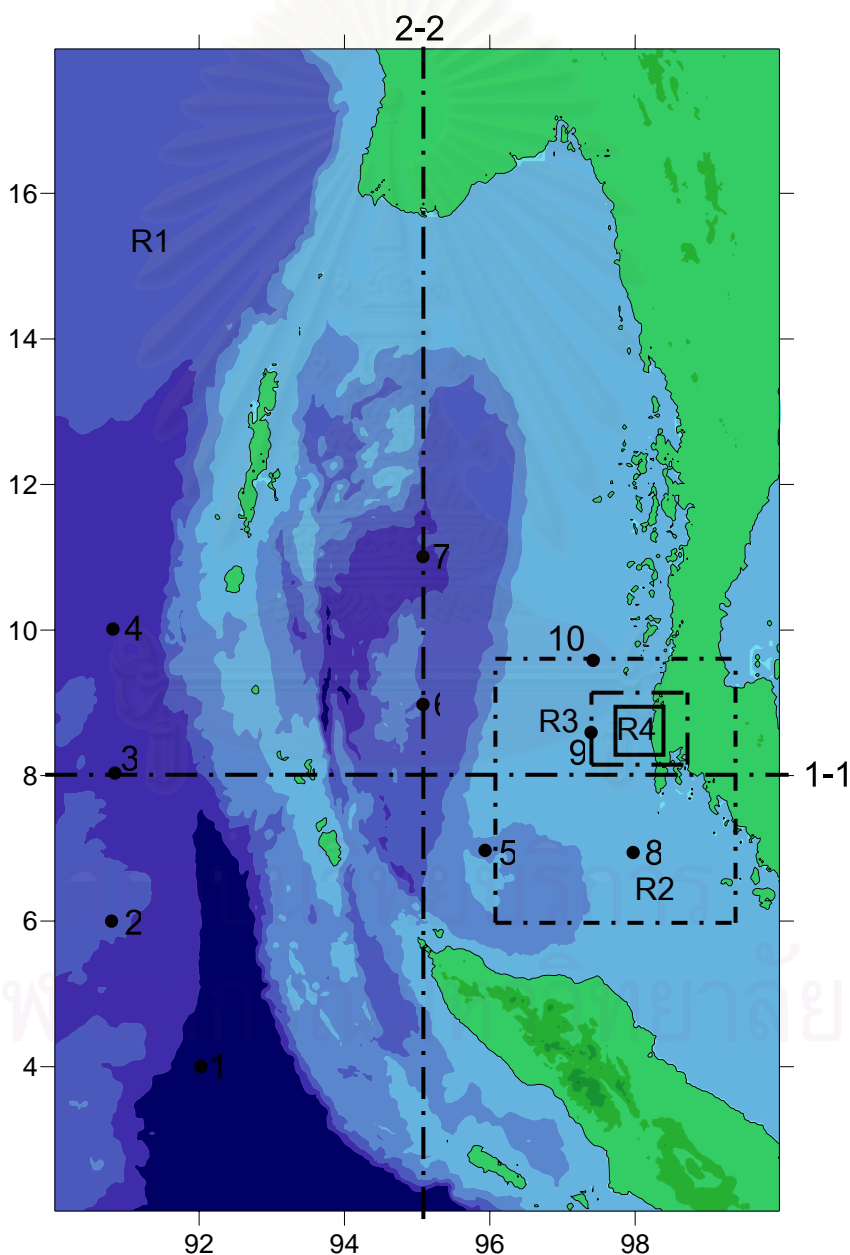
5.1 ทฤษฎีที่ใช้ในการจำลอง

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสึนามิโดย แบบจำลองที่ทำการศึกษานี้ใช้
แบบจำลอง TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of
tsunami) ซึ่งทำการประมวลผลโดยฟอร์แทรน (FORTRAN) ในการคำนวณผลจากการทำ
แบบจำลองใช้หลักการของคลื่นน้ำตื้นแบบเชิงเส้นในพิกัดวงกลม (Linear shallow wave in
spherical coordinate) สำหรับบริเวณมหาสมุทรบริเวณกว้างและใช้หลักการการเคลื่อนที่ของ
คลื่นน้ำตื้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นในแนวระนาบ (Non-linear shallow wave in cartesian
coordinate) ในบริเวณแคบ ซึ่งไม่คำนึงถึงผลของการหมุนของโลก สึนามิเป็นคลื่นที่มีความยาว
คลื่นมากเมื่อเทียบกับความลึก ทำให้ความเร่งของอนุภาคน้ำมีค่าใกล้เคียงกับความเร่งเนื่องจาก
แรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้ผลของความสูงคลื่นที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเหมือนแรงดันเนื่องจาก
น้ำหนักของน้ำที่สูงขึ้นเป็นแรงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำ และทำให้ลักษณะการ
เคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมีความโค้งน้อยมาก เมื่อเทียบกับอนุภาคของคลื่นชนิดอื่นๆ จากสาเหตุ
ดังกล่าวจึงเป็นผลให้การวิเคราะห์ สามารถที่จะไม่คิดผลของการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำในแนวตั้ง
และสมมติให้ความเร็วของอนุภาคน้ำมีค่าเท่ากับตลอดความลึก

5.2 ขอบเขตในการวิเคราะห์

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาโดยพิจารณา 2 บริเวณคือ บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาและ
บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ตซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับ ความเสียหายมาก ในงานวิจัยนี้ได้แบ่ง
ขอบเขตในการคำนวณเป็น 4 ขอบเขต โดยเริ่มจากบริเวณขนาดกริดที่ใหญ่ไปหาบริเวณที่ขนาด
กริดเล็ก รูปที่ 5.1 แสดงขอบเขตของขอบเขตของการคำนวณ (Region) ต่างๆ ของบริเวณเขาหลัก

จังหวัดพังงา ค่าของขอบเขตของการคำนวณและขนาดความกว้างของช่องกริดได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1 และ 1.2 ซึ่งในแต่ละขอบเขตมีเงื่อนไขในการคำนวณต่างกันไปแต่ทำการคำนวณแบบควบคู่กันโดยมีการรับส่งข้อมูลระหว่างขอบเขตการคำนวณหากันในช่วงเวลาแต่ละขั้นที่คำนวณ สำหรับค่าความสูงระดับน้ำที่ใช้ปรับเป็นระดับน้ำขณะเกิดสึนามิจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นใช้ค่าจากสถานีวัดน้ำที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณที่สนใจ โดยที่บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาปรับระดับน้ำขึ้น 0.577 ม. ซึ่งใช้ค่าจากสถานีวัดน้ำคุระบุรี และบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ตปรับระดับน้ำขึ้น 0.178 ม. ซึ่งใช้ค่าจากสถานีวัดน้ำตะพานน้อย



รูปที่ 5.1 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณและตำแหน่งจุดตรวจวัดบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา

ขอบเขตที่ 1 ใช้หลักการของทฤษฎีคลื่นยาวแบบเชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- ไม่คิดผลของแรงเสียดทานของผิวท้องน้ำ
- มีการสะท้อนกลับหมดของมวลน้ำเมื่อคลื่นกระทบชายฝั่ง
- มีการไหลผ่านอย่างอิสระสำหรับบริเวณขอบที่เป็นน้ำทะเล

ขอบเขตที่ 2 ใช้หลักการของทฤษฎีคลื่นยาวแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- คิดผลของแรงเสียดทานของผิวท้องน้ำ
- มีการสะท้อนกลับหมดของมวลน้ำเมื่อคลื่นกระทบชายฝั่ง
- มีการไหลผ่านอย่างอิสระสำหรับบริเวณขอบที่เป็นน้ำทะเล

ขอบเขตที่ 3 ใช้หลักการของทฤษฎีคลื่นยาวแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- คิดผลของแรงเสียดทานของผิวท้องน้ำ
- มีการสะท้อนกลับหมดของมวลน้ำเมื่อคลื่นกระทบชายฝั่ง
- มีการไหลผ่านอย่างอิสระสำหรับบริเวณขอบที่เป็นน้ำทะเล

ขอบเขตที่ 4 ใช้หลักการของทฤษฎีคลื่นยาวแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขดังนี้

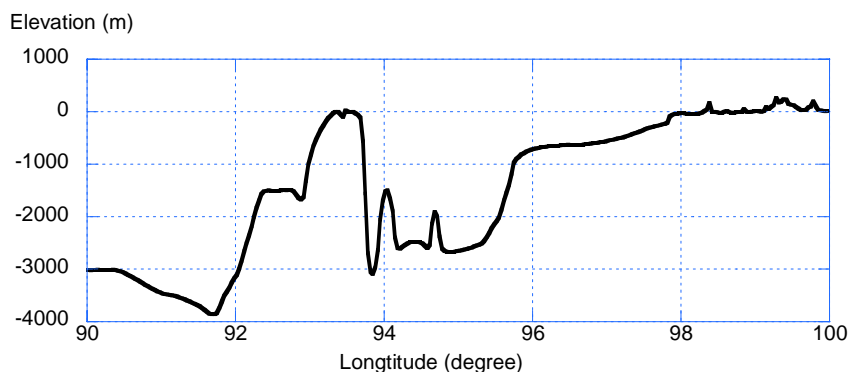
- คิดผลของแรงเสียดทานของผิวท้องน้ำ
- ให้มวลน้ำขึ้นบนชายฝั่งได้ (Runup)
- มีการไหลผ่านอย่างอิสระสำหรับบริเวณขอบที่เป็นน้ำทะเล

5.3 ข้อมูลภูมิประเทศและความลึกท้องน้ำ (Topography and Bathymetry)

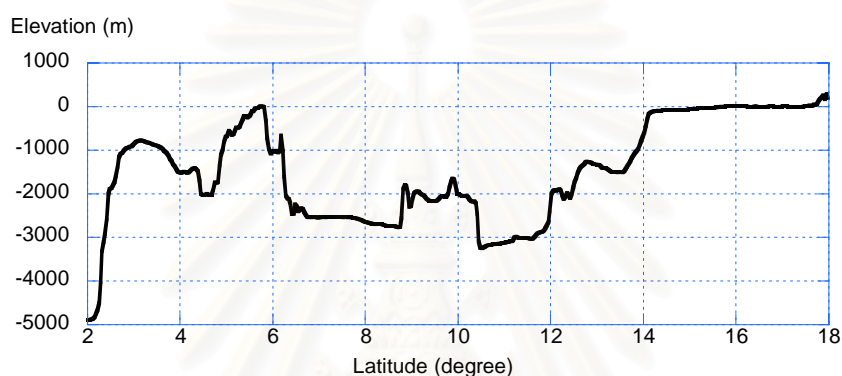
สำหรับข้อมูลภูมิประเทศและความลึกท้องน้ำที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถแบ่งออกตามขอบเขตของการคำนวณได้ดังนี้

5.3.1 ขอบเขตที่ 1

ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศและข้อมูลลักษณะของท้องน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ใช้ข้อมูลดิจิทัลจาก ETOPO2 (www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html) ความละเอียดของข้อมูล 1 ลิปดา แล้วทำการตีช่องกริดให้มีขนาด 2 ลิปดาจากรูปที่ 5.1 ได้แสดงภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 และ 2-2 ไว้ดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ



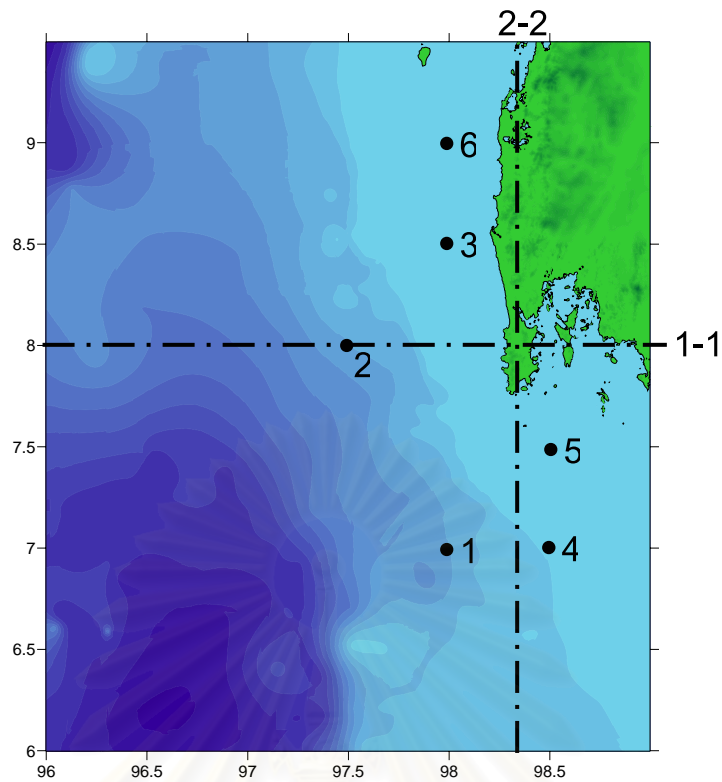
รูปที่ 5.2 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.1



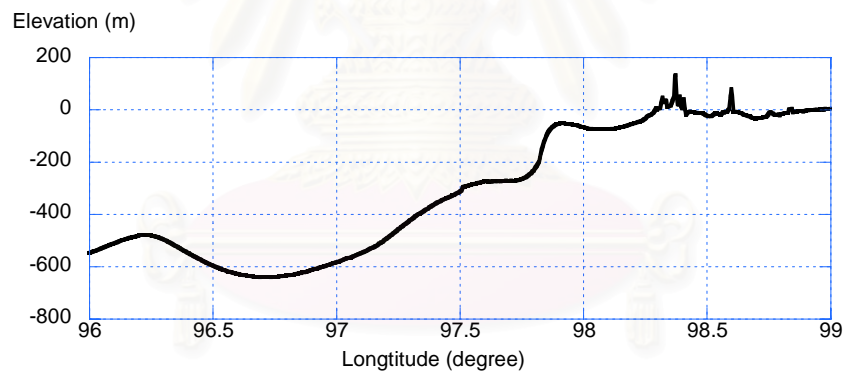
รูปที่ 5.3 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.1

5.3.2 ขอบเขตที่ 2

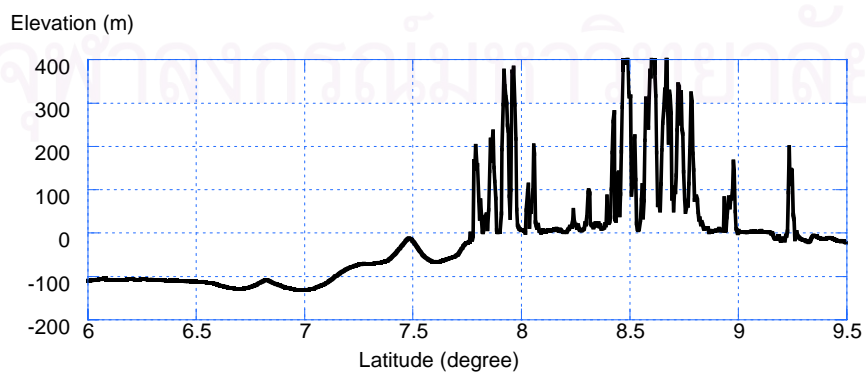
ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศประกอบด้วยข้อมูลดิจิทัลในบริเวณไกลจากแนวชายฝั่ง จาก ETOPO2 และข้อมูลดิจิทัลบริเวณชายฝั่งจากกรมแผนที่ทหาร ความละเอียดแนวราบของข้อมูล 30 ม. ซึ่งเป็นข้อมูลลักษณะภูมิประเทศที่ดีที่สุดที่สามารถหาได้ในการศึกษานี้ สำหรับข้อมูลลักษณะพื้นท้องน้ำได้มาจากการดิจิทัลแผนที่เดินเรือของกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือหมายเลข 362 ซึ่งแสดงความลึกของท้องน้ำที่ระดับน้ำต่ำสุด (Lowest water) แล้วได้ทำการปรับแก้เป็นความลึกที่เทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean sea level) โดยระดับน้ำต่ำสุดอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลปานกลาง 2.35 เมตร ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างระดับน้ำทะเลปานกลางกับระดับน้ำต่ำสุดของ 6 สถานี ได้แก่สถานีปากน้ำระนอง จ.ระนอง, สถานีคุระบุรี จ.พังงา, สถานีปากน้ำกระบี่ จ.กระบี่, สถานีแม่น้ำตรัง จ.ตรัง, สถานีปากน้ำเจ๊ะบิลัง จ.สตูล และสถานีตำมะลัง จ.สตูล ตามข้อมูลจากสถานีวัดน้ำของกรมการขนส่งทางน้ำและพาณิชยนาวีดังแสดงในภาคผนวก ง. แล้วทำการตีช่องกริดใหม่ให้มีขนาด 15 พิลิปดา ดังแสดงในรูปที่ 5.4 – 5.6



รูปที่ 5.4 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 2 และตำแหน่งจุดตรวจวัด



รูปที่ 5.5 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.2

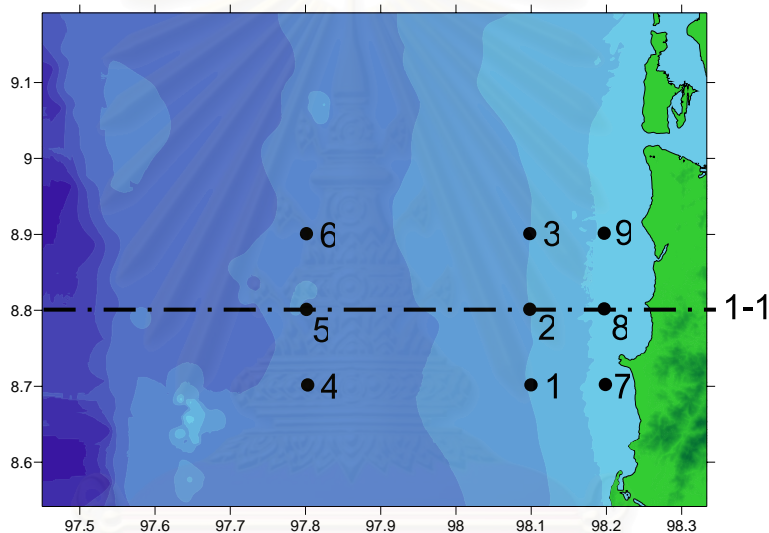


รูปที่ 5.6 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.2

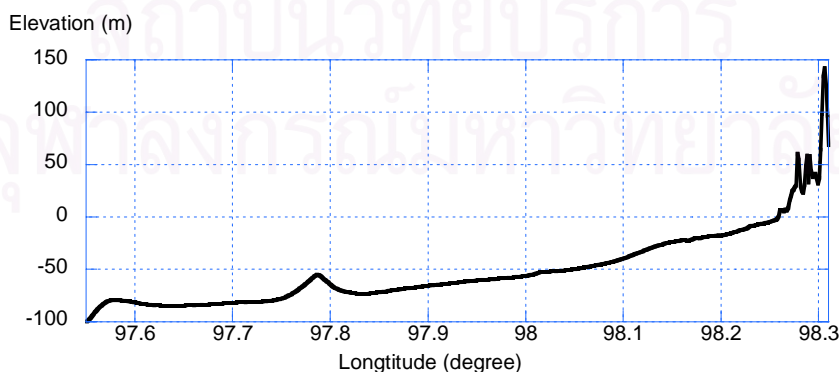
5.3.3 ขอบเขตที่ 3

บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา

ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศได้มาจากข้อมูลดิจิทัลของกรมแผนที่ทหารประกอบด้วยแผนที่หมายเลข 46261, 46262 และ 46263 สำหรับข้อมูลลักษณะพื้นที่ของน้ำได้มาจากการดิจิทัลแผนที่ที่เดินเรือของกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือหมายเลข 307 และข้อมูลดิจิทัลการสำรวจโดยกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือหลังจากเกิดเหตุการณ์สึนามิ 2004 โดยได้ทำการสำรวจเฉพาะบริเวณใกล้ชายฝั่งซึ่งห่างจากชายฝั่งประมาณ 8 กม. ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าความลึกของท้องน้ำที่ระดับน้ำต่ำสุด ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้เช่นเดียวกับทำการปรับแก้จากการดิจิทัลแผนที่ที่เดินเรือ แล้วทำการตีช่องกริดให้มีขนาด 5 ฟิลิปดา ดังแสดงในรูปที่ 5.7 สำหรับภาคตัดขวางได้แสดงในรูปที่ 5.8



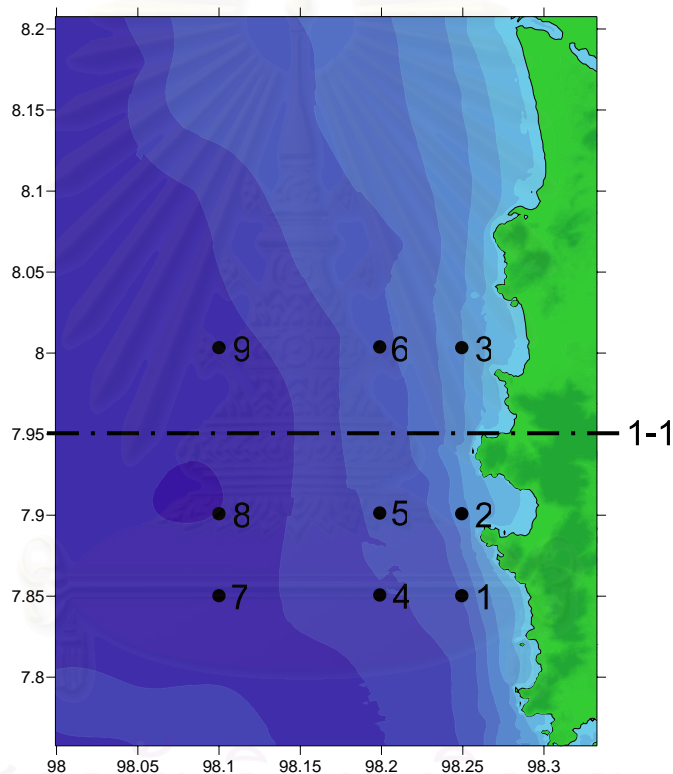
รูปที่ 5.7 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา และตำแหน่งจุดตรวจวัด



รูปที่ 5.8 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.7

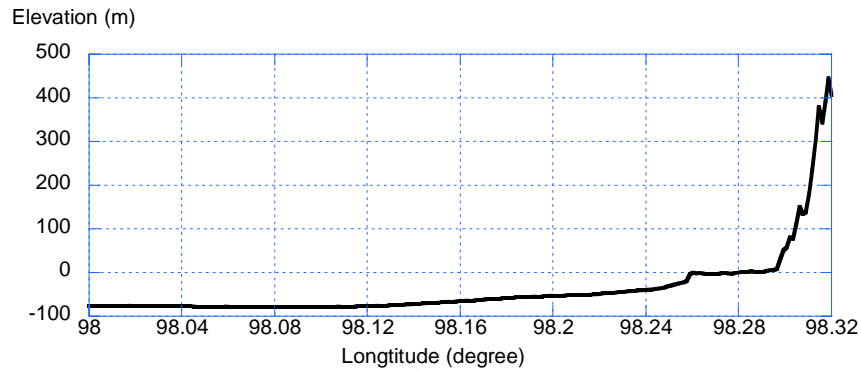
บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศได้มาจากข้อมูลดิจิทัลของกรมแผนที่ทหารประกอบด้วยแผนที่หมายเลข 46241 และ 46252 สำหรับข้อมูลลักษณะพื้นท้องน้ำได้มาจากการดิจิไทซ์แผนที่เดินเรือของกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือหมายเลข 308 และข้อมูลดิจิทัลจากการสำรวจโดยกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือหลังจากเกิดเหตุการณ์สึนามิ 2004 โดยได้ทำการสำรวจเฉพาะบริเวณใกล้ชายฝั่งซึ่งห่างจากชายฝั่งประมาณ 2 กม. ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าความลึกของท้องน้ำที่ระดับน้ำต่ำสุด ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้เช่นเดียวกับทำการปรับแก้จากการดิจิไทซ์แผนที่เดินเรือแล้วทำการตีช่องกริดให้มีขนาด 5 ฟิลิปดา ดังแสดงในรูปที่ 5.9 สำหรับภาคตัดขวางได้แสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต และตำแหน่งจุดตรวจวัด

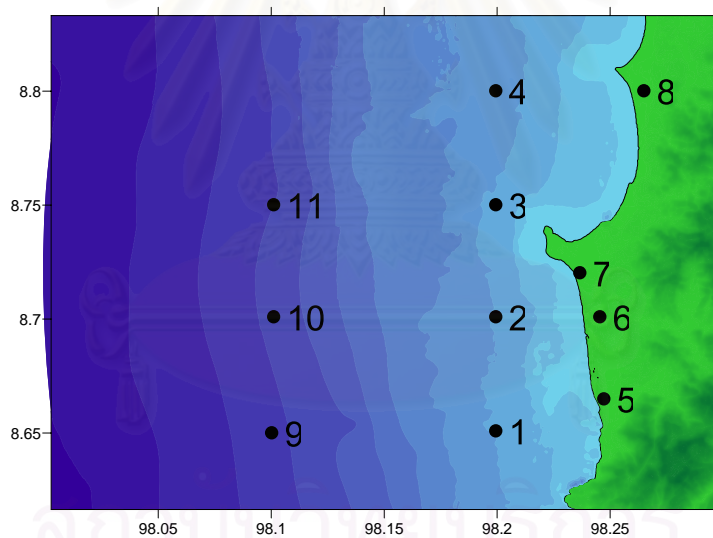
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



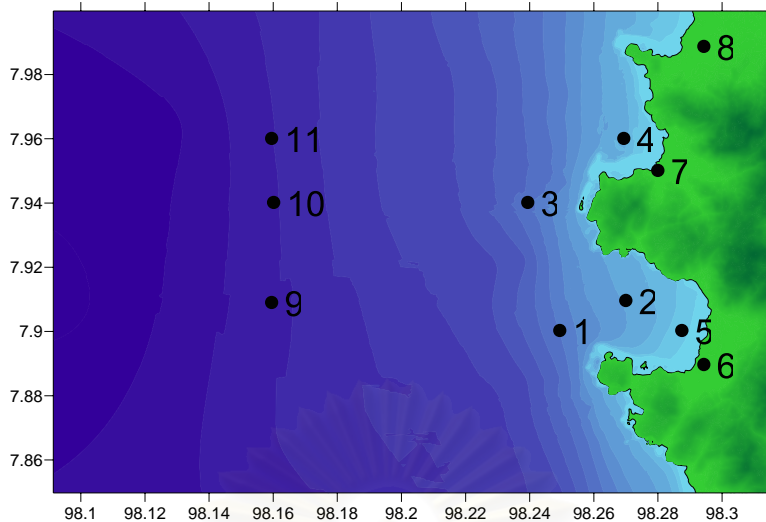
รูปที่ 5.10 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.9

5.3.4 ขอบเขตที่ 4

แหล่งที่มาข้อมูลลักษณะภูมิประเทศและข้อมูลลักษณะพื้นที่ของน้ำเหมือนกับขอบเขตที่ 3 แล้วทำการตีช่องกริดให้มีขนาด 5/3 ฟิลิปดา แบ่งออกเป็น 2 บริเวณคือบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาและบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ดังแสดงในรูปที่ 5.11 และ รูปที่ 5.12 ตามลำดับ



รูปที่ 5.11 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา และตำแหน่งจุดตรวจวัด



รูปที่ 5.12 ขอบเขตของขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต และตำแหน่งจุดตรวจวัด

5.4 การเลือกช่วงเวลาแต่ละชั้น (Δt)

ในการคำนวณสมการคลื่นยาว จะมีตัวแปรที่ต้องมีการเลือกค่าที่เหมาะสม คือ ขนาดกริด (Grid size) และช่วงเวลาแต่ละชั้น (Time step) ซึ่งส่วนใหญ่ขนาดกริดจะถูกจำกัดค่าด้วยความละเอียดของข้อมูลท้องน้ำหรือภูมิประเทศ ดังนั้นจึงได้เปลี่ยนขนาดของช่วงเวลาแต่ละชั้น แล้วเปรียบเทียบผลโดยเลือกค่าที่ให้ผลออกมาใกล้เคียงกับผลที่ใช้ช่วงเวลาแต่ละชั้นน้อยกว่า เพื่อที่จะใช้เวลาในการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์น้อยที่สุดและได้คำตอบที่ถูกต้อง

ได้มีการเสนอเงื่อนไขการเลือกขนาดกริดและช่วงเวลาแต่ละชั้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางตัวเลข จะกำหนดให้เหมาะสมกับเงื่อนไขของอิมามูระนัมเบอร์ (Imamura number, I_m) โดยจะกำหนดให้มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง

$$I_m = \Delta x / 2h\sqrt{1 - K^2} \quad (5.1)$$

$$K = \sqrt{gh} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5.2)$$

และพิจารณาตามเงื่อนไขของ CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) คือ

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \sqrt{2gh_{\max}} \quad (5.3)$$

เมื่อ

K = คอเรนตันัมเบอร์ (Courant Number)

h = ความลึกเฉลี่ยของท้องน้ำ บริเวณที่พิจารณา

h_{max} = ความลึกมากที่สุดของท้องน้ำ บริเวณที่พิจารณา

Δt = ช่วงเวลาแต่ละขั้น

จากสมการที่ 5.1 หาค่าช่วงเวลาแต่ละครั้งของแต่ละขอบเขตการคำนวณได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบช่วงเวลาแต่ละขั้นตามความลึกของท้องน้ำของขอบเขตการคำนวณต่างๆ

ขอบเขตการคำนวณ	h(max) (เมตร)	Δx (ฟิลิปดา)	Δx (เมตร)	Δt (วินาที)
1	4946	120	3710.5	11.9
2	1319	15	463.8	2.88
3	177	5	154.6	2.62
4	81	1.66667	51.5	1.29

จากสมการคลื่นยาวในการคำนวณค่าต่างๆแบบการทำซ้ำๆกันหลายๆรอบ จะต้องมีการเลือกค่าช่วงเวลาแต่ละขั้นที่เหมาะสม บางทีต้องขึ้นอยู่กับสภาพท้องน้ำที่วิเคราะห์ในแต่ละที่ซึ่งอาจจะต้องมีการทดสอบจริงกับสภาพท้องน้ำที่จะวิเคราะห์ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์จริง ซึ่งจะเป็นการทดสอบที่ช่วยในการตัดสินใจที่ดี

การคำนวณค่าต่างๆแบบการทำซ้ำๆกันหลายๆรอบ จะต้องมีการเลือกค่าช่วงเวลาแต่ละขั้นที่เหมาะสม ต้องขึ้นอยู่กับสภาพท้องน้ำในแต่ละที่ซึ่งทำการวิเคราะห์หลายกรณีโดยใช้ช่วงเวลาแต่ละขั้นที่ต่างกัน ในการศึกษานี้ได้วิเคราะห์เลือกช่วงเวลาแต่ละขั้นโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือในขอบเขตการคำนวณที่ 1 และในขอบเขตการคำนวณที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งทำการตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 2 โดยลักษณะรอยเลื่อนของ Fujii และ Satake (2006) ซึ่งแบ่งรอยเลื่อนออกเป็น 22 รอยเลื่อนย่อยให้ปกคลุมตำแหน่งของจุดกำเนิดแผ่นดินไหวหลัก (Main shock) และจุดกำเนิดของแผ่นดินไหวที่ตามมาทีหลัง (After shock) ทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 5.13 สำหรับค่าลักษณะต่างๆ ของรอยเลื่อนหาโดยการคำนวณย้อนกลับจากผลการจัดบันทึกจากสถานีวัดน้ำในบริเวณมหาสมุทรอินเดียและผลจากการบันทึกจากการสำรวจของดาวเทียม Jason-1, TOPEX/Poseidon และ Envisat การกำหนดตำแหน่งเพื่อเลือกช่วงเวลาของขอบเขตการคำนวณที่ 1 กำหนด 4 จุดซึ่ง

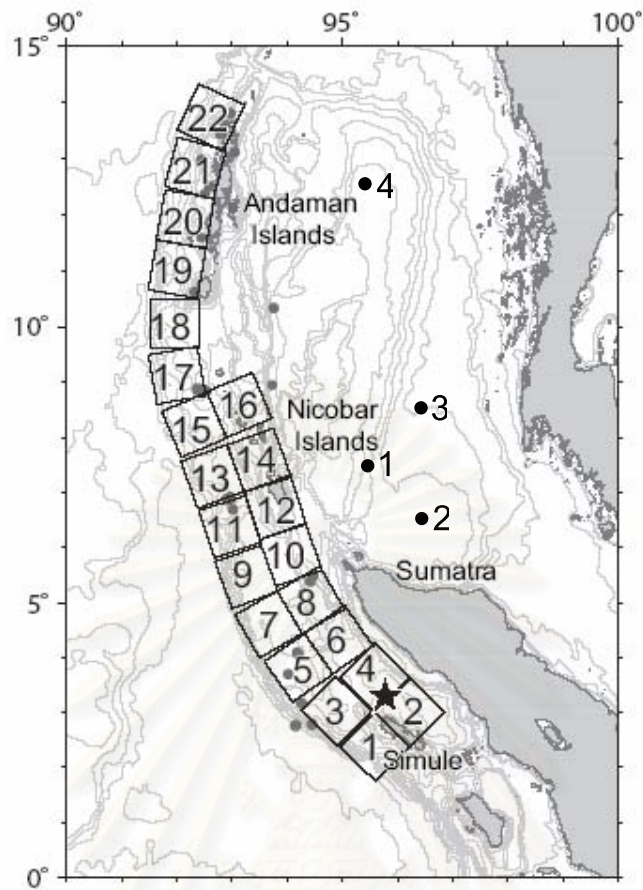
มีค่าพิกัดดังตารางที่ 5.2 โดยกระจายตัวตามแนวรอยเลื่อนดังแสดงในรูปที่ 5.13 แสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5.15-5.18 สำหรับเขตการคำนวณที่ 2, 3 และ 4 กำหนดจุดตรวจวัด 4 จุด ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งกระจายตัวตามแนวชายฝั่งประเทศไทยดังแสดงในรูปที่ 5.14 แสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 5.19-5.22

ตารางที่ 5.2 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 1

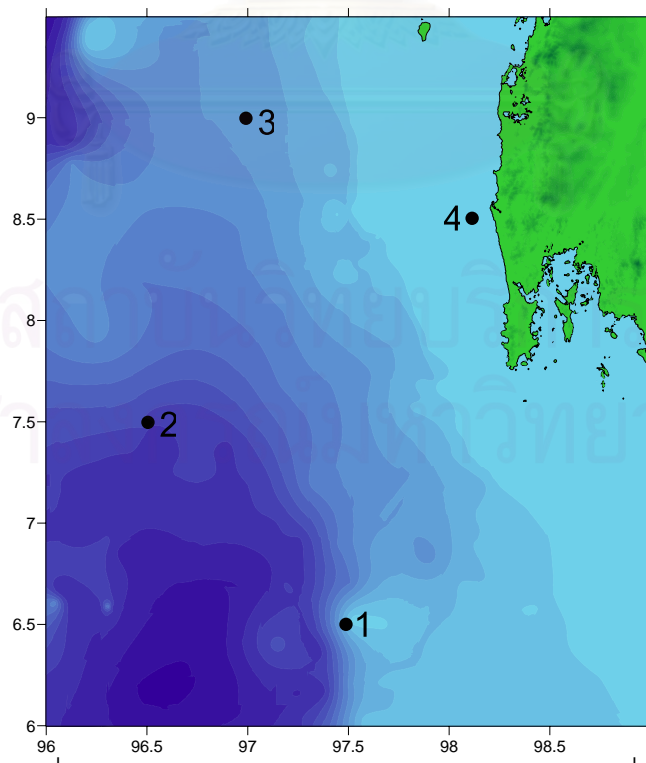
จุด	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
P1	7.5	95.5
P2	6.5	96.5
P3	8.5	96.5
P4	12.5	95.5

ตารางที่ 5.3 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 2, 3 และ 4

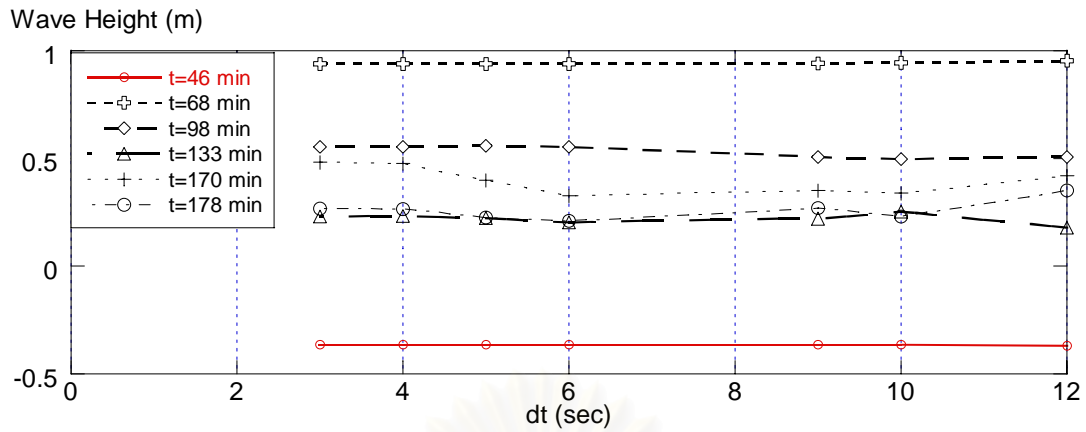
จุด	ละติจูด (องศา)			ลองจิจูด (องศา)		
	°	'	"	°	'	"
P1	6	30	7.5	97	30	7.5
P2	7	30	7.5	96	30	7.5
P3	9	0	7.5	97	0	7.5
P4	8	30	7.5	98	13	7.5



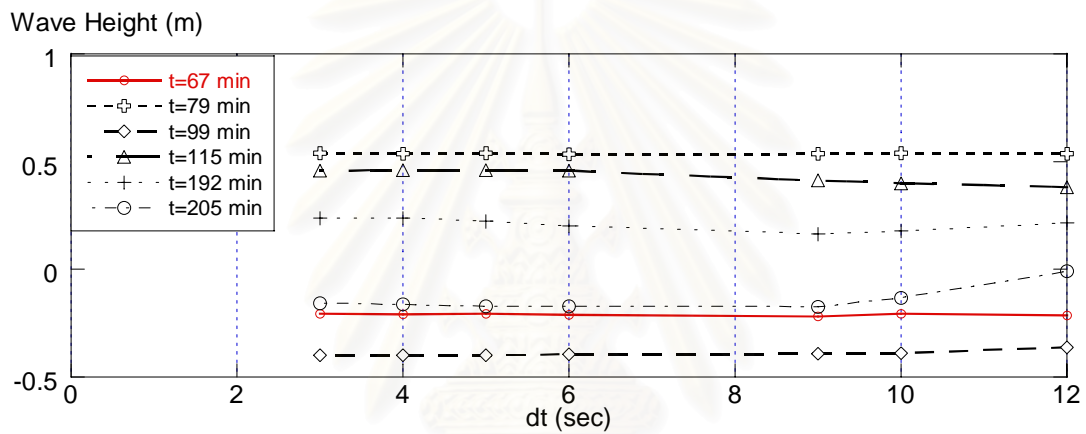
รูปที่ 5.13 หมายเลขของรอยเลื่อนย่อยและตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 1



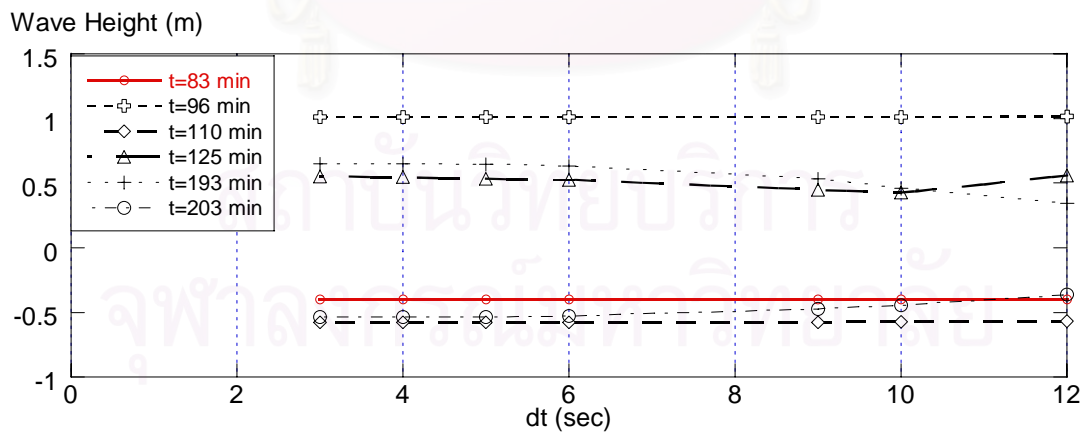
รูปที่ 5.14 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 2



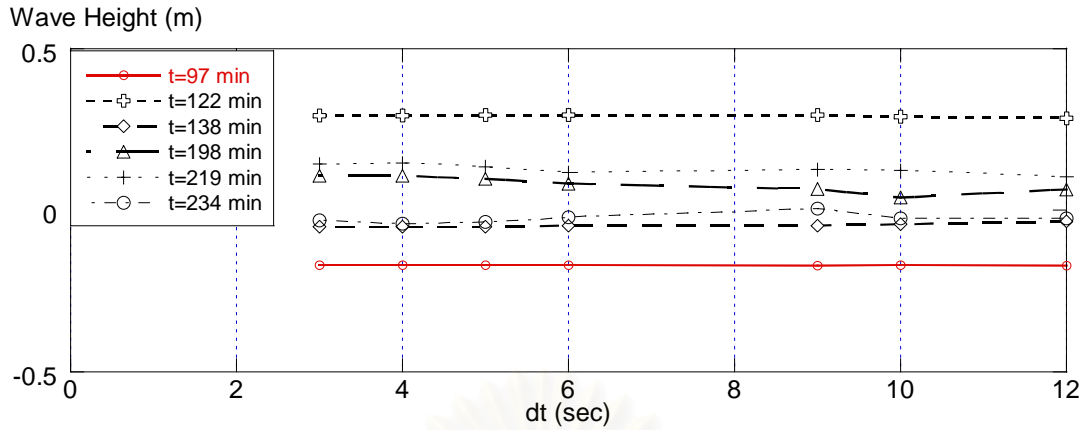
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 1 ที่จุด 1



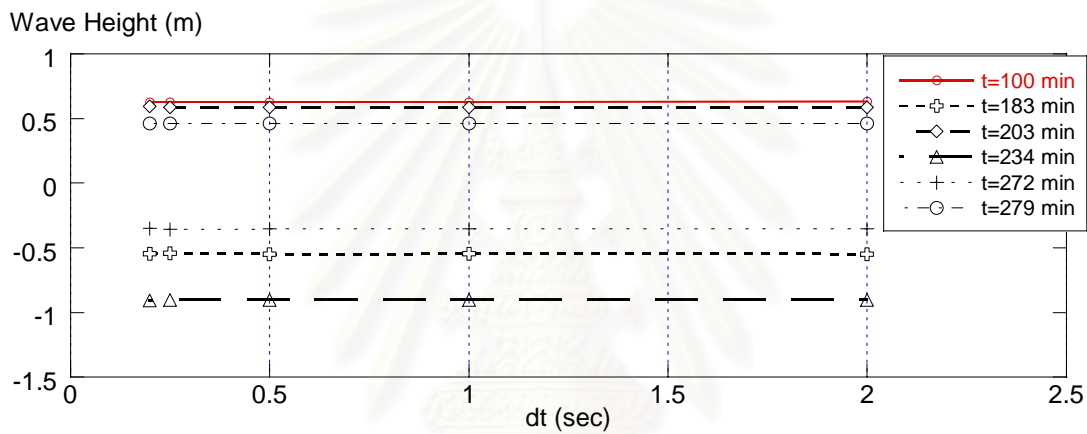
รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 1 ที่จุด 2



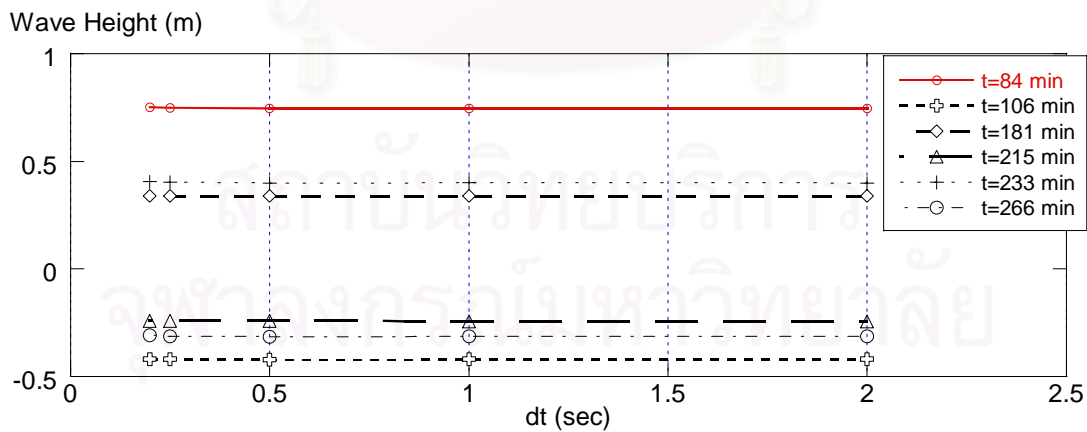
รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 1 ที่จุด 3



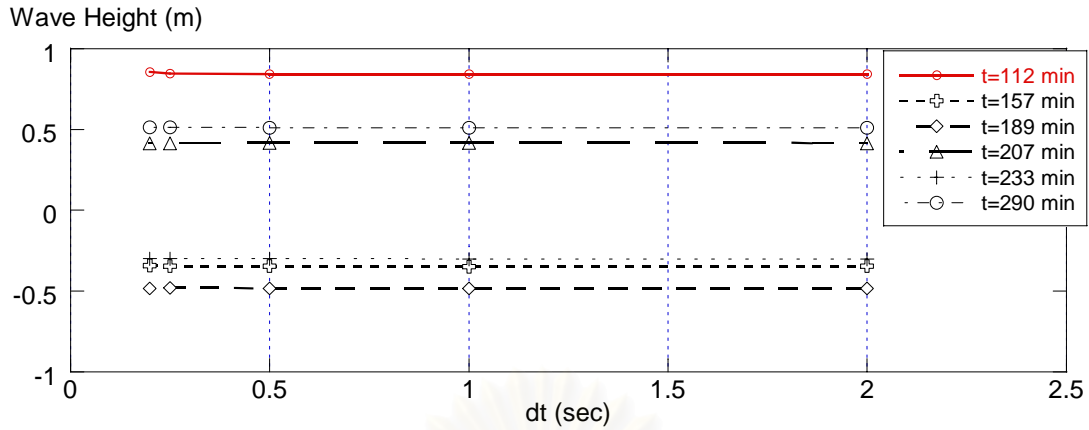
รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 1 ที่จุด 4



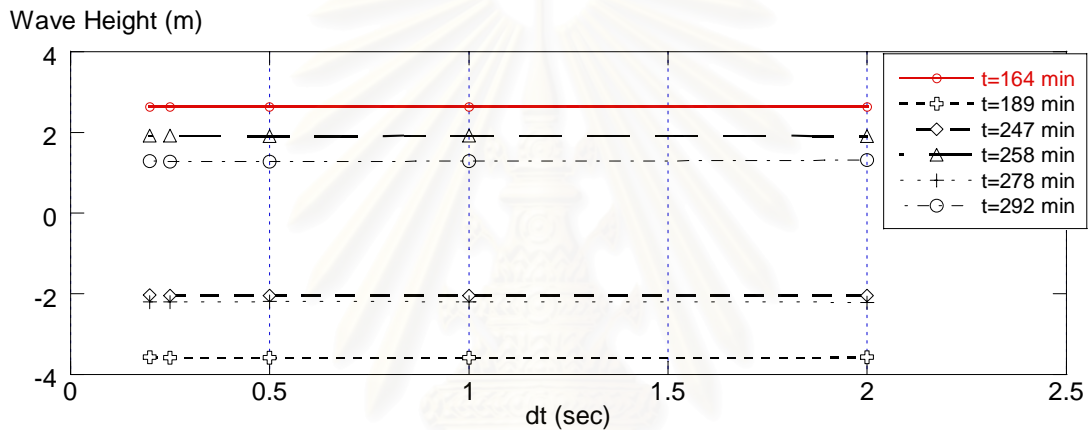
รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 2 ที่จุด 1



รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 2 ที่จุด 2



รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 2 ที่จุด 3

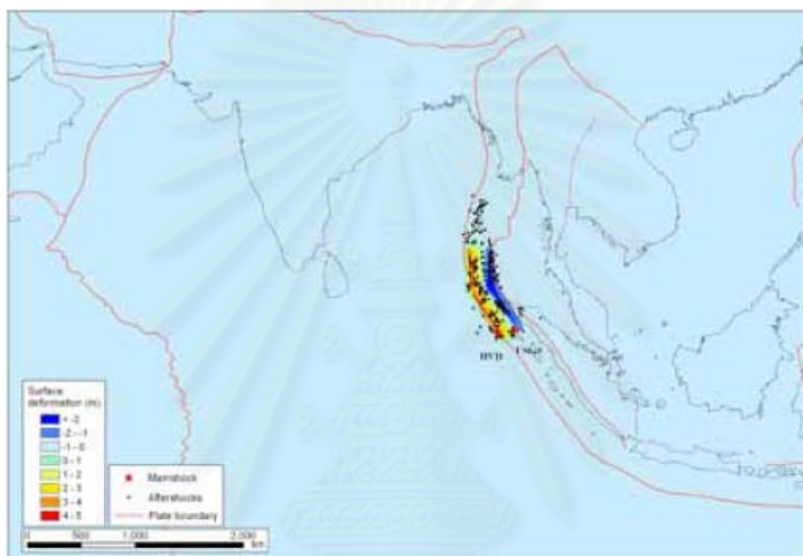


รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบความสูงสำหรับช่วงเวลาต่างๆ ของขอบเขตการคำนวณที่ 2 ที่จุด 4

จากรูปที่ 5.15-5.18 จะเห็นว่าค่าช่วงเวลาแต่ละชั้นที่เหมาะสมสำหรับขอบเขตการคำนวณที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วงเท่ากับ 3-5 วินาที เพราะค่าความสูงที่ได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ถ้าช่วงเวลามากกว่า 4 วินาที จะมีค่าความสูงบางจุดที่ให้ค่าต่างกันอย่างมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้จะใช้ช่วงเวลาแต่ละชั้นเท่ากับ 4 วินาที สำหรับขอบเขตการคำนวณที่ 1 เพราะที่ช่วงเวลาแต่ละชั้นเท่ากับ 4 วินาทีเริ่มจะให้ค่าคงที่ สำหรับขอบเขตการคำนวณที่ 2 จากรูปที่ 5.19-5.22 เห็นได้ว่าค่าไม่แตกต่างกันแต่จากรายที่ 5.1 ค่าช่วงเวลาแต่ละชั้นของขอบเขตการคำนวณที่ 4 มีค่าเท่ากับ 1.29 วินาที ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้จะใช้ช่วงเวลาแต่ละชั้นเท่ากับ 1 วินาที สำหรับขอบเขตการคำนวณที่ 2, 3 และ 4

5.5 ลักษณะของรอยเลื่อน

ในการศึกษานี้ใช้ค่าลักษณะของรอยเลื่อนของ Koshimura และ Takashima (2005) ซึ่งหาค่าลักษณะของรอยเลื่อนจากการคำนวณย้อนกลับจากผลการสำรวจของดาวเทียม Jason-1 โดยแบ่งรอยเลื่อนออกเป็น 2 รอยเลื่อนย่อยปกคลุมตำแหน่งของจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว (Main shock) และตำแหน่งของแผ่นดินไหวที่ตามมาทีหลัง (After shock) ดังรูปที่ 5.23 จากการคำนวณได้ค่าลักษณะของรอยเลื่อนดังตารางที่ 5.4

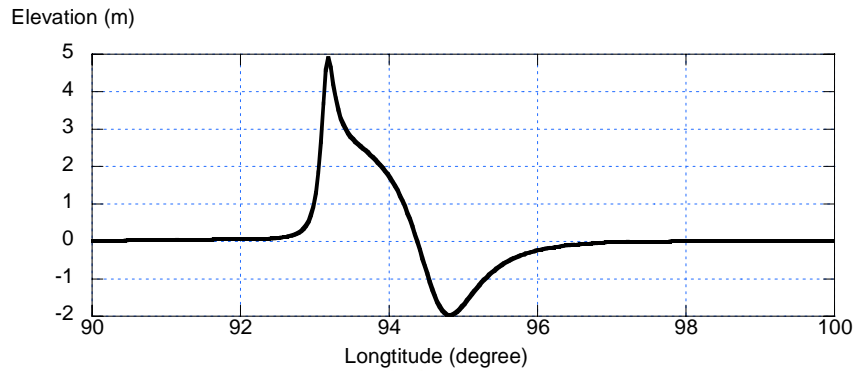


รูปที่ 5.23 แนววางตัวและตำแหน่งของรอยเลื่อน (Koshimura และ Takashima, 2005)

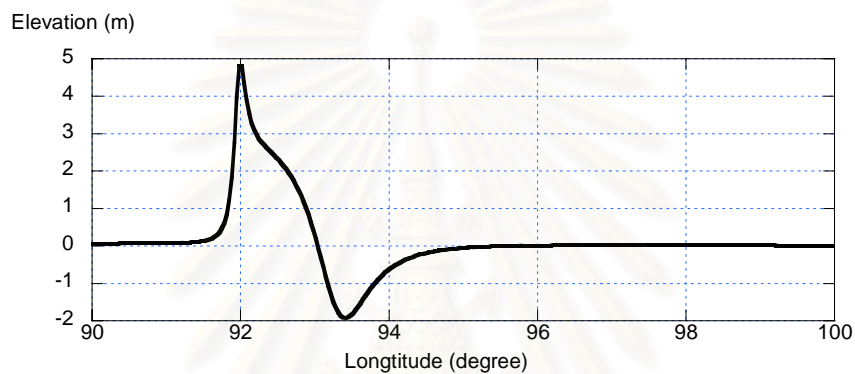
ตารางที่ 5.4 ค่าลักษณะต่างๆ ของรอยเลื่อน (Koshimura และ Takashima, 2005)

Characteristic	Southern Segment	Northern Segment
L / W (km)	500 / 150	400 / 150
Strike / Dip / Slip (degree)	329 / 15 / 90	358 / 15 / 90
Depth (km)	10	10
Dislocation (m)	11	11
Origin (Longitude /	94.8E / 2.5 N	92.0E / 6.5N

ซึ่งสามารถหาขนาดของการยกตัวที่จะใช้ในการหาค่าเริ่มต้นของความสูงคลื่นของรอยเลื่อนย่อยที่ 1 และรอยเลื่อนย่อยที่ 2 ได้ดังรูปที่ 5.24 และ 5.25 ตามลำดับโดยมีค่าการยกตัวสูงสุดประมาณ 5 ม. สำหรับทั้งสองรอยเลื่อน



รูปที่ 5.24 รูปตัดขวางการยกตัวของพื้นเนื่องจากรอยย่อยที่ 1 (Latitude = 5°)



รูปที่ 5.25 รูปตัดขวางการยกตัวของพื้นเนื่องจากรอยย่อยที่ 2 (Latitude = 8°)

5.6 การกำหนดตำแหน่งจุดตรวจวัดต่างๆที่ใช้พิจารณา

การกำหนดตำแหน่งจุดตรวจวัดต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นและกำหนดจุดตรวจวัดบนชายฝั่งเพื่อวิเคราะห์การท่วมถึงของคลื่นเฉพาะในขอบเขตการคำนวณที่ 4 ซึ่งตำแหน่งของจุดตรวจวัดจะแบ่งออกตามขอบเขตการคำนวณสำหรับเขตเขตการคำนวณที่ 1 กำหนดจุดตรวจวัดทั้งหมด 10 จุดดังแสดงในตารางที่ 5.5 และดังรูปที่ 5.1 ขอบเขตการคำนวณที่ 2 กำหนดจุดตรวจวัดทั้งหมด 6 จุดดังแสดงในตารางที่ 5.6 และดังรูปที่ 5.4 ขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา กำหนดจุดตรวจวัดทั้งหมด 9 จุดดังแสดงในตารางที่ 5.7 และดังรูปที่ 5.7 และบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต กำหนดจุดตรวจวัดทั้งหมด 9 จุดดังแสดงในตารางที่ 5.8 และดังรูปที่ 5.9 สำหรับขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา กำหนดจุดตรวจวัดทั้งหมด 11 จุดดังแสดงในตารางที่ 5.9 และดังรูปที่ 5.11 และบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต กำหนดจุดตรวจวัดทั้งหมด 9 จุดดังแสดงในตารางที่ 5.10 และดังรูปที่ 5.12

ตารางที่ 5.5 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 1

จุด	ละติจูด			ลองจิจูด		
	°	'	"	°	'	"
1	4	1	0	92	1	0
2	6	1	0	91	1	0
3	8	1	0	91	1	0
4	10	1	0	91	1	0
5	7	1	0	96	1	0
6	9	1	0	95	1	0
7	11	1	0	95	1	0
8	7	1	0	98	1	0
9	8	31	0	97	31	0
10	9	31	0	97	31	0

ตารางที่ 5.6 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 2

จุด	ละติจูด			ลองจิจูด		
	°	'	"	°	'	"
1	7	0	7.5	98	0	7.5
2	8	0	7.5	97	30	7.5
3	8	30	7.5	98	0	7.5
4	7	0	7.5	98	30	7.5
5	7	30	7.5	98	30	7.5
6	9	0	7.5	98	0	7.5

ตารางที่ 5.7 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา

จุด	ละติจูด			ลองจิจูด		
	°	'	"	°	'	"
1	8	42	2.5	98	6	2.5
2	8	48	2.5	98	6	2.5
3	8	54	2.5	98	6	2.5
4	8	42	2.5	97	48	2.5
5	8	48	2.5	97	48	2.5
6	8	54	2.5	97	48	2.5
7	8	42	2.5	98	12	2.5
8	8	48	2.5	98	12	2.5
9	8	54	2.5	98	12	2.5

ตารางที่ 5.8 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

จุด	ละติจูด			ลองจิจูด		
	°	'	"	°	'	"
1	7	51	2.5	98	15	2.5
2	7	54	2.5	98	15	2.5
3	8	3	2.5	98	15	2.5
4	7	51	2.5	98	12	2.5
5	7	54	2.5	98	12	2.5
6	8	3	2.5	98	12	2.5
7	7	51	2.5	98	6	2.5
8	7	54	2.5	98	6	2.5
9	8	3	2.5	98	6	2.5

ตารางที่ 5.9 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา

จุด	ละติจูด			ลองจิจูด		
	°	'	"	°	'	"
1	8	39	0.83	98	12	0.83
2	8	42	0.83	98	12	0.83
3	8	45	0.83	98	12	0.83
4	8	48	0.83	98	12	0.83
5	8	40	48.83	98	14	30.83
6	8	42	0.83	98	14	30.83
7	8	43	48.83	98	13	48.83
8	8	48	18.83	98	15	36.83
9	8	39	0.83	98	6	0.83
10	8	42	0.83	98	6	0.83
11	8	45	0.83	98	6	0.83

ตารางที่ 5.10 ตำแหน่งจุดตรวจวัดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

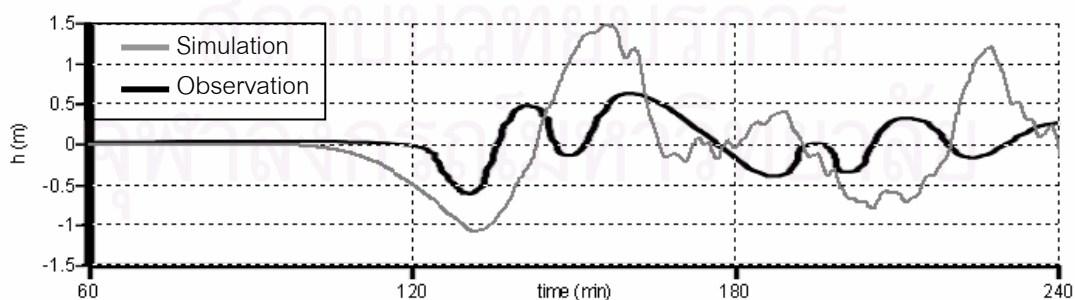
จุด	ละติจูด			ลองจิจูด		
	°	'	"	°	'	"
1	7	54	0.83	98	15	0.83
2	7	54	36.83	98	16	12.83
3	7	56	24.83	98	14	24.83
4	7	57	36.83	98	16	12.83
5	7	54	0.83	98	17	6.83
6	7	53	24.83	98	17	24.83
7	7	57	0.83	98	16	48.83
8	7	59	24.83	98	17	42.83
9	7	54	36.83	98	9	36.83
10	7	56	24.83	98	9	36.83
11	7	57	36.83	98	9	36.83

5.7 การสอบเทียบแบบจำลอง

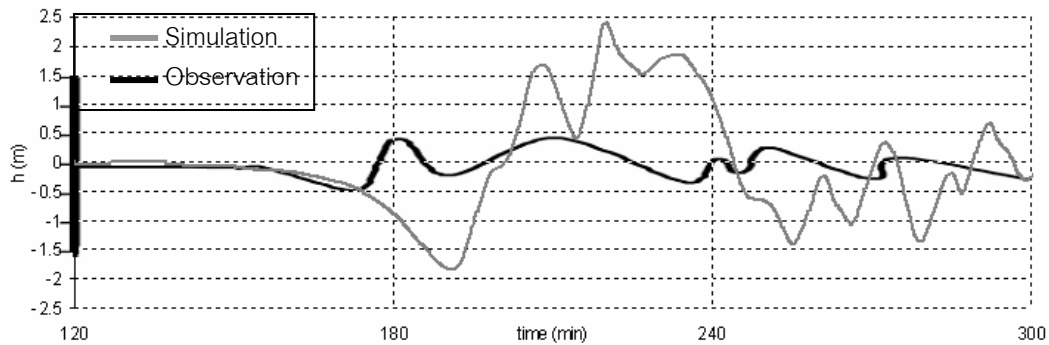
ในการศึกษานี้ได้ทำการสอบเทียบ 1) เวลามาถึงของคลื่น (Arrival time) จากแบบจำลองกับข้อมูลการบันทึกของสถานีวัดน้ำตะพานน้อยและสถานีวัดน้ำคุระบุรีโดยทั้ง 2 สถานีนั้นอยู่ในขอบเขตการคำนวณที่ 2, 2) ค่าความสูงคลื่น (Wave height) จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการสำรวจโดย DPRI, 3) ภาคตัดขวางความสูงคลื่นจากข้อมูลการสำรวจโดยรองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และ คณะ 4) สอบเทียบพื้นที่ของการท่วมถึง (Inundation area) ซึ่งทำการสำรวจโดย รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ และคณะ

5.7.1 การสอบเทียบเวลามาถึงของคลื่น

ผู้วิจัยได้สอบเทียบเวลามาถึงของคลื่นสอบเทียบกับข้อมูลจากการบันทึกจากสถานีวัดน้ำตะพานน้อยซึ่งตั้งอยู่บนพิกัด $98^{\circ} 25' 30''$ E, $07^{\circ} 49' 30''$ N และสถานีวัดน้ำคุระบุรีซึ่งตั้งอยู่บนพิกัด $98^{\circ} 20' 00''$ E, $09^{\circ} 13' 29''$ N จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองคลื่นใช้เวลาเดินทางมาถึงสถานีวัดน้ำตะพานน้อยหลังจากเกิดแผ่นดินไหวประมาณ 100 นาทีและคลื่นใช้เวลาเดินทางมาถึงสถานีวัดน้ำตะรุเตา หลังจากเกิดแผ่นดินไหวประมาณ 160 นาทีแต่ค่าความสูงของคลื่นจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการบันทึกจากสถานีวัดน้ำเนื่องจากตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดคลื่นอยู่ในปากแม่น้ำซึ่งลึกเข้าไปในแผ่นดิน เพื่อต้องการหลีกเลี่ยงผลกระทบจากคลื่นทะเลและความสามารถของเครื่องมือวัดระดับน้ำแบบอนาล็อก ที่ใช้อยู่ปัจจุบันเป็นการบันทึกระดับน้ำขึ้นลงบนกระดาษ มีหุ่นลอยน้ำอยู่ในท่อสำหรับตรวจวัดระดับน้ำโดยเจาะรูเล็กๆ ข้างท่อ 3 รูให้น้ำเข้ามาอย่างช้าๆ ดังนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านอย่างรวดเร็วระดับน้ำในท่อจึงขยับขึ้นไม่ทันความสูงคลื่นที่บันทึกได้จึงต่ำกว่าความเป็นจริง ได้ผลดังรูปที่ 5.26 และรูปที่ 5.27



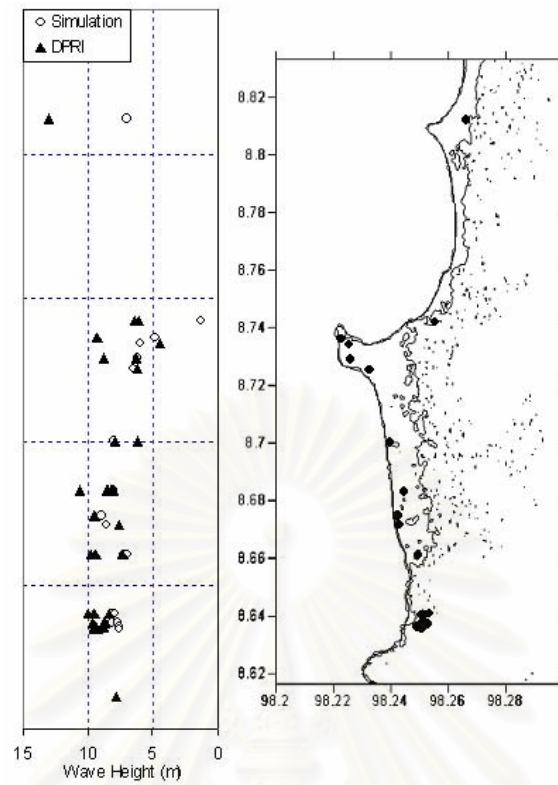
รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบข้อมูลจากสถานีวัดน้ำตะพานน้อยกับผลที่ได้จากแบบจำลอง



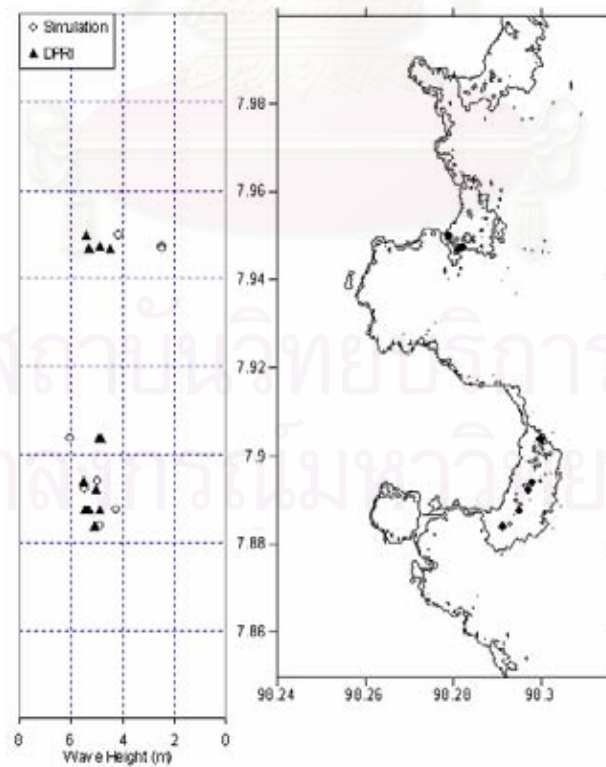
รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบข้อมูลจากสถานีวัดน้ำคูระบุรีกับผลที่ได้จากแบบจำลอง

5.7.2 การสอบเทียบความสูงคลื่น (Wave height)

ผู้วิจัยได้สอบเทียบความสูงคลื่นจากแบบจำลองกับข้อมูลจากการสำรวจโดย DPRI (Disaster Prevention Research Institute) ในตำแหน่งเดียวกัน โดยค่าความสูงคลื่นที่สอบเทียบเป็นค่าความสูงคลื่นเมื่อเทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิ ซึ่งสอบเทียบ 2 บริเวณในขอบเขตที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ซึ่งจากการสอบเทียบในทั้ง 2 บริเวณดังกล่าวได้ดังรูปที่ 5.28 สำหรับบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา ซึ่งจากข้อมูลจากการสำรวจโดย DPRI ได้ความสูงคลื่นเฉลี่ยในบริเวณนี้เท่ากับ 8.45 ม. ซึ่งจากผลจากแบบจำลองสึนามิได้ความสูงคลื่นเฉลี่ยเท่ากับ 7.02 ม. และรูปที่ 5.29 สำหรับบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ซึ่งจากข้อมูลจากการสำรวจโดย DPRI ได้ความสูงคลื่นเฉลี่ยในบริเวณนี้เท่ากับ 4.78 ม. ซึ่งจากผลจากแบบจำลองสึนามิได้ความสูงคลื่นเฉลี่ยเท่ากับ 4.29 ม. จากผลการสอบเทียบพบว่าความสูงคลื่นเฉลี่ยของทั้ง 2 บริเวณจากแบบจำลองต่างจากความสูงคลื่นเฉลี่ยของข้อมูลการสำรวจโดย DPRI ประมาณ 0.5 ม. ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลจากการสำรวจ สำหรับข้อมูลการสำรวจความสูงคลื่นโดย DPRI นั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ.



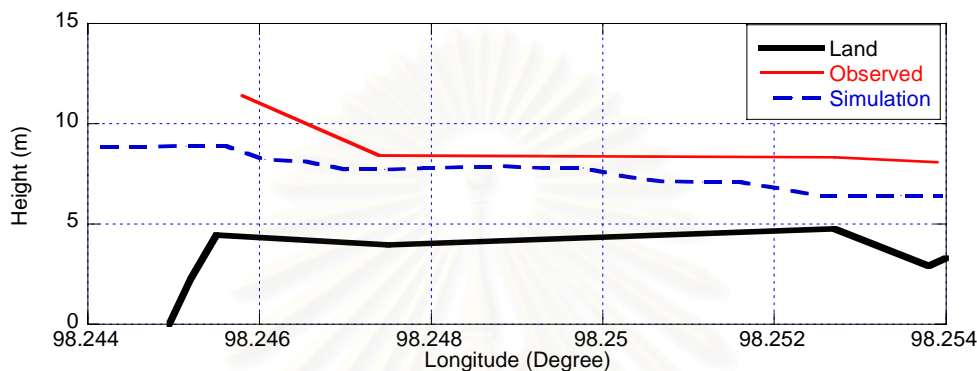
รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นจากแบบจำลองกับข้อมูลการสำรวจโดย DPRI บริเวณ
เขาหลัก จังหวัดพังงา



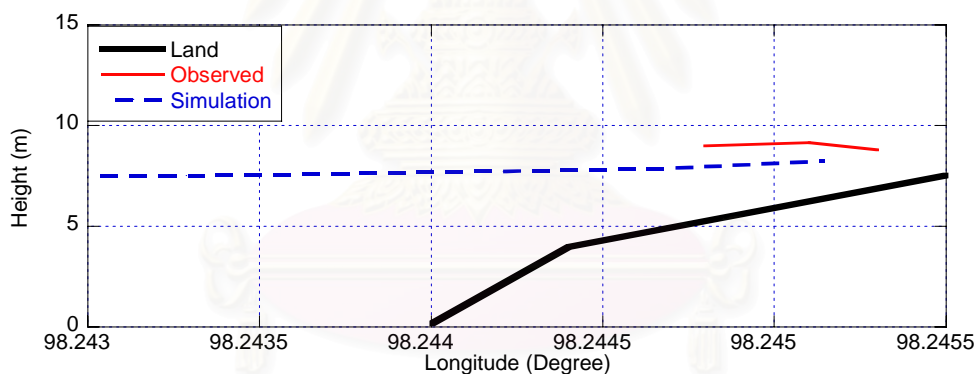
รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นจากแบบจำลองกับข้อมูลการสำรวจโดย DPRI บริเวณ
หาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

5.7.3 การสอบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่น

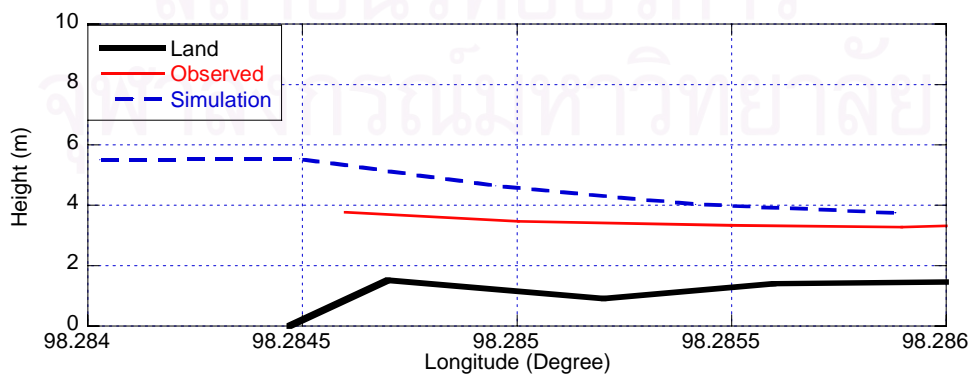
ผู้วิจัยได้สอบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นจากข้อมูลการสำรวจโดยรองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะโดยสามารถสอบเทียบได้เฉพาะแนวสำรวจที่อยู่ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 เท่านั้น ซึ่งมีทั้งหมด 4 แนวได้แก่ บริเวณบ้านบางเนียง จังหวัดพังงา, บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา, บริเวณหาดบางเทา จังหวัดภูเก็ตและบริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต ดังแสดงในรูปที่ 5.30-5.33 ตามลำดับ



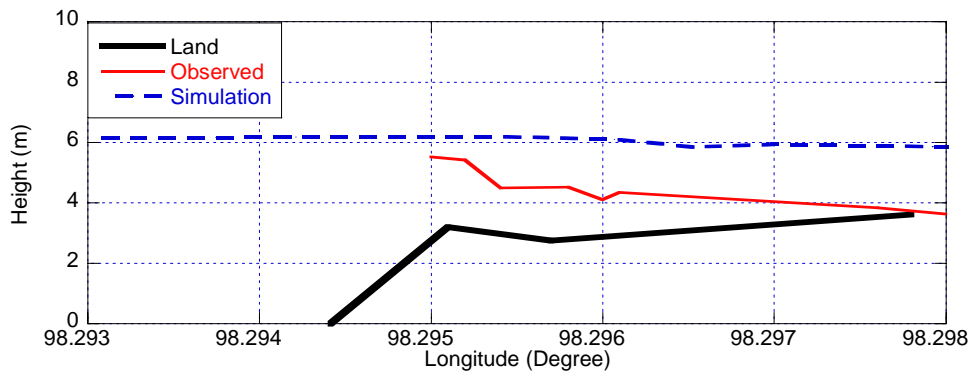
รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นบริเวณบ้านบางเนียง จังหวัดพังงาส่งตรวจโดยรองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะ



รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาส่งตรวจโดยรองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะ



รูปที่ 5.32 เปรียบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นบริเวณหาดบางเทา จังหวัดภูเก็ตส่งตรวจโดยรองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะ

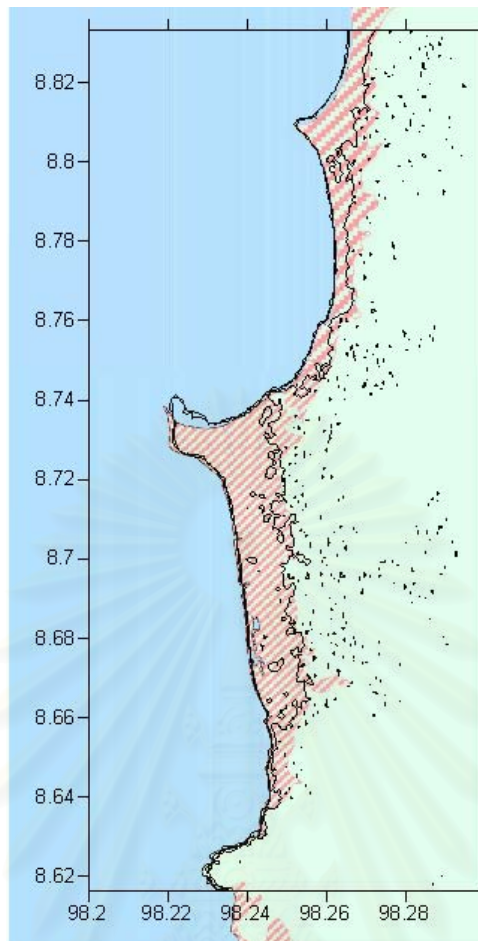


รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นบริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ตสำรวจโดยรองศาสตราจารย์ ดร. ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ และคณะ

ผลจากการสอบเทียบภาคตัดขวางความสูงคลื่นของทั้ง 4 แนวเห็นได้ว่าค่าความสูงคลื่นจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับความสูงคลื่นจากการสำรวจ แต่มีค่าต่างกันเล็กน้อยโดยสำหรับบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา ค่าความสูงคลื่นจากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าความสูงคลื่นจากการสำรวจเล็กน้อย ดังรูปที่ 5.30-5.31 และสำหรับบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ค่าความสูงคลื่นจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าความสูงคลื่นจากการสำรวจเล็กน้อย ดังรูปที่ 5.32-5.33

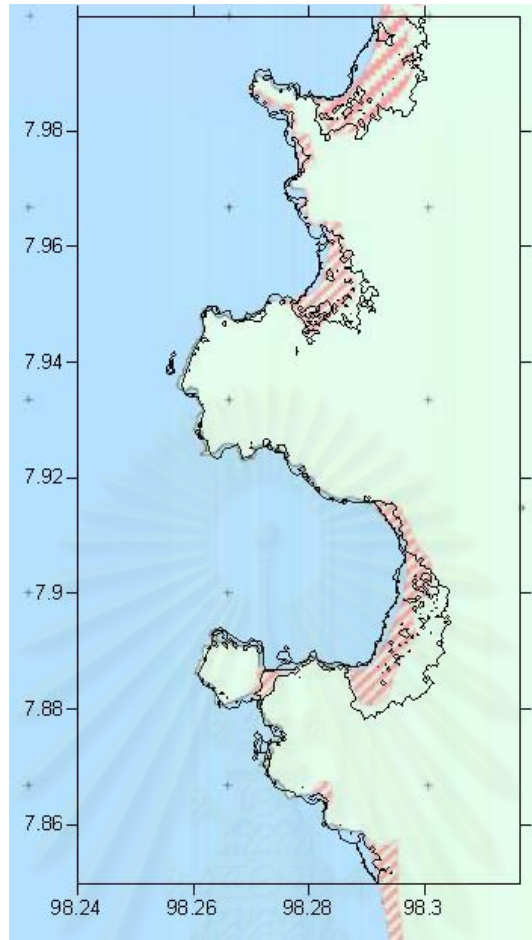
5.7.4 การสอบเทียบพื้นที่ของการท่วมถึง (Inundation area)

พื้นที่ของการท่วมถึงซึ่งทำการสำรวจโดยรองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ และคณะซึ่งสามารถสอบเทียบได้ 2 บริเวณซึ่งเป็นขอบเขตการคำนวณที่ 4 ดังรูปที่ 5.34 และรูปที่ 5.35 ทราบได้ว่าในบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา ผลจากแบบจำลองมีพื้นที่ของการท่วมถึงน้อยกว่าพื้นที่ที่ได้จากการสำรวจ และในบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ผลจากแบบจำลองมีพื้นที่ของการท่วมถึงมากกว่าพื้นที่ที่ได้จากการสำรวจ ซึ่งต่างเพียงเล็กน้อยดังนั้นแบบจำลองนี้จึงน่าเชื่อถือในการใช้หาพื้นที่ปลอดภัยจากสึนามิได้



รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบพื้นที่ของการท่วมถึงจากแบบจำลองกับข้อมูลการสำรวจโดย
รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ และคณะบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบพื้นที่ของการท่วมถึงจากแบบจำลองกับข้อมูลการสำรวจโดย
รองศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา จารุศิริ และคณะบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

5.8 ผลการวิเคราะห์

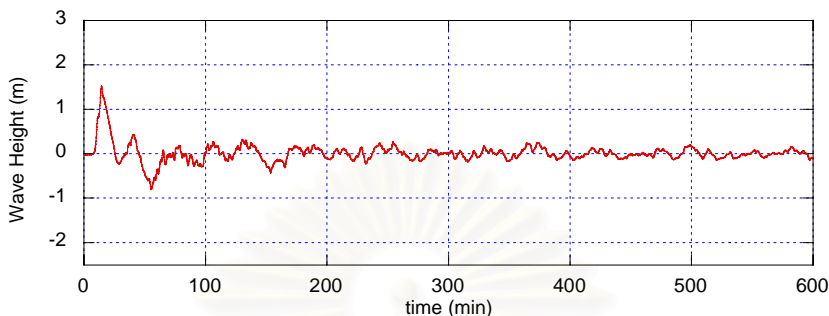
5.8.1 ลักษณะของคลื่น ณ จุดตรวจวัด

จากตำแหน่งของจุดตรวจวัดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นทำให้สามารถทราบถึงลักษณะของคลื่นที่เข้าสู่บริเวณชายฝั่งและทราบถึงเวลาที่คลื่นถึง (Arrival time) ของแต่ละหาด ซึ่งจำแนกตามขอบเขตการคำนวณได้ดังนี้

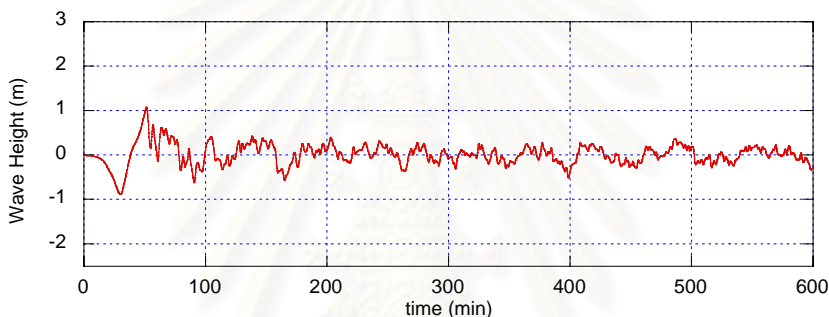
ขอบเขตการคำนวณที่ 1

ขอบเขตการคำนวณที่ 1 ได้แสดงในจุดตรวจวัดที่ 2, 5 และ 9 ดังรูปที่ 5.36 - 5.38 ซึ่งจุดที่ 2 อธิบายถึงลักษณะของสึนามิที่แพร่กระจายไปทางทิศตะวันตกของรอยเลื่อนซึ่งผลจากแบบจำลองเหมือนกับข้อมูลการสำรวจคือ สันคลื่นจะมาถึงก่อนท้องคลื่น สำหรับจุดที่ 5 สามารถอธิบายได้ว่า

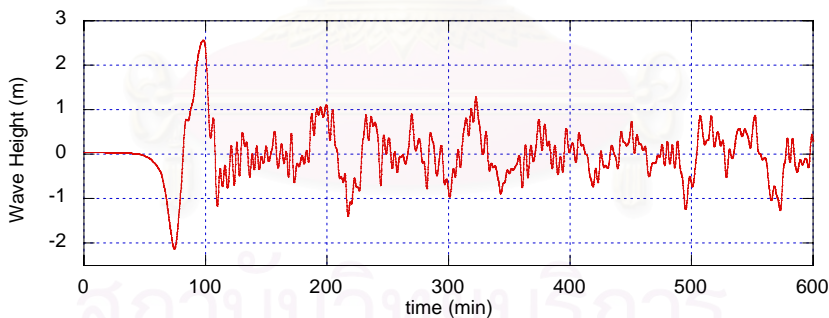
ลักษณะของคลื่นที่แพร่กระจายไปทางทิศตะวันออกของรอยเลื่อนที่องค์คลื่นจะเดินทางมาถึงก่อน
 สันคลื่นและสำหรับจุดที่ 9 สามารถอธิบายได้ว่าบริเวณใกล้ชายฝั่งความสูงของคลื่นของจุดนี้มีค่า
 สูงกว่าความสูงคลื่นในบริเวณที่ไกลจากชายฝั่ง



รูปที่ 5.36 ความสูงคลื่นที่จุด 2 ในขอบเขตการคำนวณที่ 1



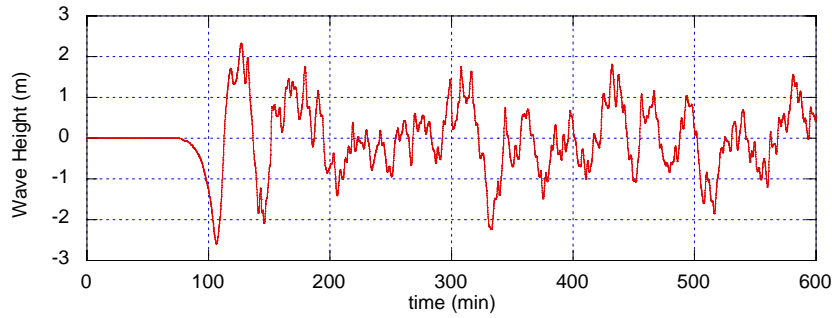
รูปที่ 5.37 ความสูงคลื่นที่จุด 5 ในขอบเขตการคำนวณที่ 1



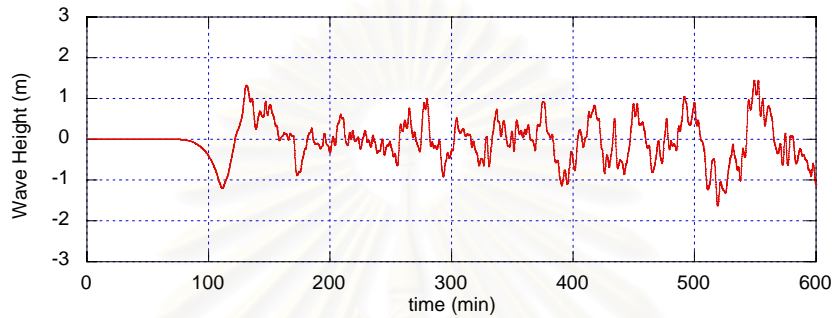
รูปที่ 5.38 ความสูงคลื่นที่จุด 9 ในขอบเขตการคำนวณที่ 1

ขอบเขตการคำนวณที่ 2

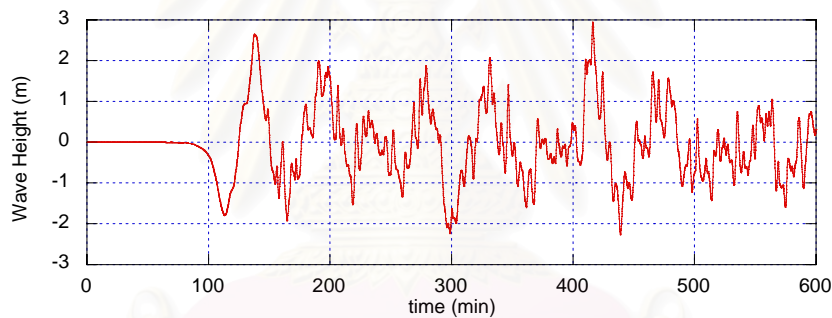
ขอบเขตการคำนวณที่ 2 ได้แสดงในจุดตรวจวัดที่ 3, 5 และ 6 ดังรูปที่ 5.39 - 5.41 ซึ่ง
 สามารถอธิบายได้ว่าคลื่นที่เข้าสู่ชายฝั่งภาคใต้ของประเทศไทย คลื่นมีความสูงในบริเวณจังหวัด
 พังงา มากกว่าบริเวณอื่นๆ ในแนวเดียวกัน ดังแสดงในจุดตรวจวัดที่ 3 และ 6 ซึ่งตรงกับผลที่ได้จาก
 การสำรวจ



รูปที่ 5.39 ความสูงคลื่นที่จุด 3 ในขอบเขตการคำนวณที่ 2



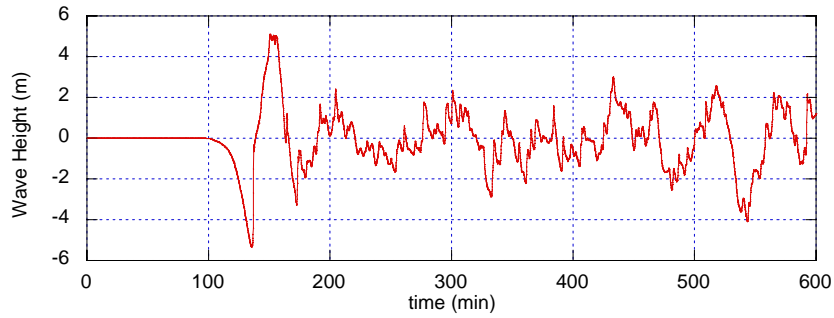
รูปที่ 5.40 ความสูงคลื่นที่จุด 5 ในขอบเขตการคำนวณที่ 2



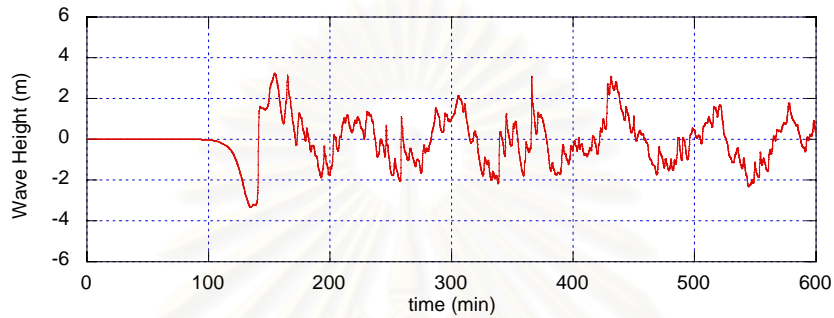
รูปที่ 5.41 ความสูงคลื่นที่จุด 6 ในขอบเขตการคำนวณที่ 2

ขอบเขตการคำนวณที่ 3

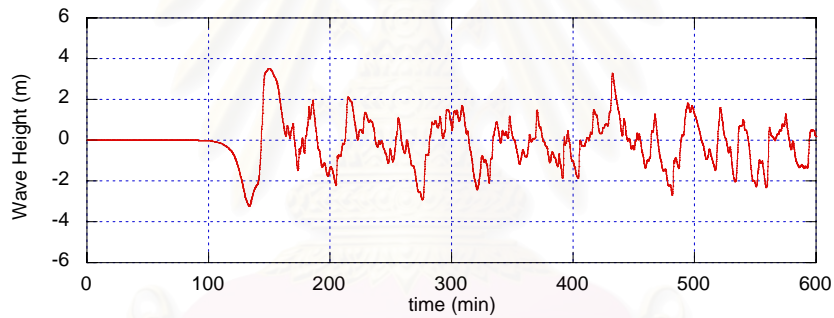
ขอบเขตการคำนวณที่ 3 สำหรับบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาแสดงในจุดตรวจวัดที่ 7, 8 และ 9 ดังรูปที่ 5.42 - 5.44 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเวลาที่คลื่นมาถึง (Arrival time) ประมาณ 2 ชม. บริเวณเขาหลักมีความสูงมากกว่าบริเวณอื่นในแนวเดียวกันซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับความเสียหายมากดังแสดงในจุดตรวจวัดที่ 7 สำหรับบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ตแสดงในจุดตรวจวัดที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 5.45 - 5.47 สามารถอธิบายได้ว่าเวลาที่คลื่นมาถึง (Arrival time) ประมาณ 1.5 ชม. คลื่นที่เข้าปะทะจังหวัดภูเก็ต มีความสูงใกล้เคียงกันซึ่งความสูงคลื่นที่จุดตรวจวัดความสูงคลื่นประมาณ 3 ม. ซึ่งตรงกับข้อมูลจากการสำรวจ



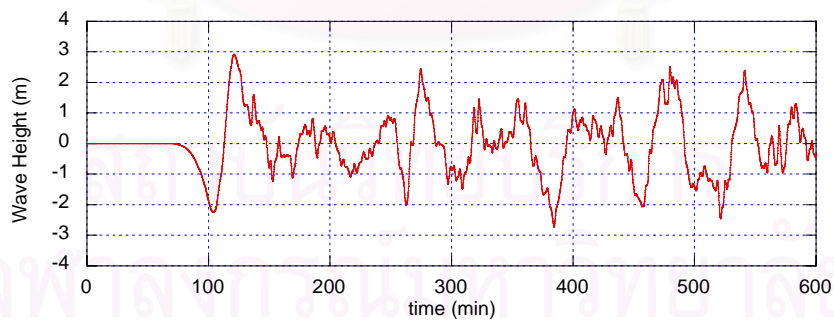
รูปที่ 5.42 ความสูงคลื่นที่จุด 7 ในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



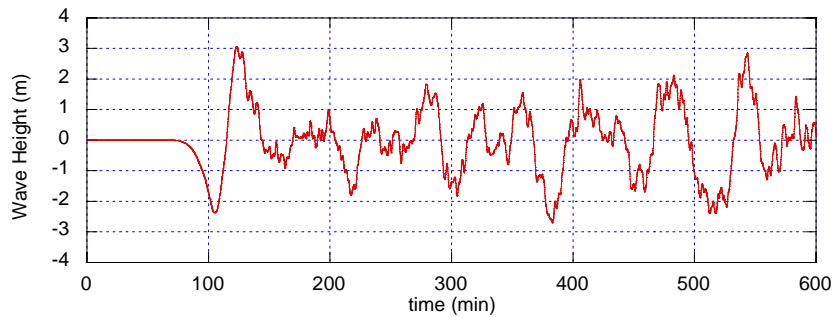
รูปที่ 5.43 ความสูงคลื่นที่จุด 8 ในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



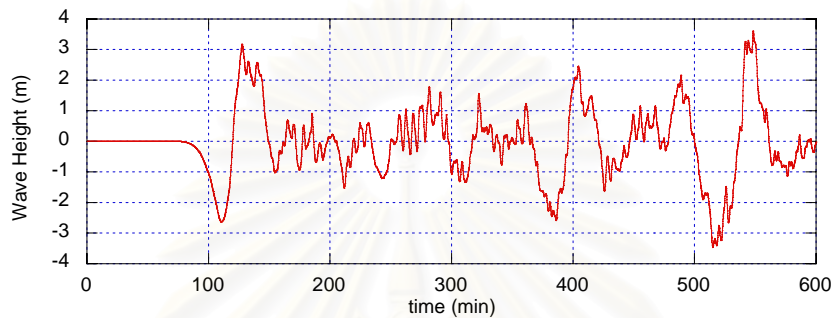
รูปที่ 5.44 ความสูงคลื่นที่จุด 9 ในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



รูปที่ 5.45 ความสูงคลื่นที่จุด 1 ในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



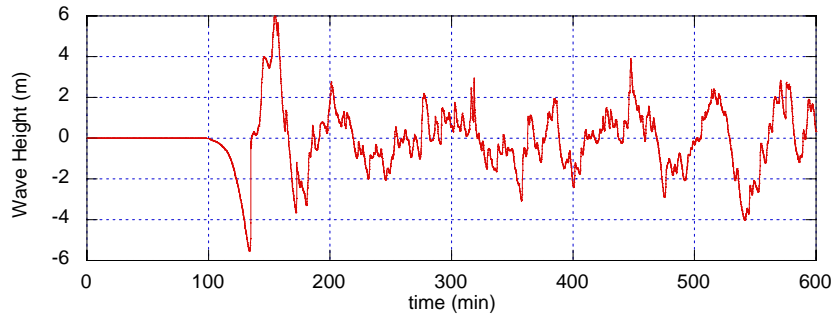
รูปที่ 5.46 ความสูงคลื่นที่จุด 2 ในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



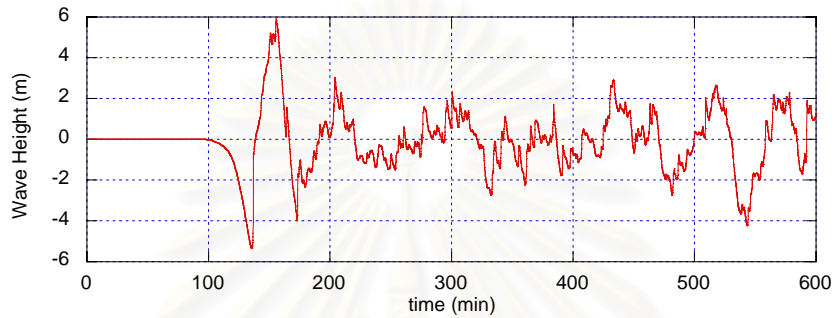
รูปที่ 5.47 ความสูงคลื่นที่จุด 3 ในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

ขอบเขตการคำนวณที่ 4

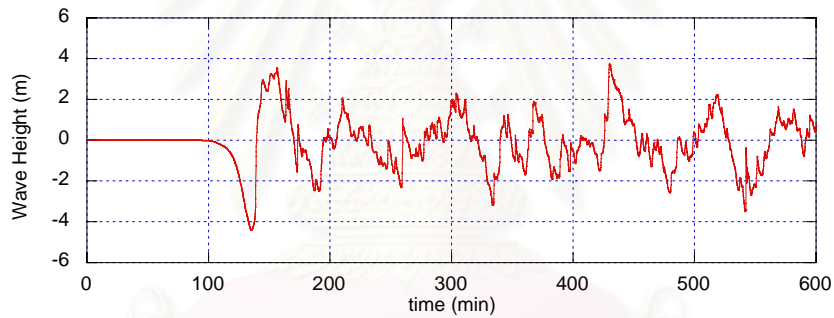
ขอบเขตการคำนวณที่ 4 สำหรับบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาแสดงในจุดตรวจวัดที่ 1, 2, 3, 4, 5, 7 และ 8 ดังรูปที่ 5.48 - 5.54 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าผลจากจุดตรวจวัดที่ 1, 2, 3 และ 4 ความสูงคลื่นที่จุดตรวจวัดที่อยู่ต่ำกว่าแหลมปะการังคลื่นจะสูงกว่าจุดที่อยู่เหนือแหลมปะการัง และจากจุดตรวจวัดที่ 5, 7 และ 8 ซึ่งเป็นจุดที่อยู่บนพื้นดินดังนั้นจากรูปจึงเห็นคลื่นขึ้นมาเพียงบางครั้งเท่านั้น โดยบริเวณนี้ได้ความสูงคลื่นประมาณ 9 ม. และความสูงคลื่นจากพื้นดิน (Inundation height) ที่จุดตรวจวัดโดยมีค่าประมาณ 3 ม. สำหรับบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต แสดงในจุดตรวจวัดที่ 4, 5, 6, 7 และ 8 ดังรูปที่ 5.55 - 5.59 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าผลจากจุดตรวจวัดที่จุดที่ 4 และ 5 ซึ่งเป็นจุดที่อยู่ใกล้ชายฝั่งมาก คลื่นเดินทางมาถึงหาดกมลาและหาดป่าตอง ในเวลาใกล้เคียงกันและจากจุดตรวจวัดที่ 7 และ 8 เป็นจุดที่อยู่บนพื้นดินโดยบริเวณนี้ได้ความสูงคลื่นประมาณ 6 ม.



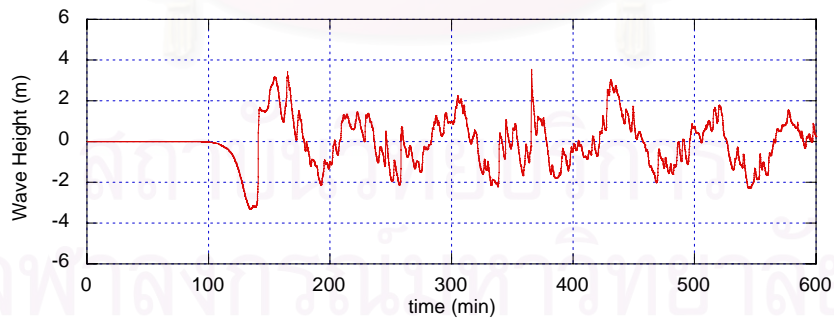
รูปที่ 5.48 ความสูงคลื่นที่จุด 1 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



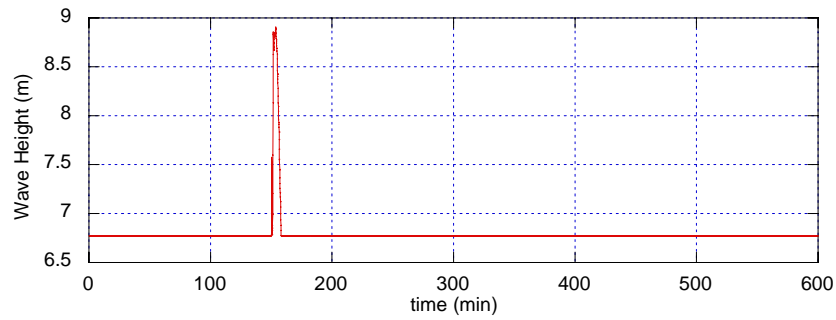
รูปที่ 5.49 ความสูงคลื่นที่จุด 2 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



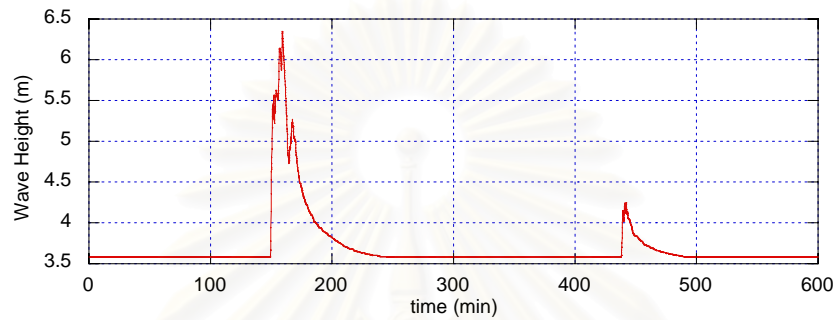
รูปที่ 5.50 ความสูงคลื่นที่จุด 3 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



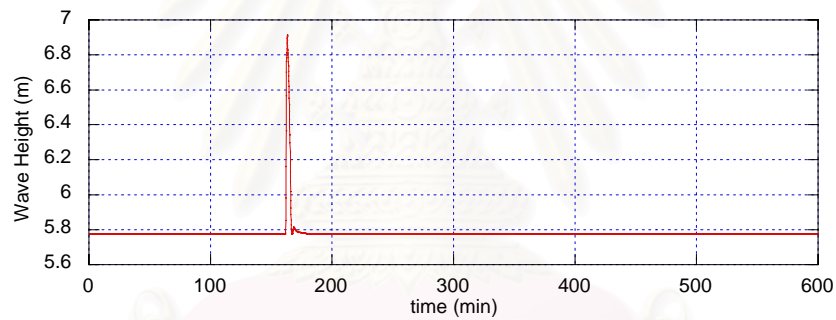
รูปที่ 5.51 ความสูงคลื่นที่จุด 4 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



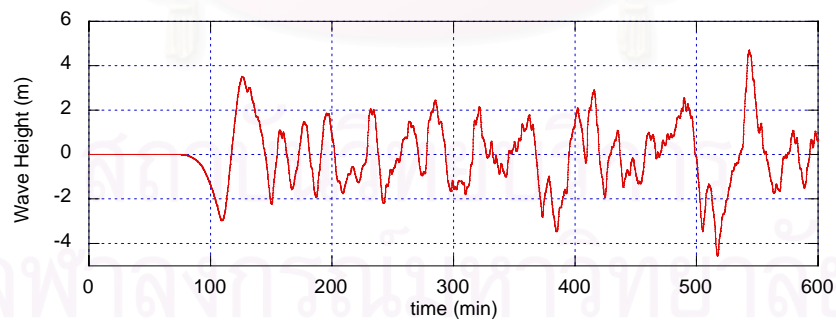
รูปที่ 5.52 ความสูงคลื่นที่จุด 5 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



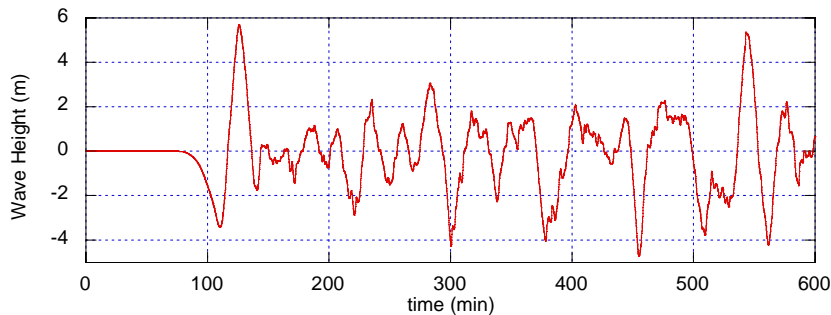
รูปที่ 5.53 ความสูงคลื่นที่จุด 7 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



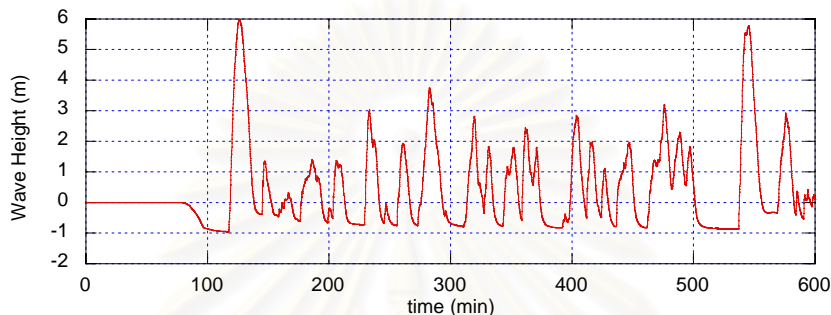
รูปที่ 5.54 ความสูงคลื่นที่จุด 8 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



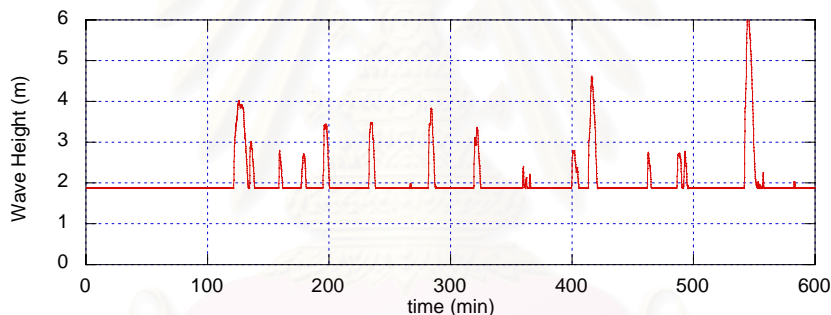
รูปที่ 5.55 ความสูงคลื่นที่จุด 4 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



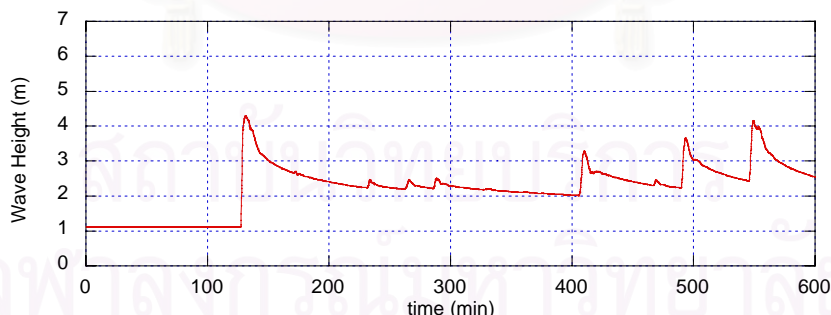
รูปที่ 5.56 ความสูงคลื่นที่จุด 5 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



รูปที่ 5.57 ความสูงคลื่นที่จุด 6 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



รูปที่ 5.58 ความสูงคลื่นที่จุด 7 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

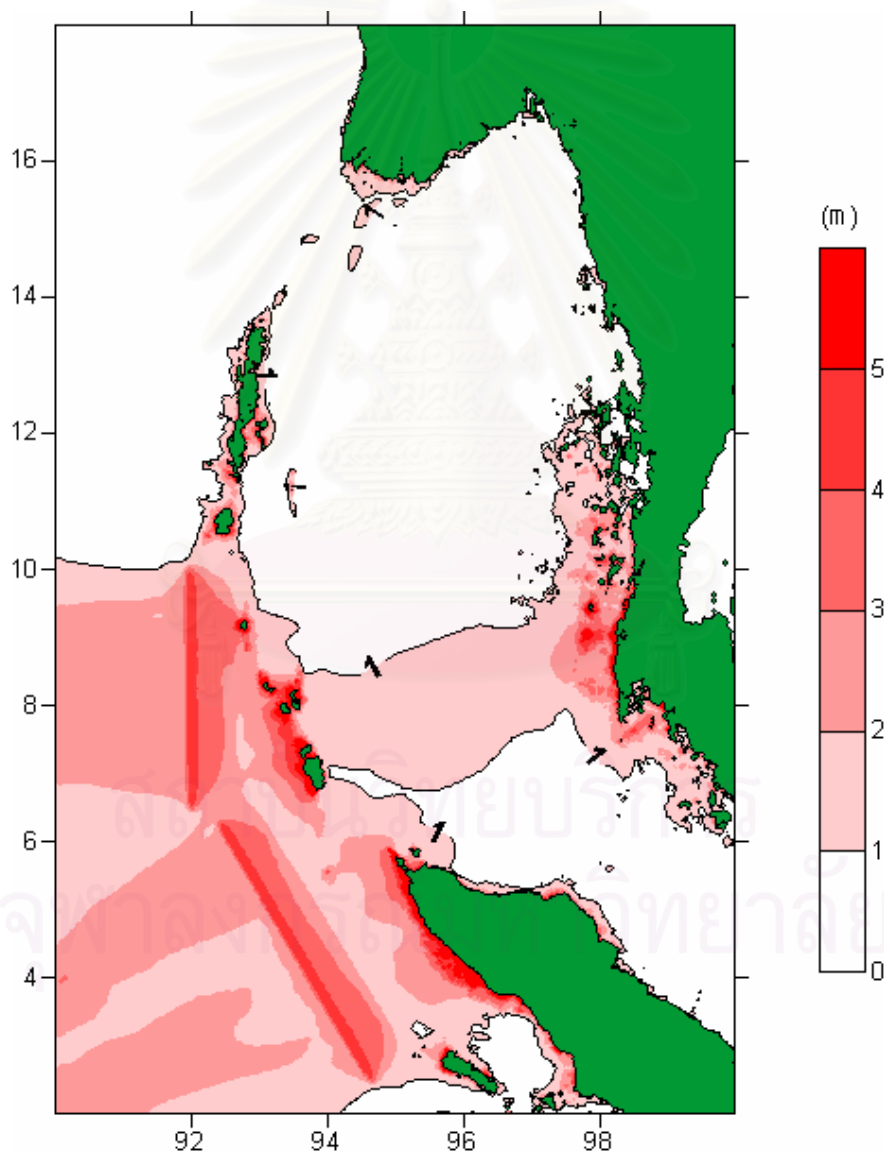


รูปที่ 5.59 ความสูงคลื่นที่จุด 8 ในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

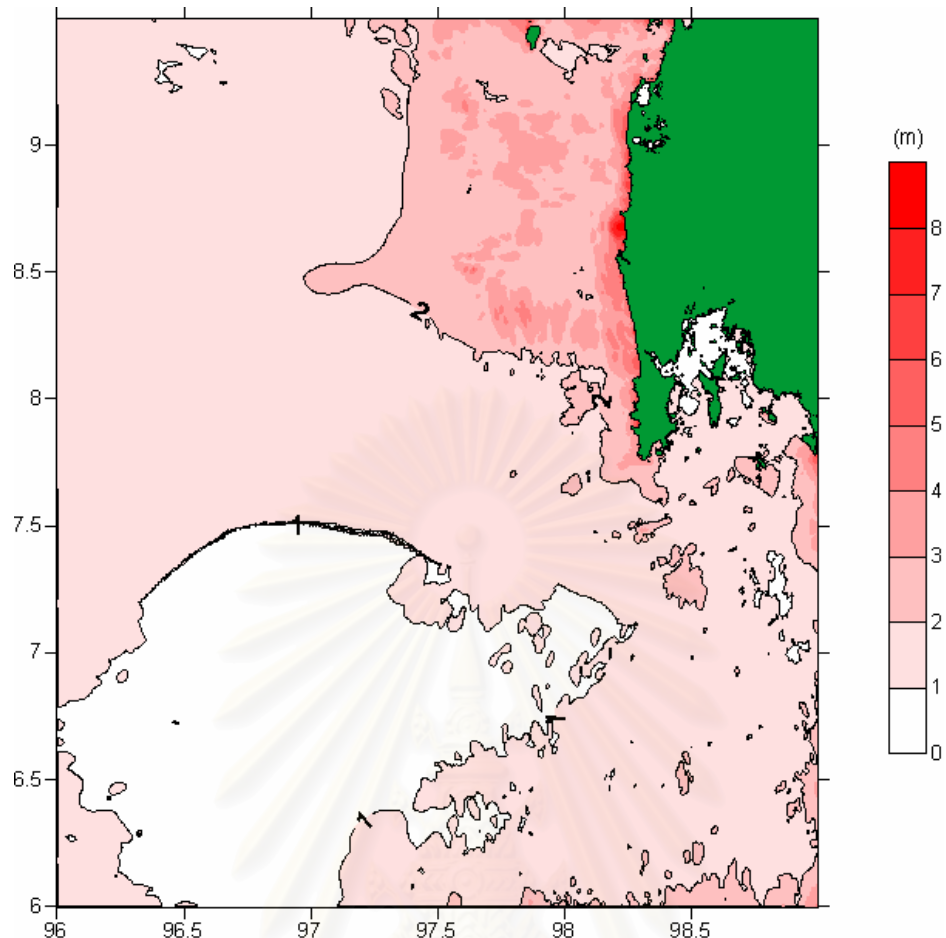
5.8.2 ความสูงคลื่นสูงสุด (Maximum wave height)

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองได้ค่าความสูงคลื่นสูงสุดซึ่งพิจารณาเฉพาะคลื่น 4 ลูกแรก หรือ 4 ชม. หลังจากเกิดแผ่นดินไหวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.60 – 5.65 สำหรับทั้ง 4 ขอบเขตการคำนวณ ซึ่งในขอบเขตที่ 1 แสดงให้เห็นว่าความสูงคลื่นจากแนวรอยเลื่อนในบริเวณจังหวัดพังงา

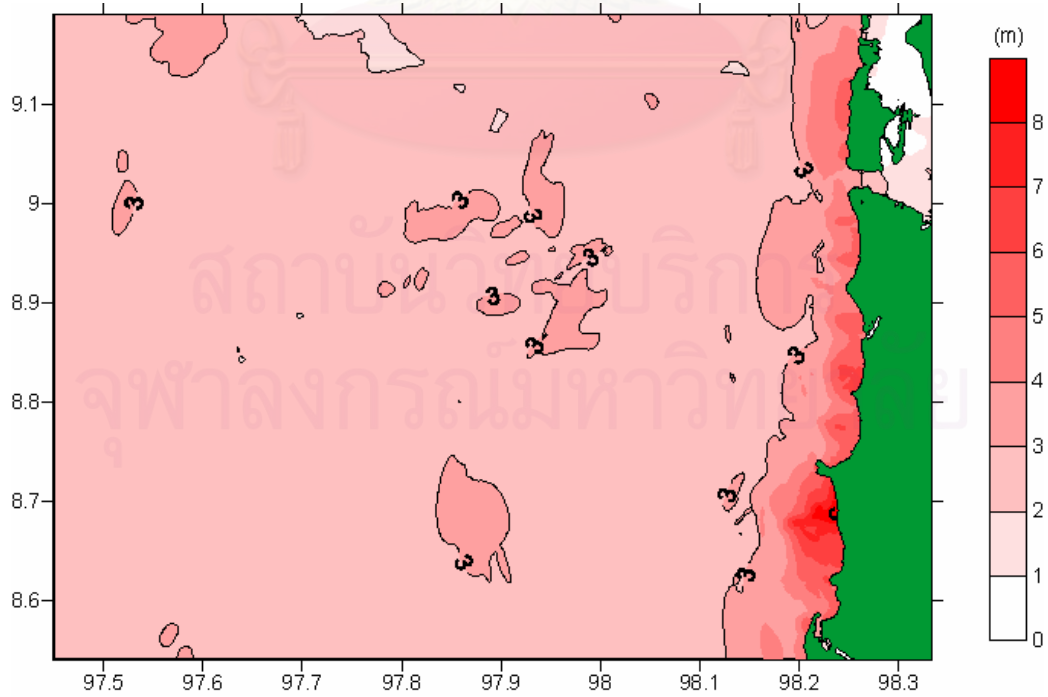
และจังหวัดภูเก็ตมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่นๆ, สำหรับขอบเขตการคำนวณที่ 2 แสดงให้เห็นว่าคลื่นบริเวณจังหวัดพังงา มีความสูงคลื่นมากกว่าบริเวณจังหวัดภูเก็ต, ขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา แสดงให้เห็นว่า บริเวณที่อยู่ตอนใต้ของแหลมปะการังมีความสูงคลื่นสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับความเสียหายมาก ความสูงคลื่นสูงสุดประมาณ 8 ม., สำหรับบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ความสูงคลื่นสูงสุดประมาณ 7 ม., ขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา แสดงให้เห็นว่าความสูงคลื่นที่เข้าปะทะบริเวณเขาหลักสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งคลื่นสูงสุดประมาณ 10 ม. และสำหรับบริเวณหาดกมลา แสดงให้เห็นว่าคลื่นในบริเวณหาดป่าตองนั้นสูงกว่าในบริเวณอื่นๆซึ่งคลื่นสูงสุดประมาณ 7 ม.



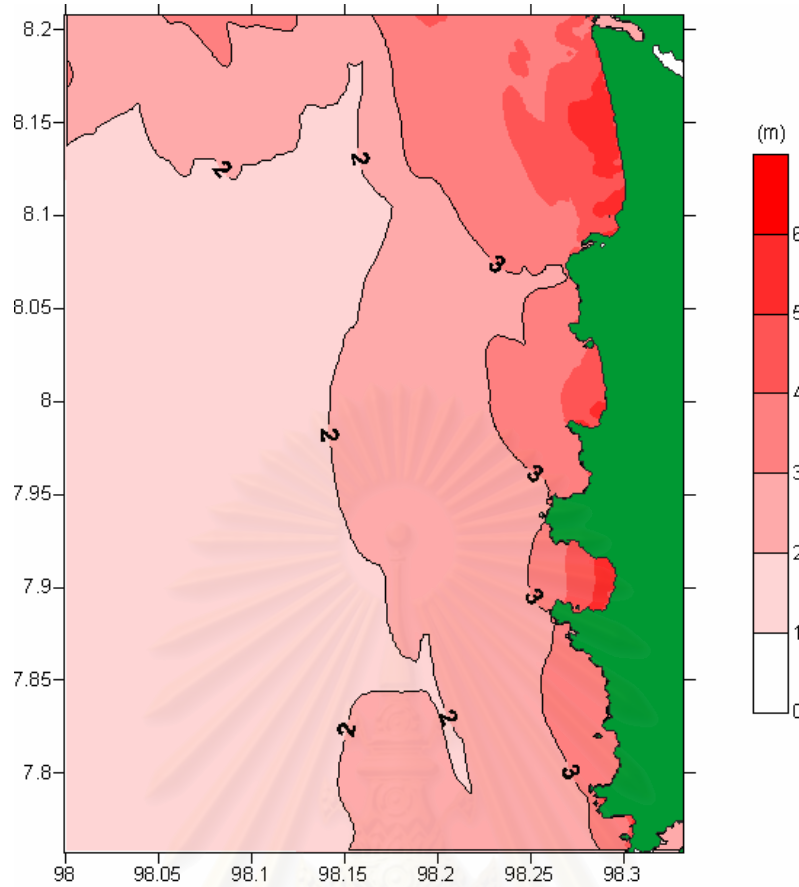
รูปที่ 5.60 ความสูงคลื่นสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 1



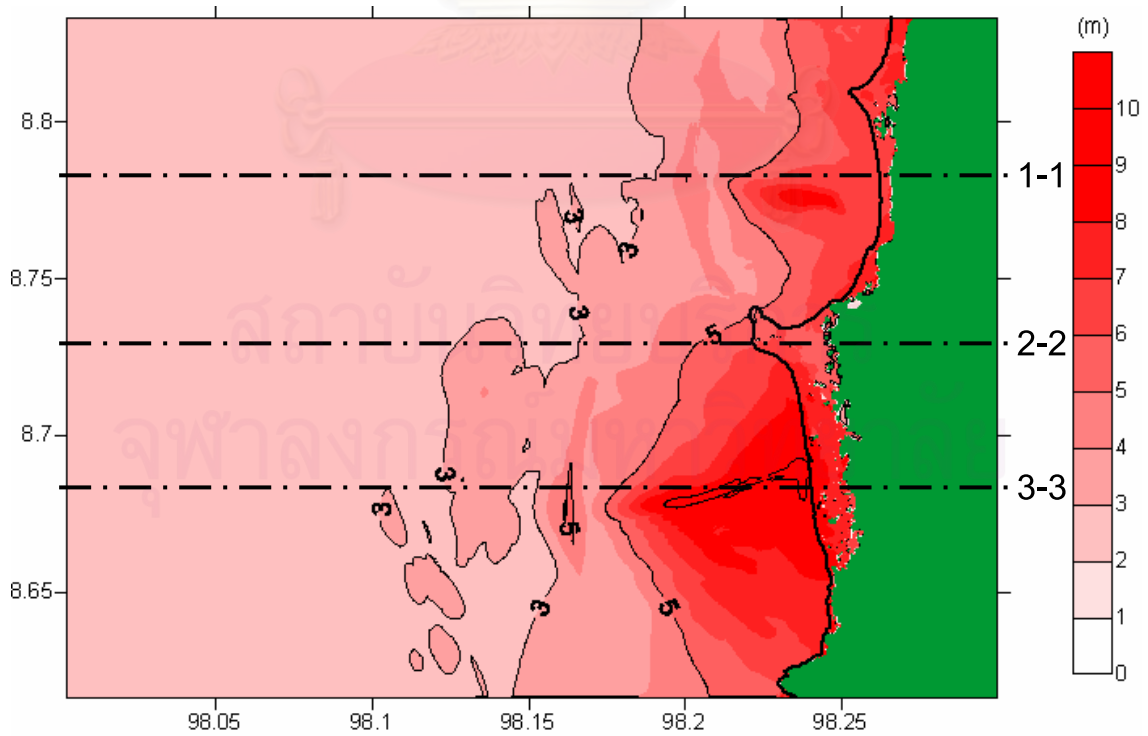
รูปที่ 5.61 ความสูงคลื่นสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 2



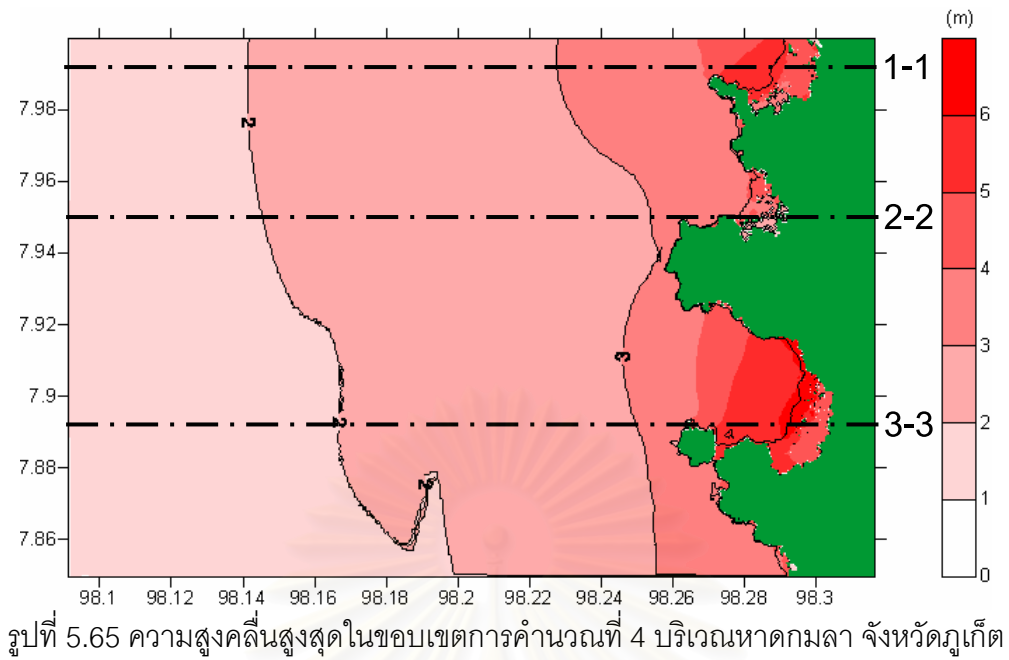
รูปที่ 5.62 ความสูงคลื่นสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



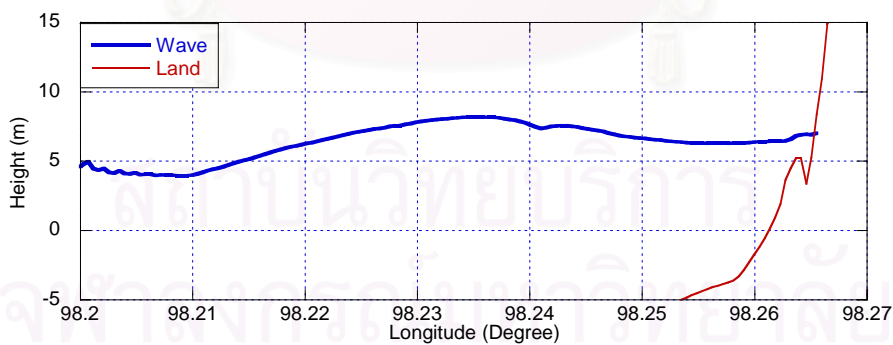
รูปที่ 5.63 ความสูงคลื่นสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



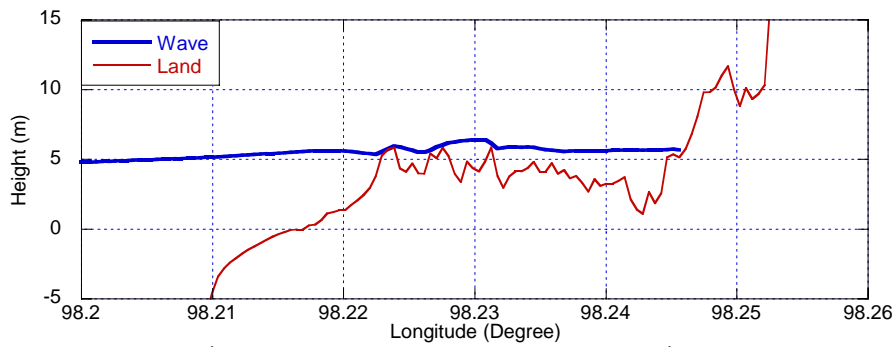
รูปที่ 5.64 ความสูงคลื่นสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



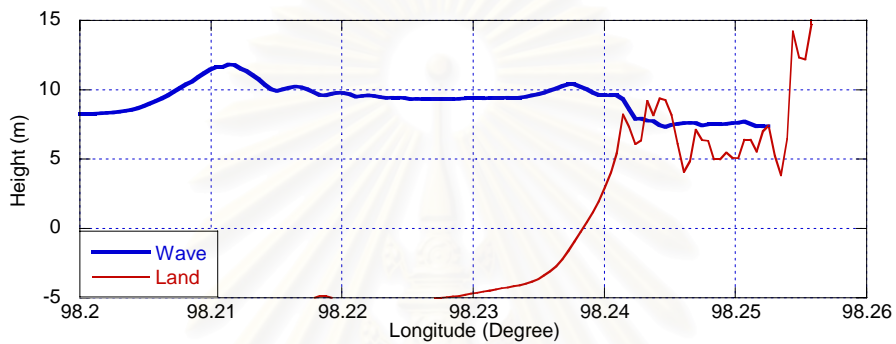
จากรูปที่ 5.64-5.65 แสดงให้เห็นถึงความสูงคลื่นสูงสุดของบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา และบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ตามลำดับ เพื่อเห็นความสูงคลื่นชัดเจนขึ้น ผู้วิจัยได้พิจารณาภาคตัดขวางของทั้ง 3 บริเวณ จากเหนือลงใต้ โดยสำหรับบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา ประกอบด้วย บริเวณบ้านบางเนียง, บริเวณแหลมประการังและบริเวณคึกคัก แสดงดังรูป 5.66-5.68 สำหรับบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ประกอบด้วย บริเวณหาดบางเทา, บริเวณหาดกมลา และบริเวณหาดป่าตอง แสดงดังรูป 5.69-5.71



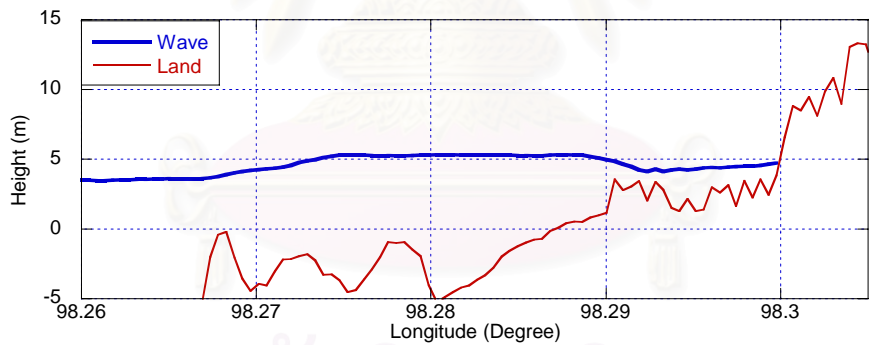
รูปที่ 5.66 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.64



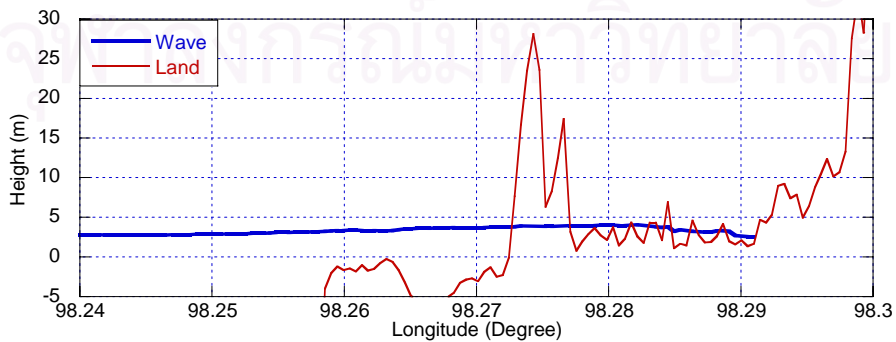
รูปที่ 5.67 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.64



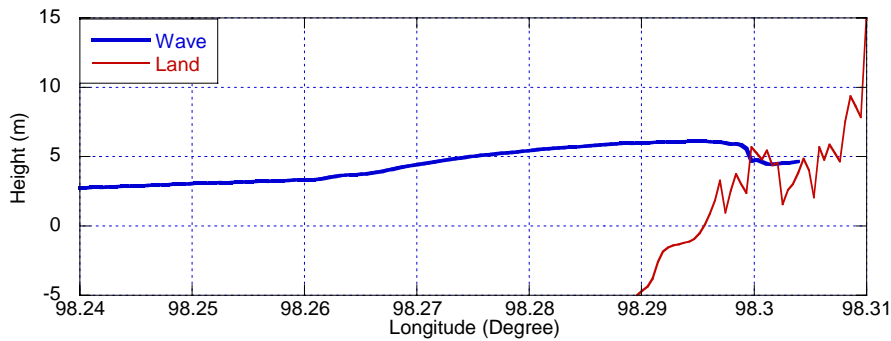
รูปที่ 5.68 ภาพตัดขวางหน้าตัด 3-3 ของรูปที่ 5.64



รูปที่ 5.69 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.65

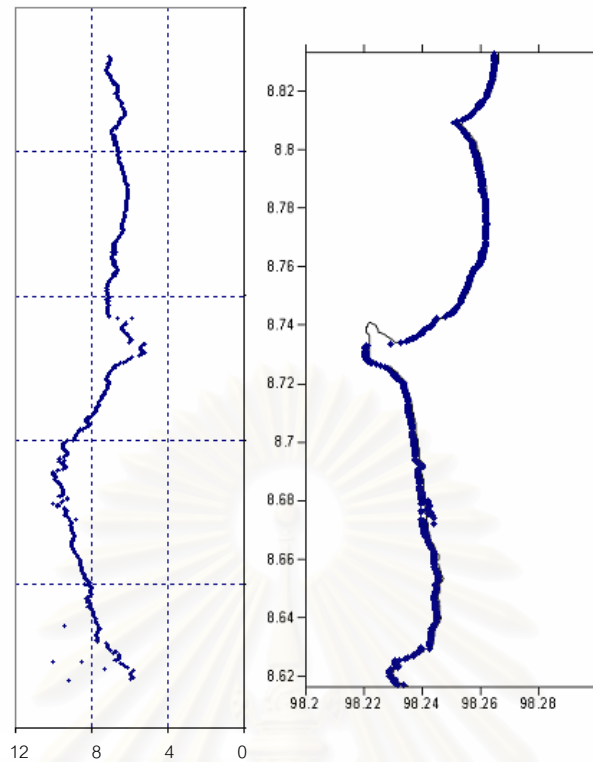


รูปที่ 5.70 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.65

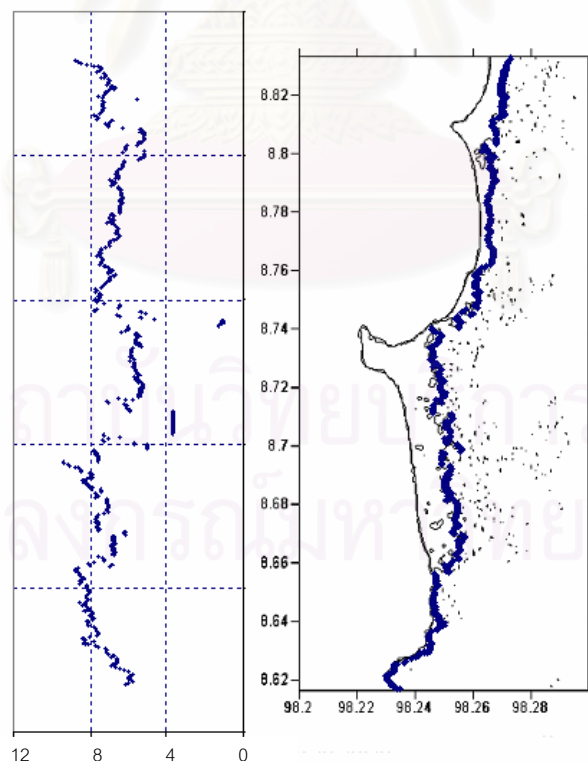


รูปที่ 5.71 ภาพตัดขวางหน้าตัด 3-3 ของรูปที่ 5.65

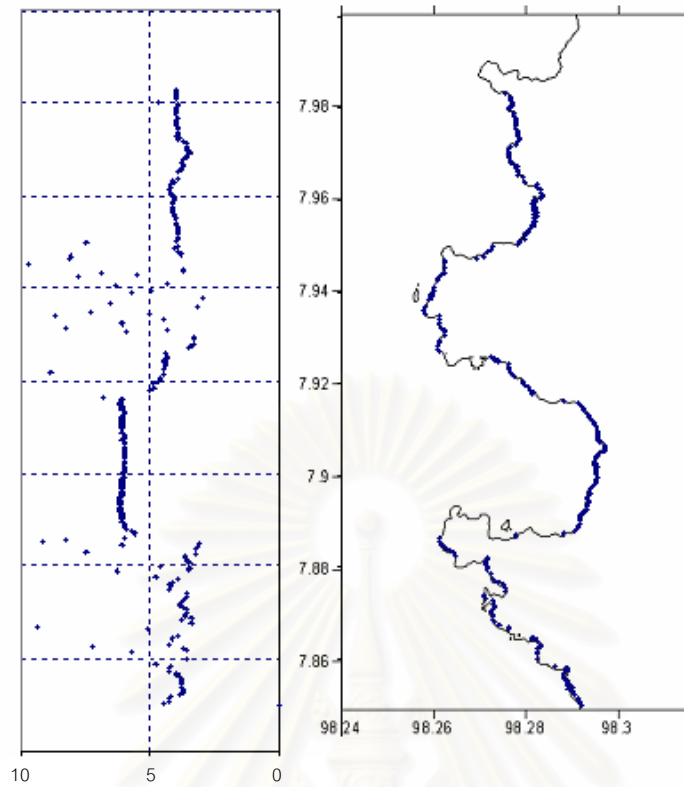
จากรูปที่ 5.64-5.65 แสดงให้เห็นถึงความสูงคลื่นสูงสุดของบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา และบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ตามลำดับ เมื่อพิจารณาบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาความสูงคลื่นริมชายฝั่งและความสูงที่มวลน้ำขึ้นบนชายฝั่งโดยวัดจากระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิ แสดงดังรูปที่ 5.72 -5.73 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 8 ม. และคลื่นสูงสุดที่วัดประมาณ 10 ม. สำหรับบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ตคลื่นริมชายฝั่งและความสูงที่มวลน้ำขึ้นบนชายฝั่งโดยวัดจากระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิ แสดงดังรูปที่ 5.74 -5.75 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 5 ม. และคลื่นสูงสุดที่วัดประมาณ 6 ม.



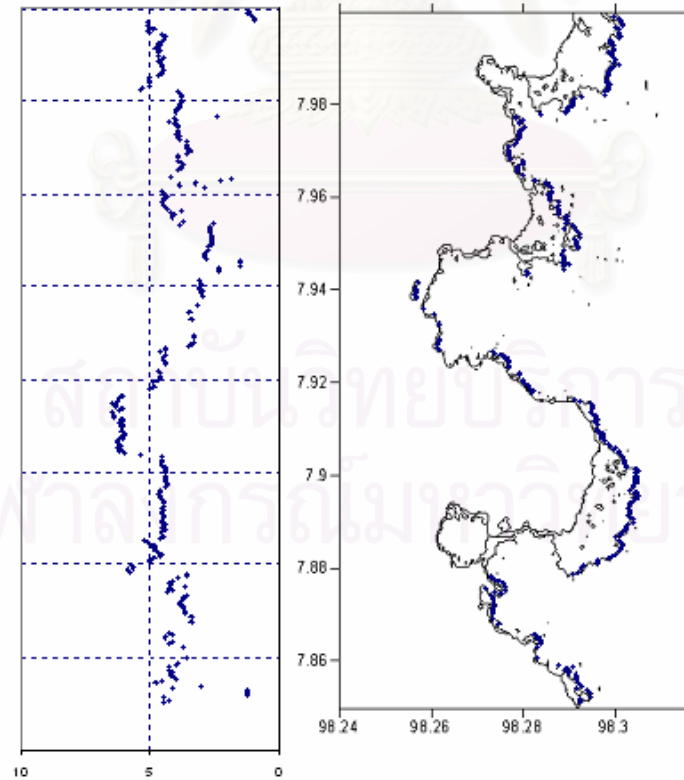
รูปที่ 5.72 ความสูงคลื่นริมชายฝั่งโดยวัดจากระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิในขอบเขตการคำนวณ
ที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



รูปที่ 5.73 ความสูงที่มวนน้ำขึ้นบนชายฝั่งโดยวัดจากระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิในขอบเขตการ
คำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



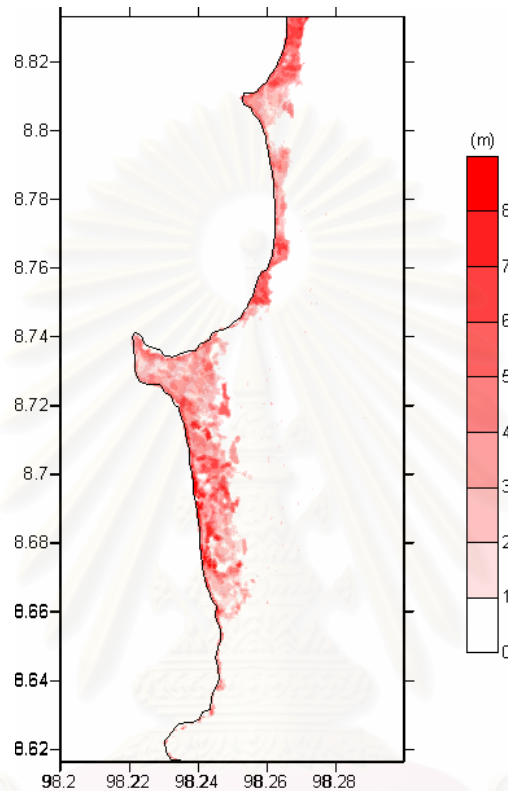
รูปที่ 5.74 ความสูงคลื่นริมชายฝั่งโดยวัดจากระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิในขอบเขตการคำนวณ
ที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



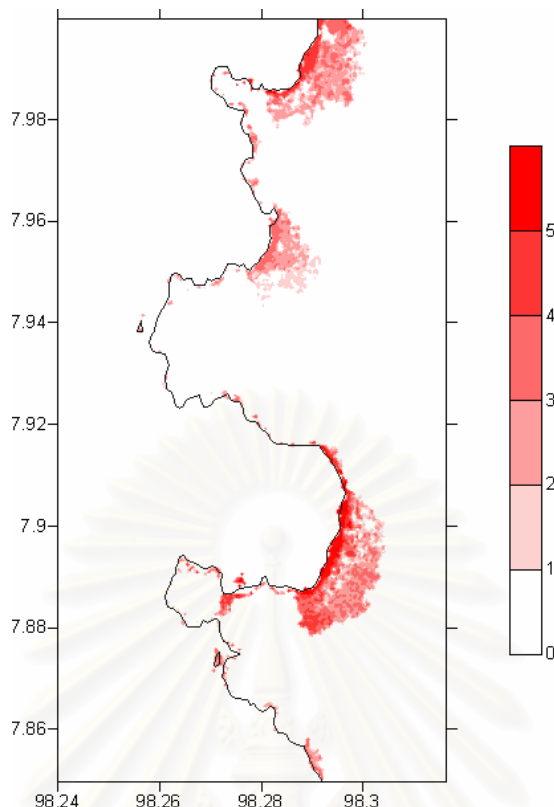
รูปที่ 5.75 ความสูงที่มีมวลน้ำขึ้นบนชายฝั่งโดยวัดจากระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิในขอบเขตการ
คำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

5.8.3 ความสูงคลื่นจากพื้นดิน (Maximum inundation height)

สามารถพิจารณาได้เฉพาะขอบเขตการคำนวณที่ 4 เท่านั้น ซึ่งมี 2 บริเวณคือบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาซึ่งมีค่าความสูงคลื่นจากพื้นดินประมาณ 8 ม. ดังรูปที่ 5.76 และบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ตมีค่าความสูงคลื่นจากพื้นดินประมาณ 5 ม. ดังรูปที่ 5.77



รูปที่ 5.76 ความสูงคลื่นจากพื้นดินในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก



รูปที่ 5.77 ความสูงคลื่นจากพื้นดินในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา

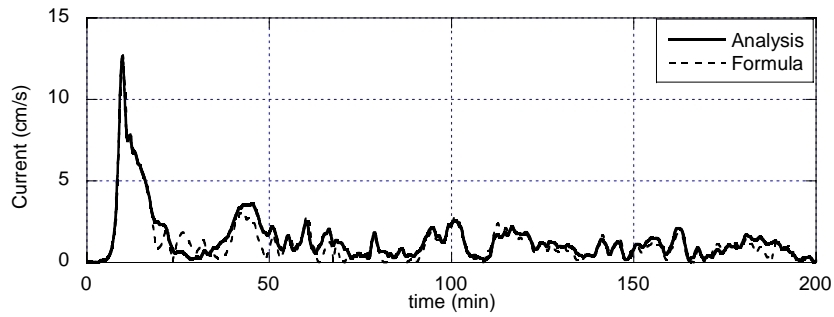
5.8.4 การวิเคราะห์ความเร็วกระแสน้ำ (Current Velocity)

จากการสอบเทียบแบบจำลองสื่อนามิซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจดังนั้นแบบจำลองนี้จึงนำเชื่อถือในการใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความเร็วกระแสน้ำและเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับค่าความเร็วกระแสน้ำจากทฤษฎีของคลื่นยาวดังสมการที่ 5.4 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับความเร็วกระแสน้ำที่ได้จากผลการวิเคราะห์และจากการคำนวณตามสมการที่ 5.4 สำหรับแต่ละขอบเขตการคำนวณจะได้ผลดังรูปที่ 5.78 – 5.89

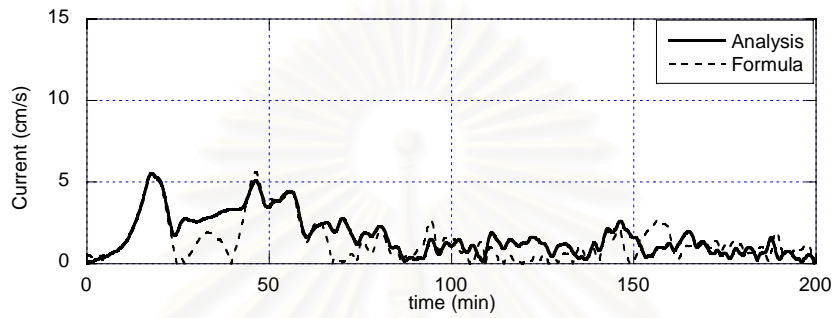
$$v = \eta \sqrt{g / h} \tag{5.4}$$

เมื่อ

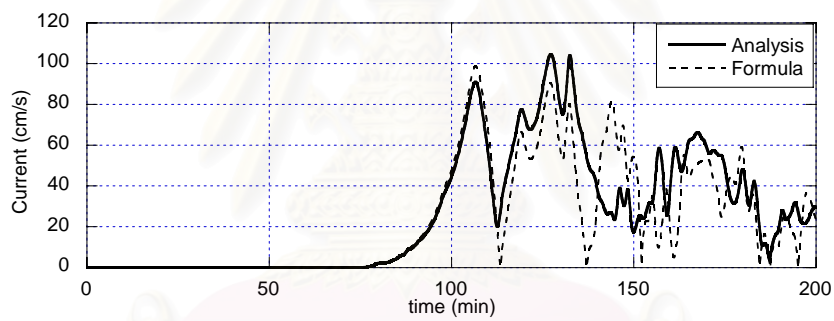
- $\eta(x,t)$ = ความสูงคลื่น
- $h(x)$ = ความลึกของน้ำ
- $v(x,t)$ = ความเร็วของกระแสน้ำ



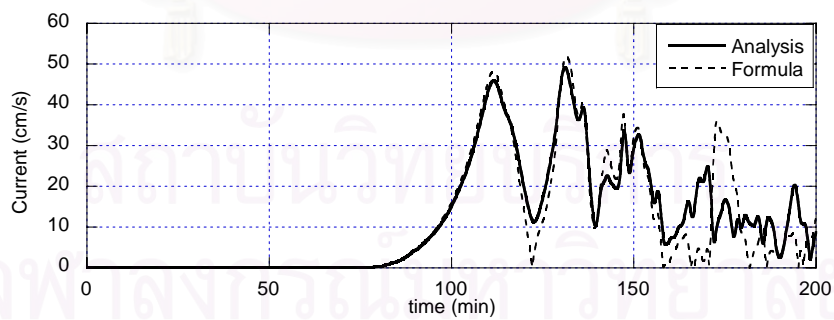
รูปที่ 5.78 เปรียบเทียบความเร็วกระแสในขอบเขตการคำนวณที่ 1 จุดที่ 3



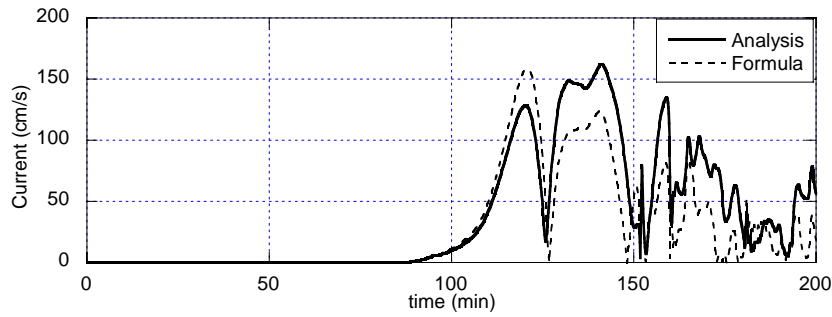
รูปที่ 5.79 เปรียบเทียบความเร็วกระแสในขอบเขตการคำนวณที่ 1 จุดที่ 6



รูปที่ 5.80 เปรียบเทียบความเร็วกระแสในขอบเขตการคำนวณที่ 2 จุดที่ 3

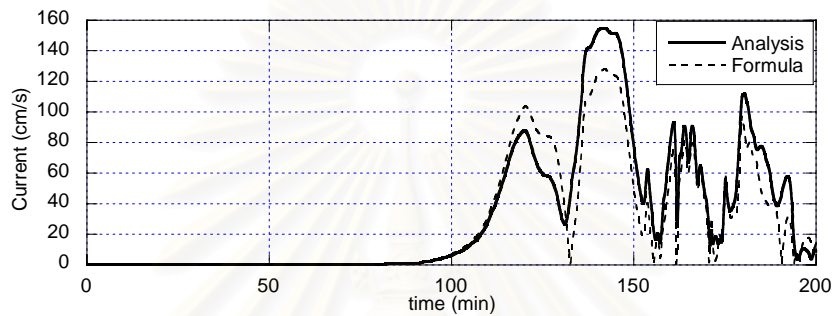


รูปที่ 5.81 เปรียบเทียบความเร็วกระแสในขอบเขตการคำนวณที่ 2 จุดที่ 5



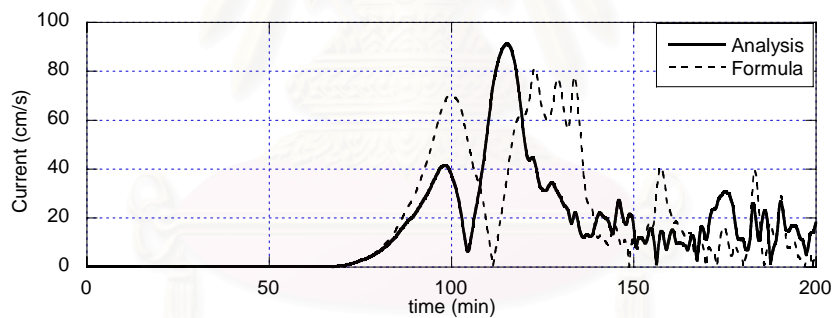
รูปที่ 5.82 เปรียบเทียบความเร็วกระแสในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา

จุดที่ 1



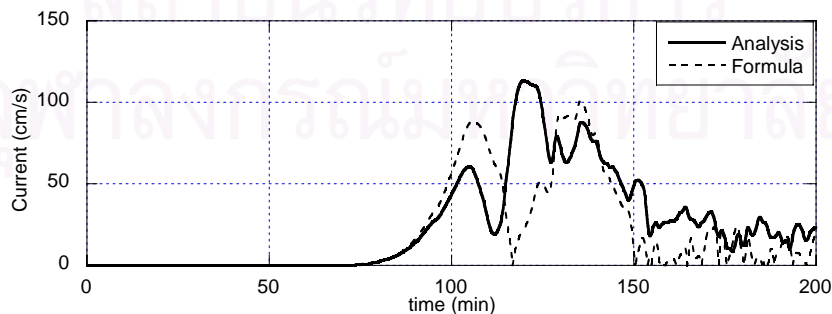
รูปที่ 5.83 เปรียบเทียบความเร็วกระแสในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา

จุดที่ 3



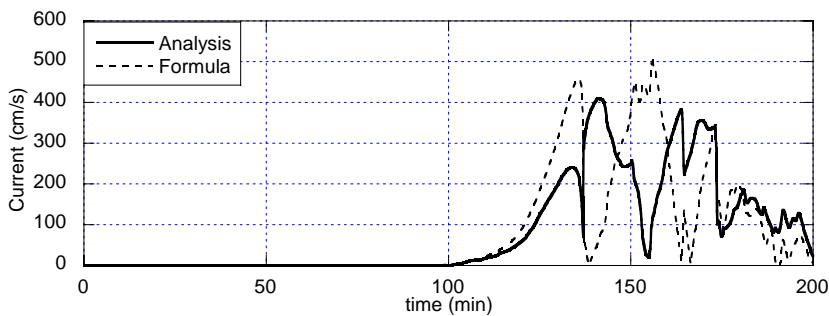
รูปที่ 5.84 เปรียบเทียบความเร็วกระแสในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัด

ภูเก็ต จุดที่ 4

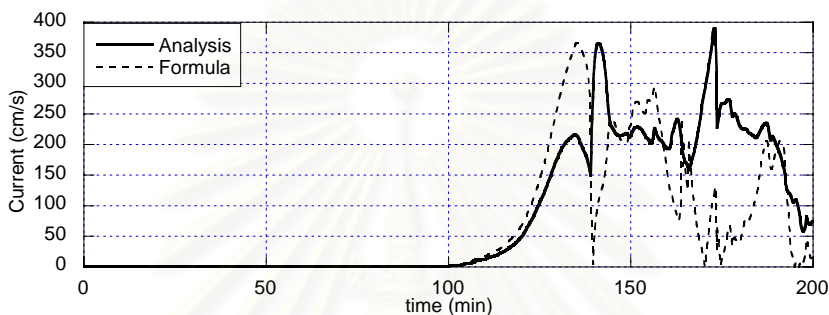


รูปที่ 5.85 เปรียบเทียบความเร็วกระแสในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัด

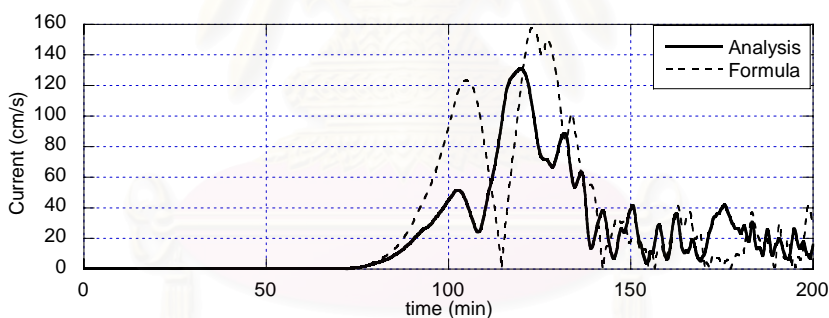
ภูเก็ต จุดที่ 6



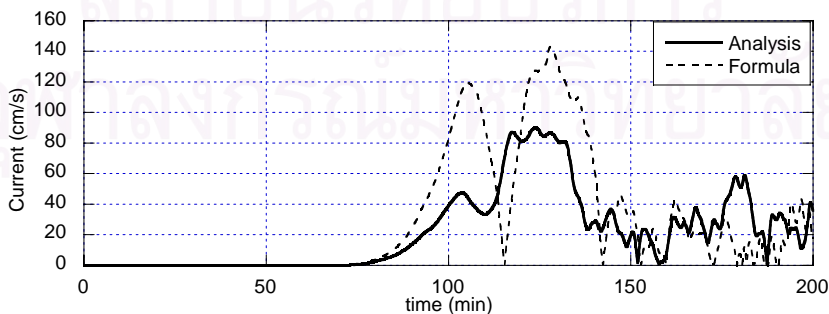
รูปที่ 5.86 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา
จุดที่ 2



รูปที่ 5.87 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา
จุดที่ 3

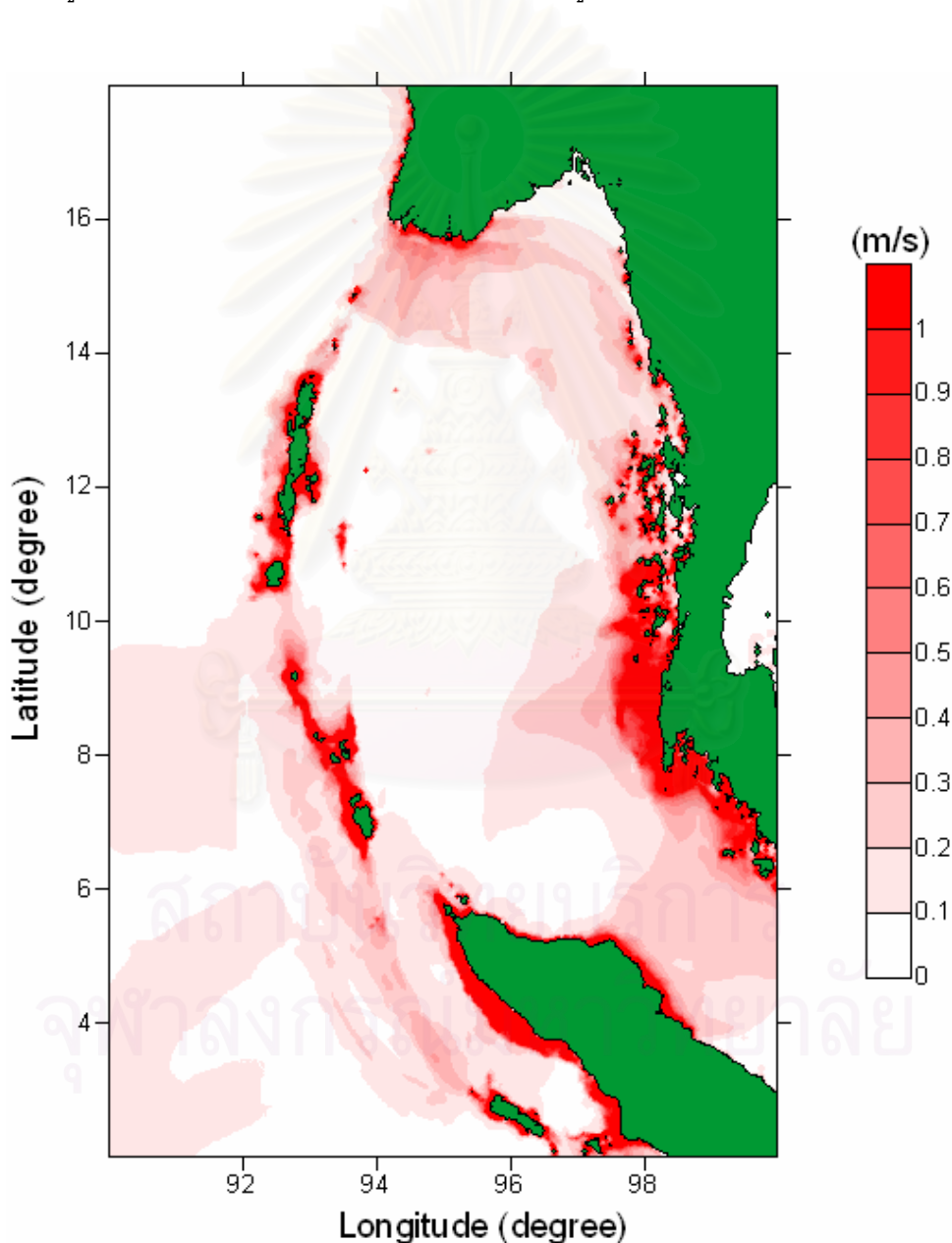


รูปที่ 5.88 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต จุดที่ 1

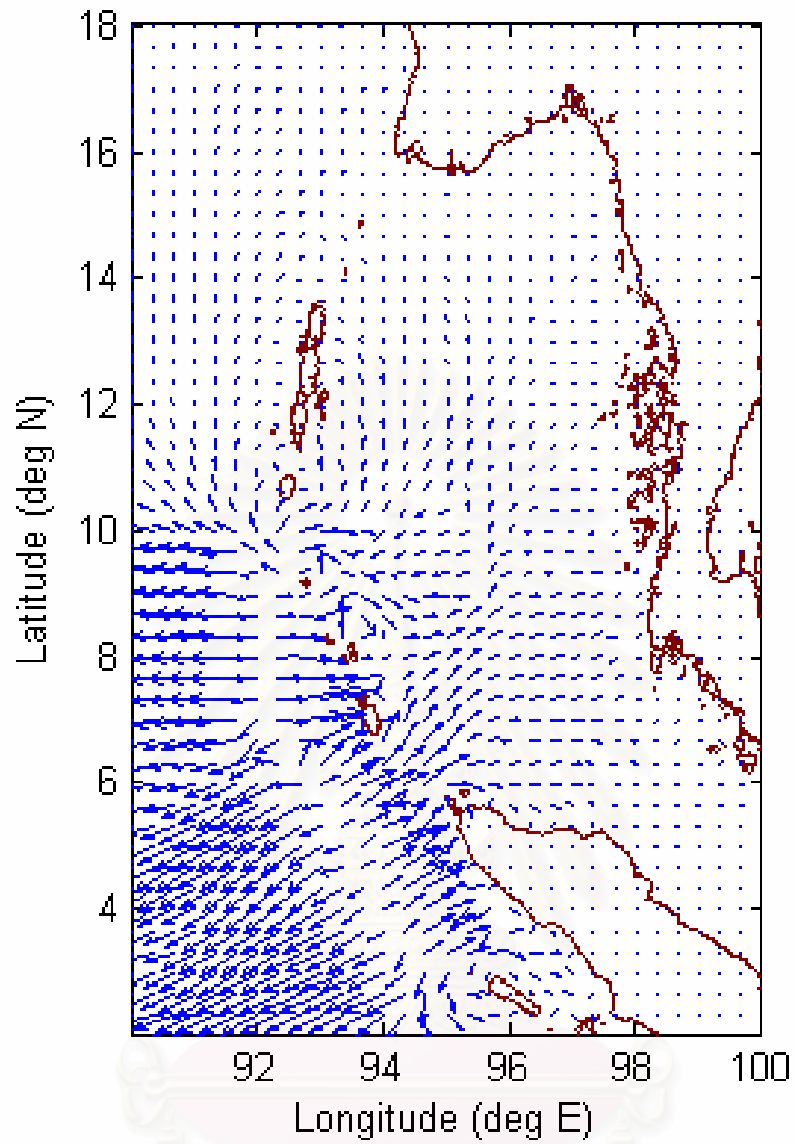


รูปที่ 5.89 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต จุดที่ 3

จากผลการเปรียบเทียบ จะเห็นว่าผลที่ได้ในช่วงเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเวลาผ่านไป จะเริ่มมีความแตกต่าง แต่ก็อยู่ในช่วงที่ไม่มากยกเว้นแต่ในขอบเขตการคำนวณที่ 3 และ 4 ซึ่งความลึกน้ำที่ตำแหน่งจุดตรวจวัดมีค่าน้อยจึงทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนมาก ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าความเร็วกระแสน้ำจากทฤษฎีของคลื่นยาวดังสมการที่ 5.4 ควรใช้กับบริเวณที่มีความลึกน้ำมากกว่าประมาณ 50 ม. จากการวิเคราะห์ความเร็วกระแสน้ำของของแต่ละขอบเขตการคำนวณ จะได้แผนที่แสดงความเร็วกระแสน้ำสูงสุด และทิศทางของกระแสน้ำสูงสุดของแต่ละขอบเขตการคำนวณ ดังรูปที่ 5.90 – 5.101 ซึ่งพิจารณาเฉพาะคลื่น 4 ลูกแรกเท่านั้น

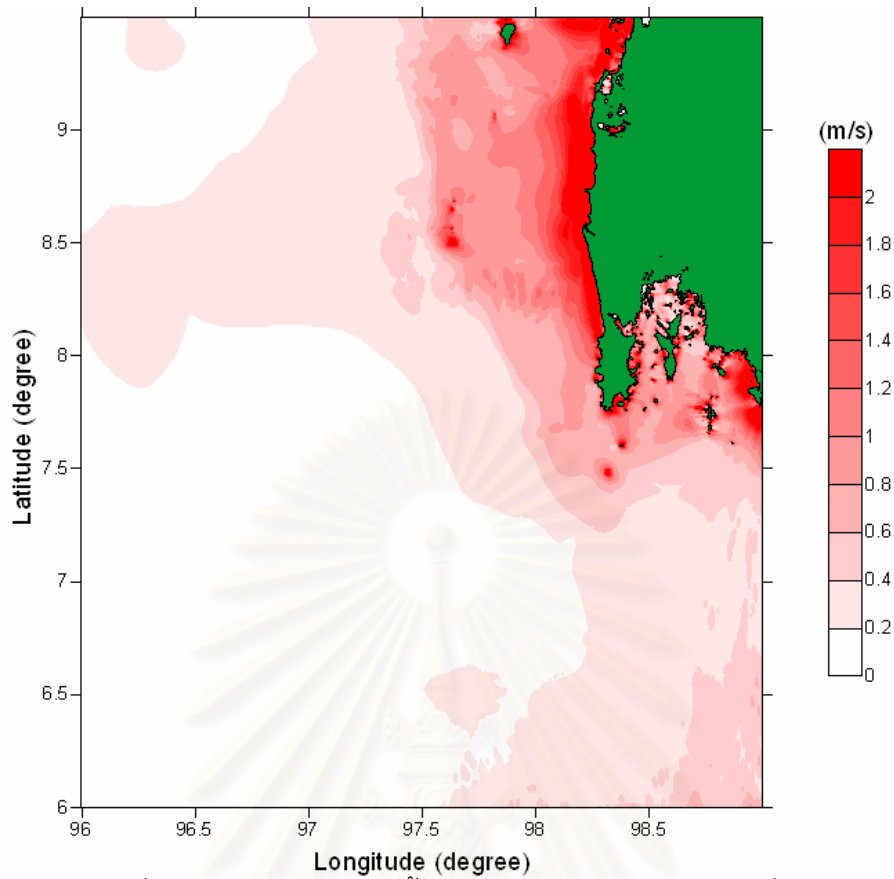


รูปที่ 5.90 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 1

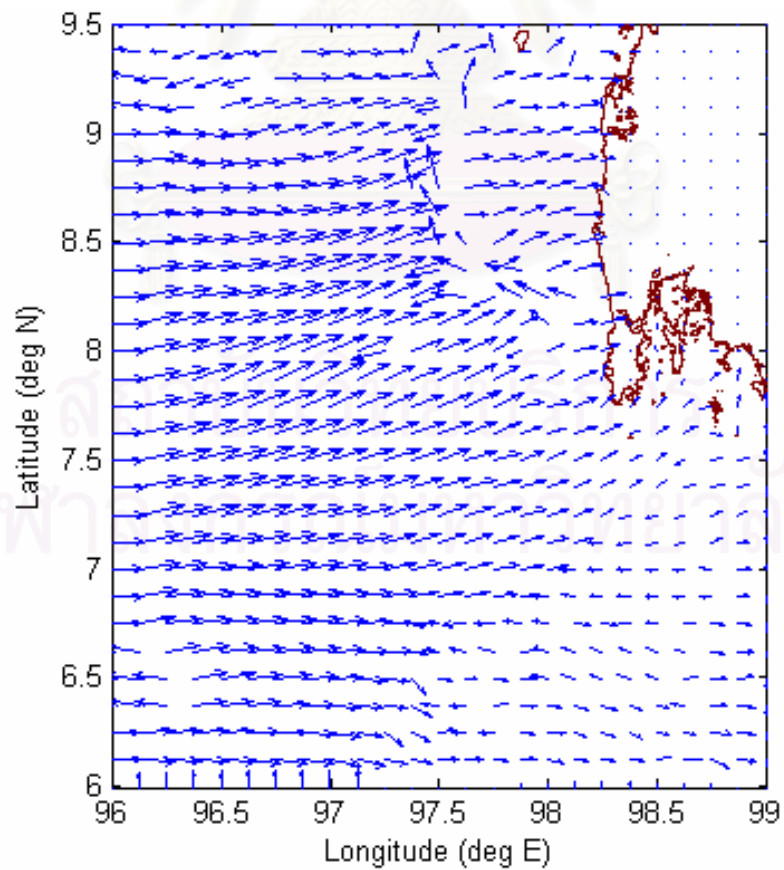


รูปที่ 5.91 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 1 (ไม่มีสเกล)

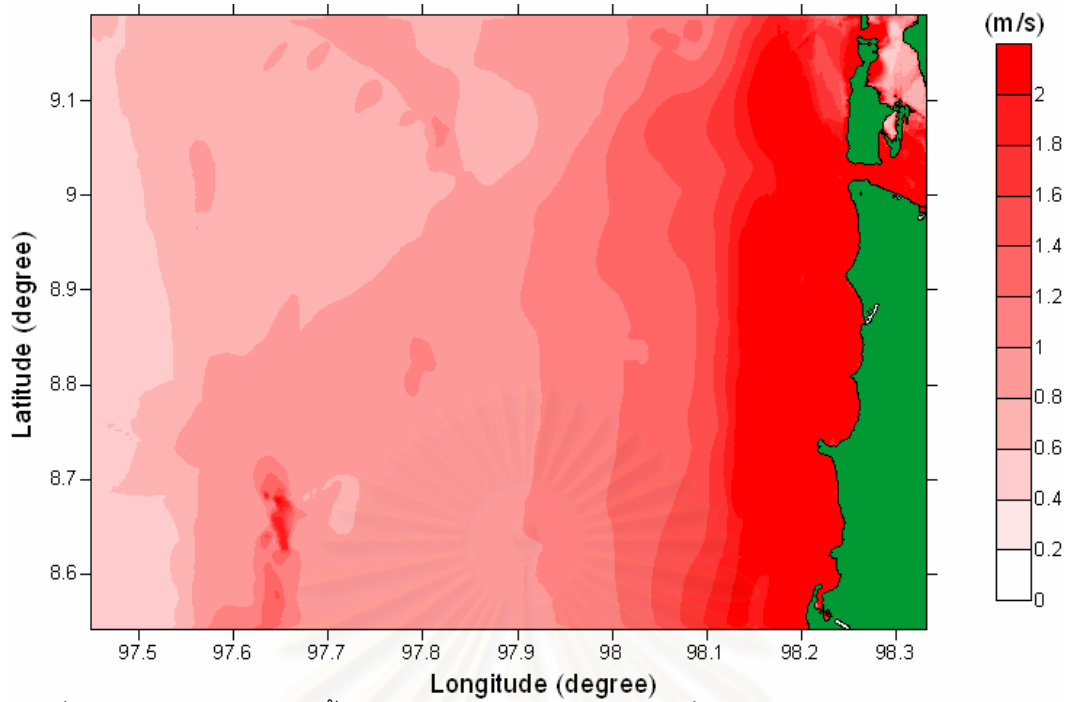
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



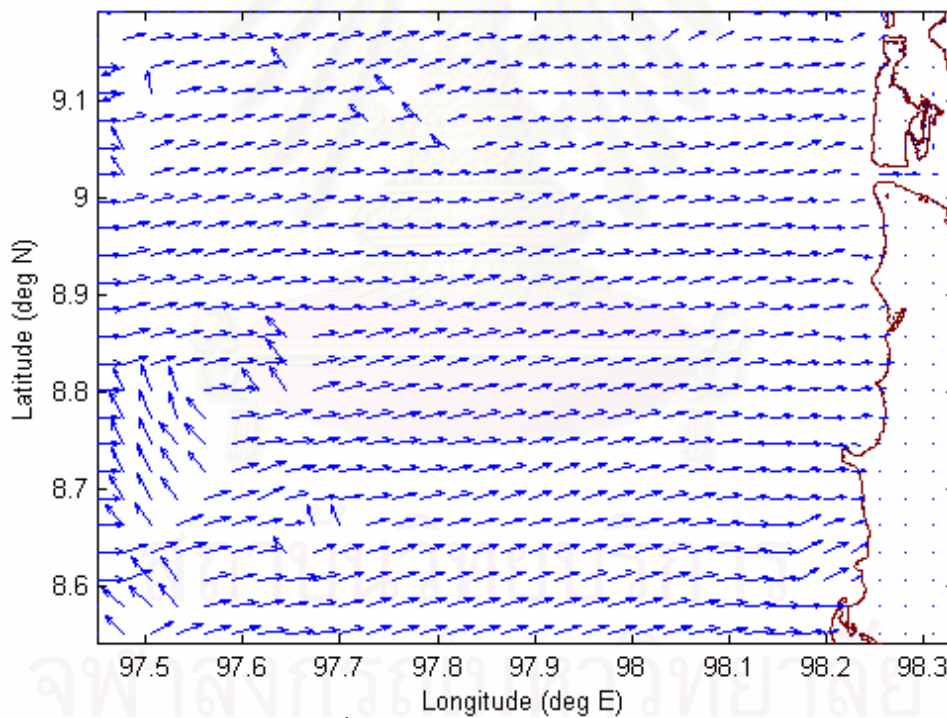
รูปที่ 5.92 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 2



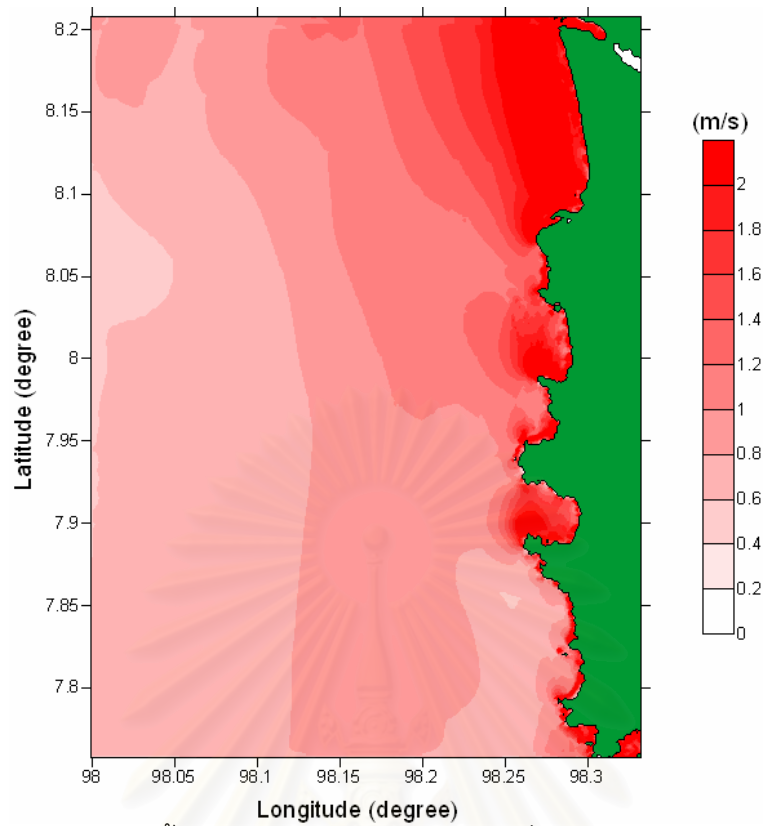
รูปที่ 5.93 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 2 (ไม่มีสเกล)



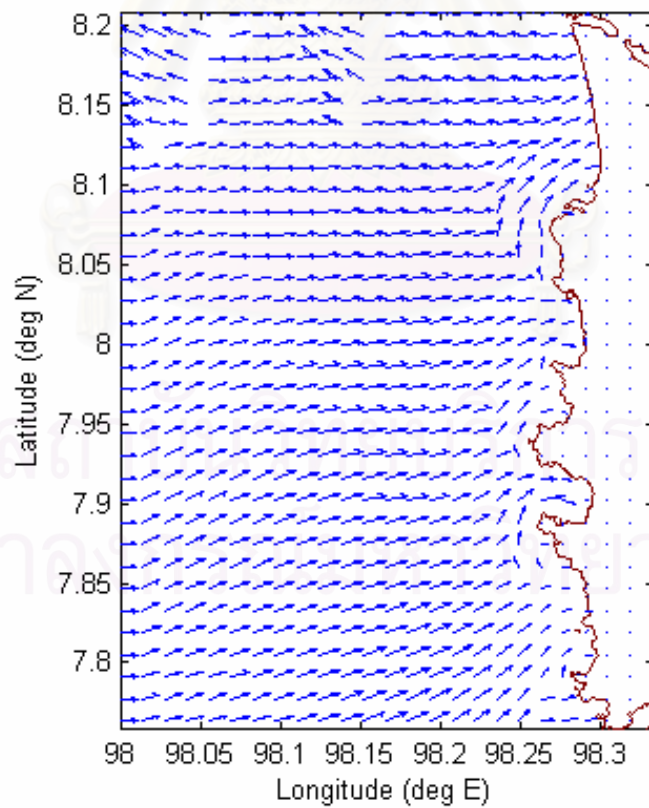
รูปที่ 5.94 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



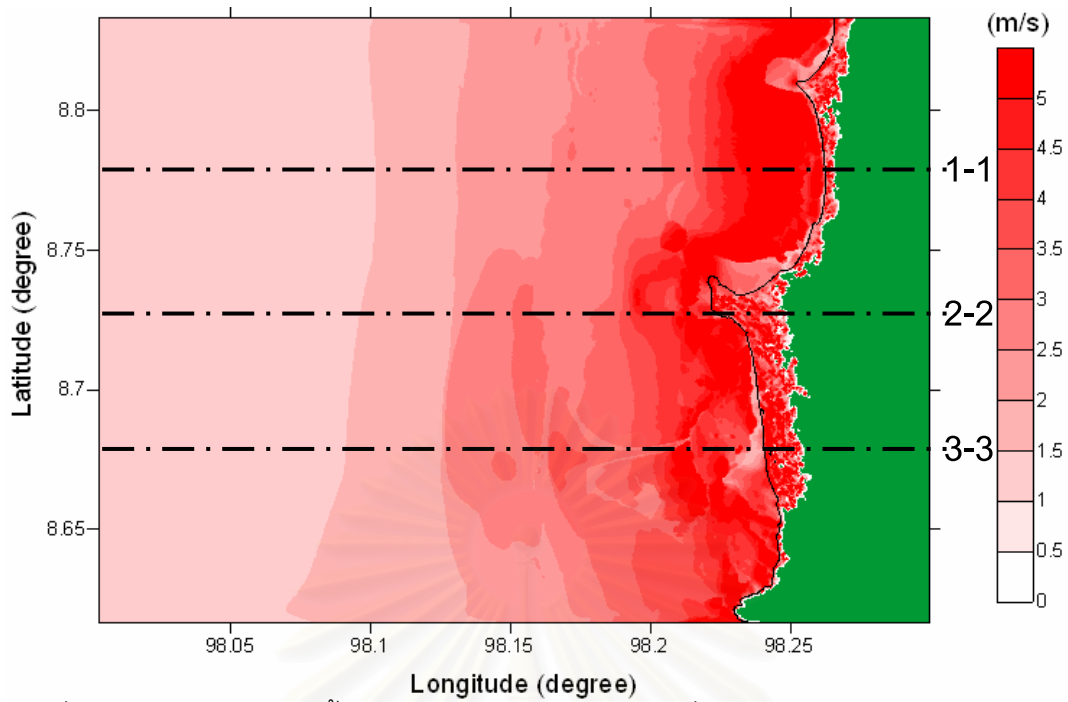
รูปที่ 5.95 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา (ไม่มีสเกล)



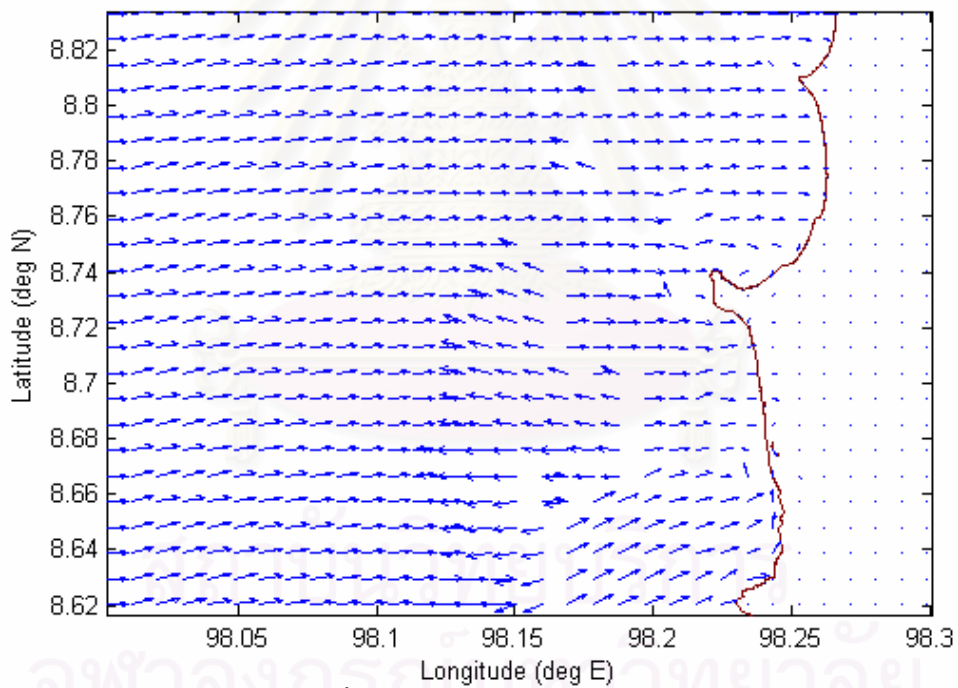
รูปที่ 5.96 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



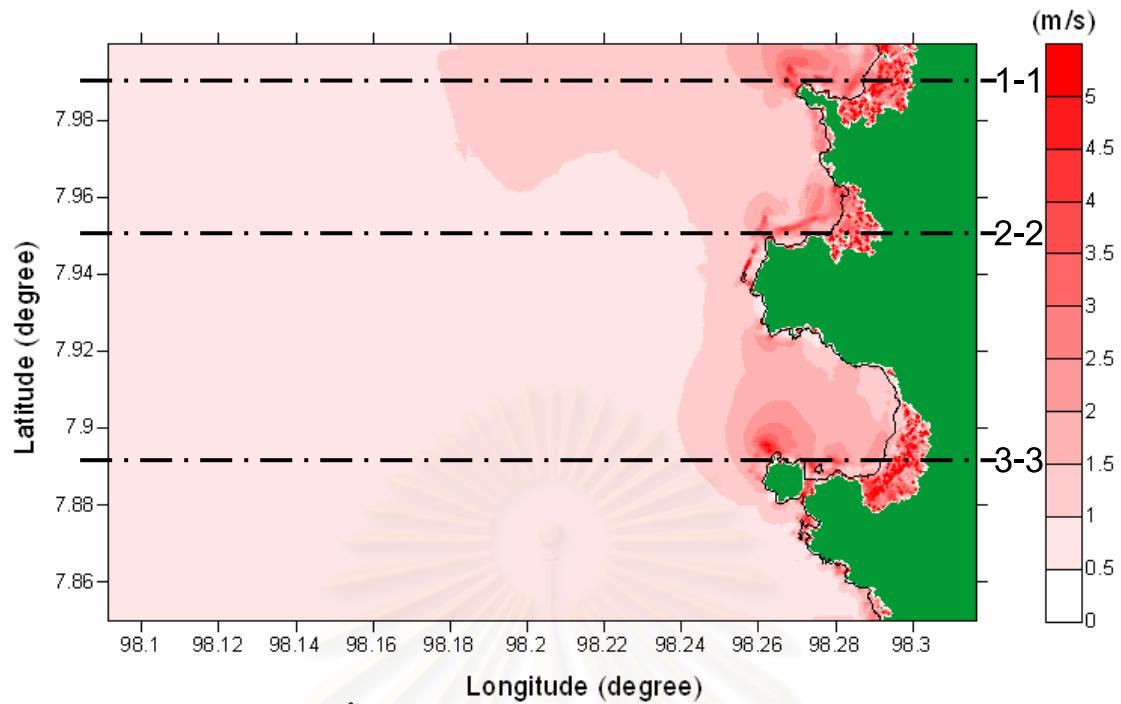
รูปที่ 5.97 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 3 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต (ไม่มีสเกล)



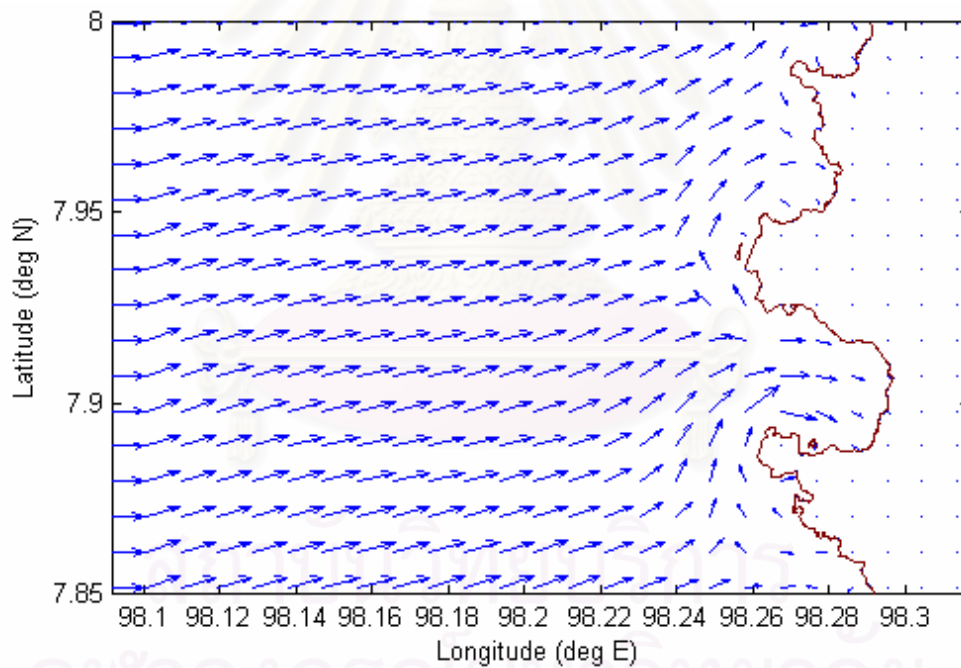
รูปที่ 5.98 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



รูปที่ 5.99 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา (ไม่มีสเกล)



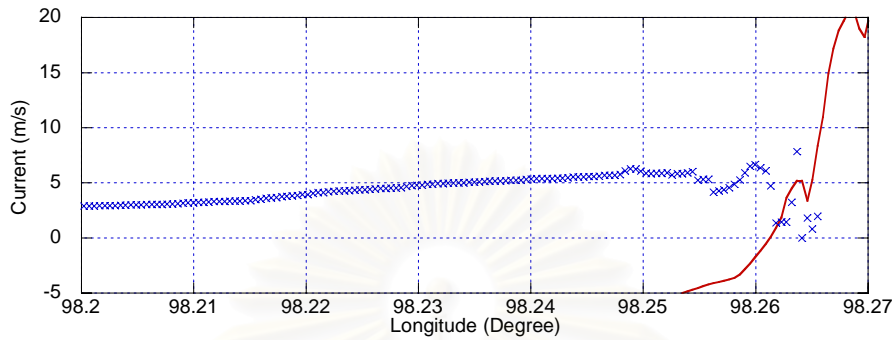
รูปที่ 5.100 ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต



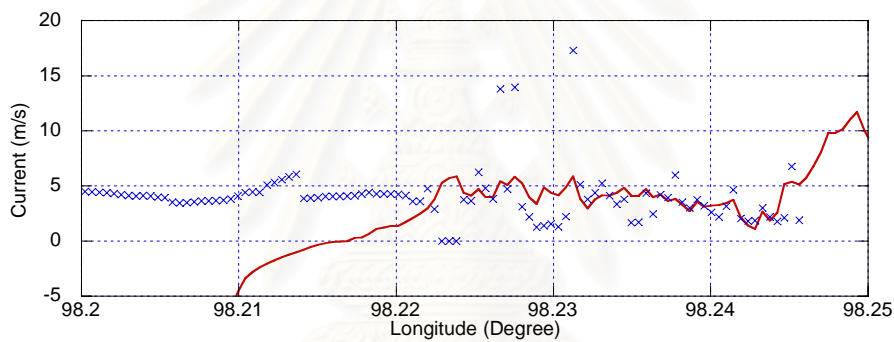
รูปที่ 5.101 ทิศทางความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในขอบเขตการคำนวณที่ 4 บริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต (ไม่มีสเกล)

จากรูปที่ 5.98 และ รูปที่ 5.100 แสดงให้เห็นถึงความเร็วกระแสน้ำสูงสุดของบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา และบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ตามลำดับ ภาพตัดขวางของทั้ง 2 บริเวณ จากเหนือลงใต้ โดยสำหรับบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา ประกอบด้วย บริเวณบ้านบางเนียน, บริเวณแหลมประการังและบริเวณคึกคัก แสดงดังรูป 5.102-5.104 สำหรับบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต

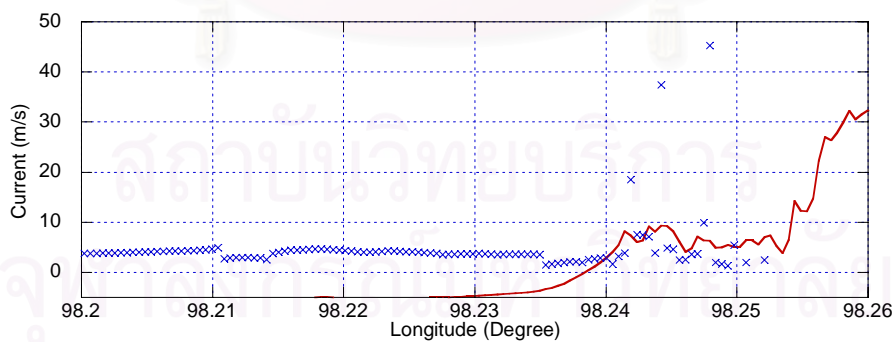
ประกอบด้วย บริเวณหาดบางเทา, บริเวณหาดกมลาและบริเวณหาดป่าตอง แสดงดังรูป 5.105-5.107 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่า ในบางจุดมีค่าความเร็วกระแสน้ำสูงมาก เนื่องจากจุดนั้นมีค่าความสูงคลื่นน้อยจึงมีผลทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนในการคำนวณ



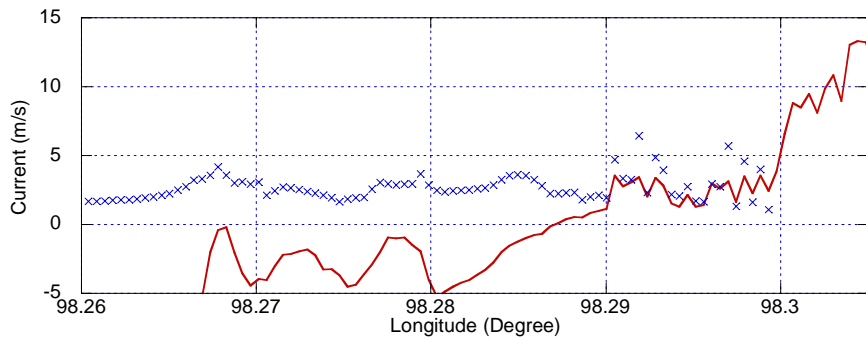
รูปที่ 5.102 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.98



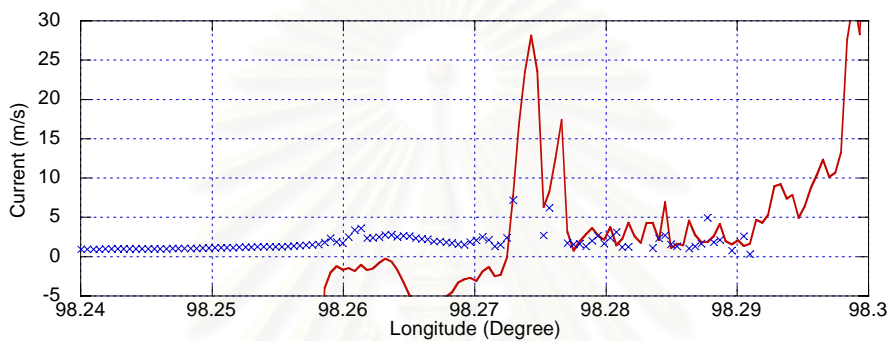
รูปที่ 5.103 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.98



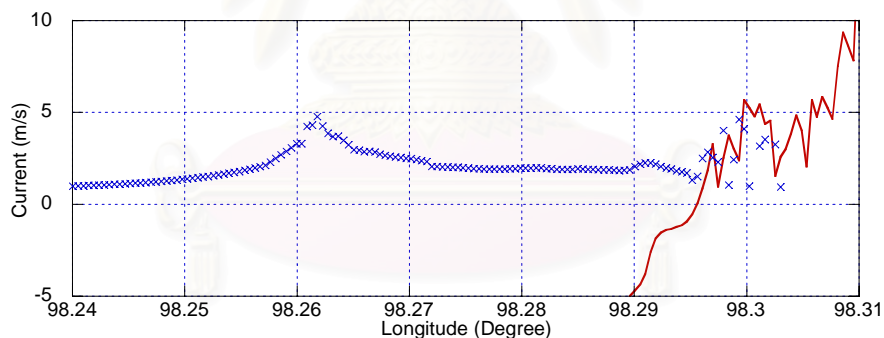
รูปที่ 5.104 ภาพตัดขวางหน้าตัด 3-3 ของรูปที่ 5.98



รูปที่ 5.105 ภาพตัดขวางหน้าตัด 1-1 ของรูปที่ 5.100



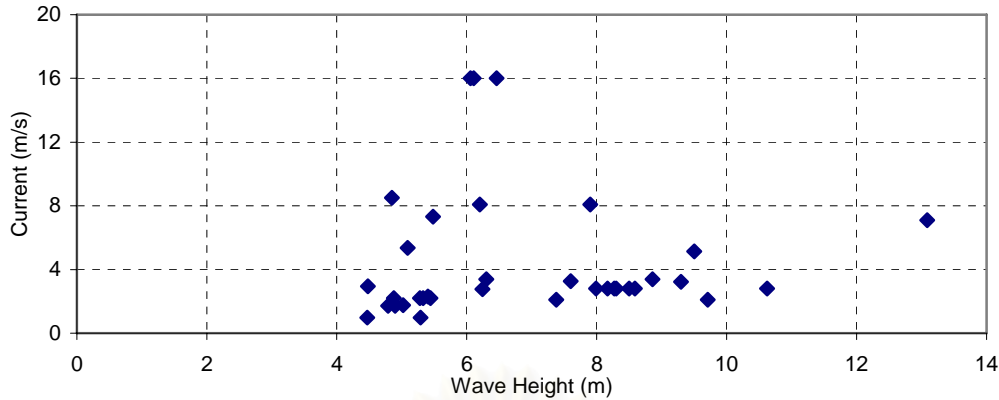
รูปที่ 5.106 ภาพตัดขวางหน้าตัด 2-2 ของรูปที่ 5.100



รูปที่ 5.107 ภาพตัดขวางหน้าตัด 3-3 ของรูปที่ 5.100

5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นกับความเร็วกะแสน้ำ

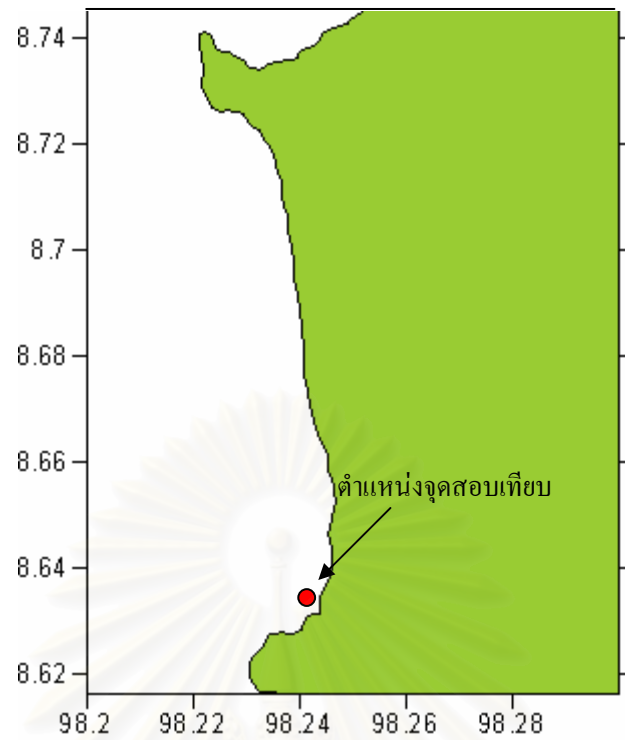
ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นที่ได้จากการสำรวจกับค่าความเร็วกะแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.108 ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายได้ว่าค่าความเร็วกะแสน้ำบริเวณบนชายฝั่งนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสูงคลื่นโดยตรง ซึ่งค่าความเร็วกะแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองส่วนมากมีค่าน้อยกว่า 4 ม./วินาที และในบางจุดมีค่าสูงถึง 16 ม./วินาที โดยที่สามารถอธิบายได้ว่าที่จุดนั้นมีค่าความสูงคลื่นจากพื้นดินน้อย เมื่อคำนวณเป็นความเร็วกะแสน้ำจึงได้ค่าที่สูงมาก



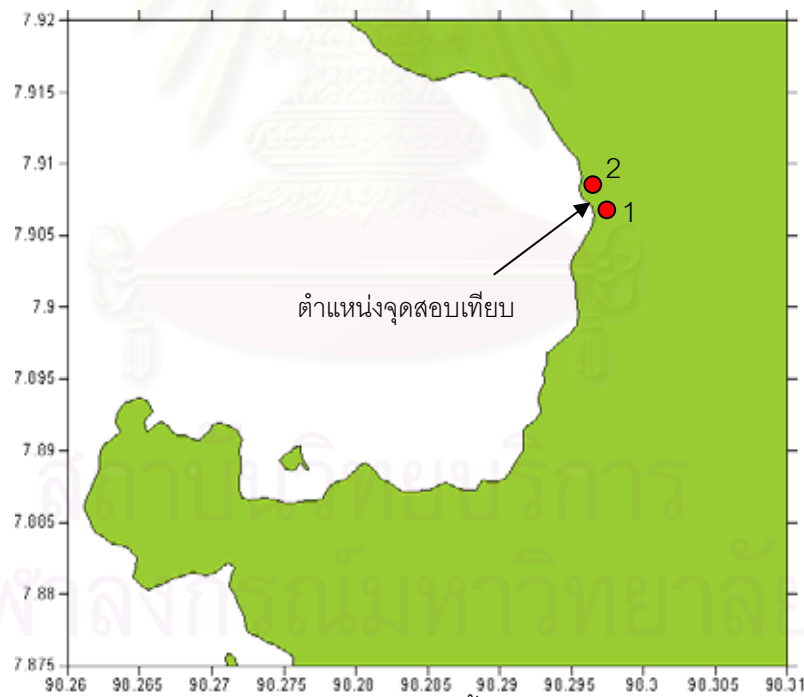
รูปที่ 5.108 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงคลื่นกับความเร็วกระแสน้ำ

5.10 การเปรียบเทียบความเร็วของหน้าคลื่น

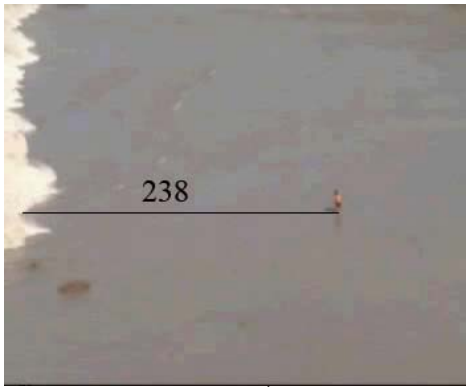
ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบความเร็วของหน้าคลื่นจากแบบจำลองกับความเร็วคลื่นที่หาได้จากวิดีโอ โดยที่ความเร็วจากแบบจำลองหาได้จากเวลาที่คลื่นเดินทางถึงของกริดที่อยู่ติดกัน เนื่องจากทราบขนาดกริดที่แน่นอนอยู่แล้ว ดังนั้นค่าความเร็วที่ได้จึงเป็นความเร็วหน้าคลื่น โดยได้ทำการสอบเทียบ 3 จุด ได้แก่ บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา และบริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต 2 จุด ซึ่งเป็นจุดที่สามารถทราบความเร็วได้จากวิดีโอสำหรับตำแหน่งของทั้ง 3 จุดที่ใช้ในการสอบเทียบความเร็วได้แสดงดังรูปที่ 5.109 และรูปที่ 5.110 การหาความเร็วจากวิดีโอของจุดบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา รูปที่ 5.111 แสดงเฟรม ณ เวลาต่างๆ ที่คลื่นยักษ์เคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่งซึ่งจะสังเกตเห็นคนที่ยืนอยู่ ผู้ศึกษาได้วัดระยะห่างของหน้าคลื่นจากคนที่ยืนอยู่และความสูงของคน โดยมีหน่วยเป็นพิกเซล ซึ่งประมาณความสูงของคนเท่ากับ 1.65 เมตร ซึ่งสามารถคำนวณหาความเร็วคลื่นได้เท่ากับ 8 ม./วินาที สำหรับจุดที่ 1 ในบริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต เลือกรูปเฟรมที่เห็นหน้าคลื่นไหลผ่านวัตถุหรือต้นไม้ที่ไม่พัดไปตามน้ำดังรูปที่ 5.112 แสดงภาพที่เฟรมต่างๆ ที่ตัดจากวิดีโอ จุดที่ 1 คือตำแหน่งของต้นไม้และจุดที่ 2 คือตำแหน่งของเสาไฟฟ้า จากนั้นทำการวัดระยะระหว่างจุด 2 จุดดังกล่าว เมื่อทราบระยะเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจุด 2 จุดและระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด สามารถคำนวณหาความเร็วคลื่นได้เท่ากับ 7 ม./วินาที และสำหรับจุดที่ 2 ในบริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต ดังรูปที่ 5.114 แสดงภาพที่เฟรมต่างๆ ที่ตัดจากวิดีโอ จุดที่ 1 คือตำแหน่งของต้นไม้และจุดที่ 2 คือตำแหน่งของเสาไฟฟ้าเช่นเดียวกัน จากนั้นทำการวัดระยะระหว่างจุด 2 จุดดังกล่าว เมื่อทราบระยะเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจุด 2 จุดและระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด สามารถคำนวณหาความเร็วคลื่นได้เท่ากับ 8.9 ม./วินาที



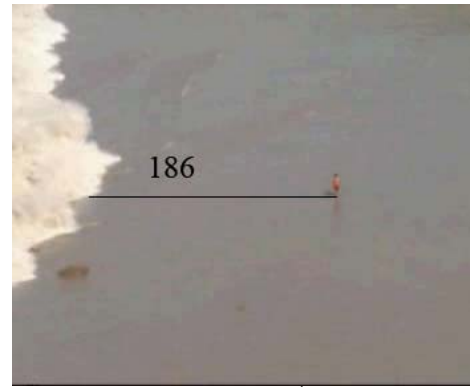
รูปที่ 5.109 ตำแหน่งจุดสอบเทียบความเร็วกระแสน้ำ บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา



รูปที่ 5.110 ตำแหน่งจุดสอบเทียบความเร็วกระแสน้ำ บริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต



(ก) เฟรมที่ 1



(ข) เฟรมที่ 11



(ค) เฟรมที่ 21



(ง) เฟรมที่ 31



(จ) เฟรมที่ 41



(ฉ) เฟรมที่ 51

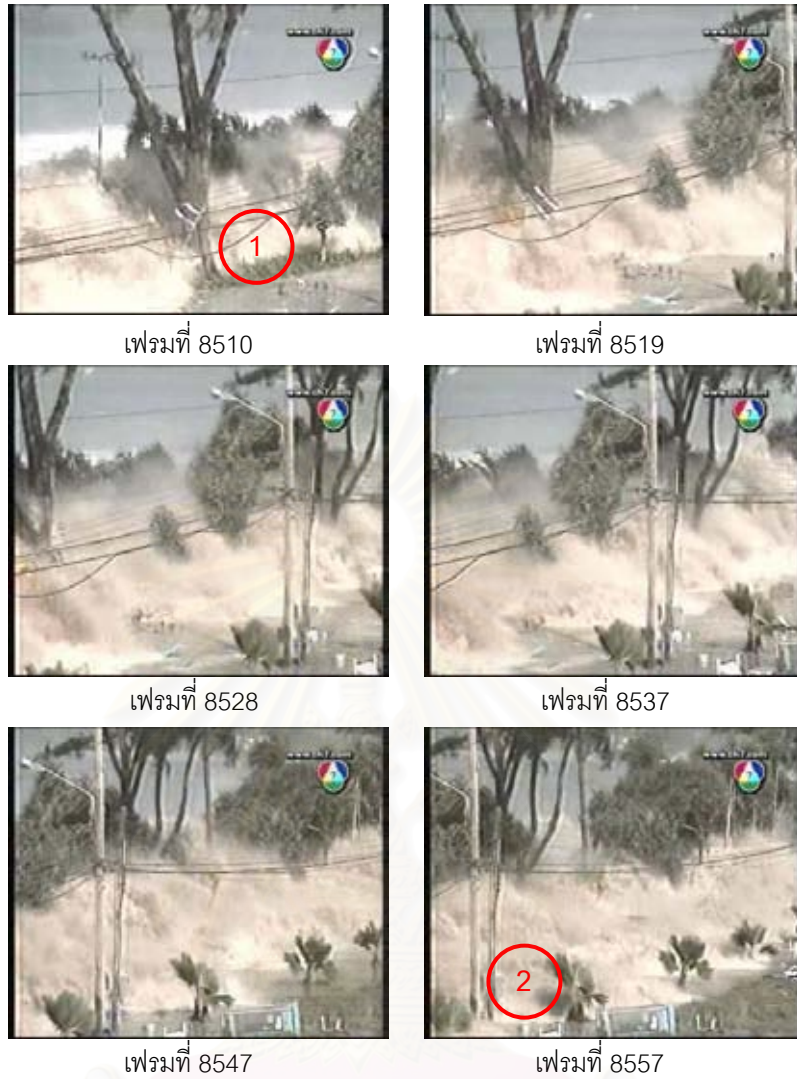


(ช) เฟรมที่ 61



(ซ) เฟรมที่ 71

รูปที่ 5.111 เฟรมต่างๆ ที่แสดงคลื่นยักษ์เคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่งโดยแต่ละเฟรมห่างกัน 1/25 วินาที



รูปที่ 5.112 เฟรมต่างๆ ที่แสดงสึนามิเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่ง จุดที่ 1 บริเวณหาดป่าตองโดย
แต่ละเฟรมห่างกัน 1/25 วินาที



รูปที่ 5.113 การวัดระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดที่ใช้คำนวณหาความเร็วคลื่นจากวิดีโอที่จุดที่
1 บริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต



เฟรมที่ 16962



เฟรมที่ 16972



เฟรมที่ 16982



เฟรมที่ 16992



เฟรมที่ 17002



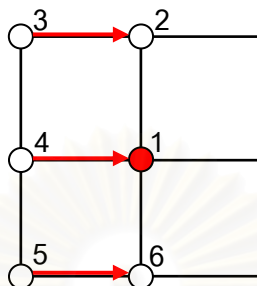
เฟรมที่ 17013

รูปที่ 5.114 เฟรมต่างๆ ที่แสดงสึนามิเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่ง จุดที่ 2 บริเวณหาดป่าตองโดย
แต่ละเฟรมห่างกัน 1/25 วินาที



รูปที่ 5.115 การวัดระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดที่ใช้คำนวณหาความเร็วคลื่นจากวิดีโอที่จุดที่
2 บริเวณหาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต

สำหรับวิธีการที่ใช้หาความเร็วหน้าคลื่นทำได้โดยกำหนดจุดที่ต้องการทำการหาความเร็วซึ่งเป็นจุดที่คำนวณค่าความเร็วจากวิดีโอที่ศึ้นหลักจากนั้นจึงกำหนดจุดรอบๆ จุดดังกล่าวจำนวน 5 จุด ดังรูปที่ 5.116 ซึ่งจุดที่ 1 คือจุดที่ต้องการทราบความเร็วหน้าคลื่น ซึ่งสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยค่าความเร็วจากจุดที่ 3 ไปจุดที่ 2, จุดที่ 4 ไปจุดที่ 1 และจุดที่ 5 ไปจุดที่ 6



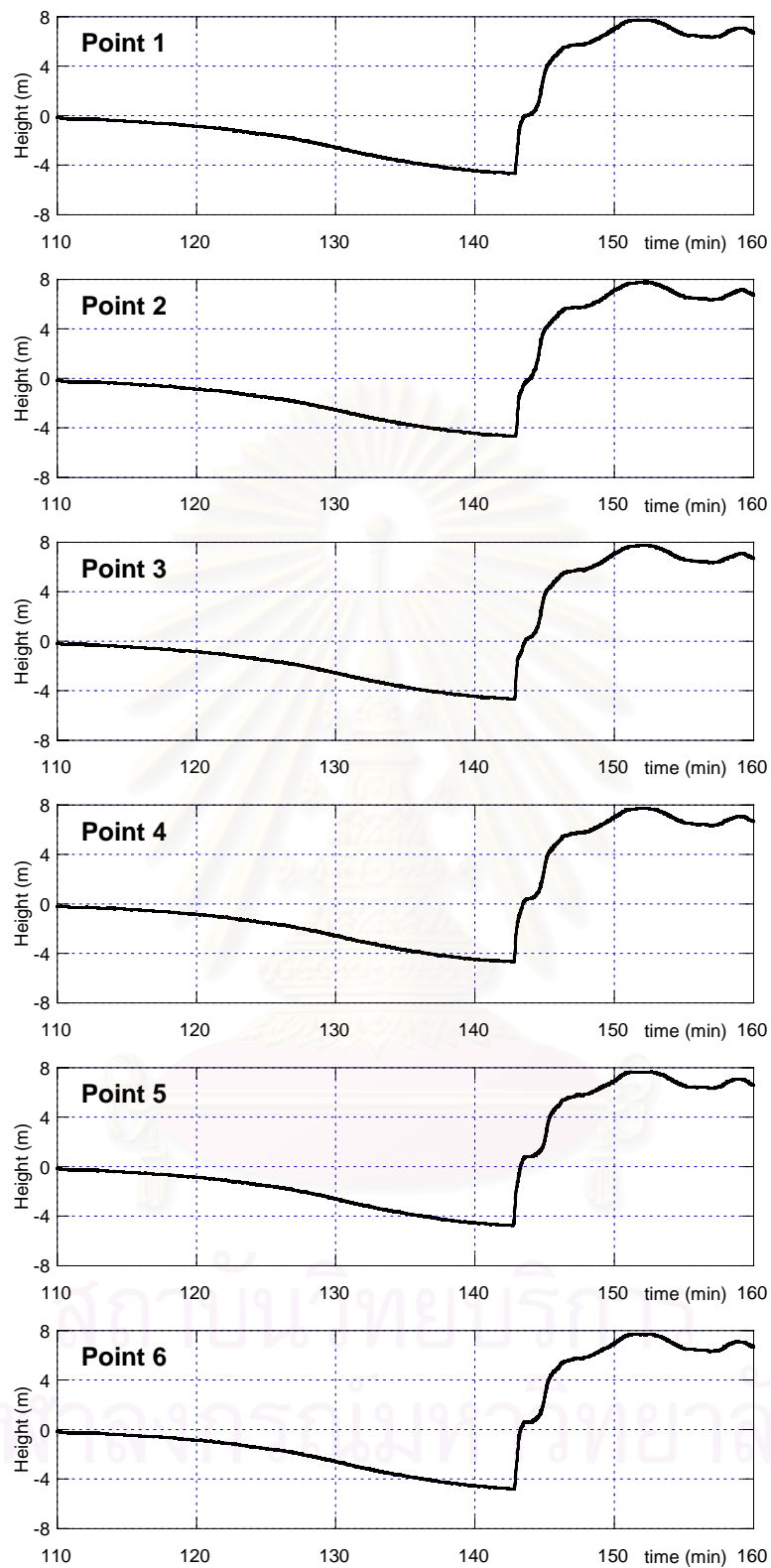
รูปที่ 5.116 ตำแหน่งจุดในแบบจำลองที่ใช้หาความเร็วหน้าคลื่น

รูปที่ 5.117 แสดงตัวอย่างหน้าคลื่นลูกที่ 1 ในบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา ของทั้ง 6 จุด ค่าเวลาเป็นเวลาลงหลังจากเกิดแผ่นดินไหว โดยคลื่นใช้เวลาเดินทางถึงจุดที่ 1 เมื่อเวลา 142.802 นาที, ถึงจุดที่ 2 เมื่อเวลา 142.852 นาที, ถึงจุดที่ 3 เมื่อเวลา 142.768 นาที, ถึงจุดที่ 4 เมื่อเวลา 142.735 นาที, ถึงจุดที่ 5 เมื่อเวลา 142.685 นาทีและถึงจุดที่ 6 เมื่อเวลา 142.752 นาที สำหรับการคำนวณยกตัวอย่างการคำนวณความเร็วจากจุดที่ 3 ไปจุดที่ 2 โดยขนาดกริดเท่ากับ 51.535 ม. ดังนั้นสามารถคำนวณความเร็วหน้าคลื่นได้

$$\text{ความเร็วจากจุดที่ 3 ไปจุดที่ 2} = \frac{51.535}{(142.852 - 142.768) \times 60 + 1} = 10.307 \text{ m/s} \quad (5.5)$$

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองได้เปรียบเทียบความเร็วหน้าคลื่นที่ได้กล่าวข้างต้น กับความเร็วกระแสน้ำซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองและความเร็วคลื่นที่ได้จากการคำนวณจากวิดีโอที่ศึ้นได้ผลดังตารางที่ 5.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.117 หน้าคลื่นลูกที่ 1 ในบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา ของทั้ง 6 จุด จากจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.11 การวิเคราะห์แบบจำลองได้เปรียบเทียบความเร็วหน้าคลื่นกับความเร็วกระแสน้ำซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองและความเร็วคลื่นที่ได้จากการคำนวณ จากวิธีทัศน

ตำแหน่ง	จุดที่พิจารณา		ความเร็วหน้าคลื่น	ค่าเฉลี่ยความเร็วหน้าคลื่น	ความเร็วกระแสน้ำ	ความเร็วจากวิธีทัศน	ค่าคลาดเคลื่อนของความเร็วหน้าคลื่น	ค่าคลาดเคลื่อนของความเร็วกระแสน้ำ
	จาก	ถึง	(m/sec)	(m/sec)	(m/sec)	(m/sec)	(%)	(%)
เขาหลัก (คลื่นลูกที่ 1)	3	2	10.307	12.025	8.773	8	50.310	9.6625
	4	1	12.884					
	5	6	12.884					
เขาหลัก (คลื่นลูกที่ 2)	3	2	-	6.902	2.062	7	13.725	70.543
	4	1	6.442					
	5	6	7.362					
หาดป่าตอง จุดที่ 1	3	2	-	1.322	2.173	8.9	27.619	75.584
	4	1	1.171					
	5	6	1.472					
หาดป่าตอง จุดที่ 2 (คลื่นลูกที่ 1)	3	2	6.442	6.442	3.436	-	61.397	-
	4	1	-					
	5	6	-					
หาดป่าตอง จุดที่ 2 (คลื่นลูกที่ 2)	3	2	3.436	3.436	-	-	-	-
	4	1	-					
	5	6	-					

จากตารางที่ 5.11 อธิบายได้ว่า สำหรับบริเวณที่อยู่ในน้ำ (เขาหลัก) ความเร็วหน้าคลื่นจากแบบจำลองใกล้เคียงกับภาพจากวิธีทัศน สำหรับบริเวณที่อยู่บนชายฝั่ง (หาดป่าตอง) การหาความเร็วจากความเร็วหน้าคลื่นจากแบบจำลองนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 6

ความบอบบางของโครงสร้าง

ในการศึกษานี้เพื่อศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาเนื่องจากสึนามิ จำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสากับลักษณะของคลื่นได้แก่ ค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1 และค่าความเร็วคลื่น โดยที่ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาเป็นค่าความเสียหายเฉลี่ยในอาคารที่ได้รับความเสียหายหลังนั้นๆ

6.1 ความบอบบางของเสาของอาคาร

ในการหาค่าเฉลี่ยของความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสานี้ใช้ค่าน้ำหนัก (Weight factor) สำหรับแต่ละระดับความเสียหายสำหรับความเสียหายแต่ละระดับจากตารางที่ 4.2 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยได้จาก

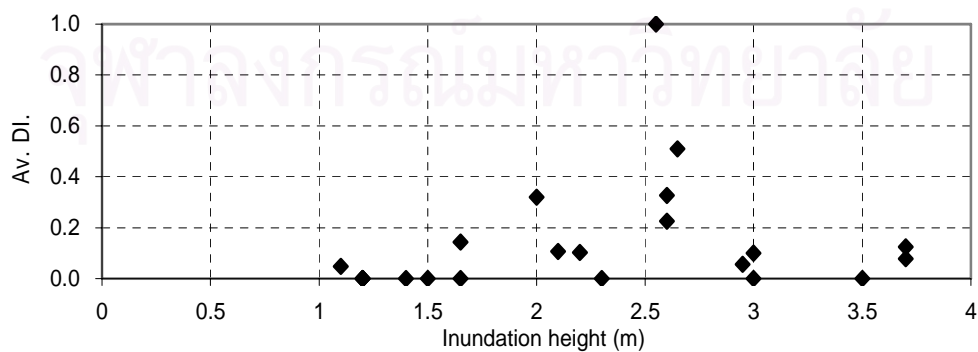
$$Av.DI. = \frac{0.226n_1 + 0.428n_2 + 0.792n_3 + 0.961n_4 + n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \quad (6.1)$$

โดยที่

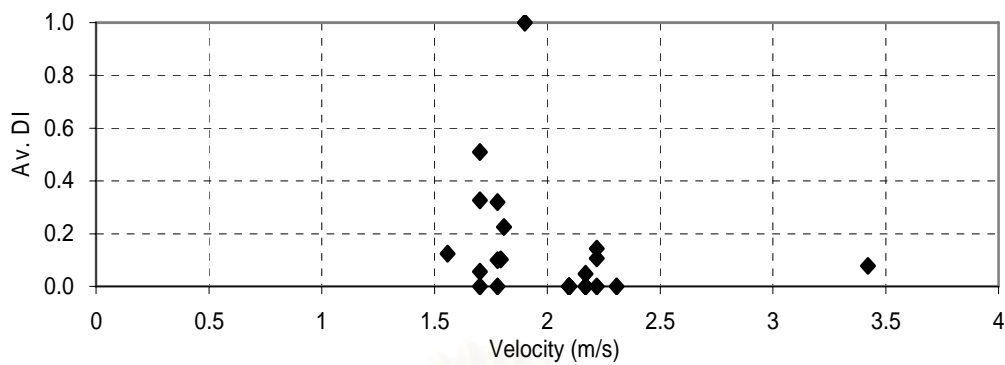
$Av.DI.$ = ค่าเฉลี่ยของความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาของอาคาร

n_i = จำนวนเสาที่เกิดความเสียหายระดับที่ i ในอาคารโดยแบ่งตามตารางที่ 4.2

ดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายเฉลี่ยของเสาในอาคารหลังนั้นๆ กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1 และความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายเฉลี่ยของเสาในอาคารหลังนั้นๆ กับค่าความเร็วคลื่นได้ดังรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายเฉลี่ยของเสาในอาคารหลังนั้นๆ กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายเฉลี่ยของเสาในอาคารหลังนั้นๆ กับค่าความเร็วคลื่น

ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.1 และ 6.2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าความเสียหายเฉลี่ยของเสามีค่าสูงเมื่อค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1 มีค่า 2.5 ม. ขึ้นไปและค่าความเร็วคลื่นมีค่า 1.7 ม./วินาทีขึ้นไป ซึ่งเห็นได้ว่าไม่มีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจน

6.2 ความบอบบางโดยรวมของอาคาร

การประเมินความเสียหายโดยรวมของอาคารสามารถทำการประเมินโดยแบ่งระดับความเสียหายออกเป็น 4 ระดับได้แก่ ไม่เสียหาย (No damage), เสียหายในโครงอาคารรอง (Damage in secondary members), เสียหายในโครงอาคารหลัก (Damage in primary members) และ โครงสร้างวิบัติ (Collapse) ซึ่งในการศึกษานี้ประเมินโดยในรูปแบบเส้นโค้งความบอบบาง (Fragility curve) เป็นเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหาย ตั้งแต่ในระดับที่พิจารณากับค่าลักษณะของคลื่นได้แก่ ค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1 และค่าความเร็วคลื่น โดยใช้หลักการความน่าจะเป็นที่มากที่สุด (Maximum likelihood) ดังสมการที่ 6.2

$$M = \prod_{i=1}^N [F(x_i)]^{y_k} [1 - F(x_i)]^{1-y_k} \quad (6.2)$$

โดยที่

M = ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายที่ระดับที่พิจารณา

$F(x)$ = เส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างสำหรับความเสียหายที่ระดับที่พิจารณา

x_i = ค่าลักษณะของคลื่น

y_k = $y_k=1$ เมื่อเกิดความเสียหายในระดับที่พิจารณา, $y_k=0$ เมื่อไม่เกิดความเสียหาย
ในระดับที่พิจารณาที่ค่าลักษณะของคลื่น = x_i

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$F(x_i)$ หาได้จากความสัมพันธ์

$$F(x_i) = \left[\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right]^{1/2} \int_{-\infty}^{x_i} \exp \left[-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (6.3)$$

$$F(x_i) = \Phi \left[\frac{\ln \frac{x}{\mu}}{\sigma} \right] \quad (6.4)$$

โดยที่

Φ = ฟังก์ชันการแจกแจงปกติ (Standardized normal distribution function)

μ = ค่ามัธยฐาน (Median)

σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

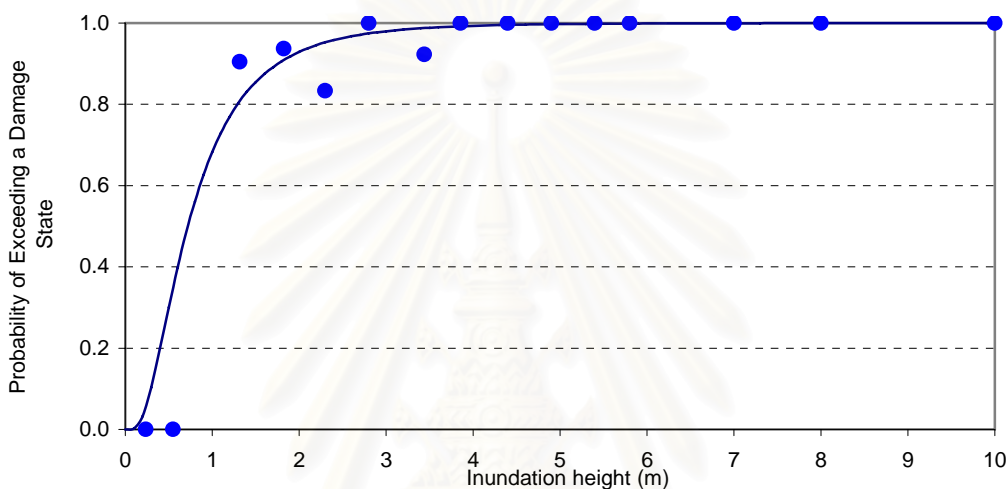
ซึ่งค่า μ และค่า σ เป็นค่าที่ทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายที่ระดับที่พิจารณา มีค่าสูงที่สุด ซึ่งหาได้จากสมการที่ 6.5

$$\frac{d \ln M}{d \mu} = \frac{d \ln M}{d \sigma} = 0 \quad (6.5)$$

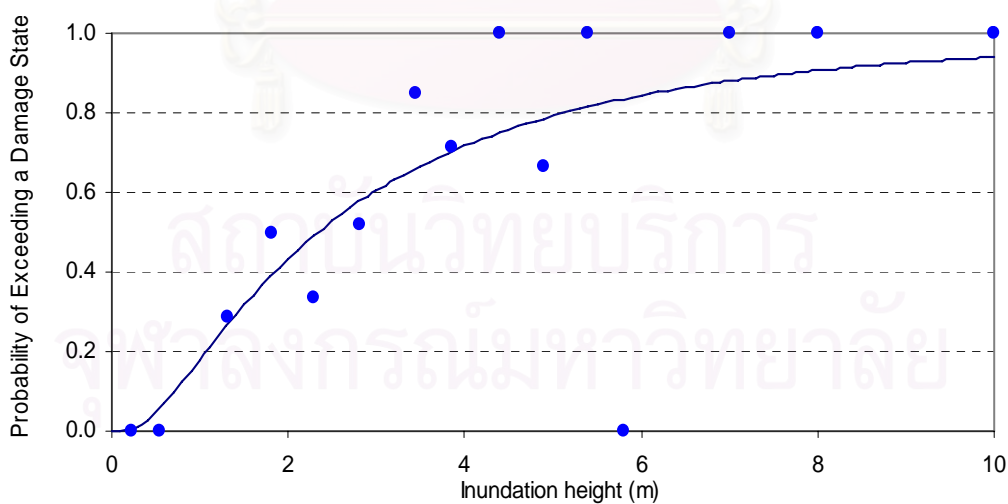
จากข้อมูลจากการสำรวจทั้งหมด 172 ข้อมูลในการศึกษานี้พิจารณาเฉพาะข้อมูลความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเท่านั้น ดังนั้นจึงมีจำนวนข้อมูล 122 ข้อมูลในการวิเคราะห์เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายโดยรวมของอาคาร ซึ่งสามารถหาค่า μ และค่า σ สำหรับความเสียหายแต่ละระดับได้ดังตารางที่ 6.1 และสามารถหาเส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายโดยรวมของอาคารสำหรับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1 ของระดับความเสียหายต่างๆ ได้ดังรูปที่ 6.3 – 6.5 ซึ่งเป็นประโยชน์ในการหาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับที่พิจารณา ยกตัวอย่างเช่นรูปที่ 6.3 ที่ค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1 มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในชั้นส่วนรอง 50% จากข้อมูลจากการสำรวจเมื่อหาค่าเฉลี่ยค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1 ทุกๆ 0.5 ม. และหาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับนั้นๆ ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 6.3 – 6.5 ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปตามเส้นโค้งความบอบบางที่คำนวณได้

ตารางที่ 6.1 ค่ามัธยฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายที่ระดับที่พิจารณา มีค่าสูงที่สุดของแต่ละระดับความเสียหาย

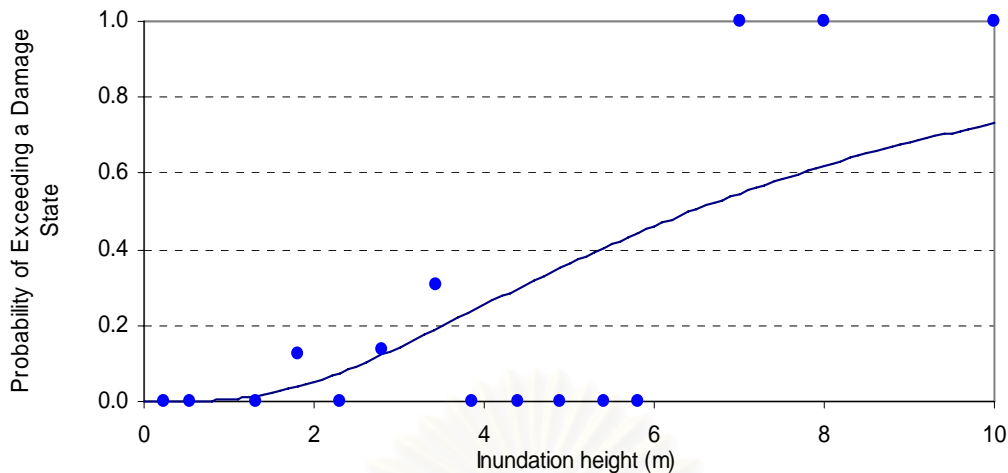
ระดับความเสียหาย	ค่ามัธยฐาน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เสียหายในโครงอาคารรอง	-0.368	0.777
เสียหายในโครงอาคารหลัก	0.850	1.121
โครงสร้างวิบัติ	1.907	0.824



รูปที่ 6.3 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายโดยรวมของอาคารในระดับความเสียหายในโครงอาคารรองกับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1



รูปที่ 6.4 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายโดยรวมของอาคารในระดับความเสียหายในโครงอาคารหลักกับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1

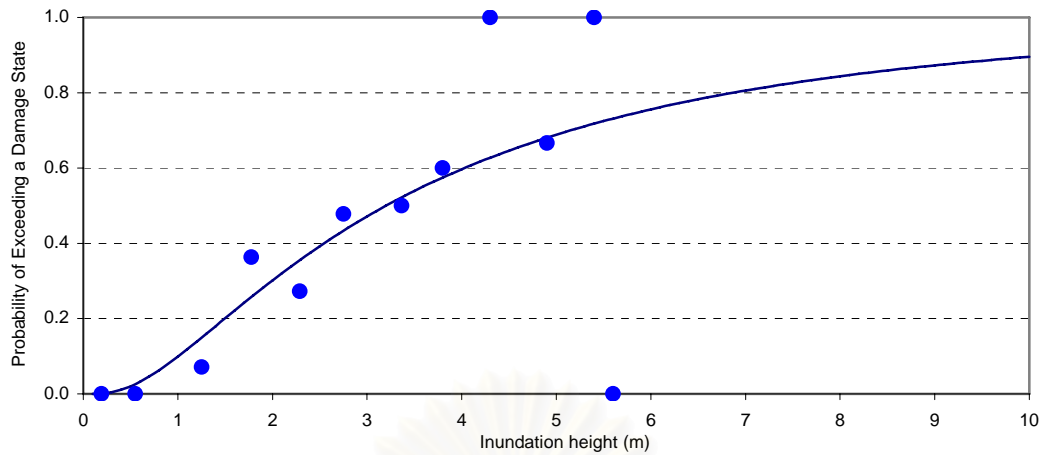


รูปที่ 6.5 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายโดยรวมของอาคารในระดับความเสียหาย
โครงสร้างวิบัติกับค่าความสูงคลื่นจากพื้นที่ 1

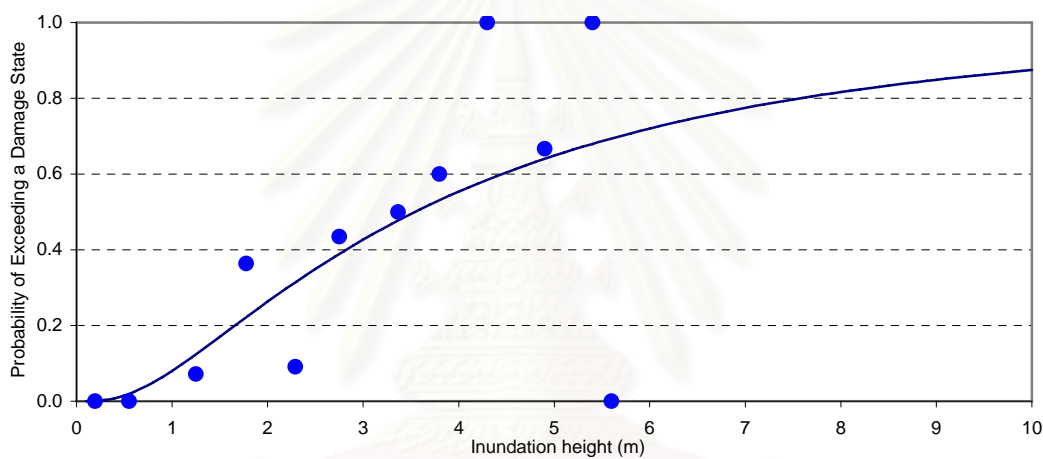
จากผลการสำรวจเมื่อพิจารณาเส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายในระดับเสียหายใน
โครงอาคารหลักอย่างละเอียด โดยพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาแบ่งออกได้เป็น 6 ระดับ
ดังตารางที่ 3.1 จำนวนข้อมูลที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์นั้นมี 83 ข้อมูลเท่านั้น ซึ่งสามารถหาค่า
 μ และค่า σ สำหรับความเสียหายแต่ละระดับได้ดังตารางที่ 6.2 และสามารถหาเส้นโค้งความ
บอบบางของความเสียหายที่สูงที่สุดของเสาในอาคารหลังนั้นๆ สำหรับค่าความสูงคลื่นจากพื้นที่
ที่ 1 ได้ดังรูปที่ 6.6 – 6.10 ซึ่งเป็นประโยชน์ในการหาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายใน
ระดับที่พิจารณา

ตารางที่ 6.2 ค่ามัธยฐานและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความ
เสียหายของเสาในที่ระดับที่พิจารณามีค่าสูงที่สุดของแต่ละระดับความเสียหายของเสา

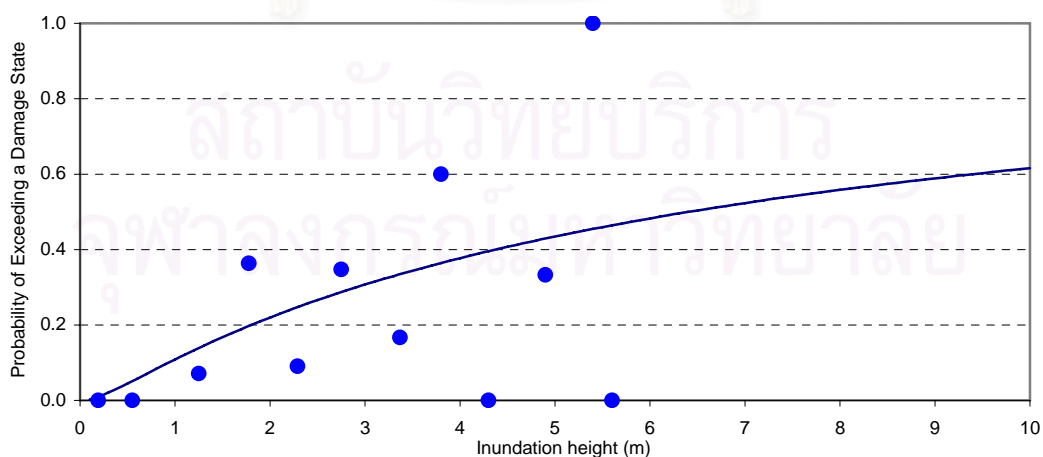
ระดับความเสียหายของเสา	ค่ามัธยฐาน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ความเสียหายระดับที่ 1	1.163	0.907
ความเสียหายระดับที่ 2	1.264	0.903
ความเสียหายระดับที่ 3	1.857	1.509
ความเสียหายระดับที่ 4	3.656	3.191
ความเสียหายระดับที่ 5	3.300	2.015



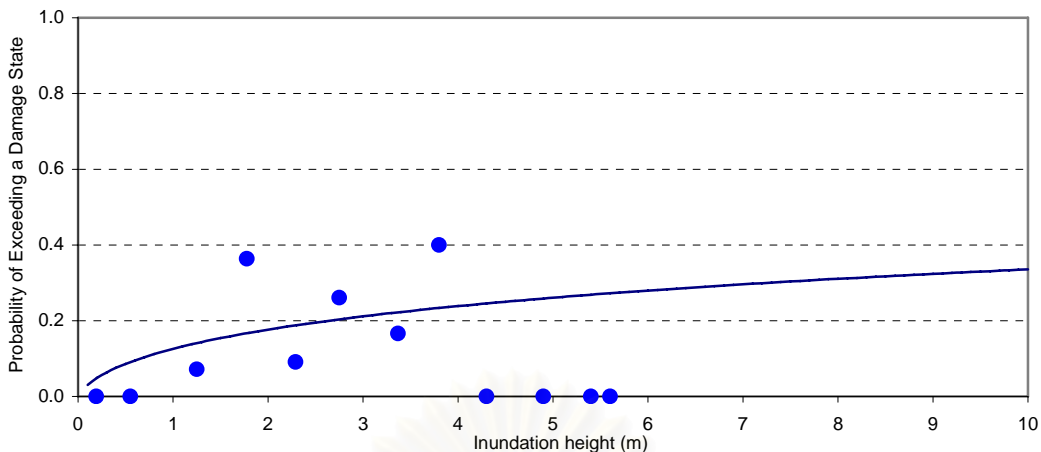
รูปที่ 6.6 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 1 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1



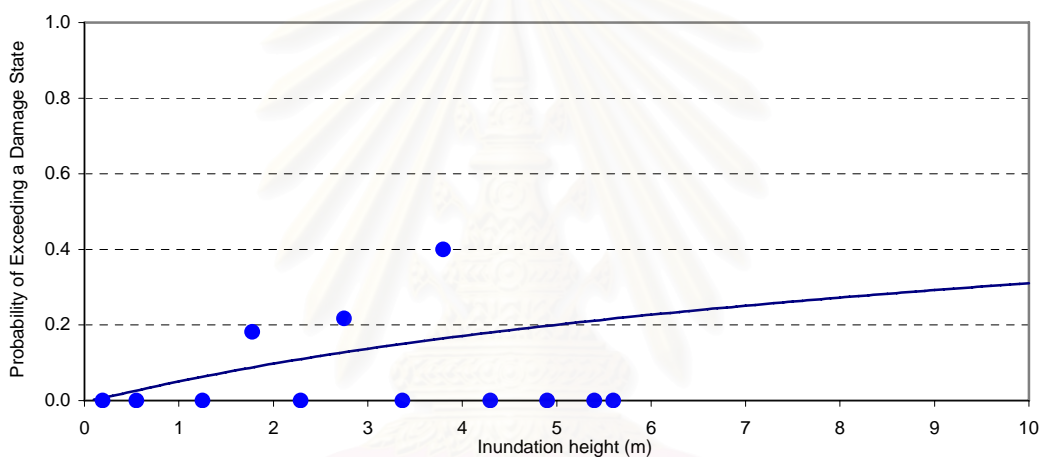
รูปที่ 6.7 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 2 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1



รูปที่ 6.8 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 3 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1

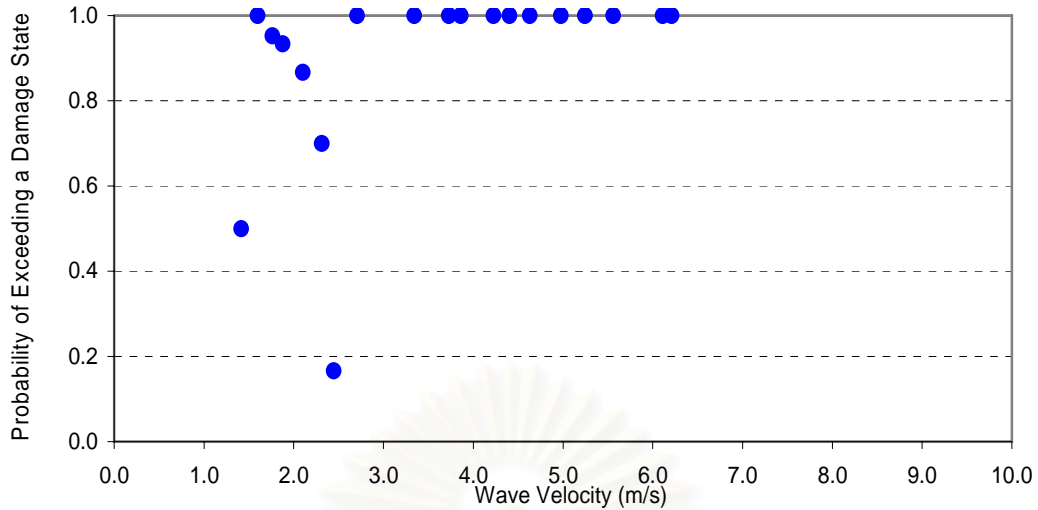


รูปที่ 6.9 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 4 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นที่ 1

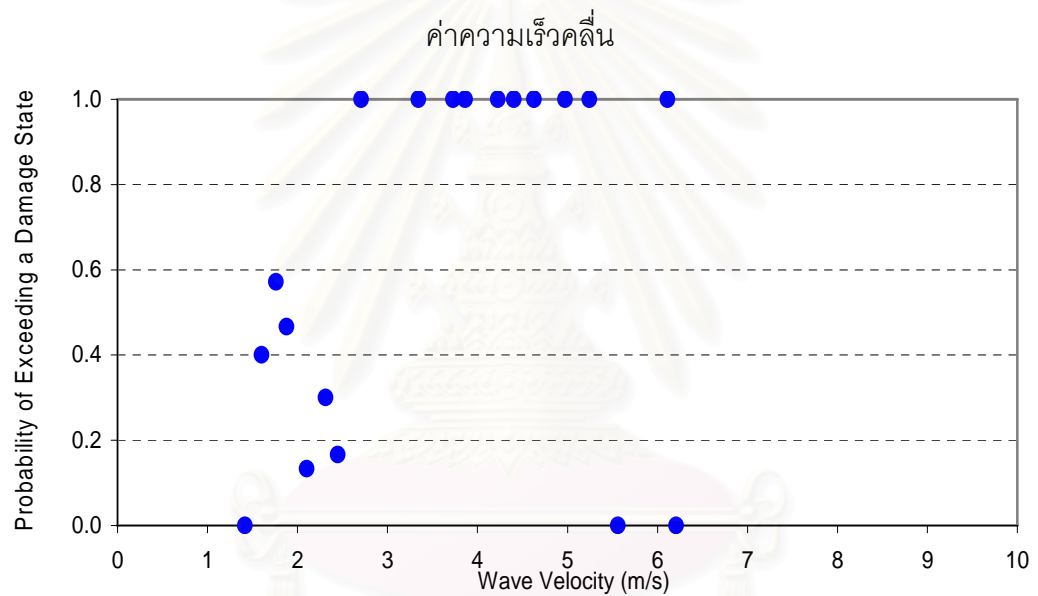


รูปที่ 6.10 เส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายของเสาในระดับความเสียหายที่ 5 กับค่าความสูงคลื่นจากพื้นที่ 1

สำหรับความเร็วคลื่นสามารถหาได้เพียง ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายโดยรวมในระดับต่างๆ ของโครงสร้างกับค่าความเร็วคลื่นเฉลี่ยค่าความเร็วคลื่นทุกๆ 0.2 ม./วินาที ดังแสดงในรูปที่ 6.11 – 6.13 ซึ่งลักษณะของข้อมูลมีความกระจายตัวไม่แน่นอนดังนั้นจึงไม่สามารถหาเส้นโค้งความบอบบางของความเสียหายโดยรวมของอาคารในระดับความเสียหายต่างๆ กับค่าความเร็วคลื่นได้



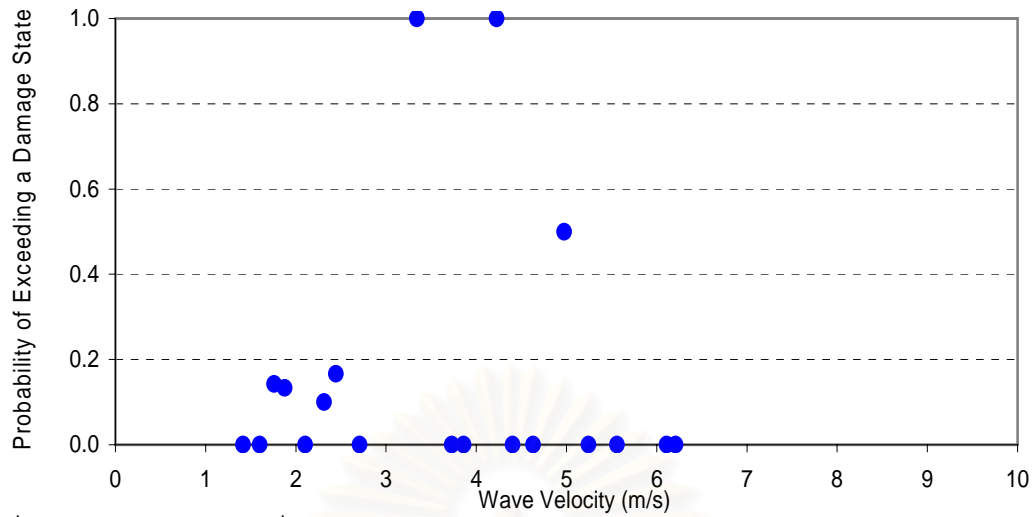
รูปที่ 6.11 ความน่าจะเป็นที่เกิดความเสียหายโดยรวมในระดับความเสียหายในโครงอาคารรองกับ



รูปที่ 6.12 ความน่าจะเป็นที่เกิดความเสียหายโดยรวมในระดับความเสียหายในโครงอาคารหลัก

กับค่าความเร็วคลื่น

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.13 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายโดยรวมในระดับความเสียหายโครงสร้างวิบัติกับค่า
ความเร็วคลื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547 โดยแบ่งเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาและความเสียหายโดยรวมของอาคาร ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม, ข้อมูลการทดสอบเสาน้ำตัด 0.15 ม. x 0.15 ม. และผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบจำลอง จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. จากข้อมูลการสำรวจภาคสนามเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547 หน่วยงานต่างๆ ทำการสำรวจเพื่อจัดบันทึกข้อมูลความเสียหายต่างๆ เช่นความเสียหายของอาคาร, ถนน, กำแพงกันดิน เป็นต้น ซึ่งในการจัดบันทึกข้อมูลนั้นได้ทำการจัดบันทึกตำแหน่งของอาคาร, ระดับความสูงของคลื่นที่ท่วม, รูปแบบของโครงสร้าง, ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเสาและคานซึ่งแบ่งระดับความเสียหายตามขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวและความเสียหายโดยรวมของอาคาร โดยมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 172 ข้อมูล สำหรับตำแหน่งของโครงสร้างส่วนมากอยู่ในจังหวัดภูเก็ต 85 ข้อมูลรองลงมาคือจังหวัดพังงา 52 ข้อมูล, จังหวัดกระบี่ 16 ข้อมูล, จังหวัดระนอง 11 ข้อมูล, จังหวัดตรัง 6 ข้อมูลและจังหวัดสตูล 2 ข้อมูล ซึ่งลักษณะของโครงสร้างส่วนมากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก และความเสียหายโดยรวมของโครงสร้างแบ่งได้เป็น ไม่เสียหาย 13%, เสียหายในโครงอาคารรอง 31%, เสียหายในโครงอาคารหลัก 32% และโครงสร้างวิบัติ 24%

2. ในการศึกษาทำการทดสอบเสาน้ำตัดขนาดหน้าตัด 0.15 ม. x 0.15 ม. ซึ่งเป็นหน้าตัดเสาที่ได้รับ ความเสียหายตั้งแต่ไม่เสียหายจนกระทั่งวิบัติ โดยทำการทดสอบเพื่อหาค่าน้ำหนักสำหรับแต่ละระดับความเสียหายของเสา จากผลการทดสอบหลังจากทำการปรับแก้แล้วสามารถสรุปได้ว่า ค่าความต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของเสาคือ 5.74 kN ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวประมาณ 1 มม. ที่อัตราการเสียรูป 2.64% ในการหาค่าน้ำหนักสำหรับแต่ละระดับความเสียหายของเสานั้นหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวกับค่าอัตราส่วนพลังงานที่เสาได้รับ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเอ็กโปเนนเชียล

3. การศึกษานี้ทำการศึกษาแบบจำลองสึนามิเพื่อหาความเร็วคลื่น ที่ซึ่งไม่สามารถทำการสำรวจได้ จากการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองสามารถสรุปได้ว่า คลื่นใช้เวลาเดินทางมาถึงสถานีวัดน้ำตะพานน้อยหลังจากเกิดแผ่นดินไหวประมาณ 100 นาทีและคลื่นใช้เวลาเดินทางมาถึงสถานีวัดน้ำตะรุเตา หลังจากเกิดแผ่นดินไหวประมาณ 160 นาที คลื่นมีความสูงมากในบริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงา โดยมีความสูงเฉลี่ยเมื่อเทียบกับข้อมูลจากการสำรวจโดย DPRI เท่ากับ 7.02 ม. และบริเวณหาดกมลาจังหวัดภูเก็ต คลื่นความสูงเฉลี่ยเมื่อเทียบกับข้อมูลจากการสำรวจโดย DPRI เท่ากับ 4.29 ม. ในการเปรียบเทียบนี้ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจุดต่อจุดซึ่งมีค่าต่างไปจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลการสำรวจโดย DPRI 0.5 ม. สำหรับทั้ง 2 บริเวณสำหรับค่าความสูงคลื่นที่สูงที่สุดจากแบบจำลองนั้น บริเวณเขาหลัก จังหวัดพังงาคลื่นที่สูงที่สุดประมาณ 8 ม. และบริเวณหาดกมลา จังหวัดภูเก็ต ประมาณ 5 ม. จากการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นจากแบบจำลองกับค่าความเร็วกระแสน้ำจากทฤษฎีของคลื่นยาวทราบได้ว่า สมการจากทฤษฎีไม่เหมาะสมกับบริเวณที่มีความลึกน้ำน้อยกว่า 50 ม. ค่าความเร็วคลื่นที่ได้จากแบบจำลองสึนามิมีค่าสูงสุดประมาณ 5 เมตร/วินาที สำหรับทั้ง 2 บริเวณ

4. ในงานวิจัยนี้ศึกษาความบอบบางของโครงสร้างใน 2 ลักษณะคือ ความเสียหายของเสาขนาดหน้าตัด 0.15 ม. x 0.15 ม. และความเสียหายโดยรวมของอาคาร จากการประเมินความเสียหายของเสาสามารถสรุปได้ว่า ความเสียหายจะเกิดขึ้นต่อเสามากเมื่อคลื่นมีความสูงจากพื้นชั้นที่ 1 ประมาณ 2.5 ม. และความเร็วคลื่นประมาณ 1.7 ม./วินาที จากการศึกษาเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างกับความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1 ซึ่งเป็นการประเมินความเสียหายโดยรวมของอาคาร สามารถสรุปได้ว่า จากข้อมูลจากการสำรวจเมื่อหาค่าเฉลี่ยค่าความสูงคลื่นจากพื้นชั้นที่ 1 ทุกๆ 0.5 ม. และหาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเสียหายในระดับนั้นๆ มีแนวโน้มเป็นไปตามเส้นโค้งความบอบบางที่คำนวณได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ในการทำแผนที่เสี่ยงภัยได้ แต่สำหรับเส้นโค้งความบอบบางของโครงสร้างกับความเร็วคลื่นนั้น ไม่สามารถหาเส้นโค้งความบอบบางได้เนื่องจากไม่มีแนวโน้มที่เด่นชัด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ปราโมทย์ ไชจิศุภกร, อัปสรสุดา ศิริพงศ์ และ นฤมิตร สว่างผล. (2548) แบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของคลื่นสึนามิเมื่อเข้าสู่ชายฝั่งประเทศไทย. การศึกษาและประเมินความเสี่ยงอันเกิดจากพิบัติภัยคลื่นยักษ์สึนามิ และให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับระบบติดตามและป้องกันภัยสึนามิ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ภาษาอังกฤษ

Architectural Institute of Japan _AIJ_, (2000). Report on the Technical Cooperation for Temporary Restoration of Damaged RC School Buildings Due to the 1999 Chi-Chi Earthquake, Tokyo, Japan.

Aslani H., and Miranda E. (2005): Drift base fragility function for slab column connections. Research spotlight, <http://blume.stanford.edu/Blume/Newsletters/Spring2005Spotlight.pdf>.

Choi, B.H., Hong, S.J., Hwang, D., Hidayat, R., Kaistrenko, V., Korolev, Y., Kurkin, A., Pelinovsky, E., Polukhin, N., Prasetya, G., Razzhigaeva, N., Subandono, D., Yalciner, A., Yoon, S.B. and Zaitsev, A. (2005): Catastrophic tsunami in the Indian Ocean (December 26, 2004): data of two field surveys and numerical simulation. Proceeding of the special Asia tsunami session at Asian and Pacific coasts: 159-187.

Choi, B.H., Siripong, A., Sundar, V., Wijetunge, J.J. and Diposaptono, S. (2005): Post runup survey of the December 26, 2004 earthquake tsunami of the Indian Ocean. Proceeding of the special Asia tsunami session at Asian and Pacific coasts: 1-20.

Fujii, Y. and Satake, K. (2006): Tsunami Source of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Inferred from Tide Gauge and Satellite Data. National Institute of

Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Geological Survey of Japan (GSJ), Japan.

Ghobarah, A., Saatcioglu, M. and Nistor, I. (2006): The impact of the 26 December 2004 earthquake and tsunami on structure and infrastructure. Engineering Structures 28:312-326.

Imamura, F. (1996): Review of tsunami simulation with a finite difference method. In Long-Wave Runup Models, World Scientific, 25-42.

Joseph, B.F. and John E.F. (2002): Fluid mechanics with engineering applications. McGraw-Hill International Editions, New York.

Koshimura, S. and Takashima, M. (2005): Remote Sensing, GIS, and Modeling Technologies Enhance the Synergic Capability to Comprehend the Impact of Great Tsunami Disaster. 3rd International workshop on remote sensing for post disaster response, Chiba University, Chiba.

Makhlouf, H.M. and Malhas, F.A. (1996): The effect of thick concrete cover on the maximum flexural crack width under service load. ACI structural journal. 93:257-265.

Mansinha, L., and Smylie, D. (1971): The Displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, 61:1433-1440.

Papadopoulos, G.A., and Imamura, F. (2001): A proposal for a new tsunami intensity scale. ITS 2001 Proceeding, 5(1):569-577.

Pindyck, R. S. and Rubinfeld, D. L. (1998): Econometric Models and Economic Forecasts. McGraw-Hill International Editions, New York.

Saxena, V., Deodatis, G., Shinozuka, M. and Feng, M.Q. (2000): Development of fragility curves for multi-span reinforced concrete bridges. International conference on Monte Carlo simulation Technical Programe.

Shigihara, Y. and Fujima, K. (2005): Numerical modeling of Indian Ocean tsunami in the Maldives. Proceeding of the special Asia tsunami session at Asian and Pacific coasts: 49-56.

Shuto, N. (1991): Tsunami intensity and disasters. In Tsunamis in the World, edited by S. Tinti, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 197-216.

Siripong, A., Choi, B.H., Vichiencharoen, C., Yumuang, S. and Sawangphol, N. (2005): The changing coastline on the Andaman seacoasts of Thailand from Indian Ocean tsunami. Proceeding of the special Asia tsunami session at Asian and Pacific coasts 2005, 21-31.

Titov, V.V. and Gonzalez, F.I. (1997): Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112.

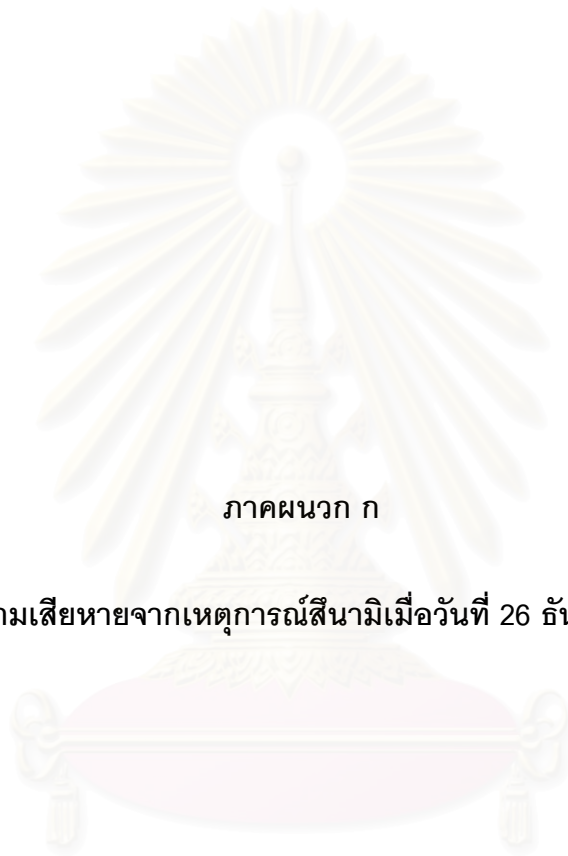
Yamazaki, F. and Murao, O. (2000): Fragility curves for buildings in Japan based on experience from the 1995 Kobe Earthquake. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo, Japan.

สถาบันทฤษฎีบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลความเสียหายจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก1 ข้อมูลความเสียหายจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547

Ref. No.	Location	Function	Structure Type	No. of Stories	Damage
KB-011	Rai-Ray Bay, Krabi	Hotel	Wood	1	Damage in secondary members only
KB-012	Nam-Maow Bay, Krabi	Other	RC		Collapse
KB-013	Lantra-Yai Island, Krabi	Residence	Wood	1	Collapse
KB-018	Lantra Island, Krabi	Other	Other		Damage in some primary members
KB-021	Krong-Hin Beach, Krabi	Residence	Wood	1	Collapse
KB-101	Aow-Nang Beach, Krabi	Other	RC		No damage
KB-102	Nam-Maow Bay, Krabi	Other	RC		No damage
KB-201	Lanta Island, Krabi	Hotel	RC	1	Collapse
KB-202	Ban-Krong-Talu, Krabi	Residence	Wood	1	Damage in some primary members
KB-302	Nopparat-Tara Beach, Krabi	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
KB-303	Rai-Ray Bay, Krabi	Hotel	Wood	2	Damage in secondary members only
KB-305	Lantra Island, Krabi	Residence	Wood	2	No damage
KK-002	Kor Khao Island, Phang-Nga	Residence	RC	1	Damage in some primary members
KK-008	Kor Khao Island, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Collapse
KK-010	Kor Khao Island, Phang-Nga	Residence	RC	1	Collapse
KK-013	Kor Khao Island, Phang-Nga	Residence	RC	1	Collapse
KK-023	Kor Khao Island, Phang-Nga	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
KK-024	Kor Khao Island, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Damage in some primary members
KK-031	Kor Khao Island, Phang-Nga	School	RC	1	Damage in secondary members only
KK-051	Kor Khao Island, Phang-Nga	Residence	RC	1	Damage in some primary members
KK-057	Kor Khao Island, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Damage in secondary members only
KL-001	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	3	Damage in secondary members only
KL-002	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Damage in secondary members only
KL-003	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Damage in some primary members
KL-004	Ban-Bang-Niang, Phang-Nga	Residence	RC	1	Damage in some primary members
KL-005	Khao Lak, Phang-Nga	Other	RC	1	Damage in some primary members
KL-006	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Collapse
KL-007	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Damage in secondary members only

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ข้อมูลความเสียหายจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547

Ref. No.	Location	Function	Structure Type	No. of Stories	Damage
KL-009	Pakarang Cape, Phang-Nga	Residence	RC	2	Damage in some primary members
KL-010	Pakarang Cape, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Collapse
KL1-003	Khao-Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	2	Collapse
KL1-004	Khao-Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	2	Damage in secondary members only
KL1-006	Khao-Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Collapse
KL1-012	Khao-Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Collapse
KL1-013	Khao-Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Collapse
KL1-101	Khao-Lak, Phang-Nga	Other	Other		Collapse
KL1-106	Khao-Lak, Phang-Nga	Bridge	RC		No damage
KL1-107	Khao-Lak, Phang-Nga	Bridge	RC		Collapse
KL-A-001	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Damage in some primary members
KL-A-002	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Damage in some primary members
KL-B-001	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	2	Damage in some primary members
KL-C-001	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Collapse
KL-C-002	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	1	Collapse
KL-C-003	Khao Lak, Phang-Nga	Hotel	RC	3	Damage in some primary members
KL-D-001	Ban-Nam-Kem, Phang-Nga	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
KL-D-002	Ban-Nam-Kem, Phang-Nga	Shop	RC	1	Damage in some primary members
KML-A-001	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in some primary members
KML-A-002	Kamala Beach, Phuket	Other	RC	2	No damage
KML-A-003	Kamala Beach, Phuket	Other	RC	2	Damage in secondary members only
KML-A-004	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in some primary members
KML-A-005	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	No damage
KML-A-006	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in some primary members
KML-A-007	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
KML-A-009	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in secondary members only
KML-A-010	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	3	Damage in secondary members only
KML-A-011	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in some primary members
KML-A-012	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in secondary members only
KML-A-013	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in some primary members

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ข้อมูลความเสียหายจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547

Ref. No.	Location	Function	Structure Type	No. of Stories	Damage
KML-A-014	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Collapse
KML-A-015	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in some primary members
KML-A-016	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in secondary members only
KML-A-017	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in some primary members
KML-A-018	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
KML-A-019	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Collapse
KML-A-020	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in some primary members
KML-A-021	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in some primary members
KML-A-022	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Collapse
KML-A-023	Kamala Beach, Phuket	Hotel	RC	4	Damage in secondary members only
KML-A-024	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Collapse
KML-A-025	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in some primary members
KML-A-028	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in some primary members
KML-A-029	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in secondary members only
KML-A-031	Kamala Beach, Phuket	Hotel	RC	3	Damage in secondary members only
KML-B-001	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
KML-B-002	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
KML-B-003	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in some primary members
KML-B-004	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
KML-B-005	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
KML-B-006	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
KML-B-007	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
KML-B-009	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in secondary members only
KML-B-010	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in secondary members only
KML-B-011	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	No damage
KML-B-012	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
KML-B-013	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in secondary members only
KML-B-014	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
KML-B-015	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	No damage
KML-B-016	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in secondary members only

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ข้อมูลความเสียหายจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547

Ref. No.	Location	Function	Structure Type	No. of Stories	Damage
KML-B-017	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
KML-B-018	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in some primary members
KML-C-002	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
KML-C-004	Kamala Beach, Phuket	Other	RC	1	Damage in some primary members
KML-C-005	Kamala Beach, Phuket	School	RC	2	Damage in secondary members only
KML-C-007	Kamala Beach, Phuket	Residence	Wood	1	Damage in some primary members
KML-C-008	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in secondary members only
KML-C-010	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
KML-C-011	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in some primary members
KML-C-014	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in some primary members
KML-D-001	Kamala Beach, Phuket	Hotel	RC	2	Damage in secondary members only
KML-D-002	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	Damage in some primary members
KML-D-003	Kamala Beach, Phuket	Hotel	RC	2	Damage in secondary members only
KML-D-004	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in some primary members
KML-D-005	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in secondary members only
KML-D-006	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in some primary members
KML-D-007	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	1	Damage in some primary members
KML-D-008	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	No damage
KML-D-009	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	Damage in some primary members
KML-D-010	Kamala Beach, Phuket	Hotel	RC	2	Damage in secondary members only
KML-D-011	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	No damage
KML-D-012	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	No damage
KML-D-013	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	2	No damage
KML-D-014	Kamala Beach, Phuket	Residence	RC	3	No damage
KML-D-015	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	1	No damage
KML-D-016	Kamala Beach, Phuket	Hotel	RC	2	No damage
KML-D-017	Kamala Beach, Phuket	Residence	Wood	1	No damage
KML-D-018	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	No damage
KML-D-019	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in secondary members only
KML-D-020	Kamala Beach, Phuket	NA	RC	2	Collapse

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ข้อมูลความเสียหายจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547

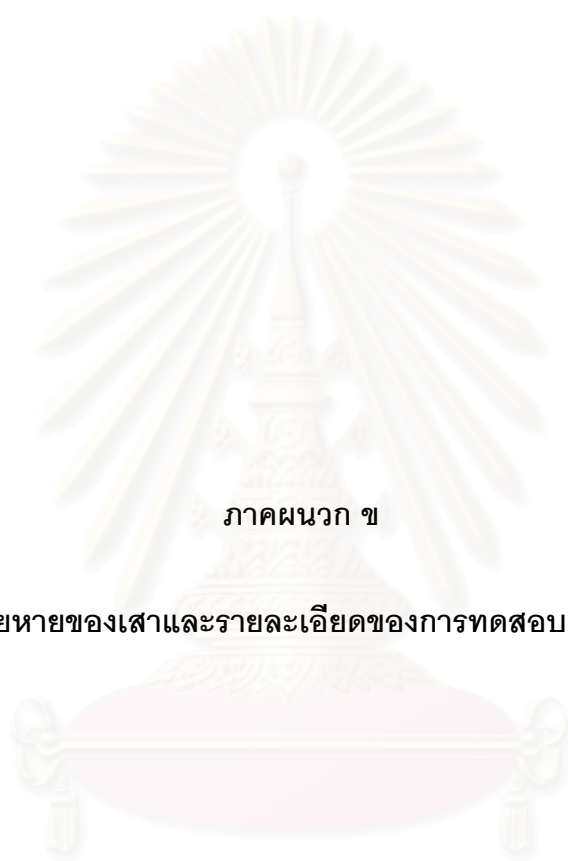
Ref. No.	Location	Function	Structure Type	No. of Stories	Damage
KML-D-021	Kamala Beach, Phuket	Hotel	RC	3	Damage in secondary members only
KML-E-001	Kamala Beach, Phuket	Shop	RC	2	Damage in some primary members
KML-E-002	Kamala Beach, Phuket	Hotel	RC	2	Damage in secondary members only
KML-E-003	Kamala Beach, Phuket	Hotel	RC	2	Damage in secondary members only
KR-001	Karon Beach, Phuket	Other	RC	1	Damage in secondary members only
KR-002	Karon Beach, Phuket	Hotel	RC	1	Damage in some primary members
KR-014	Karon Beach, Phuket	Hotel	RC	1	Damage in secondary members only
KT-001	Kata Beach, Phuket	Hotel	RC	3	No damage
KT-002	Kata Beach, Phuket	Shop	RC	3	Damage in secondary members only
KT-003	Kata Beach, Phuket	Hotel	RC	3	Damage in secondary members only
NK-001	Ban-Nam-Kem, Phang-Nga	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
NK-002	Ban-Nam-Kem, Phang-Nga	Shop	RC	1	Damage in some primary members
NK-003	Ban-Nam-Kem, Phang-Nga	Residence	RC	2	Damage in secondary members only
NK-004	Ban-Nam-Kem, Phang-Nga	Other	Other		Damage in secondary members only
NK-005	Ban-Nam-Kem, Phang-Nga	Other	Other		Collapse
PP-001	Phi Phi Island, Krabi	Shop	RC	2	Damage in some primary members
PP-002	Phi Phi Island, Krabi	Hotel	RC	2	Collapse
PP-003	Phi Phi Island, Krabi	Bridge	RC		Collapse
PP-004	Phi Phi Island, Krabi	Other	RC		Damage in some primary members
PT-001	Patong Beach, Phuket	Hotel	RC	4	Damage in secondary members only
PT-002	Patong Beach, Phuket	Other	Other		Damage in secondary members only
PT-003	Patong Beach, Phuket	Other	RC		Collapse
RN-01	Kapoe, Ranong	Other	Steel	1	Damage in some primary members
RN-02	Kapoe, Ranong	Other	RC	1	Damage in some primary members
RN-03	Kapoe, Ranong	Hotel	RC	1	Collapse
RN-04	Kapoe, Ranong	Hotel	RC	1	Collapse
RN-05	Kapoe, Ranong	Other	RC	1	Damage in some primary members
RN-06	Kapoe, Ranong	Residence	Wood	1	Collapse
RN-07	Kapoe, Ranong	Residence	RC	1	Damage in some primary members
RN-105	King Amphoe Suk-Samran, Ranong	Residence	RC		Collapse

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ข้อมูลความเสียหายจากเหตุการณ์สึนามิเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2547

Ref. No.	Location	Function	Structure Type	No. of Stories	Damage
RN-109	King Amphoe Suk-Samran, Ranong	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
RN-304	King Amphoe Suk-Samran, Ranong	Residence	RC	1	Damage in secondary members only
RN-402	Suk-Samran, Ranong	Residence	RC	1	Damage in some primary members
ST-001	Satun	Other	Other		Damage in some primary members
ST-002	Satun	Other	Other		Damage in some primary members
TM-001	Thai Muang, Phang-Nga	Residence	RC	1	Damage in some primary members
TM-002	Thai Muang, Phang-Nga	Residence	RC	1	Damage in some primary members
TM-003	Thai Muang, Phang-Nga	Residence	RC	1	Damage in some primary members
TM-004	Thai Muang, Phang-Nga	School	RC	1	Damage in some primary members
TM-005	Thai Muang, Phang-Nga	School	RC	1	Damage in some primary members
TM-006	Thai Muang, Phang-Nga	Other	RC		Collapse
TM-007	Thai Muang, Phang-Nga	Other	Other		Collapse
TM-008	Thai Muang, Phang-Nga	Other	RC		No damage
TM-009	Thai Muang, Phang-Nga	Residence	RC	1	Collapse
TM-010	Thai Muang, Phang-Nga	Residence	RC	1	Damage in some primary members
TM-011	Thai Muang, Phang-Nga	Residence	RC	1	Damage in some primary members
TM-012	Thai Muang, Phang-Nga	Bridge	Steel		Collapse
TM-013	Thai Muang, Phang-Nga	Other	Other		Collapse
TR-001	Trang	School	RC	1	No damage
TR-002	Trang	Residence	Wood	1	Collapse
TR-01	Trang	Bridge	RC		Damage in secondary members only
TR-02	Trang	Other	RC		No damage
TR-03	Trang	Other	RC		No damage
TR-04	Trang	Other	RC		No damage

ตารางที่ ก2 ตัวอย่างข้อมูลความเสียหาย

Reference No.	KL-C-001	
Date	1/9/2005	
Time		
Inspector		
Organization	Chulalongkorn University	
Structure name	Khaolak Resort	
Location	Khao Lak, Phang-Nga	
GPS E position (UTM Datum 47)	416903	
GPS N position (UTM Datum 47)	954413	
Distance from shoreline (m)		
Runup height (m)		
Function	Hotel	
Structural type	RC	
Foundation type	Shallow Foundation	
Wall type	Brick+Glass	
Roof type	Tile	
No. of stories (above ground)	1	
No. of stories (underground)		
Plan Width (m)	4	
Plan Length (m)	8	
Remarks on structural details		
Column width (m)	0.25	Photo
Column depth (m)	0.25	
Column height (m)		
Column reinforcement		
Total no. of columns	6	
No. of inspected columns	6	
No. of columns with D=0		
No. of columns with D=1		
No. of columns with D=2		
No. of columns with D=3		
No. of columns with D=4		
No. of columns with D=5	6	
Remarks on column damage		
Beam width (m)		Photo
Beam depth (m)		
Beam reinforcement		
Beam damage	Collapse	
Remarks on beam damage		
Footing width (m)		Photo
Footing length (m)		
Footing depth (m)		
No. of footings		
Foundation damage	NA	
Remarks on foundation damage		
Wall damage	Damaged	
Remarks on wall damage		
Roof damage	Collapse	
Remarks on roof damage		
Overall damage	Collapse	KL-C-001-01.jpg
Damage Keyword		






ภาคผนวก ข





รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข1 รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
0.0	0.0	0	เริ่มต้น	
0.4	5.6	3.3	เริ่มเกิดรอยแตกกว้างในด้าน E	
0.6	8.3	3.9	เกิดรอยแตกกว้างบริเวณมุมฐาน NE, ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 0.1 มม.	



ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียหายรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
0.7	9.7	3.8	เกิดรอยแตกร้าวบริเวณฐานด้าน S	
0.8	11.1	4.4	รอยแตกร้าวด้าน E เริ่มเชื่อมกัน	
0.9	12.5	4.7	เกิดรอยแตกร้าวแนวใหม่ที่ด้าน E	
1.0	13.9	4.8	เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นที่ฐานด้าน N	

ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
1.2	16.7	5.3	ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 0.25 มม. ที่ด้าน E	
1.8	25.0	6.0	รอยแตกกว้างที่ฐานด้าน E เชื่อมต่อกันมากขึ้น	
2.2	30.6	6.3	ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 0.4 มม. ที่ด้าน N และ E	



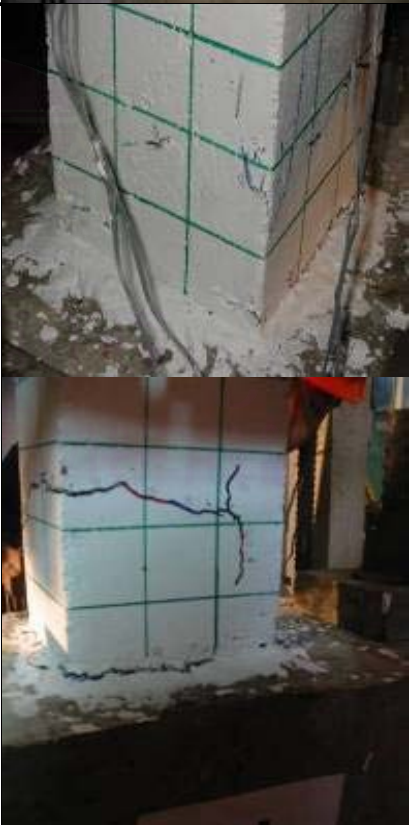
ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียหายรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
2.4	33.4	6.4	รอยแตกร้าวที่ฐานด้าน E ยกขึ้นสูง, ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 0.6 มม.	
2.6	36.1	6.6	รอยแตกร้าวบริเวณฐานด้าน E เชื่อมต่อกัน, ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 0.8 มม.	
2.8	38.9	6.7	รอยที่ฐานเพิ่มมากขึ้น	
3.0	41.7	6.6	รอยแตกร้าวที่ฐานด้าน E ขยายมากขึ้น, ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 1.0 มม, ที่ด้าน E	




ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
3.2	44.5	6.6	<p>เริ่มเห็นจุดหักของการเสียรูปของเสา, ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 1.0 มม. ที่ด้าน E, ซึ่งสามารถใช้เวอร์เนียวัดขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวได้ที่ด้าน E</p>	
3.4	47.3	6.6	<p>ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 1.4 มม. ที่ด้าน E</p>	




ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียหายรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
3.6	50.0	6.3	ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 1.6 มม. ที่ด้าน E	
3.8	52.8	6.2	ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 2.15 มม. ที่ด้าน E, เริ่มเกิดรอยแตกร้าวด้านรับแรงอัด	
4.0	55.6	4.8	เกิดรอยแตกร้าวด้านรับแรงอัดมากขึ้น, ด้าน N รอยแตกร้าวเชื่อมต่อกันเป็นแนวยาว, ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 2.4 มม.	




ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
4.2	58.4	6.0	ด้านรับแรงอัดแตกมากขึ้น โดยแตกแบบครีษ, ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 2.8 มม.	
4.4	61.2	5.6	เกิดรอยแตกตามแนวยาวด้าน N, ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 4.0 มม.	
4.6	63.9	4.8	ด้าน N รอยแตกกว้างยาวขึ้น, ด้านรับแรงอัดรอยแตกกว้างยาวต่อเนื่องทั้งหน้าตัด, ที่ตำแหน่งมุม SE คอนกรีตแตกหลุดออก, ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 3.2 มม.	

ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียหายรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
4.8	66.7	5.1	คอนกรีตด้านรับแรงดึงเริ่มหลุดร่อน, ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 3.5 มม.	
5.0	69.5	4.7	ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 6.2 มม. ที่ด้าน E	
5.2	72.3	4.4	ด้าน W รอยแตกกว้างไม่เพิ่มแต่บวมออก	

ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียหายรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
5.4	75.1	4.3	รอยแตกร้าวด้านรับแรงอัด บวมออกประมาณ 1 ซม., ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 10.6 มม. ที่ด้าน E	
5.6	77.8	4.2	ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 7.7 มม. ที่ด้าน E	
5.6	77.8	4.2	ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 7.0 มม. ที่ด้าน E	


ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

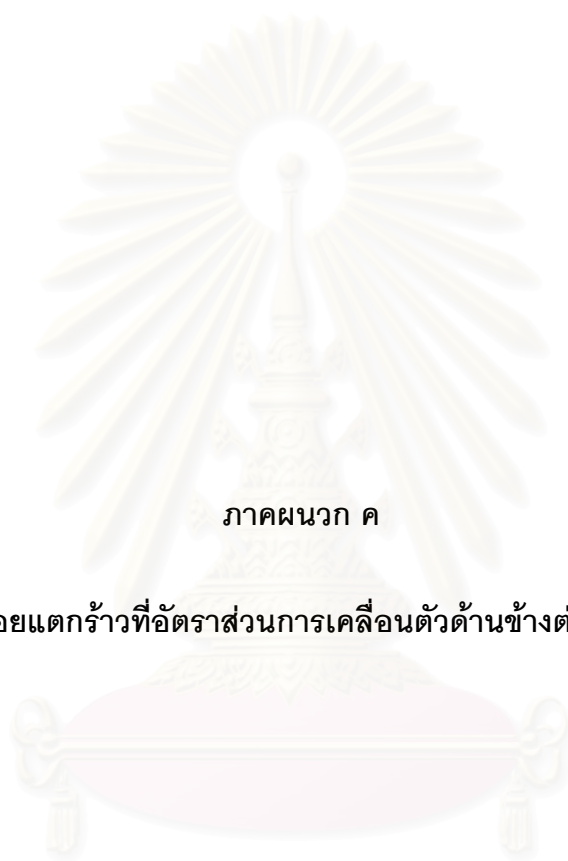
อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียหายรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
6.0	83.4	3.9	รอยแตกร้าวด้านรับแรงอัด บวมออกมากขึ้น, ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 7.1 มม., ที่ด้าน E	
6.2	86.2	3.8	ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 7.5 มม. ที่ด้าน E	
6.4	89.0	3.8	ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าว = 7.85 มม. ที่ด้าน E	

ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
6.6	91.7	3.8	สภาวะสุดท้ายลดแรงกระทำด้านข้าง, ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 8.3 มม. ที่ด้าน E	 
6.6	91.7	3.8		

ตารางที่ ข1 (ต่อ) รูปความเสียหายของเสาและรายละเอียดของการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

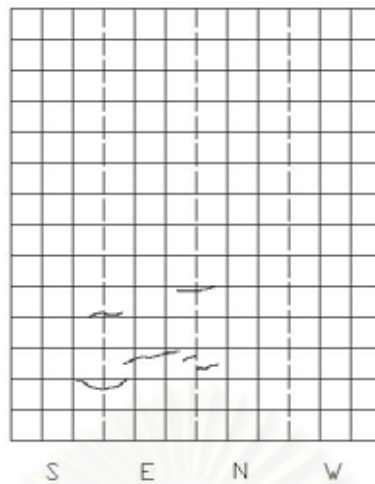
อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (%)	ระยะการเสียรูป (มม.)	แรง (kN)	หมายเหตุ	ภาพถ่าย
สภาวะที่ไม่มีแรงกระทำด้านข้าง		-0.1	สภาวะที่ไม่มีแรงกระทำด้านข้าง, ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้าง = 7.1 มม. ที่ด้าน E	



ภาคผนวก ค

ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างต่างๆ ของเสา

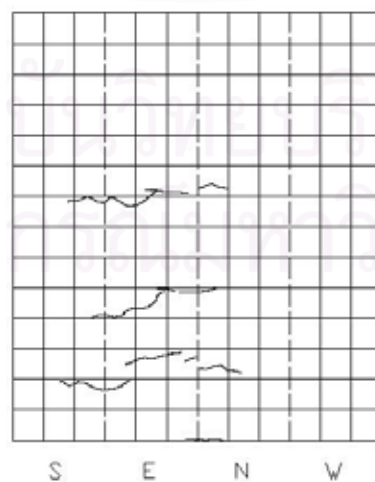
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



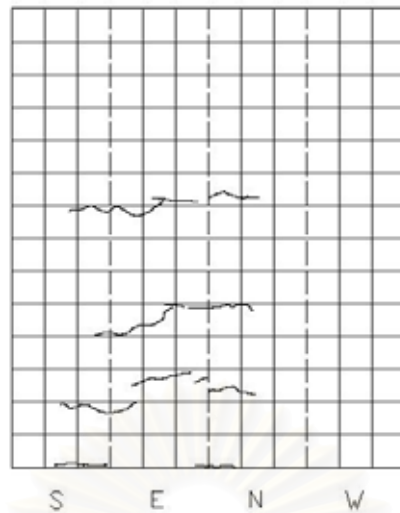
รูปที่ ค1.1 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 0.4%



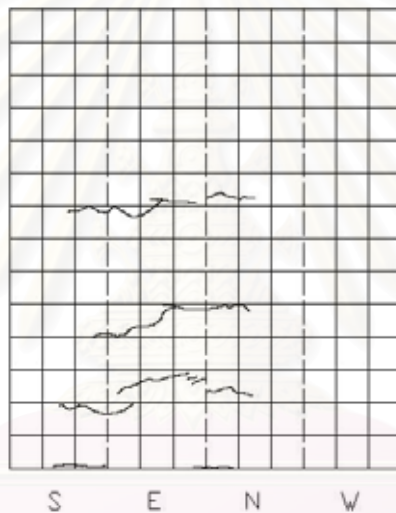
รูปที่ ค1.2 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 0.5%



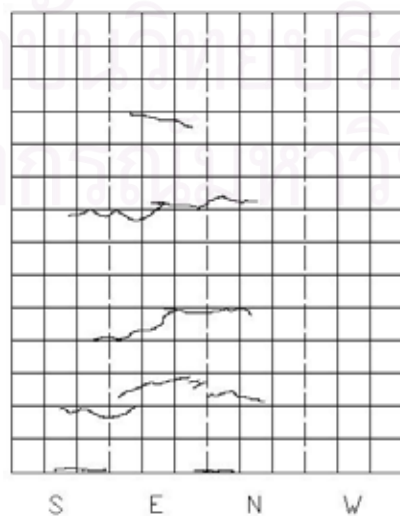
รูปที่ ค1.3 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 0.6%



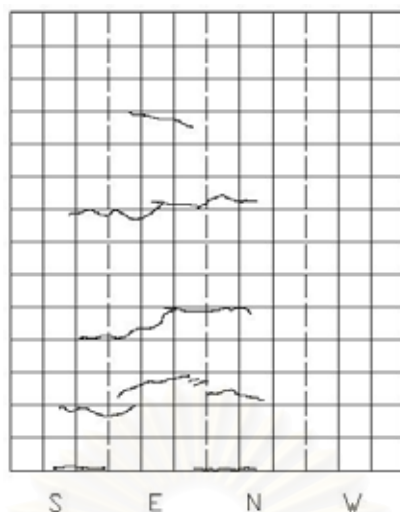
รูปที่ ค1.4 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 0.7%



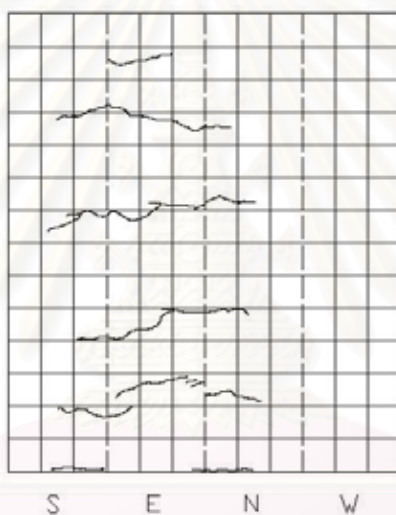
รูปที่ ค1.5 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 0.8%



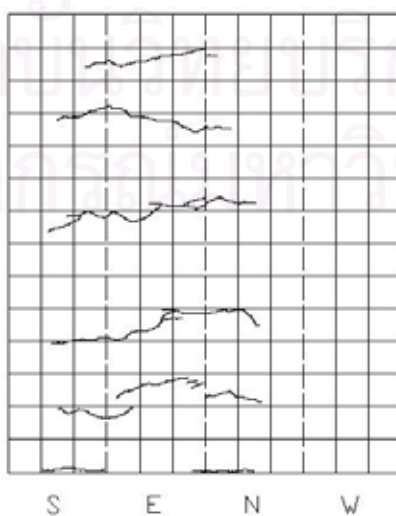
รูปที่ ค1.6 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 0.9%



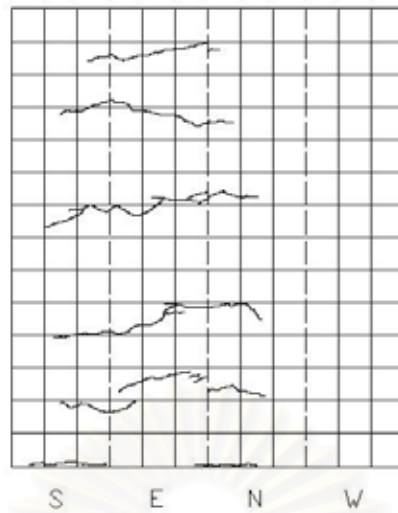
รูปที่ ค1.7 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 1.0%



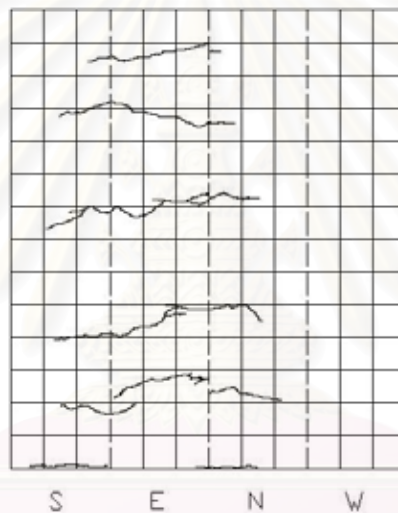
รูปที่ ค1.8 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 1.4%



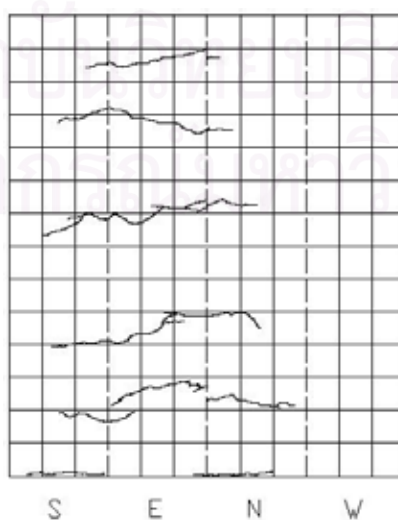
รูปที่ ค1.9 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 1.6%



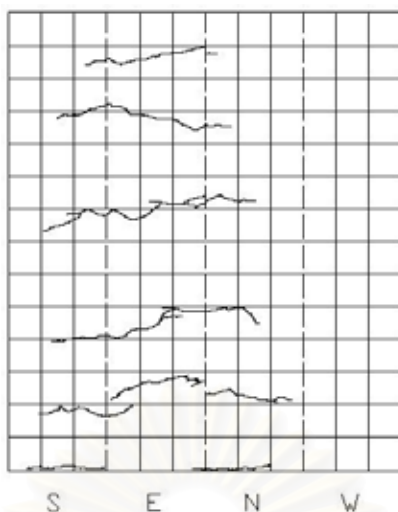
รูปที่ ค1.10 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 1.8%



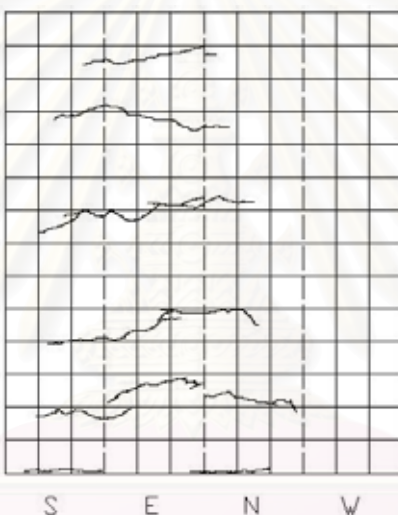
รูปที่ ค1.11 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 2.2%



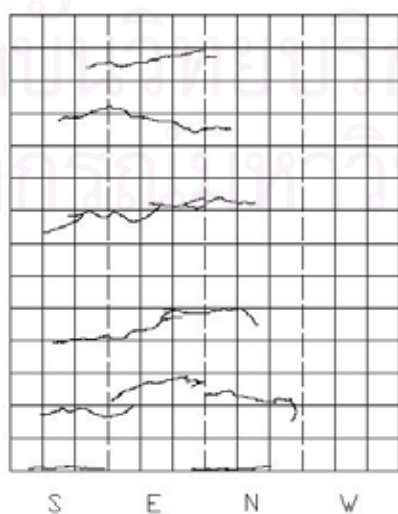
รูปที่ ค1.12 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 2.8%



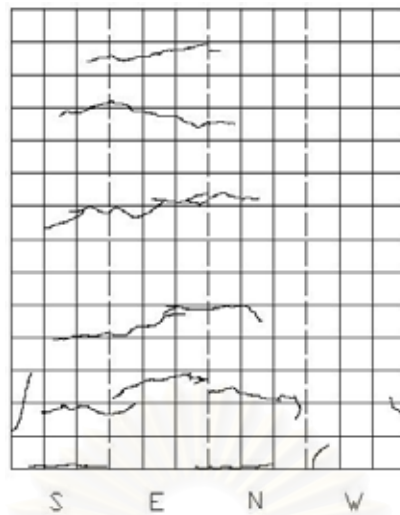
รูปที่ ค1.13 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 3.2%



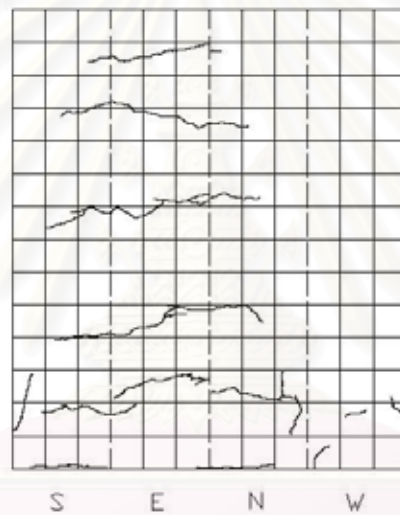
รูปที่ ค1.14 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 3.4%



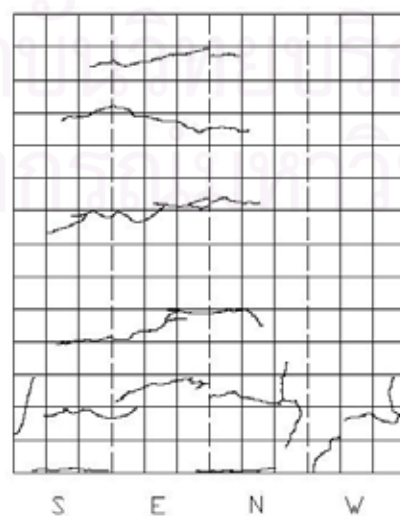
รูปที่ ค1.15 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 3.6%



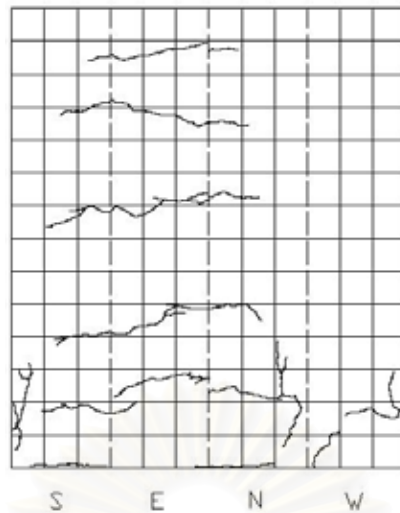
รูปที่ ค1.16 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 3.8%



รูปที่ ค1.17 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 4.0%



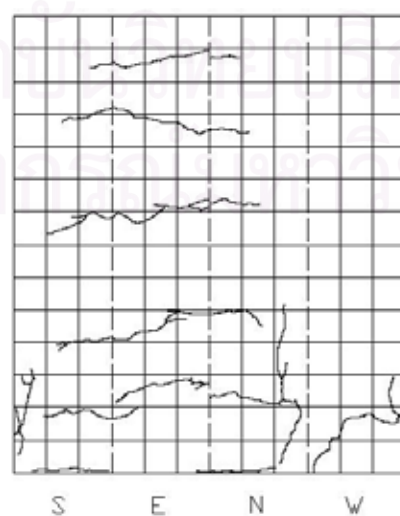
รูปที่ ค1.18 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 4.2%



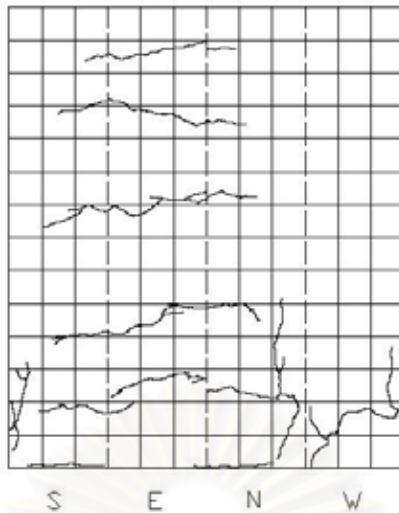
รูปที่ ค1.19 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 4.4%



รูปที่ ค1.20 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 4.6%



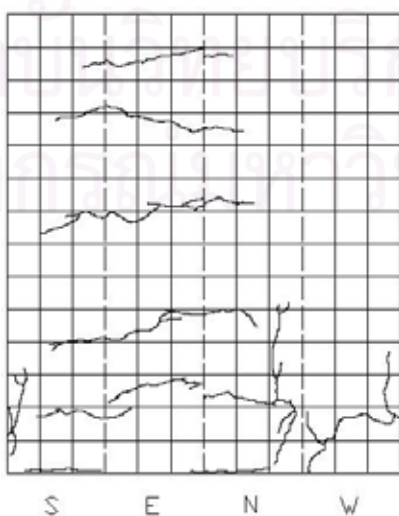
รูปที่ ค1.21 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 4.8%



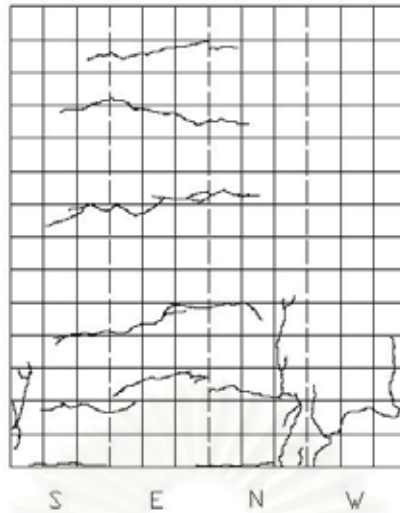
รูปที่ ค1.22 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 5.2%



รูปที่ ค1.23 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 5.4%



รูปที่ ค1.24 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 5.6%

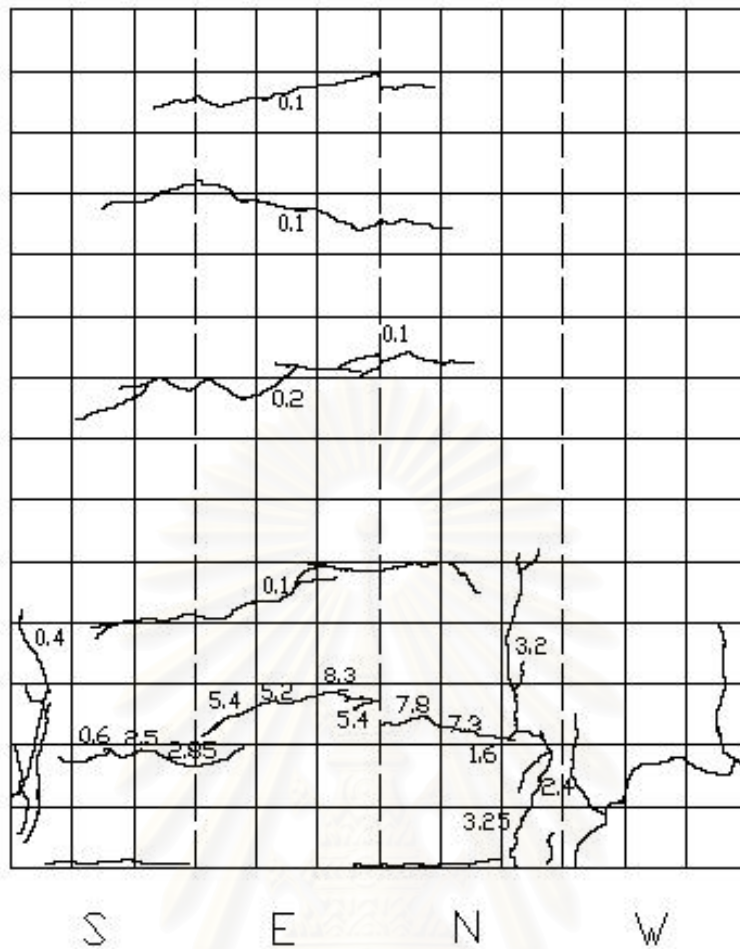


รูปที่ ค1.25 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 6.0%

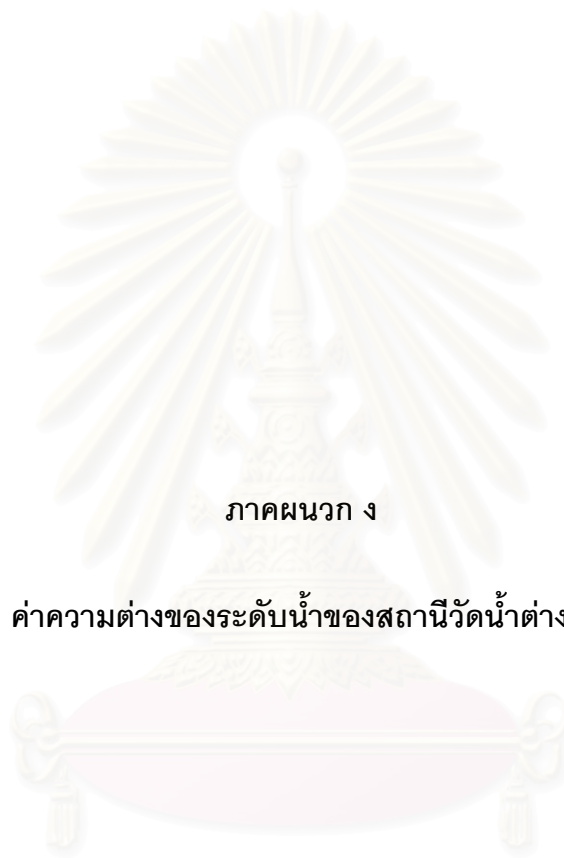


รูปที่ ค1.26 ลักษณะรอยแตกร้าวที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 6.2%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค1.27 ลักษณะรอยแตกราบที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสา 6.6%



ภาคผนวก ง

ค่าความต่างของระดับน้ำของสถานีวัดน้ำต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑1 ค่าความต่างของระดับน้ำของสถานีปากน้ำระนอง จ.ระนอง

พ.ศ. 2520 - 2545 (ค.ศ. 1977 - 2002)

Non-Harmonic tidal Quantities

Lat. $09^{\circ} 57' 03''$ N Long. $98^{\circ} 35' 15''$ E

TIDAL DATA	ค่าเฉลี่ย (เมตร)	
	จากศูนย์บรรทัดน้ำ	จาก M.S.L.
H'est H.W. (November 1978)	4.98	+2.48
M.H.H.W.	3.61	+1.11
M.L.H.W.	3.33	+0.83
M.H.W.S.	3.96	+1.46
M.H.W.	3.49	+0.99
M.H.W.N.	2.96	+0.46
M.T.L.	2.21	-0.29
Loc.M.S.L.	2.22	-0.28
M.L.W.N.	1.44	-1.06
M.L.W.	0.93	-1.57
M.L.W.S.	0.51	-1.99
M.H.L.W.	0.99	-1.51
M.L.L.W.	0.89	-1.61
L'est L.W. (August 1996)	-0.42	-2.92
Mn	2.54	2.54

All the heights are above zero of staff which is 2.50 m. below M.S.L.

ตารางที่ 2 ค่าความต่างของระดับน้ำของสถานีคุระบุรี จ.พังงา

พ.ศ. 2542 - 2545 (ค.ศ. 1999 - 2002)

Non-Harmonic tidal Quantities

Lat. $09^{\circ} 13' 29''$ N Long. $98^{\circ} 22' 36''$ E

TIDAL DATA	ค่าเฉลี่ย (เมตร)	
	จากศูนย์บรรทัดน้ำ	จาก M.S.L.
H'est H.W. (February 2000)	4.69	+2.19
M.H.H.W.	3.43	+0.93
M.L.H.W.	3.18	+0.68
M.H.W.S.	3.80	+1.30
M.H.W.	3.31	+0.81
M.H.W.N.	2.94	+0.44
M.T.L.	2.29	-0.21
Loc.M.S.L.	2.27	-0.23
M.L.W.N.	1.66	-0.84
M.L.W.	1.26	-1.24
M.L.W.S.	0.85	-1.65
M.H.L.W.	1.31	-1.19
M.L.L.W.	1.21	-1.29
L'est L.W. (March 2001)	0.20	-2.30
Mn	2.06	2.06

All the heights are above zero of staff which is 2.50 m. below M.S.L.

ตารางที่ 3 ค่าความต่างของระดับน้ำของสถานีปากน้ำกระบี่ จ.กระบี่

พ.ศ. 2524 - 2545 (ค.ศ. 1981 - 2002)

Non-Harmonic tidal Quantities

Lat. $08^{\circ} 03' 23''$ N Long. $98^{\circ} 55' 21''$ E

TIDAL DATA	ค่าเฉลี่ย (เมตร)	
	จากศูนย์บรรทัดน้ำ	จาก M.S.L.
H'est H.W. (August 1981)	4.75	+2.25
M.H.H.W.	3.52	+1.02
M.L.H.W.	3.23	+0.73
M.H.W.S.	3.79	+1.29
M.H.W.	3.40	+0.90
M.H.W.N.	2.98	+0.48
M.T.L.	2.37	-0.13
Loc.M.S.L.	2.41	-0.09
M.L.W.N.	1.82	-0.68
M.L.W.	1.36	-1.14
M.L.W.S.	0.97	-1.53
M.H.L.W.	1.42	-1.08
M.L.L.W.	1.30	-1.20
L'est L.W. (February 1981)	0.10	-2.40
Mn	2.07	2.07

All the heights are above zero of staff which is 2.50 m. below M.S.L.

ตารางที่ 4 ค่าความต่างของระดับน้ำของสถานีแม่น้ำตรัง จ.ตรัง

พ.ศ. 2511 - 2535 (ค.ศ. 1968 - 1992), 2541 - 2545 (ค.ศ. 1998 - 2002)

Non-Harmonic tidal Quantities

Lat. $07^{\circ} 24' 13''$ N Long. $99^{\circ} 30' 45''$ E

TIDAL DATA	ค่าเฉลี่ย (เมตร)	
	จากศูนย์บรรทัดน้ำ	จาก M.S.L.
H'est H.W. (September 1973)	5.02	+2.52
M.H.H.W.	3.52	+1.02
M.L.H.W.	3.26	+0.76
M.H.W.S.	3.75	+1.25
M.H.W.	3.39	+0.89
M.H.W.N.	2.99	+0.49
M.T.L.	2.36	-0.14
Loc.M.S.L.	2.43	-0.07
M.L.W.N.	1.69	-0.81
M.L.W.	1.33	-1.17
M.L.W.S.	1.04	-1.46
M.H.L.W.	1.40	-1.10
M.L.L.W.	1.28	-1.22
L'est L.W. (February 1978)	0.32	-2.18
Mn	2.05	2.05

All the heights are above zero of staff which is 2.50 m. below M.S.L.

ตารางที่ 5 ค่าความต่างของระดับน้ำของสถานีปากน้ำเจ๊ะบิลัง จ.สตูล

พ.ศ. 2518 - 2532 (ค.ศ. 1975 - 1989)

Non-Harmonic tidal Quantities

Lat. $06^{\circ} 39' 18''$ N Long. $99^{\circ} 58' 54''$ E

TIDAL DATA	ค่าเฉลี่ย (เมตร)	
	จากศูนย์บรรทัดน้ำ	จาก M.S.L.
H'est H.W. (November 1987)	4.91	+2.41
M.H.H.W.	3.67	+1.17
M.L.H.W.	3.40	+0.90
M.H.W.S.	3.89	+1.39
M.H.W.	3.54	+1.04
M.H.W.N.	3.18	+0.68
M.T.L.	2.55	+0.05
Loc.M.S.L.	2.58	+0.08
M.L.W.N.	1.89	-0.61
M.L.W.	1.56	-0.94
M.L.W.S.	1.15	-1.35
M.H.L.W.	1.64	-0.86
M.L.L.W.	1.49	-1.01
L'est L.W. (July 1980)	0.28	-2.22
Mn	1.98	1.98

All the heights are above zero of staff which is 2.50 m. below M.S.L.

ตารางที่ 6 ค่าความต่างของระดับน้ำของสถานีตำมะลัง จ.สตูล

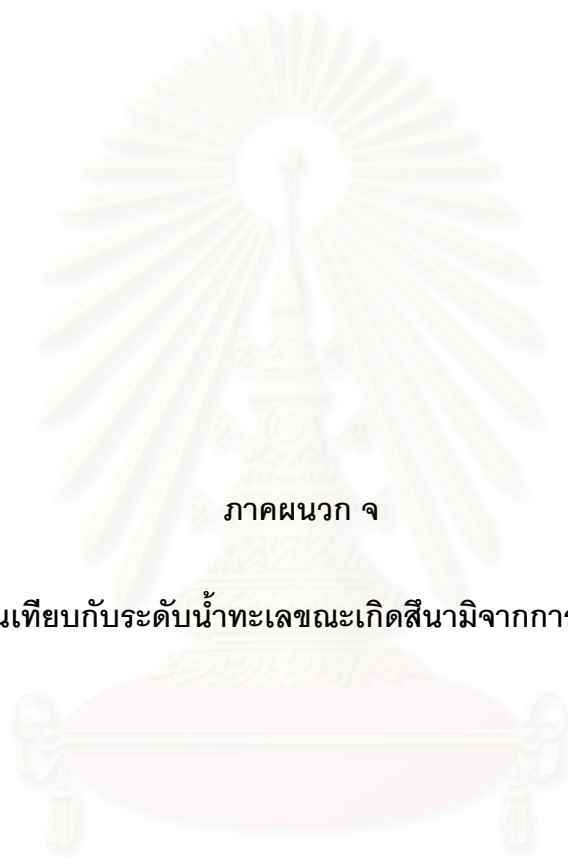
พ.ศ. 2524 - 2545 (ค.ศ. 1981 - 2002)

Non-Harmonic tidal Quantities

Lat. $06^{\circ} 32' 10''$ N Long. $100^{\circ} 04' 34''$ E

TIDAL DATA	ค่าเฉลี่ย (เมตร)	
	จากศูนย์บรรทัดน้ำ	จาก M.S.L.
H'est H.W. (September 1984)	4.60	+2.10
M.H.H.W.	3.45	+0.95
M.L.H.W.	3.17	+0.67
M.H.W.S.	3.73	+1.23
M.H.W.	3.35	+0.85
M.H.W.N.	2.90	+0.40
M.T.L.	2.38	-0.12
Loc.M.S.L.	2.38	-0.12
M.L.W.N.	1.89	-0.61
M.L.W.	1.44	-1.06
M.L.W.S.	1.03	-1.47
M.H.L.W.	1.53	-0.97
M.L.L.W.	1.35	-1.15
L'est L.W. (March 1981)	0.26	-2.24
Mn	1.87	1.87

All the heights are above zero of staff which is 2.50 m. below M.S.L.



ภาคผนวก จ

ค่าความสูงคลื่นเทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิจากการสำรวจโดย DPRJ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑1 ค่าความสูงคลื่นที่เทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิจากการสำรวจโดย DPRI

สถานที่	รายละเอียด	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูงคลื่น (m)
Ban Bang Phng	Water Mark of a tree	8.812467	98.266050	13.085
Khao Lak	sea, Trace on reef(house)	8.742300	98.255067	6.46
Khao Lak		8.742300	98.255067	6.06
Khao Lak		8.742300	98.255067	6.11
Laem Pakarang	marks on trees	8.736361	98.222417	9.3
Khao Lak	mes.point, ground height=3.88m, Load	8.734367	98.225317	4.48
Khao Lak	mes.point, Trace on wall(house)	8.729133	98.225767	6.3
Khao Lak	mes.point	8.729133	98.225767	8.86
Khao Lak	Trace on wall(2F)	8.725600	98.232317	6.24
Ban Niang Beach	marks on hotel (2nd floor)	8.700333	98.239722	6.2
Ban Niang Beach	broken roof	8.700333	98.239722	7.9
Khao Lak	mes.point, Trace on reef(house)	8.682933	98.244333	8.27
Khao Lak	Trace on building	8.682933	98.244333	8.3
Khao Lak	Trace on tree	8.682933	98.244333	7.99
Khao Lak	Trace on reef(house)	8.682933	98.244333	8.59
Khao Lak		8.682933	98.244333	10.62
Khao Lak		8.682933	98.244333	8.5
Khao Lak		8.682933	98.244333	8.17
Ban Niang Beach	mark on tree	8.674528	98.242139	9.5
Ban Niang Beach	mark on house (2nd floor)	8.671417	98.242917	7.6
Khao Lak	mes.point, Trace on building	8.660833	98.249617	9.71
Khao Lak		8.660833	98.249617	7.38

ตารางที่ ๑1 (ต่อ) ค่าความสูงคลื่นเทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิจากการสำรวจโดย DPRI

สถานที่	รายละเอียด	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูงคลื่น (m)
Khao Lak	mes.point, Trace on tree	8.661133	98.249400	9.35
Khao Lak	mes.point, Top of runup	8.640333	98.252933	9.46
Khao Lak	mes.point, Trace on reef	8.640167	98.250433	9.91
Khao Lak	mes.point, Trace on Building	8.640167	98.250433	9.56
Khao Lak	mes.point	8.640167	98.251683	8.35
Khao Lak	mes.point	8.637383	98.250767	8.71
Khao Lak	sea	8.637333	98.250750	8.67
Khao Lak	height of the washed roof tiles	8.637083	98.250767	8.8
Khao Lak	edge of the eaves of damaged Cottage	8.636933	98.252500	9.6
Khao Lak	Trace on wall, ground height=4.15m	8.635533	98.248783	8.76
Khao Lak		8.635533	98.248783	9.34
Khao Lak	Trace on wall	8.635533	98.248783	9.5
Khao Lak	mes.point	8.635267	98.250333	9.45
Khao Lak		8.635267	98.250333	9.28
Kamala Beach	water mark on wall inside a house ~50m from beach	7.949694	98.279889	5.4
Kamala Beach	sea, Trace on wall, ground height=2.88m, load	7.947217	98.282683	4.85
Kamala Beach	trace point, Trace on wall	7.946517	98.281983	5.29
Kamala Beach	ground surface come down toward rever	7.946517	98.281983	4.47
Patong Beach	Trace on wall, ground height=3.23m, load	7.903767	98.300550	4.9
Patong Beach		7.903767	98.300550	4.79
Patong Beach	Trace on wall	7.893867	98.298700	5.48

ตารางที่ ๑1 (ต่อ) ค่าความสูงคลื่นเทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิจากการสำรวจโดย DPRJ

สถานที่	รายละเอียด	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูงคลื่น (m)
Patong Beach		7.892200	98.297983	5.02
Patong Beach	sea	7.887417	98.295717	4.88
Patong Beach		7.887417	98.295717	5.44
Patong Beach		7.887417	98.295717	5.33
Patong Beach	trace point	7.887417	98.295717	5.28
Patong Beach	sea, Trace on wall	7.883817	98.292033	5.09
Leam Him		7.943200	98.401250	0.72
Ban Pak Chok	Water Mark, a little temple	9.159767	98.270967	6.632
Ban Thung Dap	Water Mark, a broken twig	9.028367	98.257067	19.572
Ban Nok Na	Water Mark, a broken twig	8.999017	98.256517	12.61
Ban Ma Kap	Water Mark, broken roof	8.922750	98.258150	6.0345
Ban Pak Ko	Water Mark, broken windows at temple	8.882417	98.270100	6.391
Ko Koh Kao port	Water Mark, hearing, the edge of roof	8.871917	98.275283	3.72
Ban Nam Kem	water mark on house	8.864306	98.274306	6.4
Ban Nam Kim	Water Mark, white house	8.859833	98.275017	4.08
Ban Nam Kim	Water Mark on the wall of house, which stands in the direction of the ocean from the above house	8.858833	98.272333	6.379
Ban Nam Kim	Water Mark, a broken twig, 19.363m between tree and measuring machine (horizontal)	8.857217	98.268167	15.77
Ban Nam Kim	Water Mark on the wall of house	8.852650	98.272450	5.779

ตารางที่ ๑1 (ต่อ) ค่าความสูงคลื่นเทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิจากการสำรวจโดย DPRI

สถานที่	รายละเอียด	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูงคลื่น (m)
Ban Kao Lak	broken roof of cottage	8.611133	98.238444	7.8
Tap Lam Navy Base	water mark and eyewitness	8.570028	98.224056	3.8
Khao Lak	Trace on house	8.197367	98.299800	3.11
Khao Lak	Trace on tree	8.184067	98.291550	4.83
Khao Lak	Trace on wall	8.184067	98.291550	3.32
Nai Yang Beach	Trace on wall	8.086783	98.300417	4.05
Nai Yang Beach	Trace on wall	8.086783	98.300417	4.07
Bang Thao beach	trace on tree,height of sand beach is 4m	8.001950	98.296033	3.41
Bang Thao beach	Trace on tree	8.001950	98.296033	4.04
Bang Thao beach	Trace on toilet	8.001950	98.296033	3.76
Bang Thao beach	wetness	8.001950	98.296033	4.41
Bang Thao beach	Trace on box	8.001950	98.296033	3.95
Karon Beach (Central part)	entrance of hotel, 2nd wave	7.841833	98.297233	4.49
Karon Beach (South part)	debris of back shed, transfared by tsunami	7.829317	98.297967	4.04
Kata Noi Beach	Broken window frame of Shop	7.802533	98.302533	3.88
Rawai Beach		7.772150	98.328017	2.43
Ban Thale Nok	Water Mark at the roof	9.459817	98.437267	6.77
Ban Thale Nok	The other water mark (inside)	9.459817	98.437267	6.206
Hat Praphat	Water Mark at the lowest roof	9.376183	98.400683	4.974
Ban Ao Khoei	Water Mark under the roof	9.299250	98.383667	9.213
Ban Ko Dam	Hearing	9.277267	98.385783	1.136

ตารางที่ ๑1 (ต่อ) ค่าความสูงคลื่นเทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิจากการสำรวจโดย DPRI

สถานที่	รายละเอียด	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูงคลื่น (m)
Ko Yao, fishing village	Hearing	9.222067	98.374933	0.982
Ban Ao Luk Tum	runup height	9.202817	98.272217	8.617
Ban Tam Nang	Hearing, the difference of the heights between tsunami and normal full tide	8.992917	98.411967	0.7
Thai Muang, Natural Conservation Park	Water Mark of a wood	8.484417	98.227517	5.19
Thai Muang, visitor center	Water Mark in a shed	8.435833	98.238383	6.25
Thai Muang	Water Mark in a shop	8.398550	98.265283	6.07
Ban Thung Wa	Water Mark of a tree	8.377717	98.255250	6.78
Nai Rai	Water Mark on a tank	8.309750	98.273250	5.29
Khao Lak	Trace on wall	8.304183	98.274650	4.28
Rai Dan	Water Mark of a tree	8.296950	98.271683	6.77
Ban Na Tai	lower: debris on tree, upper: broken branch	8.292611	98.273083	5.1
Ban na Tai	runup height	8.274033	98.277767	4.801
Khao Lak	Trace on tree	8.271633	98.279883	4.05
Khao Lak	Trace on tree	8.271633	98.279883	4.3
Bang Rong Pier	pire of broken boat dock	8.047483	98.418733	1.47
Bang Rong Pier	height on floor of broken stilt house	8.047483	98.418733	1.29
Sire village (Siray Is.)	Inundatied at breast(+1.3m),hearing	7.872867	98.425050	2.67

ตารางที่ ๑1 (ต่อ) ค่าความสูงคลื่นเทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิจากการสำรวจโดย DPRI

สถานที่	รายละเอียด	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูงคลื่น (m)
Makham Bay (North, Pier)	1st step at Ticket Center	7.870233	98.417283	1.39
Moodong Canal (Chalong Bay)	end of load after pass through Phuket Zoo, boat dock was washed out, died grass level	7.841783	98.375217	3.15
Phalai village (Chalong Bay)	died grass height +2.00m	7.838800	98.372517	2.75
Ta pou Noi	Water Mark on a tree	7.833867	98.422367	2.53
Ta pou Noi	Distance between the sea level and floor	7.833817	98.421233	1.7
Chalong	Water Mark on a wall	7.821033	98.344700	3.9
Chalong Bay Pier	height of inundated pier	7.818833	98.402800	3.62
Frendship Beach Hotel (Rawai Rest Area)	Floor face of Restaurant in the open air	7.796250	98.339650	2.35
Phi Phi Don (South coast)	2nd floor of hotel	7.748300	98.772050	4.58
Phi Phi Don (North coast)	Trace on wall of house	7.738900	98.777017	5.84
Ban Pak Nam fishing port	At the fishing port of Ban Pak Nam	9.946067	98.597950	1.66
Ka Yu Harbor (Ban La ong)	Hearing from the inhabitants	9.781267	98.553750	1.979
Had Sai Dam (Ban La Ong)	Water Mark on a tree	9.744383	98.552283	3.727
Ban Chang Hak	Hearing from the inhabitants	9.668550	98.558567	1.06

ตารางที่ ๑1 (ต่อ) ค่าความสูงคลื่นเทียบกับระดับน้ำทะเลขณะเกิดสึนามิจากการสำรวจโดย DPRI

สถานที่	รายละเอียด	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูงคลื่น (m)
Ramson	Water Mark at wall in the office of national park (inside). The time at tsunami arriving is 11:10	9.602167	98.470283	4.8
Ramson	Water Mark at roof on the house (outside).	9.602167	98.470283	4.91
Ramson	Difference of the water mark between inside and outside.	9.602167	98.468783	1.075

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปิยะวัชร ฝอยทอง เกิดวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดยโสธร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย