

โอกาสเกิดทรายเหลวเนื่องจากแผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY DUE TO EARTHQUAKE IN NORTHERN PARTS OF
THAILAND

Mr. Weeradetch Tanapalungkorn



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โอกาสเกิดทรายเหลวเนื่องจากแผ่นดินไหวในพื้นที่
ภาคเหนือของประเทศไทย

โดย

นายวีระเดช ธนพลังกร

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏ์ชน)

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

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จีรวัดร์ บุญญะฐิติ)

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

วีรเดช ธนพลังกร : โอกาสเกิดทรายเป็นผลเนื่องจากแผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย (LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY DUE TO EARTHQUAKE IN NORTHERN PARTS OF THAILAND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 73 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา และวิเคราะห์โอกาสการเกิดทรายเป็นผลเนื่องจากแผ่นดินไหวในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยในปีพ.ศ. 2554 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาดกลางในประเทศไทย ค่าความเร่งของพื้นดินสูงสุดของแผ่นดินไหวครั้งนั้น ถูกวัดได้ที่อำเภอแม่สายประมาณ 0.2g นอกจากนี้การเกิดแผ่นดินไหวพบว่าทำให้เกิดลิกวิแพคชั่นขึ้นเป็นบริเวณกว้าง นี่เป็นครั้งแรกที่เกิดลิกวิแพคชั่นถูกพบในประเทศไทย เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เกิดแผ่นดินไหวที่มีขนาด 6.3 ขึ้นในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ลิกวิแพคชั่นได้ตรวจพบขึ้นอีกครั้งเป็นวงกว้างในจังหวัดเชียงราย ตามหลักฐานทางกายภาพของทั้งสองเหตุการณ์ อาจกล่าวได้ว่าภาคเหนือของประเทศไทยจะมีความไวต่อความเสี่ยงจากลิกวิแพคชั่น ในการศึกษาครั้งนี้ คลื่นแผ่นดินไหวผิวดินที่ตรวจวัดได้ในประเทศไทยเมื่อปีพ.ศ. 2554 จะถูกนำมาแปลงเป็นคลื่นในชั้นดินแข็งและใช้วิเคราะห์ลิกวิแพคชั่นที่อาจจะเกิดขึ้นในพื้นที่ภาคเหนือ โดยใช้การวิเคราะห์ความเค้นประสิทธิผลด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์ คุณสมบัติของดินในพื้นที่ ตัวอย่างเช่น ข้อมูลเจาะสำรวจดิน และค่าความเร็วคลื่นเฉือน ได้ถูกรวบรวม และใช้ในการวิเคราะห์ เป็นที่คาดว่าผลของการวิเคราะห์จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการสร้างมาตรการตอบโต้ที่เหมาะสมเพื่อลดอันตรายจากลิกวิแพคชั่นในภาคเหนือของประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5670387321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: LIQUEFACTION

WEERADETCHE TANAPALUNGKORN: LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY DUE TO EARTHQUAKE IN NORTHERN PARTS OF THAILAND. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUPOT TEACHAVORASINSKUN, D.Eng., 73 pp.

The purpose of this study is to analyse liquefaction susceptibility due to earthquake in northern parts of Thailand. In 2011, there was an medium earthquake in Myanmar. The maximum ground acceleration of that event measured at Mae Sai was about 0.2g. Furthermore, the earthquake was found to induce liquefaction over a wide area. This was the first time that liquefaction being found in Thailand. On May 5, 2014, earthquakes with magnitude 6.3 hit Mae Lao, Chiang-Rai. Liquefaction was again observed for a wide area in Chiang Rai. Based on these two physical evidences, it can be said that the northern part of Thailand is somewhat susceptible to liquefaction risks. In the present study, the ground surface motion in Thailand that measured in 2011 was converted to motion at stiff soil layer and analyse liquefaction potential of the northern area using the effective stress finite element analysis. Actual soil properties; i.e. boring log and shear wave velocity, were collected and used in the analysis. It is expected that the analytical results can provide and use as a guideline to establish the proper counter-measures to mitigate the liquefaction hazards in the northern part of Thailand.

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้
รวมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอกราบ
ขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏ์ชน, ศาสตราจารย์ ดร. สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง,
รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิรวัตถ์ บุญญะฐิติ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ คณะกรรมการ
ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยแนะนำ ตรวจสอบ แก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์
ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งต่อ รุ่นพี่ เพื่อนๆ และรุ่นน้องที่คอยให้ความช่วยเหลือ
ในการทำ การ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจและสนับสนุน
การทำงานเป็นอย่างดี ตลอดจนครูบาอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอน อบรม และให้ความรู้ใน
สาขาวิชาต่างๆ พระคุณของท่านเหล่านี้ ผู้เขียนจะระลึกถึงจนกว่าชีวิตจะหาไม่

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ธรรมชาติของการเกิดแผ่นดินไหว.....	5
2.2 ศัพท์เกี่ยวกับแผ่นดินไหว.....	5
2.3 คลื่นแผ่นดินไหว.....	6
2.3.1 คลื่นในตัวกลาง.....	6
2.3.2 คลื่นผิวพื้น.....	7
2.4 ขนาดความรุนแรง.....	8
2.5 ขนาดของแผ่นดินไหว.....	9
2.5.1 Local Magnitude Scale (M_L).....	9
2.5.2 Body-Wave Magnitude Scale (M_B).....	9

2.5.3 Surface Magnitude Scale (M_S)	10
2.5.4 Moment magnitude Scale (M_W)	10
2.6 ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน	10
2.7 เครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหว	11
2.8 ระยะเวลาของการเกิดแผ่นดินไหว	12
2.9 การวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวด้วย Shake91_Input	12
2.10 ความเร็วคลื่นเฉือน และ โมดูลัสของแรงเฉือน	13
2.11 ลิกควีแฟคชั่น	14
2.12 สาเหตุของการเกิดลิกควีแฟคชั่น	16
2.13 กลไกการวิบัติของลาดดิน	19
2.13.1 การแผ่อกทางด้านข้าง (Lateral Spreads)	19
2.13.2 การวิบัติแบบไหล (Flow Failures).....	20
2.14 กลไกการวิบัติของดินในแนวราบ.....	21
2.14.1 ทRAYเดือด (Sand Boils).....	21
2.14.2 การกวัดแกว่งของแผ่นดิน (Ground Oscillation).....	22
2.14.3 การสูญเสียกำลังแบกทาน (Loss of Bearing Strength).....	23
2.14.4 การทรุดตัว และการยุบตัว (Subsidence and Settlement).....	25
2.15 การวิเคราะห์โอกาสเกิดลิกควีแฟคชั่น	25
2.15.1 ด้วยวิธีวัฏจักรความเค้น.....	25
2.15.2 ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ FLIP	28
2.16 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว	31

3.2 ข้อมูลแผ่นดินไหว	34
3.3 ข้อมูลสภาพชั้นดิน	38
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	44
4.1 อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล.....	44
4.2 การประเมินโอกาสเกิดลิกวิแฟคชั่น	46
4.3 พื้นที่ที่เกิดลิกวิแฟคชั่น	54
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1 สรุป และอภิปรายผลการวิจัย.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง	62
ภาคผนวก.....	66
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	73

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	อันดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตราเมอร์คัลลี (บุรินทร์ เวชบรรเทิง).....	8
ตารางที่ 2.2	การคำนวณขนาดแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ.....	10
ตารางที่ 2.3	โมเดลพารามิเจอร์ของโปรแกรม FLIP (Morita, lai และคณะ, 1997).....	29
ตารางที่ 3.1	ค่าขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดโดยการประมาณอิงจากตามพื้นที่ A-K (Nuttalaya, Sodsri และคณะ, 1985) และปรับปรุงโดย (Warnitchai และ Lisantono, 1996).....	32
ตารางที่ 3.2	ค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด โดยการประมาณอิงจากตามพื้นที่ 0-4 (Warnitchai และ Lisantono, 1996).....	33
ตารางที่ 3.3	รายชื่อสถานีตรวจวัดที่นำมาวิเคราะห์.....	36
ตารางที่ 3.4	รายชื่อตำแหน่งหลุมเจาะที่นำมาวิเคราะห์.....	39
ตารางที่ 4.1	ค่าอัตราส่วนแรงดันน้ำที่มากที่สุด ที่ความเร่งพื้นผิวสูงสุดต่างๆกัน.....	44
ตารางที่ 4.2	ตารางสรุปข้อมูลการคำนวณการเกิดลิควิแฟคชั่นเมื่อ PGA = 0.1g.....	49
ตารางที่ 4.3	ตารางสรุปข้อมูลการคำนวณการเกิดลิควิแฟคชั่นเมื่อ PGA = 0.2g.....	50
ตารางที่ 4.4	ตารางสรุปข้อมูลการคำนวณการเกิดลิควิแฟคชั่นเมื่อ PGA = 0.3g.....	52
ตารางที่ 4.5	ตารางแสดงรายละเอียดของข้อมูลที่เกิดลิควิแฟคชั่นแบบบางส่วน.....	54
ตารางที่ 4.6	ตารางแสดงค่าของ SPT และความลึกของชั้นทรายของข้อมูลที่เกิดลิควิแฟคชั่นแบบบางส่วน.....	54

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 USGS ShakeMap (U.S. Geological Survey, 2557).....	1
รูปที่ 1.2 การเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลวที่อำเภอแม่สาย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2557)	2
รูปที่ 2.1 ศูนย์กลางแผ่นดินไหวผิวพื้น และศูนย์กลางแผ่นดินไหวแท้จริง.....	6
รูปที่ 2.2 ลักษณะของคลื่นในตัวกลาง: (a) P-wave; (b) S-wave (Kramer, 1996).....	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะของคลื่นผิวพื้น: (a) R-wave; (b) L-wave (Kramer, 1996).....	7
รูปที่ 2.4 ลักษณะการสั่นไหวโดยทั่วไป (Lindeburg, 1998)	12
รูปที่ 2.5 โปรแกรม Shake91_input	13
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และ N ของดินทรายบริเวณภาคเหนือ (จิตติ ปาลศรี และ อาณัติ เรืองรัมย์, 2552)	14
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อจำกัดระยะทางจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวบนผิวพื้นของสถานที่ที่พบการเกิดทรายเหลว และขนาดของแผ่นดินไหวระดับตื้นตามมาตราโมเมนต์ (Ambraseys, 1988).....	15
รูปที่ 2.8 วัฏจักรความเค้นเฉือนในองค์ประกอบของดิน ระหว่างพื้นดินสั่นสะเทือน (a) เงื่อนไขของไหลในอุดมคติ; (b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนพิจารณาจากการวิเคราะห์การตอบสนอง (พิชัย ภัทรรัตนกุล, 2546).....	17
รูปที่ 2.9 การแผ่อกทางด้านข้างอยู่ติดกับแม่น้ำ (a) ก่อนเกิดแผ่นดินไหว; (b) หลังเกิดแผ่นดินไหว (Youd, 1984).....	19
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการวิบัติแบบไหลที่เกิดจากลิกวีแฟกชัน และการสูญเสียกำลังของดินที่วางบนลาดชัน (พิชัย ภัทรรัตนกุล, 2546)	20
รูปที่ 2.11 การก่อดำของน้ำในระหว่างชั้นในการทดสอบโต๊ะสั่นสะเทือน (Liu และ Qiao, 1984) ...	22
รูปที่ 2.12 การกวัดแกว่งของแผ่นพื้น: (a) ก่อนเกิดแผ่นดินไหว; (b) หลังเกิดแผ่นดินไหว (Youd, 1984).....	23

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของโครงสร้างที่เอียงเนื่องจากการเสถียรกำลังแบกทาน ลิกวีแพคชั่นทำให้ดินอ่อนแอ ลดความสามารถในการรองรับของฐานรากที่รองรับโครงสร้างที่มีน้ำหนักมากทำให้จมและเอียง (Youd, 1984) 24

รูปที่ 2.14 การพลิกคว่ำของอาคารที่พักอาศัย, นิงาตะ (1964) (พิชัย ภัทรรัตนกุล, 2546)..... 24

รูปที่ 2.15 กราฟใช้สำหรับหาค่า CRR สำหรับแผ่นดินไหวขนาด $M = 7.5$ (Seed, Tokimatsu และคณะ, 1985) 27

รูปที่ 2.16 ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของความเค้นที่กระทำโดยรอบ (Seed และHarder, 1990)..... 28

รูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยและบริเวณข้างเคียง (Nuttalaya, Sodsri และคณะ, 1985)..... 31

รูปที่ 3.2 แผนที่แสดงเส้นระดับค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด โดยคิดจากโอกาส 10% ในรอบ 50 ปี (Warnitchai และLisantonno, 1996)..... 33

รูปที่ 3.3 ภาคเหนือของประเทศไทย 34

รูปที่ 3.4 ตำแหน่งสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว (สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557)..... 35

รูปที่ 3.5 ตำแหน่งสถานีตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดิน (สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557)..... 35

รูปที่ 3.6 กราฟที่ได้จากการตรวจวัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก จังหวัดเชียงราย 37

รูปที่ 3.7 กราฟที่ได้จากการตรวจวัดในแนวเหนือ-ใต้ จังหวัดเชียงราย..... 37

รูปที่ 3.8 กราฟที่ได้จากการตรวจวัดในแนวตั้ง จังหวัดเชียงราย 38

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างข้อมูลหลุมเจาะ (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2557)..... 39

รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของข้อมูลหลุมเจาะที่ใช้ในการวิเคราะห์ 41

รูปที่ 3.11 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล 43

รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ของวัฏจักรความเค้น CSR ที่เกิดลิกวีแพคชั่น และค่าการตอกเข็มมาตรฐาน SPT สำหรับแผ่นดินไหวขนาด $M_w = 7.5$ (Seed, Tokimatsu และคณะ, 1985, Youd และIdriss, 1997) 47

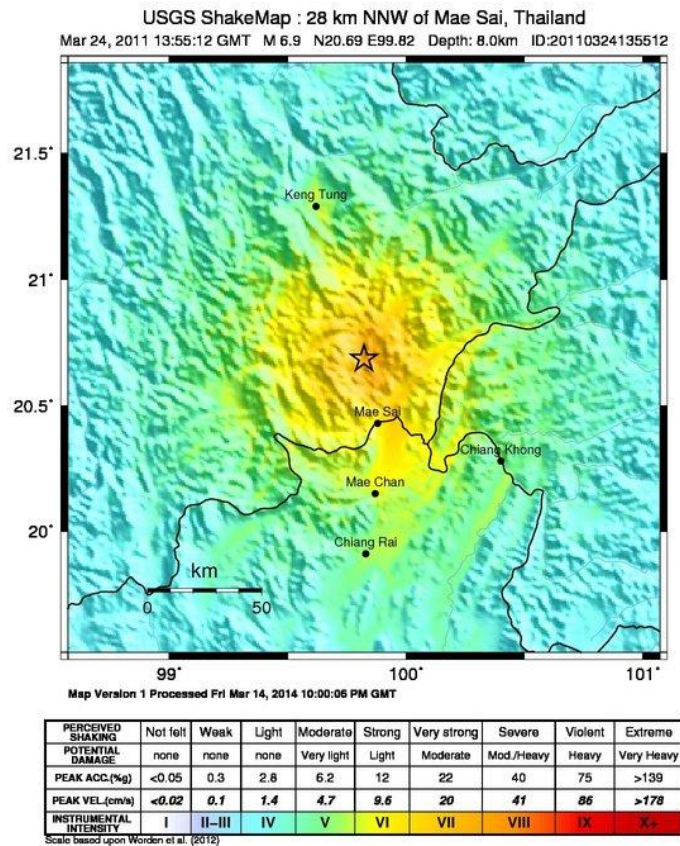
รูปที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.5 47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยปรกติแล้วภาคเหนือของประเทศไทย มีแผ่นดินไหวอยู่บ่อยครั้ง ทั้งจากการขยับตัวของรอยเลื่อนในประเทศ และคลื่นแผ่นดินไหวจากประเทศใกล้เคียง จากข้อมูลในอดีต คลื่นแผ่นดินไหวในภาคเหนือของประเทศไทยจะมีขนาดคลื่นที่ไม่แรงมากนัก และจุดกำเนิดจะอยู่ห่างออกไปในประเทศเพื่อนบ้าน แต่ในวันที่ 24 มีนาคม 2554 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.8 ตามมาตราริกเตอร์ ในประเทศพม่า ซึ่งมีจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว อยู่ทางทิศเหนือ ห่างจากชายแดนอำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ประมาณ 28 กิโลเมตร คลื่นแผ่นดินไหวถูกตรวจวัดความเร็วพื้นดินสูงสุด (Peak ground acceleration) ได้ที่สถานีตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดิน ที่ว่าการอำเภอแม่สาย จ.เชียงราย ตรวจวัดได้ 20.6 %g และสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวอ่างเก็บน้ำห้วยซ่าง จ.เชียงราย ตรวจวัดได้ 9.8 %g ซึ่งมีความรุนแรงระดับ VI-VII ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 USGS ShakeMap (U.S. Geological Survey, 2557)

จากแผ่นดินไหวในครั้งนั้น ทำให้มีการตรวจพบการเกิดลิกวิแฟคชั่น (Liquefaction) ที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ในหลายพื้นที่ ซึ่งนับเป็นครั้งแรกที่มีการตรวจพบในประเทศไทยดังรูปที่ 1.2 ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลวจะเกิดขึ้นได้ง่ายในบริเวณที่มีชั้นทรายหลวม และอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยลักษณะชั้นดินจากผลการเจาะสำรวจดินในภาคเหนือจะประกอบไปด้วย ชั้นทรายหลวมถึงแน่นปานกลาง ในหลายพื้นที่ ทำให้มีโอกาสที่คลื่นแผ่นดินไหวจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ และในวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 ได้เกิดแผ่นดินไหวขึ้นในอำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงรายขนาด 6.3 ทำให้มีการพบการเกิดสภาวะลิกวิแฟคชั่นจำนวนมากในพื้นที่จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 1.2 การเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลวที่อำเภอแม่สาย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก, 2557)

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์โอกาสการเกิดปรากฏการณ์ทรายเหลวจาก อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล โดยใช้ข้อมูลดินจากหลุมเจาะในบริเวณภาคเหนือ และข้อมูลความแรงของพื้นดินจากสถานีตรวจวัดต่างๆ ในภาคเหนือ ด้วยโปรแกรม Finite element analysis of liquefaction program (FLIP) เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับงานวิศวกรรม ในการออกแบบสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ให้มีความมั่นคง และแข็งแรงในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดลิกวิแฟคชั่น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 วิเคราะห์ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล จากข้อมูลดินหลุมเจาะ และข้อมูลความเร่งของพื้นดิน จากสถานีตรวจวัด ด้วยโปรแกรม Finite element analysis of liquefaction program

1.2.2 ประเมินโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ทรายเป็นผล ในแต่ละข้อมูลหลุมเจาะ จากการขยายค่าความเร่งของพื้นดินจากแรงแผ่นดินไหว

1.2.3 หาพื้นที่ที่เกิดปรากฏการณ์ทรายเป็นผล จากค่าความเร่งของพื้นดินจากแรงแผ่นดินไหว และพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดปรากฏการณ์ทรายเป็นผล จากค่าความเร่งของพื้นดินจากแรงแผ่นดินไหว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวจาก สถานีตรวจวัดต่างๆ ในภาคเหนือ วันที่ 24 มีนาคม 2554

1.3.2 ใช้ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน จากกรมโยธาธิการและผังเมือง และที่อื่นๆ โดยสุ่มตัวอย่างหลุมเจาะ จากทั้งหมด 17 จังหวัด ในภาคเหนือ

1.3.3 ประเมินการเกิดปรากฏการณ์ทรายเป็นผล ด้วยโปรแกรม Finite element analysis of liquefaction program โดยดูจาก ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ภาคเหนือ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล จากข้อมูลดินหลุมเจาะ และข้อมูลความเร่งของพื้นดิน จากสถานีตรวจวัด ด้วยโปรแกรม Finite element analysis of liquefaction program

1.4.2 สามารถประเมินโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ทรายเป็นผล ในแต่ละข้อมูลหลุมเจาะ จากการขยายค่าความเร่งของพื้นดินจากแรงแผ่นดินไหว

1.4.3 สามารถหาพื้นที่ที่เกิดปรากฏการณ์ทรายเป็นผล จากค่าความเร่งของพื้นดินจากแรงแผ่นดินไหว และพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดปรากฏการณ์ทรายเป็นผล จากค่าความเร่งของพื้นดินจากแรงแผ่นดินไหว

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 นำข้อมูลแผ่นดินไหวจากสถานีตรวจวัดต่างๆ ในวันที่ 24 มีนาคม 2554 มาวิเคราะห์ เพื่อตัดเอาช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร่งที่ตรวจวัดได้ และทำการแปลงเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์

1.5.2 รวบรวมข้อมูลชั้นดินมาวิเคราะห์ในแต่ละหลุมเจาะ เพื่อสร้างรายละเอียดในการป้อนข้อมูลแยกแต่ละหลุมเจาะ

1.5.3 เตรียมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับแต่ละหลุมเจาะ โดยใช้โปรแกรม Shake91_input แปลงข้อมูลจากคลื่นผิวพื้นลงไปยังระดับก้นหลุมเจาะ

1.5.4 นำข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว และข้อมูลของหลุมเจาะ แต่ละหลุมมาทำการคำนวณด้วยโปรแกรม Finite element analysis of liquefaction program

1.5.5 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม ประเมินโอกาสเกิดปรากฏการณ์ทรายเป็นผล แล้วนำไประบุพื้นที่ จากตำแหน่งของหลุมเจาะที่ทำการวิเคราะห์

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการรับรู้ข้อมูลข่าวสาร สามารถรับรู้ได้รวดเร็ว ทำให้ประชาชนตื่นตัวในเรื่องของแผ่นดินไหวมากขึ้น ซึ่งการเกิดแผ่นดินไหว สามารถทำให้เกิดลิควิแพคชั่นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในชั้นทรายได้

2.1 ธรรมชาติของการเกิดแผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว คือการสั่นไหวของพื้นผิวโลก บางครั้งการเคลื่อนไหวที่มีความรุนแรงของพื้นผิวโลก จะเกิดจากการปลดปล่อยของพลังงานในชั้นเปลือกโลก พลังงานนี้สามารถเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่อย่างฉับพลันของชิ้นส่วนเปลือกโลก ภูเขาไฟระเบิด หรือการระเบิดที่มนุษย์สร้างขึ้น อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่การเกิดแผ่นดินไหวที่อันตราย จะเกิดจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก เมื่ออยู่ภายใต้แรงทางธรณีวิทยาจากแผ่นเปลือกโลก เปลือกจะเริ่มสะสมความเครียด สำหรับความเค้นในแนวแกนกฎของฮุก (Hooke's law) ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังสมการ 2.1

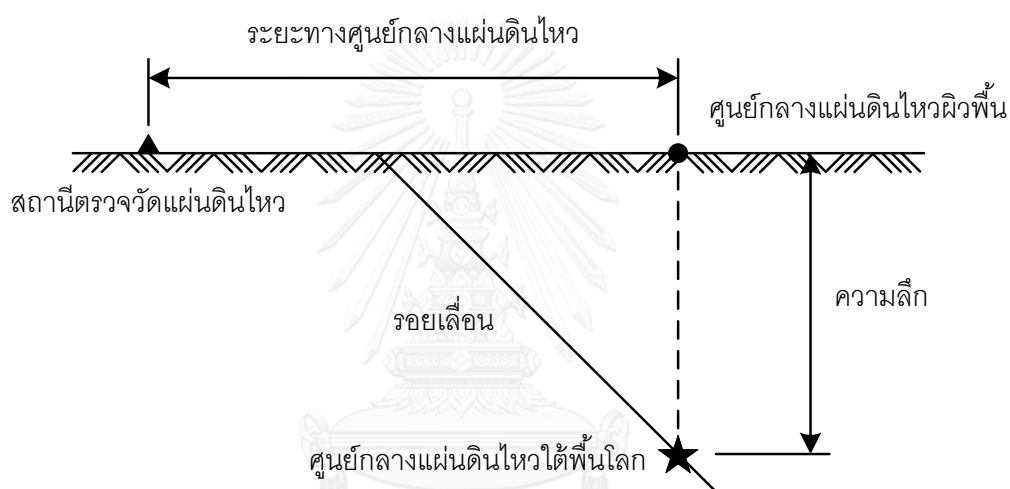
$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.1)$$

เมื่อชั้นหินได้รับความเค้น จะถูกเก็บอยู่ในรูปของพลังงานความเครียด และเมื่อความเค้น มีค่าสูงเกินกว่ากำลังสูงสุดของชั้นหินที่จะรับได้ ชั้นหินจะพัง และจะเกิดการเคลื่อนตัวย้ายไปตำแหน่งใหม่อย่างฉับพลัน ในขั้นตอนที่เกิดการพังของชั้นหิน พลังงานความเครียดที่ถูกสะสม จะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแผ่นดินไหว เป็นการอธิบายทฤษฎีพื้นฐาน ในการเกิดขึ้นของแผ่นดินไหว คลื่นเหล่านี้เดินทางมาจากแหล่งที่มาของการเกิดแผ่นดินไหว ที่เรียกว่าจุดศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว ไปยังสถานที่ห่างไกลผ่านไปตามพื้นผิวของโลก บางส่วนของการสั่นสะเทือนจะมีความถี่สูงพอที่จะเกิดเสียง ในขณะที่ช่วงอื่นๆ ที่มีความถี่ต่ำมากในช่วงเวลาหลายวินาที จะไม่สามารถได้ยินได้

2.2 ศัพท์เกี่ยวกับแผ่นดินไหว

ศูนย์กลางของแผ่นดินไหวบนผิวพื้น (Epicenter) คือจุดที่อยู่บนพื้นผิวโลก เหนือศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่แท้จริง (Hypocenter) ซึ่งจะพบแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวอยู่บนรอยเลื่อน (Fault)

สถานที่เกิดแผ่นดินไหวสามารถอธิบายกันได้ทั่วไปโดยตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ โดยระบุศูนย์กลางของแผ่นดินไหวบนผิวพื้น และความลึกของจุดกำเนิด (Focal depth) ความลึกของจุดกำเนิดแผ่นดินไหวคือความลึกจากพื้นผิวโลกถึงจุดกำเนิด ศัพท์เหล่านี้จะแสดงดังรูป 2.1 การเกิดแผ่นดินไหวที่มีระดับความลึกน้อยกว่า 60 กิโลเมตรจะถูกระบุเป็นแผ่นดินไหวระดับตื้น แผ่นดินไหวระดับตื้นจะเกิดจากการแตกหักของหินในเปลือกโลก หรือพลังงานความเครียดภายในที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานยึดเหนี่ยวของรอยเลื่อนด้านตรงข้าม แผ่นดินไหวระดับปานกลาง สาเหตุการเกิดยังไม่เข้าใจอย่างเต็มที่ มีความลึกตั้งแต่ 60-300 กิโลเมตร แผ่นดินไหวระดับลึกอาจมีความลึกของแหล่งกำเนิดได้ถึง 700 กิโลเมตร



รูปที่ 2.1 ศูนย์กลางแผ่นดินไหวผิวพื้น และศูนย์กลางแผ่นดินไหวแท้จริง

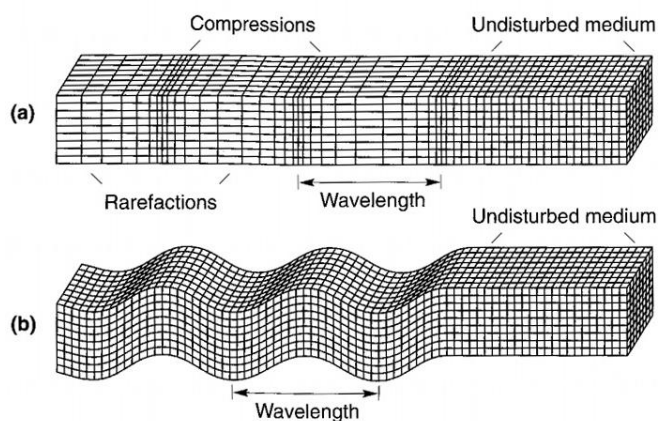
2.3 คลื่นแผ่นดินไหว

คลื่นแผ่นดินไหว (Seismic waves) จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการเคลื่อนที่ได้แก่ คลื่นในตัวกลาง (Body wave) และคลื่นผิวพื้น (Surface wave)

2.3.1 คลื่นในตัวกลาง

คลื่นในตัวกลาง (Body wave) คือคลื่นที่เดินทางจากจุดกำเนิดผ่านภายในเปลือกโลกไปจนถึงพื้นผิว โดยจะแบ่งได้เป็นคลื่นอัด หรือที่รู้จักกันในชื่อคลื่นปฐมภูมิ (P-waves) จะเป็นคลื่นตามยาว สามารถมีความเร็วได้สูงถึง 5800 เมตร/วินาที ในหินแกรนิต และคลื่นเฉือน หรือที่รู้จักกัน

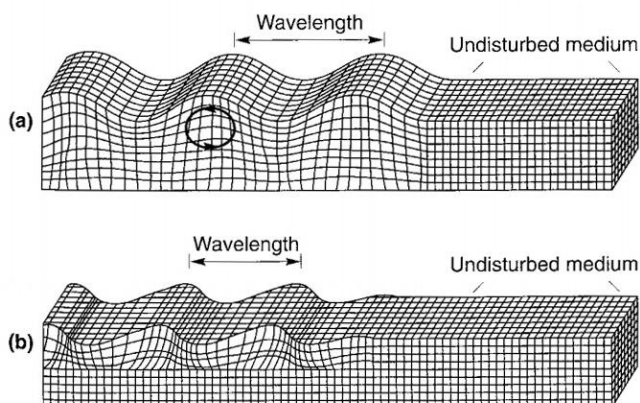
ในชื่อคลื่นทุติยภูมิ (S-waves) จะเป็นคลื่นตามขวาง มีความเร็วช้ากว่าที่ 3000 เมตร/วินาที ในหินแกรนินิต ซึ่งทำให้คลื่นเฉือนจะเดินทางไปถึงพื้นผิวได้ช้ากว่า แสดงดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของคลื่นในตัวกลาง: (a) P-wave; (b) S-wave (Kramer, 1996)

2.3.2 คลื่นผิวพื้น

คลื่นผิวพื้น (Surface wave) คือคลื่นที่เดินทางไปตามผิวโลก โดยจะแบ่งได้เป็นที่คลื่นเรย์ลี (Rayleigh waves) อนุภาคของดินเคลื่อนที่เหมือนคลื่นปฐมภูมิ แต่ขณะเดียวกันมีการเคลื่อนตัวแบบย้อนกลับ และคลื่นเลิฟ (Love waves) อนุภาคดินเคลื่อนที่ในแนวระนาบเหมือนการเคลื่อนที่ของงู แสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของคลื่นผิวพื้น: (a) R-wave; (b) L-wave (Kramer, 1996)

2.4 ขนาดความรุนแรง

ขนาดความรุนแรง (Intensity scale) วัดได้จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ขณะเกิดแผ่นดินไหว และหลังเกิดแผ่นดินไหว เช่น ความรู้สึกของความรู้สึกคน ลักษณะที่วัตถุ สิ่งก่อสร้างสั่นไหว หรือเสียหาย ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่เปลี่ยนแปลง เป็นต้น ความรุนแรงแผ่นดินไหวถูกพัฒนาขึ้นมา แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดในโลกคือ มาตราเมอร์คัลลีที่ปรับปรุงแล้วซึ่งมี 12 อันดับ (MMI Scale) เรียงลำดับจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงน้อยที่สุดจนถึงรุนแรงมากที่สุด ซึ่งจะใช้เหมือนกับมาตราเมอร์คัลลี แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อันดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตราเมอร์คัลลี (บุรินทร์ เวชบรรเทิง)

อันดับ	เหตุการณ์แผ่นดินไหว
I	ไม่รู้สึกลับั่นไหว ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือ
II	รู้สึกบางคน โดยเฉพาะผู้อยู่ชั้นบนของอาคาร สิ่งของแกว่งไกว
III	ผู้อยู่ในอาคารรู้สึก เฉพาะอย่างยิ่งผู้อยู่ชั้นบนอาคาร แต่ผู้คนส่วนใหญ่ยังไม่รู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว
IV	ในเวลากลางวันผู้คนในอาคารรู้สึกมาก แต่ผู้อยู่นอกอาคารรู้สึกบางคน งาน หน้าต่าง ประตูสั่น ความรู้สึกเหมือนรถบรรทุกชนอาคาร
V	เกือบทุกคนรู้สึก หลายคนตกใจตื่น วัตถุที่ไม่มั่นคงล้มคว่ำ เสา ต้นไม้ แกว่งไกว
VI	ทุกคนรู้สึก เครื่องเรือนเคลื่อน ปล่องไฟแตก เกิดความเสียหายเล็กน้อยกับอาคาร
VII	ทุกคนตกใจวิ่งออกนอกอาคาร อาคารที่ออกแบบดีไม่เสียหาย เสียหายเล็กน้อยถึงปานกลางกับอาคารสิ่งก่อสร้างธรรมดา เสียหายมากกับอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผู้ชั้บรรู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว
VIII	เสียหายเล็กน้อยกับอาคารที่ออกแบบไว้ดี เสียหายมากในอาคารธรรมดา บางส่วนของอาคารพังทลาย เสียหายอย่างมากในอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผนังอาคารหลุดออกนอกอาคาร ปล่องไฟพัง ดินและทรายพุ่งขึ้นมา
IX	เสียหายมากในอาคารที่ออกแบบไว้ดี โครงสิ่งก่อสร้างบิดเบนจากแนวตั้ง เสียหายอย่างมากกับอาคารและบางส่วนพังทลาย ตัวอาคารเคลื่อนจากฐานราก พื้นดินแตก ท่อใต้ดินแตกหัก
X	อาคารไม้ที่สร้างไว้อย่างดี เสียหาย โครงสร้างอาคารพังพลาาย รางรถไฟบิด พื้นดินแตก แผ่นดินถล่มหลายแห่ง ทรายและโคลนพุ่งจากพื้นดิน

XI	สิ่งก่อสร้างเหลืออยู่น้อย สะพานถูกทำลาย พื้นดินมีรอยแยกกว้าง ท่อใต้ดินเสียหายหมด รางรถไฟบิดงอมาก
XII	เสียหายทั้งหมด เห็นคลื่นบนพื้นดิน เส้นแนวระดับสายตาบิดเบน วัตถุสิ่งของกระเด็นใน อากาศ

2.5 ขนาดของแผ่นดินไหว

ขนาด (Magnitude) เป็นปริมาณที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่พื้นโลกปลดปล่อยออกมา ในรูปของการสั่นสะเทือน คำนวณได้จากการตรวจวัดค่าความสูงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ด้วย เครื่องมือตรวจแผ่นดินไหว เป็นปริมาณที่บ่งชี้ขนาด ณ บริเวณจุดศูนย์กลาง ขนาดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีด้วยกันหลายประเภท ได้แก่

2.5.1 Local Magnitude Scale (M_L)

แสดงขนาดแผ่นดินไหวในยุคเริ่มแรก บ่งบอกถึงปริมาณของแผ่นดินไหวท้องถิ่น หรือ แผ่นดินไหวใกล้ (ระยะทางน้อยกว่า 600 กิโลเมตร) คำนวณได้จากความสูงของคลื่นซึ่งตรวจด้วย เครื่องมือตรวจความสั่นสะเทือนแบบวัด การขจัด (Displacement) ได้แก่เครื่อง Wood Anderson ซึ่งมีค่ากำลังขยาย 2,800 เท่า ขนาดนี้นำเสนอโดย C. F Richter นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา ดังนั้น หน่วยของขนาด M_L ที่ใช้จึงเป็น “ริคเตอร์” “โดยนำค่าของความสูงของคลื่นที่สูงที่สุดของคลื่น S ซึ่งมี ช่วงคลื่นอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 วินาทีมาใช้ในการคำนวณ

2.5.2 Body-Wave Magnitude Scale (M_B)

แสดงขนาดของเหตุการณ์แผ่นดินไหวทั้งใกล้ และแผ่นดินไหวไกล (ระยะทางมากกว่า 1,000 กิโลเมตร) เรียกว่าขนาดของคลื่นหลัก (Body-wave magnitude) ในการคำนวณใช้คลื่นหลัก ได้แก่คลื่น P ที่มีความยาวช่วงคลื่นประมาณ 1.0-5.0 วินาที

2.5.3 Surface Magnitude Scale (M_S)

แสดงขนาดของเหตุการณ์แผ่นดินไหวไกล และมีขนาดใหญ่ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าขนาดคลื่นผิวพื้น (Surface magnitude) ในการคำนวณใช้คลื่นผิวพื้นที่มีความยาวช่วงคลื่นประมาณ 18-22 วินาที

2.5.4 Moment magnitude Scale (M_W)

เป็นปริมาณที่แสดงถึงปริมาณพลังงานของคลื่นแผ่นดินไหวได้ดีกว่าขนาดชนิดอื่น สามารถวิเคราะห์ได้จาก โมเมนต์แผ่นดินไหว (M_0 : Seismic moment) ส่วนใหญ่ขนาด M_W ใช้เพื่อประเมินขนาดของแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ในสมัยใหม่ เพื่อใช้แทนมาตราริกเตอร์ โดยจะมีค่าขนาดใกล้เคียงตามที่จำกัดความไว้โดยมาตราริกเตอร์เดิม

ตารางที่ 2.2 การคำนวณขนาดแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ

ขนาด	สูตรคำนวณ	คลื่นแผ่นดินไหว	ความยาวช่วงคลื่น (วินาที)
M_L	$\log A - \log A_0$	S-Wave	0.1-1.0
M_B	$\log (A/T) + 0.01\Delta + 5.9$	P-Wave	1.0-5.0
M_S	$\log A + 1.66 \log \Delta + 2.0$	Surface-Wave	20
M_W	$(2/3 \log M_0) - 10.7$	Surface-Wave	>200

2.6 ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน

ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak ground acceleration, PGA) จะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือตรวจวัดความเร็วของอนุภาคดิน (Seismometer) หรือเครื่องมือตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดิน (Accelerometer) และเป็นหนึ่งในคุณลักษณะที่สำคัญของแผ่นดินไหวในการไปใช้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยจะมีหน่วยได้หลายค่า เช่น ฟุต/วินาที² นิ้ว/วินาที² และ เมตร/วินาที² อย่างไรก็ตามเราจะระบุค่า PGA เป็นสัดส่วนของค่าอัตราเร่งหรือแรงโน้มถ่วงของโลก (%)

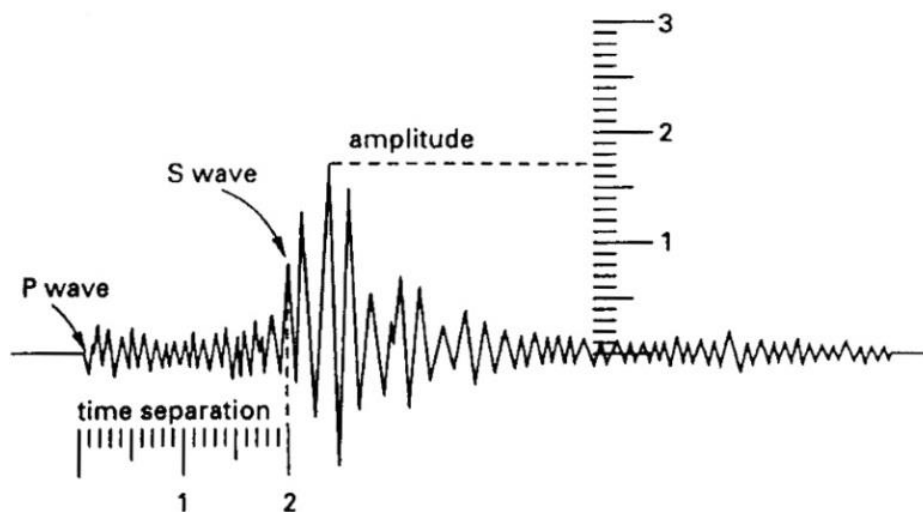
ของค่า g) หรือหน่วยเป็น gal (ประมาณ 980 gal เท่ากับ 1 g) ค่าอัตราเร่งจะลดลงตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิด

2.7 เครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหว

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาแผ่นดินไหวมีด้วยกันหลายประเภทซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการตรวจวัดค่าต่างๆ เช่น เพื่อตรวจวัด ค่าสนามแม่เหล็กโลก ความสั่นสะเทือนของพื้นดิน ระยะการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซเรดอน การเปลี่ยนแปลงของ ค่าความเค้นของหิน (Stress) ตรวจวัดระดับน้ำใต้ดิน ตรวจวัดระดับความลาดเอียง เป็นต้น

เครือข่ายตรวจวัดความสั่นสะเทือนทั่วไปจะเป็นเครื่องมือตรวจวัดความเร็วของอนุภาคดิน (Seismometer) มีวัตถุประสงค์โดยทั่วไปเพื่อหาตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหว เวลาเกิด ขนาด และเครื่องมือตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดิน (Accelerometer) เพื่องานด้านวิศวกรรม ข้อมูลพื้นฐานนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ ลักษณะของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว โครงสร้างของโลก ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว และอื่นๆ

คลื่นแผ่นดินไหว จะเดินทางผ่านผิวโลก โดยถูกบันทึกไว้ใน เครื่องตรวจวัดความเร็วของอนุภาคดิน (Seismometer) เครื่องตรวจวัดความเร็วของอนุภาคดิน จะทำการตรวจวัด และบันทึกลงไปบนอุปกรณ์ที่เรียกว่า ไสสโมกราฟ (Seismograph) เครื่องตรวจวัดความเร็วของอนุภาคดิน เป็นอุปกรณ์ประเภทลูกตุ้ม ที่ติดตั้งอยู่บนพื้นดิน และวัดการเคลื่อนที่ของพื้นดิน ที่สถานีที่เป็นจุดอ้างอิง เครื่องตรวจวัดความเร็วของอนุภาคดินจะวัดการเคลื่อนที่ได้ในแค่ทิศทางเดียว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ทั้งหมด 3 เครื่องเพื่อจับเก็บค่าการเคลื่อนตัวของชั้นดินทั้งหมด ดังรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการสั่นไหวโดยทั่วไป ที่รู้จักกันเป็นไฮสโมแกรม (Seismogram)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการสั่นไหวโดยทั่วไป (Lindeburg, 1998)

เครื่องมือตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดิน (Accelerometer) เป็นเครื่องตรวจวัดที่ถูกติดตั้งในอาคาร ใช้สำหรับการวัดความเร่งขนาดใหญ่ จึงทำให้เป็นข้อจำกัดที่สามารถบันทึกได้แต่การสั่นที่มีความรุนแรง ซึ่งทำให้สามารถวัดได้เกินขีดจำกัดของเครื่องตรวจวัดส่วนใหญ่ เครื่องมือตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดินที่ตั้งอยู่ในอาคารจะไม่ได้ทำงานอย่างต่อเนื่อง จะวัดในส่วนของ คลื่นหลัก (P-wave) และทำงานในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น

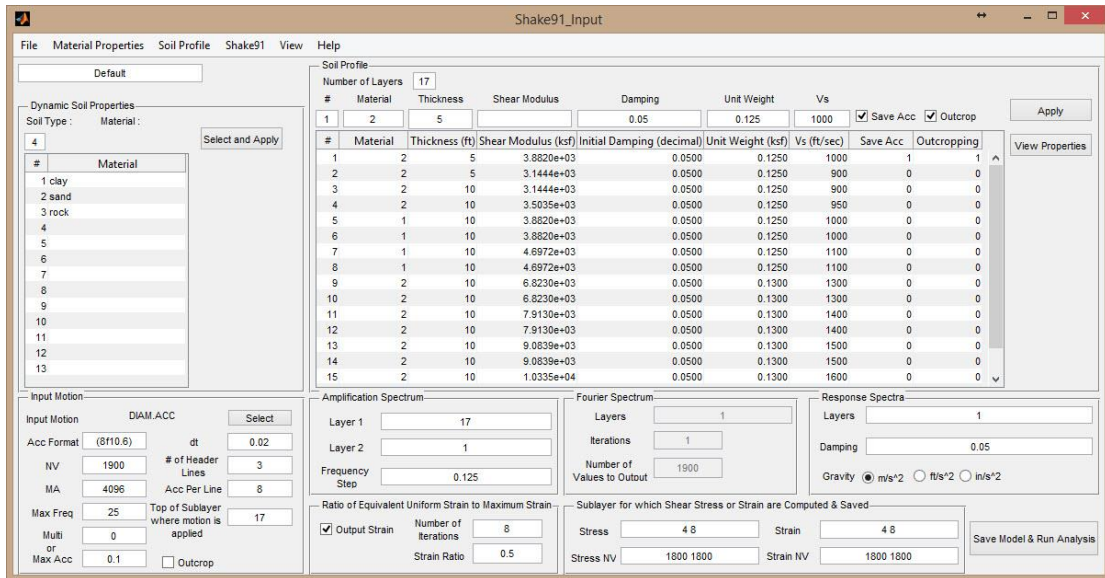
2.8 ระยะเวลาของการเกิดแผ่นดินไหว

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวที่มีความสั้นสะเทือนกินเวลาหลายวินาที ความเสียหายจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวประกอบด้วยคลื่นความสั้นสะเทือนหลายความยาวช่วงคลื่น หรือหลายความถี่ ในกรณีที่แผ่นดินไหวมีความสั้นสะเทือนที่ยาวนาน ณ ความถี่ที่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารสิ่งก่อสร้างจะช่วยเสริมให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อโครงสร้างได้

2.9 การวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวด้วย Shake91_Input

Shake91_Input เป็นโปรแกรมที่ใช้ Matlab ในการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณ ตัวโปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นโดย Li (2013) โดยจะถูกนำไปคำนวณด้วยโปรแกรม Shake91 (Idriss และ Sun, 1992) โดยจะต้องใช้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินและข้อมูลชั้นดินหน้าทีของโปรแกรม Shake91_Input จะใช้ในการ สร้างและจัดรูปแบบของข้อมูลที่จะใช้ในโปรแกรม

Shake91 สามารถเก็บค่า และสามารถแก้ไขข้อมูลคุณสมบัติของดินได้ และใช้ในการสร้างกราฟของผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก Shake91



รูปที่ 2.5 โปรแกรม Shake91_input

2.10 ความเร็วคลื่นเฉือน และ โมดูลัสของแรงเฉือน

ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ลิควิแฟกชันจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ พารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งคือ โมดูลัสของแรงเฉือน (G) ที่ความเครียดต่ำ ($\gamma \cong 5 \times 10^{-4}\%$) ทั่วไป จะถูกแสดงด้วยเป็น G_{max} ถึงแม้ว่า G_{max} ยากที่จะทำการวัดอย่างแม่นยำภายในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากผลกระทบของการรบกวนของกลุ่มตัวอย่าง สามารถระบุค่าได้จากความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) และความหนาแน่นของดิน (ρ) จากสมการที่ 2.2 และจะประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือน โดยอ้างอิงตามลักษณะชั้นดินของภาคเหนือของประเทศไทย ด้วยวิธีการทดสอบดาวน์โฮล (Seismic down hole test) โดยจะประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามสมการที่ 2.3 จากค่าการตอกทดลองมาตรฐาน (Standard penetration test - N value)

$$G = \rho \times V_s^2 \quad (2.2)$$

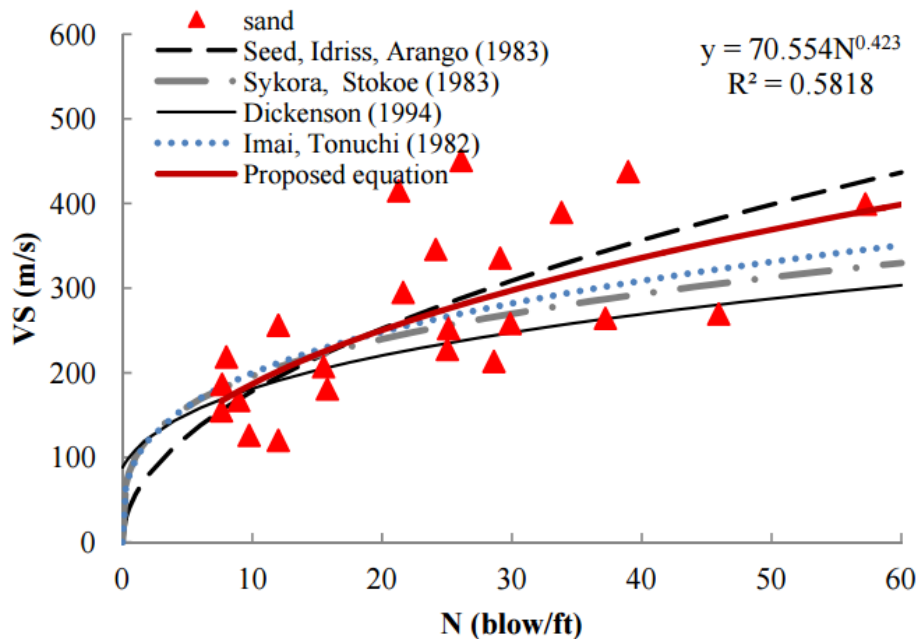
$$V_s = 70.554 \times N^{0.423} \quad (2.3)$$

โดยที่ G คือ โมดูลัสของแรงเฉือน, kPa

ρ คือ ความหนาแน่นของดิน, t/m^3

V_s คือ ความเร็วของคลื่นเฉือน, m/s

N คือ ค่าการตอกทดลองมาตรฐาน, $blows/ft$



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และ N ของดินทรายบริเวณภาคเหนือ (จิตติ ปาลศรี และอานัติ เรืองรัมย์, 2552)

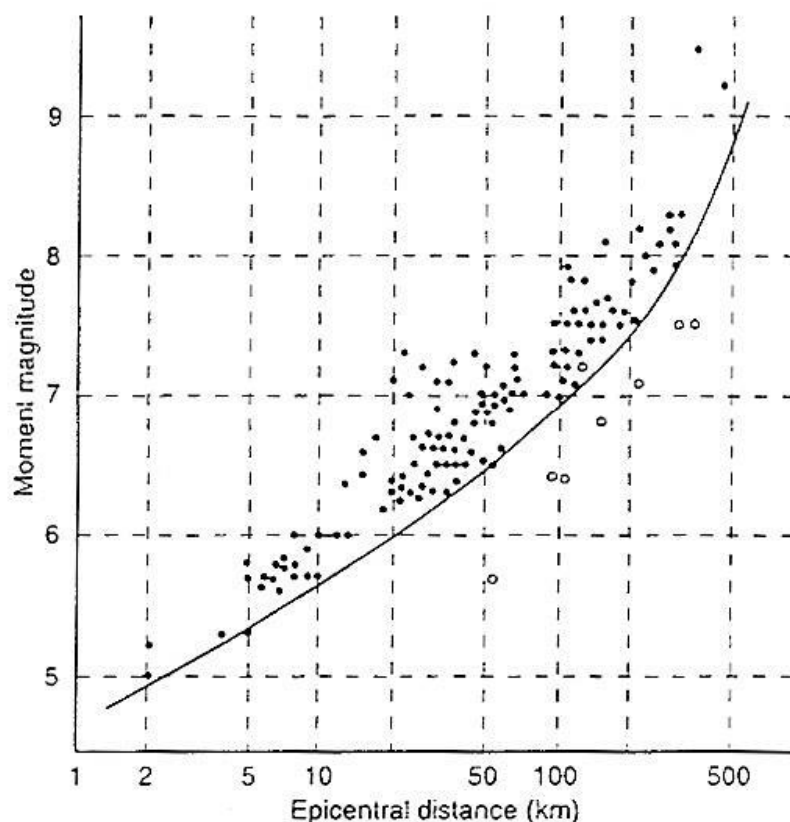
2.11 ลิกควีแฟคชั่น

ปรากฏการณ์ลิกควีแฟคชั่น สามารถอธิบายได้จาก วัฏจักรความเค้นที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน ทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน ในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless soils) จะทำให้เกิดการสูญเสียแรงเฉือนในดินบางส่วนหรือทั้งหมดได้ ดินอาจจะเกิดการเคลื่อนตัวมาก นำไปสู่ความเสียหายของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นได้ระดับน้ำ แต่หลังจากเกิดทรายเหลว มันสามารถกระจายขึ้นด้านบนผ่านชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ตามการหนีออกของน้ำส่วนเกิน

โอกาสเกิดลิกควีแฟคชั่นภายใต้แผ่นดินไหวขึ้นอยู่กับ ขนาดคละ และความหนาแน่นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นลักษณะของดิน ความเค้นก่อนที่จะมีการเคลื่อนไหวของพื้นดิน ความลึกของระดับน้ำ เช่นเดียวกับปัจจัยอื่น ๆ

เรารู้จักกันมานานแล้วว่า ความเข้มของการสั่นไหวของพื้นดิน ในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว ทำให้เกิดความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับอาคาร และคุณสมบัติอื่นๆได้รับผลกระทบทางธรณีวิทยา และลักษณะของพื้นดิน ปรากฏการณ์ลิควิแฟคชัน ได้รับการรายงานในการเกิดแผ่นดินไหวจำนวนมาก ที่ทำให้เกิดดินถล่ม และความเสียหายให้กับอาคาร แต่มันก็แสดงให้เห็นมากขึ้นอย่างมาก จากความเสียหายอย่างกว้างขวางในอาคาร และดินถล่มขนาดใหญ่ในจากแผ่นดินไหวของปี 1964 ที่นิงะตะ, ญี่ปุ่น และอลาสก้า, สหรัฐอเมริกา

Ambraseys (1988) ได้รวบรวมข้อมูลทั่วโลกจากการเกิดแผ่นดินไหวระดับตื้น ที่จะประเมินเป็นข้อจำกัดระยะทางจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวบนผิวพื้น ที่เกินกว่านั้นลิควิแฟคชันจะไม่ปรากฏให้เห็นในแผ่นดินไหวขนาดต่างๆ ดังรูปที่ 2.7 ระยะทางที่มีโอกาสเกิดลิควิแฟคชันจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก กับการเพิ่มขึ้นของขนาด ในขณะที่ความสัมพันธ์ที่แสดงดังรูปที่ 2.7 ไม่ได้ประกันว่าทรายเป็นเหตุจะไม่สามารถปรากฏได้ในระยะทางที่มากขึ้น แต่ก็จะมีเป็นประโยชน์สำหรับการประมาณสถานการณ์อันตรายในระดับภูมิภาค



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อจำกัดระยะทางจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวบนผิวพื้นของสถานที่ที่พบการเกิดทรายเป็นเหตุ และขนาดของแผ่นดินไหวระดับตื้นตามมาตราโมเมนต์ (Ambraseys, 1988)

การเกิดลิควีแฟคชันต้องมีการพัฒนาของแรงดันน้ำส่วนเกินช่องว่าง โอกาสเกิดลิควีแฟคชันขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรปรวนเป็นผลมาจากลักษณะองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร ลักษณะขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงที่ปริมาตรที่สูง มีแนวโน้มที่จะเกี่ยวข้องกับโอกาสที่จะเกิดลิควีแฟคชันได้สูงตามไปด้วย ลักษณะเหล่านี้รวมถึงขนาดอนุภาค รูปร่าง และขนาดคละ

หลายปีที่ผ่านมา ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับลิควีแฟคชันจะถูกจำกัดเฉพาะทราย ดินที่มีความละเอียดถูกพิจารณาว่าไม่สามารถสร้างแรงดันน้ำในช่องว่างได้มากพอที่จะทำให้เกิดดินเหลว และดินที่มีลักษณะเม็ดใหญ่ที่สามารถซึมผ่านได้ดี ก็ไม่สามารถพัฒนาแรงดันน้ำในดินได้มากพอที่จะทำให้เกิดดินเหลว

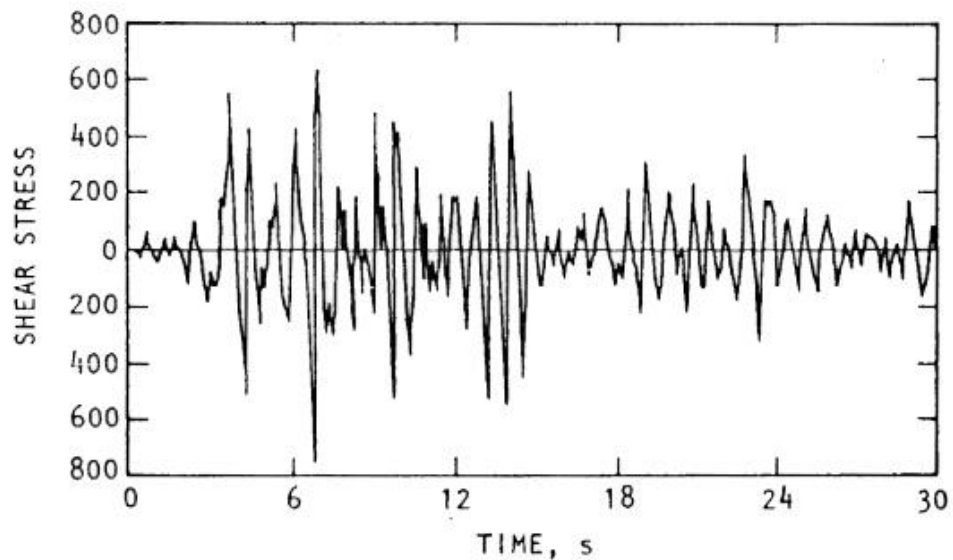
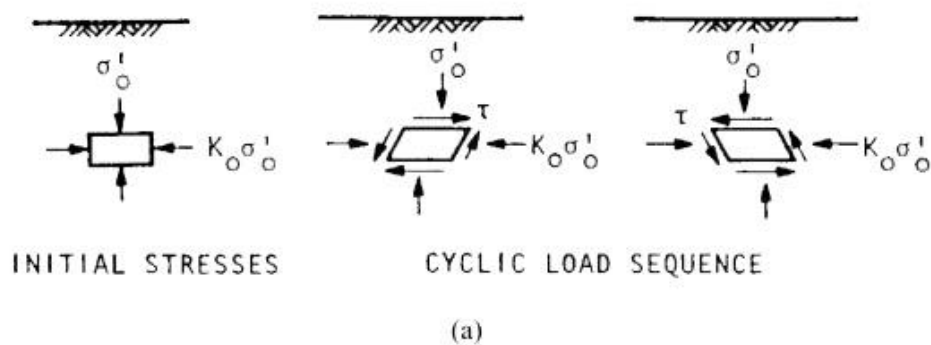
ลิควีแฟคชันที่เกิดจากทรายแป้งได้ถูกพบ (Ishihara, 1984, Ishihara, 1985) ในห้องปฏิบัติการ และในสนามแสดงให้เห็นว่าลักษณะของสภาพพลาสติก มีผลมากกว่าขนาดเม็ดเพียงอย่างเดียว ที่เป็นผลต่อโอกาสเกิดทรายเหลวของทรายละเอียด ทรายแป้งที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ที่ไม่มีความเป็นพลาสติก และไม่มีความเชื่อมแน่น มีความเสี่ยงที่จะเกิดทรายเหลวได้มาก (Ishihara, 1993) ทรายแป้งละเอียดที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ หรือมีลักษณะเป็นแผ่น โดยทั่วไปแสดงให้เห็นการเชื่อมแน่นเพียงพอที่จะยับยั้งลิควีแฟคชัน ดินเหนียวยังคงไม่ไวต่อการทำให้เหลว แม้ว่าดินเหนียวจะสามารถหดตัว หรือไหลได้ คล้ายกับดินเหลว

โอกาสเกิดลิควีแฟคชันเป็นผลมาจากขนาดคละ ดินที่มีขนาดคละดี โดยทั่วไปจะมีโอกาสน้อยกว่าดินที่มีขนาดคละไม่ดี ต่อการเกิดลิควีแฟคชัน การเติมช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่โดยอนุภาคขนาดเล็กในดินขนาดคละดี ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ภายใต้เงื่อนไขการระบายน้ำของดินต่ำกว่า และดังนั้นแรงดันน้ำส่วนเกินในช่องว่างต่ำกว่าภายใต้เงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ เป็นหลักฐานในสนามที่แสดงให้เห็นว่าการเกิดทรายเหลวส่วนใหญ่มีความเกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของขนาดคละของดิน

2.12 สาเหตุของการเกิดลิควีแฟคชัน

สาเหตุพื้นฐานของลิควีแฟคชัน ได้รับความเข้าใจว่า หากทรายอิมมัวอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนพื้นดิน ก็มีแนวโน้มที่จะแน่นขึ้นและปริมาตรจะลดลง ถ้าหากดินไม่สามารถระบายน้ำได้ แต่ยังมีแนวโน้มของปริมาตรที่จะลดลง ผลคือการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำช่องว่าง และถ้าแรงดันน้ำช่องว่างที่เกิดขึ้นมากเกินกว่าเท่ากับแรงดันดินที่กดทับ ความเค้นประสิทธิผลจะกลายเป็นศูนย์ ทรายจะสูญเสียกำลังโดยสมบูรณ์ และจะพัฒนาไปสู่สถานะเหลว

กลายเป็นความเชื่อโดยทั่วไปว่า สาเหตุพื้นฐานที่เกิดทรายเหลวในดินอิ่มตัวที่ไม่มีความเชื่อมแน่น ในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว คือการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำมากเกินไป เกิดจากวัฏจักรของความเค้นเฉือน ที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของพื้นดิน ความเค้นจะมีการแพร่ไปตามคลื่นเฉือนในดิน แม้ว่ารูปแบบของคลื่นสั่นไหวยังคงคาดว่าจะเป็นดัง นั้น องค์ประกอบของดินที่ได้รับการพิจารณาจะได้รับชุดของเงื่อนไขวัฏจักรความเค้นดังแสดงดังรูปที่ 2.8 ชุดความเค้นจะมีรูปแบบที่เปลี่ยนไปตามวงจรในธรรมชาติ



รูปที่ 2.8 วัฏจักรความเค้นเฉือนในองค์ประกอบของดิน ระหว่างพื้นดินสั่นสะเทือน (a) เงื่อนไขของโหลดในอุดมคติ; (b) การเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนพิจารณาจากการวิเคราะห์การตอบสนอง (พิชัย ภัทรรัตนกุล, 2546)

ผลจากการเพิ่มขึ้นของวัฏจักรความเค้น โครงสร้างของดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น มีแนวโน้มที่จะแน่นมากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายความเค้นให้น้ำในช่องว่าง และคลายความเค้นในตัวเอง ดังนั้นโครงสร้างดินจะมีการปรับตัวเท่าที่จำเป็นเพื่อให้ปริมาตรคงที่ ซึ่งจะมีผลต่อการลดตัวของปริมาตร โดยการกลับตัวของโครงสร้างดินนี้จะกำหนดขนาดของการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในดิน (Martin, Finn และคณะ, 1975)

ในขณะที่แรงดันน้ำในช่องว่างเพิ่มขึ้น จนเท่ากับแรงดันดินที่กดทับ ทราย์เริ่มที่จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ถ้าหากว่าทราย์หลวม แรงดันน้ำจะเพิ่มมากขึ้นในทันทีทันใดจนเท่ากับแรงดันดิน และทราย์จะเกิดการยุบตัวขนาดใหญ่อย่างรวดเร็ว โดยที่ความเครียดเฉือนอาจเพิ่มขึ้นถึง $\pm 20\%$ หรือมากกว่า ถ้าทราย์เกิดการยุบตัวแบบไม่จำกัด โดยปราศจากการต้านทานการเปลี่ยนรูป จะสามารถบอกได้ว่ามันเป็นของเหลวแล้ว ในทางกลับกัน ถ้าทราย์มีความหนาแน่นมาก ก็อาจจะพัฒนาแรงดันน้ำที่คงค้าง วัฏจักรความเค้นเต็มทีก็จะเท่ากับแรงดันที่กดทับ แต่เมื่อความเค้นเกิดขึ้นอีกครั้งต่อไป หรือทราย์ถูกน้ำหนักกดทับอย่างต่อเนื่อง ดินมีแนวโน้มที่จะขยายตัว แรงดันน้ำในดินจะลดลงถ้าเป็นทราย์ที่ไม่ระบายน้ำ และในที่สุดดินจะสามารถพัฒนากำลังมากพอที่จะทนต่อความเค้นที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม มันจะมีการยุบตัวของดินบ้างเล็กน้อย เพื่อจะเพิ่มการต้านทาน และถ้ายังมีแรงเกิดซ้ำต่อเนื่อง ปริมาณของการยุบตัวจำเป็นในการที่จะทำให้เกิดสภาพมั่นคงมากขึ้น ในที่สุดสำหรับสภาพของแรงกระทำ ที่เกิดขึ้นดูเหมือนจะมีระดับของความเครียดที่พื้นดินสามารถต้านทานความเครียดซ้ำๆ ได้โดยไม่เกิดการยุบตัวสูงสุดอีก (De Alba, Seed และคณะ, 1976) ประเภทของพฤติกรรมนี้จะถูกเรียกว่า "วัฏจักรจร" และมันถูกพิจารณาว่าร้ายแรงน้อยกว่าการเกิดลิควิแฟคชั่น ความสำคัญขึ้นอยู่กับขนาดจำกัดของความเครียด มันควรจะสังเกตเห็น อย่างไรก็ตามเมื่อการเกิดความเค้นซ้ำๆ หยุดลง ถ้าหากความเค้นกลับไปเป็นศูนย์ ก็จะมีแรงดันน้ำในช่องว่างตกค้างอยู่ในดินเท่ากับแรงดันดินที่กดทับ และจะทำให้เกิดการไหลขึ้นของน้ำในดิน ที่อาจมีอันตรายต่อลำดับชั้นดินด้านบน

ทราย์เหลวในลักษณะนี้อาจจะเกิดขึ้นที่เหนืกก็ได้ที่มีการรวมกันของสภาพที่จำเป็น และการยุบตัวจากการสั่นจะเกิดขึ้น พื้นที่นั้นอาจจะอยู่บนพื้นผิว หรือที่ความลึกหนึ่งๆ ใต้ผิวดินลงไป ขึ้นอยู่กับสถานะของทราย์ และการสั่นไหวที่ได้รับ

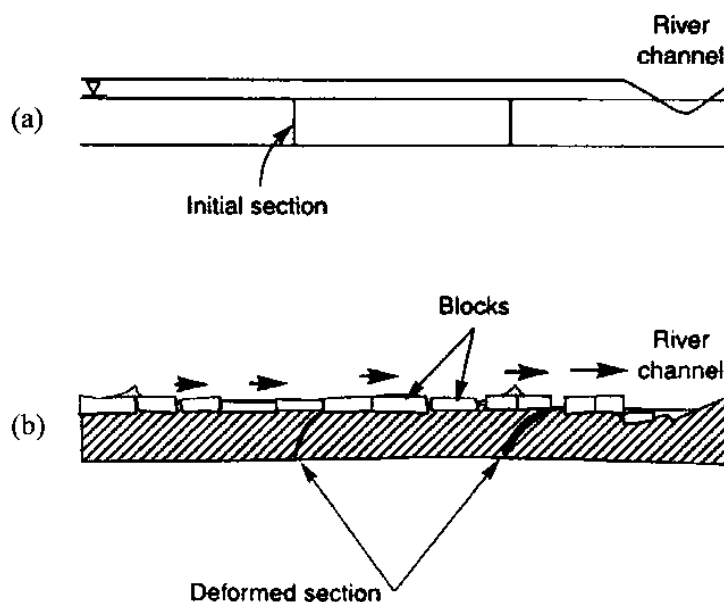
อย่างไรก็ตาม การเกิดลิควิแฟคชั่นที่ชั้นด้านบนอาจจะเกิดขึ้น โดยไม่ได้เป็นผลทางตรงจากการสั่นไหวของพื้นที่ แต่เกิดขึ้นเพราะลิควิแฟคชั่นในดินชั้นข้างล่างที่ลึกลงไป แรงดันของน้ำส่วนเกินจะทำให้พื้นที่ที่เหลวจะกระจายตัว โดยมีการไหลของน้ำในทิศทางขึ้นด้านบน ถ้าลาดการไหลมีขนาดใหญ่เพียงพอ การไหลขึ้นของน้ำจะทำให้เกิดสภาพเหลวในชั้นพื้นผิวของพื้นที่นั้น ลิควิแฟคชั่นประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับขอบเขตของลาดการไหลสามารถพัฒนาขึ้นมาและคงอยู่ ในที่สุดก็จะถูกกำหนดโดยลักษณะการบดอัดของทราย์ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินตามธรรมชาติ ความสามารถการซึม

ผ่านของทราย ขอบเขตของสภาพการระบายน้ำ ลักษณะรูปร่างของอนุภาค และระยะเวลาของแรงสั่นสะเทือนที่ได้รับ

2.13 กลไกการวิบัติของลาดดิน

2.13.1 การแผ่อกทางด้านข้าง (Lateral Spreads)

การแผ่อกทางด้านข้างเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวขนาดใหญ่ออกไปด้านข้าง ของชั้นผิวหน้าของดินซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดลิควิแพคชั่นของชั้นดิน แสดงดังรูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจากการตอบสนองของการรวมกันของแรงโน้มถ่วงและแรงเฉื่อยที่เกิดจากแผ่นดินไหว โดยทั่วไปจะเกิดบนลาดเนินเขาที่มีความชันน้อยกว่า 3 องศา และเคลื่อนที่เข้าหาด้านที่ว่าง เช่นร่องแม่น้ำ การเคลื่อนตัวในแนวราบโดยทั่วไปสามารถเกิดขึ้นได้หลายเมตร การเคลื่อนตัวของดินทำให้เกิดการแตกชั้นภายใน ทำให้เกิดรอยแยก ภา การยุบตัวและยกตัวขึ้นในรูปแบบของผิวการวิบัติ การแผ่อกทางด้านข้างโดยทั่วไปจะส่งผลกระทบต่อฐานรากของอาคารที่วางอยู่บนระนาบวิบัติ ทำให้ท่อถูกตัดขาด สาธารณูปโภคอื่นๆเสียหาย และเกิดการบีบอัดหรือเกิดการดุ้งของโครงสร้างทางวิศวกรรม ตัวอย่างเช่น สะพาน การวิบัติจะพบได้ที่ตีนสะพาน

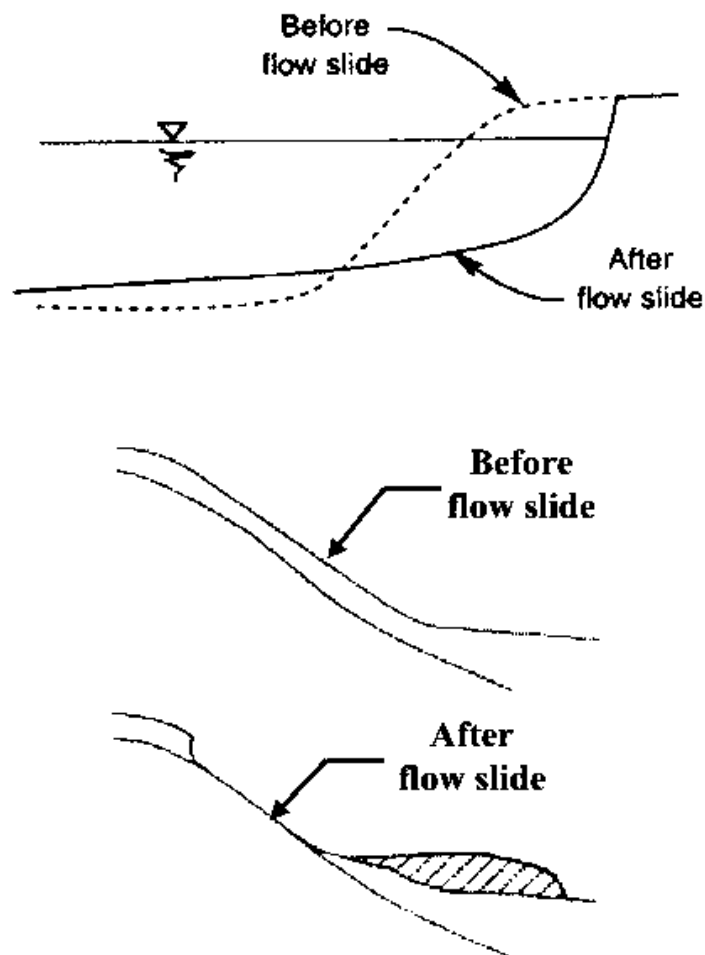


รูปที่ 2.9 การแผ่อกทางด้านข้างอยู่ติดกับแม่น้ำ (a) ก่อนเกิดแผ่นดินไหว; (b) หลังเกิดแผ่นดินไหว

(Youd, 1984)

2.13.2 การวิบัติแบบไหล (Flow Failures)

การวิบัติแบบไหลเป็นภัยพิบัติส่วนใหญ่ของการวิบัติดินที่เกิดจากลิควิแฟคชั่น การวิบัติแบบนี้โดยทั่วไปจะเกิดการเคลื่อนที่ของมวลดินขนาดใหญ่ไปด้านข้างขนาดหลายสิบลเมตร และในบางตัวอย่าง มวลดินขนาดใหญ่สามารถไหลไปได้หลายสิบกิโลเมตรลงไปตามเนินยาว โดยมีความเร็วได้ถึงหลายสิบกิโลเมตรต่อชั่วโมง การไหลอาจจะประกอบด้วยดินเหลวทั้งหมด หรือก้อนของวัสดุที่อันตรายไหลอยู่บนชั้นของดินเหลว การไหลจะเกิดขึ้นในชั้นทรายหรือทรายแป้งหลวมอิมมัตวบนเนินเขาสูงค่อนข้างชันที่มากกว่า 3 องศา ดังรูปที่ 2.10



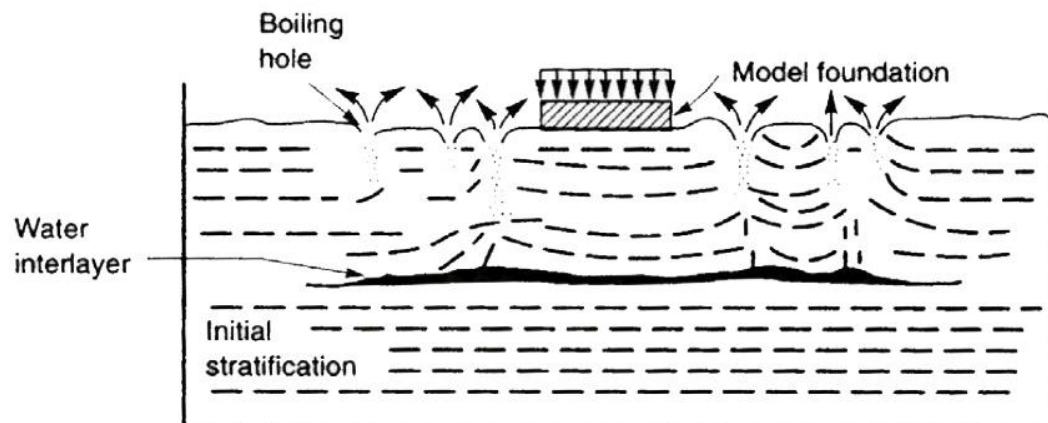
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการวิบัติแบบไหลที่เกิดจากลิควิแฟคชั่น และการสูญเสียกำลังของดินที่วางบนลาดชัน (พิชัย ภัทรรัตนกุล, 2546)

2.14 กลไกการวิบัติของดินในแนวราบ

2.14.1 ทรายเดือด (Sand Boils)

ลิกวีแฟคชั่นมักจะมาพร้อมกับการเกิดขึ้นของทรายเดือด ระหว่าง และหลังจากการสั่นไหวจากแผ่นดินไหว แผ่นดินไหวจะทำให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินส่วนใหญ่กระจายไหลขึ้นไปด้านบนของช่องว่างน้ำ การไหลสร้างแรงกระทำขึ้นด้านบนให้อนุภาคดิน แรงเหล่านี้จะสามารถทำให้ดินด้านบนหลวม และทำให้อยู่ในสถานะที่มีโอกาสเกิดลิกวีแฟคชั่นในการเกิดแผ่นดินไหวในอนาคต (Youd, 1984) ถ้าลาดการไหลไปถึงค่าวิกฤต ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งจะตกลงสู่ศูนย์ และดินจะเปลี่ยนสถานะอย่างรวดเร็ว ในกรณีเช่นนี้ความเร็วน้ำอาจจะเพียงพอที่จะยกอนุภาคของดินให้ขึ้นไปบนพื้นผิว ในสนามสภาพดินจะไม่สม่ำเสมอทำให้การหนีออกของน้ำมีแนวโน้มที่จะไหลที่ความเร็วสูงผ่านรอยแตกหรือช่อง อนุภาคทรายสามารถออกมาตามช่องเหล่านี้ และพุ่งออกมาบนผิวดินในรูปแบบของทรายเดือด

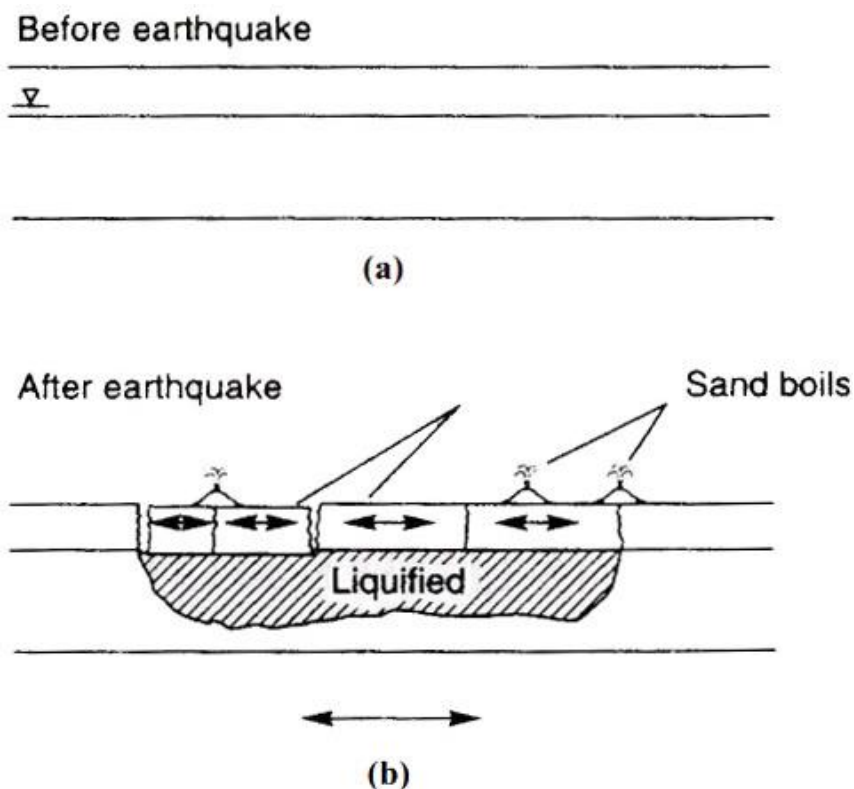
ทรายเดือดตัวมันเองมีความสำคัญทางด้านวิศวกรรมไม่มากนัก แต่เป็นตัวชี้วัดที่มีประโยชน์ของการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินสูง โต๊ะการสั่นสะเทือน (Liu และ Qiao, 1984) และเครื่องเหวี่ยง (Fiegel และ Kutter, 1992) ทดสอบได้แสดงให้เห็นถึง การระบายน้ำจากช่องว่างของชั้นที่หลวมสามารถสะสมอยู่ใต้ชั้นก่อนหน้านั้นน้อยลง และรูปร่างของน้ำในระหว่างชั้นแสดงดังรูปที่ 2.10 ทรายเดือดสามารถเกิดขึ้นเมื่อน้ำในระหว่างชั้นตัดผ่านขึ้นไปยังพื้นผิวดิน การถูกทำให้กระจายใหม่ของเม็ดดินยังมาพร้อมกับการก่อตัวของน้ำในระหว่างชั้น โดยเฉพาะในทรายการหายไปของน้ำแบบทันทีทันใดจะทำให้หลวมโดยน้ำจะไหลขึ้นไปหาระหว่างชั้น ถ้าเงื่อนไขดังกล่าวพัฒนาภายใต้พื้นผิวเอียง การปรากฏของน้ำในระหว่างชั้น และการลดลงของกำลังของทรายหลวมทันทีที่น้ำมันสามารถนำไปสู่การไหลของรูปร่างขนาดใหญ่



รูปที่ 2.11 การก่อดำของน้ำในระหว่างชั้นในการทดสอบโต๊ะสั่นสะเทือน (Liu และ Qiao, 1984)

2.14.2 การกวัดแกว่งของแผ่นดิน (Ground Oscillation)

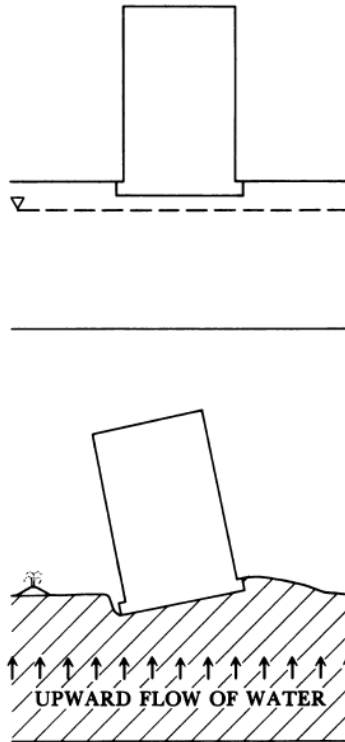
เมื่อลิควิแพคชันเกิดขึ้นที่ความลึกใต้พื้นผิวดิน ดินเหลวสามารถรอดออกมาได้ตามรอยแยกของแผ่นดินที่แตกออกมาเป็นชั้นๆ แสดงดังรูปที่ 2.12 โดยแยกรอยแยกสามารถเปิด และปิดได้ ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว คลื่นพื้นดินที่มีช่วงกว้างของคลื่นสูง สามารถตรวจพบการเกิดได้มากกว่า แต่สำหรับการเกิดการเคลื่อนถาวรจะมีขนาดเล็ก การทำนายช่วงกว้างของคลื่นที่ทำให้เกิดการกวัดแกว่งของแผ่นดินที่ระบุเฉพาะเจาะจงได้ยากมาก รายละเอียดยังไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์การตอบสนองพื้นดินสามารถให้ข้อมูลประมาณการดิบเท่านั้น



รูปที่ 2.12 การกวัดแกว่งของแผ่นพื้น: (a) ก่อนเกิดแผ่นดินไหว; (b) หลังเกิดแผ่นดินไหว (Youd, 1984)

2.14.3 การสูญเสียกำลังแบกทาน (Loss of Bearing Strength)

เมื่อดินที่รองรับอาคาร หรือสิ่งก่อสร้าง เกิดการเหลว และสูญเสียกำลัง การเคลื่อนตัวขนาดใหญ่สามารถเกิดขึ้นภายในดินซึ่งอาจจะทำให้โครงสร้างจม และเอียง ดังแสดงดังรูปที่ 2.13 ในทางกลับกันบ่อและเข็มที่อยู่ใต้ดินอาจจะโผล่ขึ้นมาผ่านดินเหลว ตัวอย่างเช่น หลายอาคารที่จม และเอียงในช่วงแผ่นดินไหวที่ญี่ปุ่นในปี 1964 การสูญเสียกำลังแบกทาน และทำให้ตึกเอียงได้ถึง 60 องศา ดังรูปที่ 2.14 เห็นได้ชัดว่าลิควิแฟชันในตอนแรกจะเกิดขึ้นในชั้นทรายด้านล่างใต้ชั้นผิวดิน จากนั้นจะกระจายขึ้นด้านบนผ่านชั้นทรายที่ทับอยู่ การเคลื่อนตัวของ การเกิดลิควิแฟชัน จะทำให้ดินที่รองรับอยู่อ่อนแอ และจะทำให้สิ่งก่อสร้างเกิดการจมและเอียงอย่างช้าๆ



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของโครงสร้างที่เอียงเนื่องจากการเสี้ยก้ำลึงแบกทาน ลิกวิแพคชั่นทำให้ดินอ่อนแอลดความสามารถในการรองรับของฐานรากที่รองรับโครงสร้างที่มีน้ำหนักมากทำให้จม และเอียง (Youd, 1984)



รูปที่ 2.14 การพลิกคว่ำของอาคารที่พักอาศัย, นิงาตะ (1964) (พิชัย ภัทรรัตนกุล, 2546)

2.14.4 การทรุดตัว และการยุบตัว (Subsidence and Settlement)

ในหลายกรณีน้ำหนักของโครงสร้างจะไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการยุบตัวที่สัมพันธ์กับความล้มเหลวจากการแบกทานของดิน ดังที่ได้อธิบายไปข้างต้น อย่างไรก็ตามการยุบตัวขนาดเล็กอาจจะก่อให้เกิดแรงดันน้ำในช่องว่างกระจายออกไป และดินเกิดการยุบตัวหลังจากการเกิดแผ่นดินไหว การทรุดตัวอาจทำให้เกิดอันตราย ถึงแม้ว่าพวกมันมีแนวโน้มที่ไม่มากเท่าการเกิดการเคลื่อนตัวขนาดใหญ่ที่มาพร้อมกับการวิบัติแบบไหล การเคลื่อนตัวออกทางด้านข้าง และการวิบัติจากกำลังแบกทาน การระเบิดของทรายเดือดเป็นอาการที่บ่งบอกของการเกิดลิควิแพคชันที่สามารถนำไปสู่การยุบตัวของดินในท้องถิ่นที่ไม่เท่ากัน

2.15 การวิเคราะห์โอกาสเกิดลิควิแพคชัน

2.15.1 ด้วยวิธีวัฏจักรความเค้น

ในการคำนวณ หรือประมาณ มีตัวแปรสองตัวที่ใช้ประเมินความต้านทานการเกิดลิควิแพคชันของดิน (1) แรงที่สั่นสะเทือนในชั้นดิน เรียกว่า Cyclic stress ratio (CSR) และ (2) ปริมาณความต้านทานการเกิดลิควิแพคชันของดิน เรียกว่า Cyclic resistance ratio (CRR)

1. Cyclic stress ratio (CSR) สามารถคำนวณโดยใช้สมการของ Seed และ Idriss (1971) ดังสมการที่ 2.4 และหาค่า r_d ได้จากสมการของ Liao และ Whitman (1986a) ดังสมการที่ 2.5

$$CSR = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{\max}}{g} r_d \quad (2.4)$$

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \text{ for } z \leq 9.15 \text{ m} \quad (2.5a)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \text{ for } 9.15 \leq z \leq 23 \text{ m} \quad (2.5b)$$

โดยที่ a_{\max} คือค่าอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินตามแนวราบ, m/s^2
 g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2
 σ_v คือความเค้นรวม
 σ'_v คือความเค้นประสิทธิผลตามแนวตั้ง

r_d คือค่าสัมประสิทธิ์ลดค่าความเค้น

z คือความลึกใต้พื้นผิวดินถึงจุดที่พิจารณา, m

2. Cyclic resistance ratio (CRR) สามารถคำนวณค่า CRR ได้ดังสมการที่ 2.6 โดยที่ค่า $CRR_{7.5}$ อ่านกราฟจากรูปที่ 2.15 จากค่าปรับแก้ของ SPT N-value, $(N_1)_{60}$ ดังสมการที่ 2.7 กับค่าของ Percent Fines ที่ 5%, 15% และ 35% ตามลำดับ โดยต้องเป็นแผ่นดินไหวขนาด $M_w = 7.5$ ริคเตอร์เท่านั้น จึงต้องปรับแก้ด้วย Magnitude scaling factors (MSF) ได้จากสมการของ Youd และ Idriss (1997) ดังสมการที่ 2.8 และปรับแก้เนื่องจากผลของความเค้นที่กระทำโดยรอบ (K_σ) ได้จากกราฟของ Seed และ Harder (1990) ดังรูปที่ 2.16

$$CRR = CRR_{7.5} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (2.6)$$

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \quad (2.7)$$

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56} \quad (2.8)$$

โดยที่

MSF คือค่าปรับแก้เนื่องจากขนาดของแผ่นดินไหว

K_σ คือค่าปรับแก้เนื่องจากผลของความเค้นที่กระทำโดยรอบ

N_m คือค่าการตอกที่วัดได้, Blows/ft

C_N คือค่าปรับแก้ของ overburden stress

$$= \sqrt{\frac{10}{\sigma'_{vo}}} \leq 1.7 \text{ for } \sigma'_{vo} \leq 20 \text{ t/m}^2 \text{ (Liao และ Whitman, 1986b)}$$

$$= \frac{2.2}{\left(1.2 + \frac{\sigma'_{vo}}{10} \right)} \leq 1.7 \text{ for } 20 \leq \sigma'_{vo} \leq 30 \text{ t/m}^2 \text{ (Kayen, Mitchell และคณะ, 1992)}$$

C_E คือค่าปรับแก้สำหรับ Hammer energy ratio(ER)

= 0.5-1.0 for donut hammer

= 0.7-1.2 for safety hammer

C_B คือค่าปรับแก้สำหรับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลุมเจาะ

= 1.0 for 65 to 115 mm

= 1.05 for 150 mm

= 1.15 for 200 mm

C_R คือค่าปรับแก้สำหรับ Rod length

= 0.75 for up to 3 m of drill rods

= 0.8 for 3 to 4 m of drill rods

= 0.85 for 4 to 6 m of drill rods

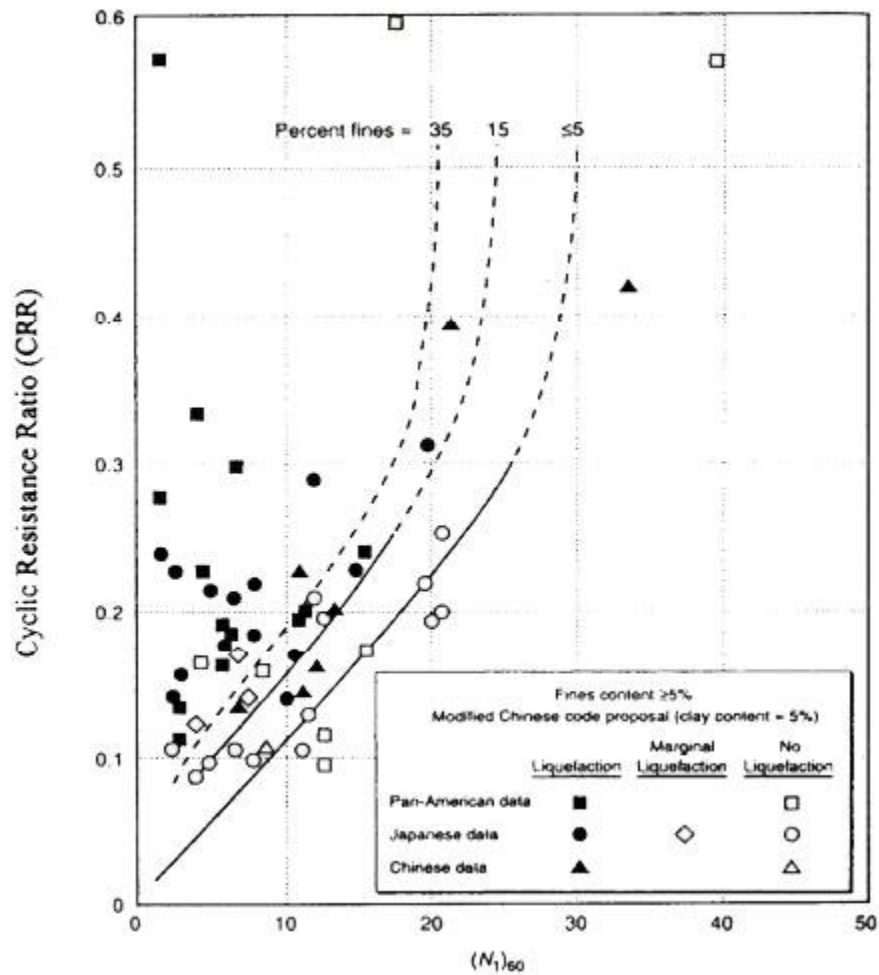
= 0.95 for 6 to 10 m of drill rods

= 1.0 for excess 10 m of drill rods

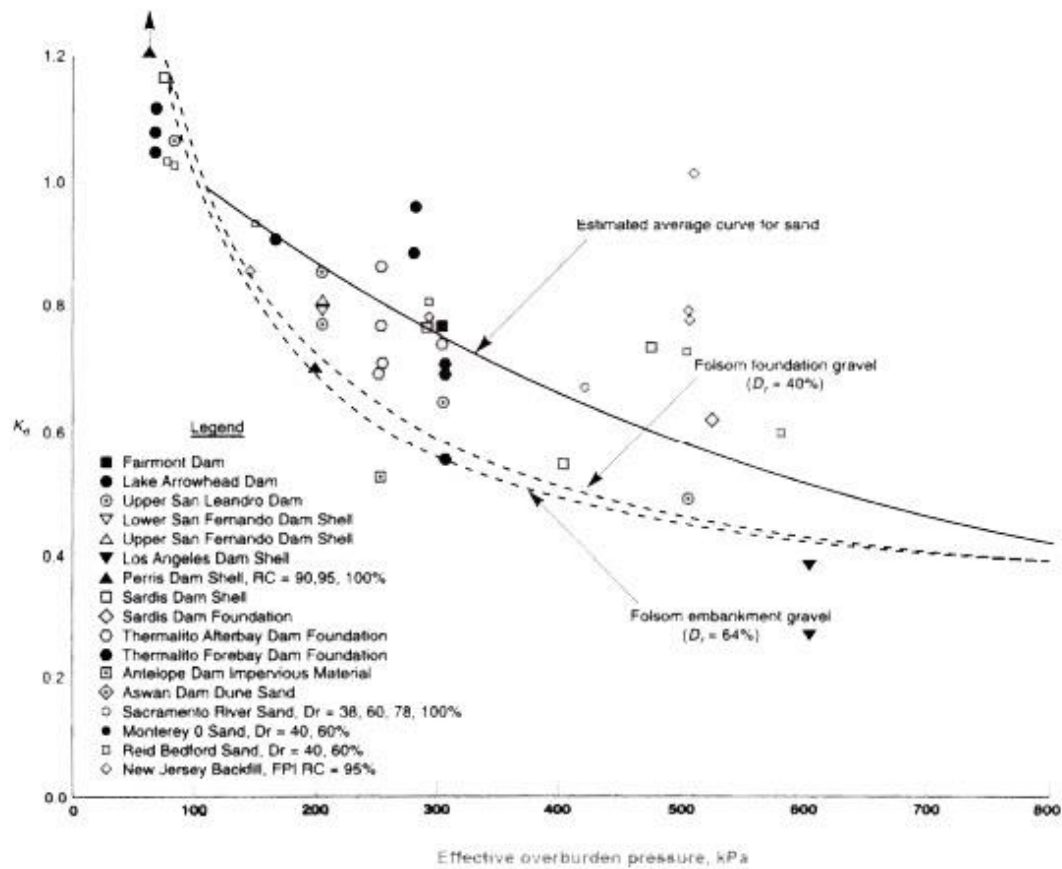
C_s คือค่าปรับแก้สำหรับ Samplers with or without liners

= 1.0 for standard sampler

= 1.1-1.3 for sampler without liner



รูปที่ 2.15 กราฟใช้สำหรับหาค่า CRR สำหรับแผ่นดินไหวขนาด $M = 7.5$ (Seed, Tokimatsu และ คณะ, 1985)



รูปที่ 2.16 ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของความเค้นที่กระทำโดยรอบ (Seed และ Harder, 1990)

ค่าสัดส่วนความปลอดภัยต้านทานการเกิดลิกวิแฟคชันหาได้จากอัตราส่วนของ CRR ต่อ CSR ดังสมการที่ 2.9 จากสมการเห็นได้ว่าถ้าค่า CSR ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดินมีค่ามากกว่า CRR ก็จะทำให้ F.S. มีค่าน้อยกว่า 1.0 ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่าชั้นทรายชั้นนั้นมีโอกาสเสี่ยงสูงที่จะเกิดลิกวิแฟคชัน

$$F.S. = \left(\frac{CRR}{CSR} \right) \quad (2.9)$$

2.15.2 ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ FLIP

Finite element analysis of liquefaction program (FLIP) ใช้สำหรับการวิเคราะห์การเกิดขึ้นของแรงดันน้ำในช่องว่าง ตัวโปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นโดย Morita, Iai และคณะ (1997) ประเทศญี่ปุ่น โดยจะใช้ระหว่างข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว และข้อมูลชั้นดิน โดยโปรแกรมจะทำการหา

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 2.3 เพื่อนำไปวิเคราะห์จากค่า SPT N-values โดยวิธี Simplified method แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย Strain space plasticity theory เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล

ตารางที่ 2.3 โมเดลพารามิเตอร์ของโปรแกรม FLIP (Morita, Iai และคณะ, 1997)

Classification	Model Parameter	
Characteristic of Dynamic Deformation	G_{ma}	Elastic shear modulus
	K_{ma}	Bulk modulus
	ϕ_f	Friction angle
	h_{max}	Hysteretic damping
Characteristic of Liquefaction	ϕ_p	Phase transformation angle
	w_1	Material parameters which characterize the cyclic mobility of the cohesionless soil
	p_1	
	p_2	
	c_1	
S_1		

2.16 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พิชัย ภัทรรัตนกุล (2546) ได้ทำการศึกษาเรื่องกำลังต้านทานการเกิดสภาวะลิกวิแฟคชันของชั้นดินทรายในภาคเหนือ เนื่องจากพื้นที่ในแถบจังหวัดทางภาคเหนือของประเทศไทย เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยต่อแผ่นดินไหวในระดับปานกลาง และจากการสำรวจทางธรณีวิทยา พบว่ารอยเลื่อนหลายๆ รอยเลื่อน ในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทย เป็นรอยเลื่อนที่มีพลัง ซึ่งเป็นไปได้ว่ารอยเลื่อนที่พบเหล่านี้ จะสามารถทำให้เกิดแผ่นดินไหวขนาด 5.5 ถึง 6.5 ริกเตอร์ แม้ว่าได้มีการประกาศให้อาคารหรือสิ่งก่อสร้าง ในพื้นที่ทางภาคเหนือและภาคตะวันตก ต้องทำการออกแบบต้านแรงแผ่นดินไหวตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 แต่ไม่ค่อยได้รับความสนใจ เนื่องจากวิศวกรส่วนใหญ่ยังขาดพื้น

ฐานความรู้ทางด้านพลศาสตร์ โดยเฉพาะพลศาสตร์ของดิน จากข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินที่รวบรวมได้ในจังหวัดเชียงใหม่และเชียงราย พบว่าชั้นดินส่วนใหญ่ ประกอบด้วยชั้นทรายหลวมถึงแน่นปานกลาง กระจายอยู่ในระดับที่มีความลึกไม่มาก และมี SPT N-value ที่ปรับแก้แล้วประมาณ 5-20 ครั้งต่อฟุต ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินดังกล่าว และแบบจำลองทางสถิติซึ่งได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดลิควิแพคชั่นที่รวบรวมจากทั่วโลก จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้ จะถูกเสนอในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดลิควิแพคชั่น แรงดันน้ำส่วนเกิน และความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน เพื่อใช้ประเมินความเสี่ยงและกำลังต้านทานการเกิดสภาวะลิควิแพคชั่นของชั้นดินทรายในจังหวัดเชียงใหม่และเชียงราย

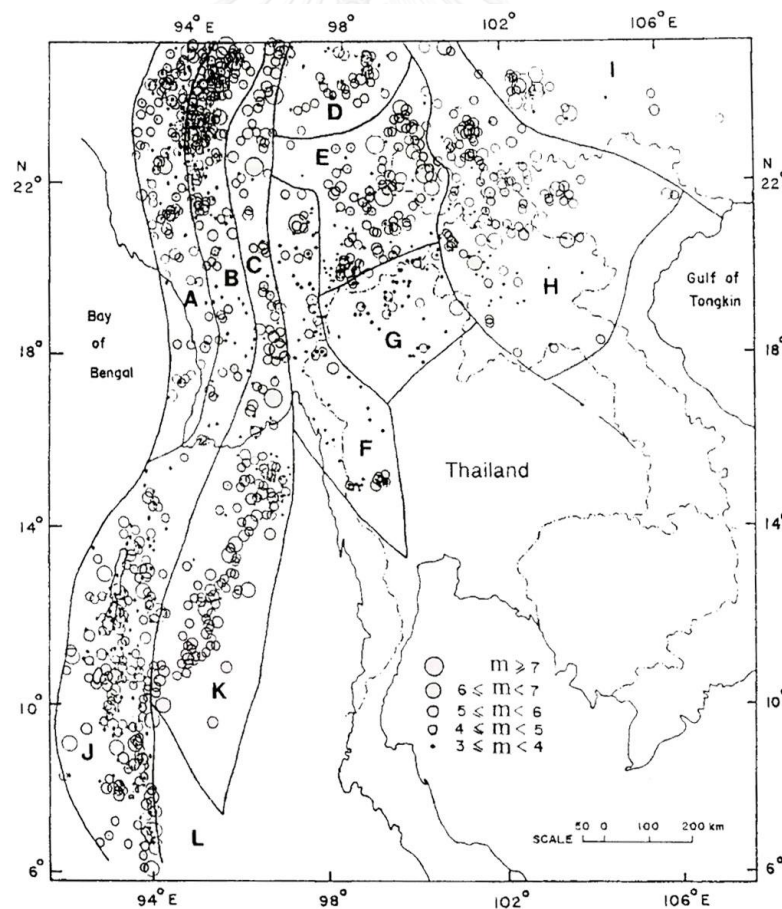
บุญชัย อุกฤษฏาชน และธวัชชัย สังขะวิไล (2547) ได้วิเคราะห์โอกาสการเกิด Liquefaction สำหรับชั้นทรายกรุงเทพฯ ชั้นแรก วัตถุประสงค์เพื่อที่จะประมาณหาค่าสัดส่วนความปลอดภัยสำหรับการเกิด Liquefaction ของชั้นทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ อันเนื่องมาจากแรงกระทำจากแผ่นดินไหว การวิเคราะห์ที่ใช้ข้อมูลจากการทดสอบ SPT (Standard penetration test) และสูตรปรับปรุงล่าสุดจากการประชุม NCEER (1996) และ NCEER/NSF (1998) พารามิเตอร์หลักในการศึกษานี้ประกอบด้วย ค่า SPT ของชั้นทราย ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน และผลของการสูบน้ำบาดาล กรณี SPT เท่ากับ 25 ครั้ง/ฟุต และอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน 0.015g – 0.050g สำหรับระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ -2.0 เมตรจากผิวดิน ค่าสัดส่วนความปลอดภัยด้านการเกิด Liquefaction มีค่าอยู่ประมาณ 3.3–11.9 สำหรับชั้นทรายชั้นที่ 1 ที่ระดับความลึก -32.0 เมตร ผลของการสูบน้ำบาดาลทำให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยด้านการเกิด Liquefaction มีค่าสูงขึ้น คือ 3.7-12.2 เนื่องมาจากผลของการเพิ่มของความเค้นประสิทธิผล

สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ และเจษฎา เฟื่องอักษร (2556) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากแผ่นดินไหวขนาด 6.8 มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ประเทศพม่า เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2554 โดยสามารถวัดความเร่งได้ 0.2g ที่สถานีแม่สาย จังหวัดเชียงรายที่อยู่ห่างออกมา 30 กิโลเมตรจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว โดยลักษณะชั้นดินของแม่สาย จะประกอบไปด้วยชั้นทรายหลวมถึงหนาแน่นปานกลางซึ่งเกิดลิควิแพคชั่นตรวจพบได้ในวงกว้าง ได้ทำการประเมินความน่าจะเป็นของลิควิแพคชั่นที่อาจจะเกิดขึ้น พบว่าในชั้นทรายแม่สายมีโอกาสสูงมากที่จะเกิดการเหลว ตั้งแต่ 75-95% ของโอกาสการเกิดลิควิแพคชั่น แหล่งที่พบการเกิดตั้งอยู่ห่างออกไปจากตัวเมืองแม่สาย ทำให้ผลกระทบมีไม่มากนัก ปรากฏการณ์ลิควิแพคชั่นได้ถูกบันทึกว่าเป็นครั้งแรกที่มีการเกิดลิควิแพคชั่นขึ้นในประเทศไทย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว

ประเทศไทยตั้งอยู่ภายในแผ่นธรณียูราเซีย (Eurasian plate) ที่ติดกับแผ่นแผ่นธรณีพม่า (Burma microplate) และแผ่นธรณีอินเดีย (India plate) ที่อยู่ทางด้านซีกตะวันตก ฝั่งทะเลอันดามัน (Nuttalaya, Sodsri และคณะ, 1985) ได้เก็บรวบรวมข้อมูลแผ่นดินไหว ตั้งแต่ปี 1910 - 1989 ที่มีขอบเขตอยู่ภายในละติจูดที่ 5 - 25 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 90 - 110 องศาตะวันออก ซึ่งจะประกอบด้วยประเทศไทย อินโดนีเซีย บางส่วนของพม่าและจีน ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 12 พื้นที่ ตั้งแต่ A - L ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะแบ่งจากการกระจายตัวของแผ่นดินไหว โดยตารางที่ 3.1 จะแสดงถึงการประมาณค่าขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดในแต่ละพื้นที่

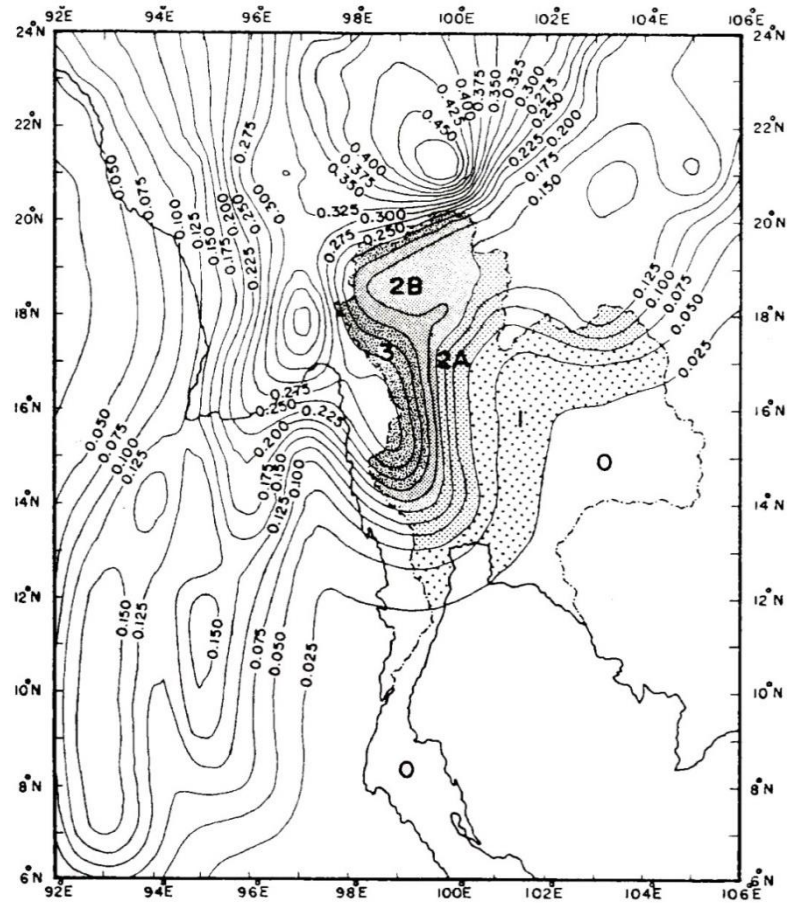


รูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยและบริเวณข้างเคียง (Nuttalaya, Sodsri และคณะ, 1985)

ตารางที่ 3.1 ค่าขนาดแผ่นดินไหวสูงสุดโดยการประมาณอิงจากตามพื้นที่ A-K (Nuttalaya, Sodsri และคณะ, 1985) และปรับปรุงโดย (Warnitchai และLisantonno, 1996)

พื้นที่	ชื่อ	ค่าขนาดสูงสุด M_L
A	Arakan Coastal Area	6.75
B	West-Central Burma Basin	7.40
C	East-Central Burma Basin	7.75
D	Bhamo-Paoshan Area	5.96
E	Burma Eastern Highlands	7.30
F	Tenasserim Range	7.90
G	Northern Thailand	6.50
H	North Indochina	6.75
I	South Yunnan-Kwangsi	8.38
J	Andaman Arc	7.20
K	Andaman Basin	6.50

(Warnitchai และLisantonno, 1996) ได้ทำแผนที่ภัยพิบัติของประเทศไทยแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งคำนวณจากโอกาสการเกิด 10% ในรอบ 50 ปี โดยจะแสดงให้เห็นถึงค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน เห็นได้ว่าประเทศไทยจะแบ่งจุดวิกฤตออกได้เป็นหลายพื้นที่ โดยจะแบ่งเป็นช่วงของ PGA ดังตารางที่ 3.2

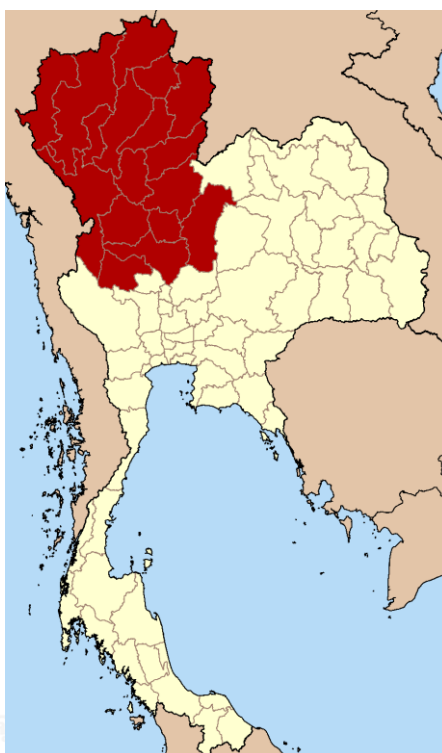


รูปที่ 3.2 แผนที่แสดงเส้นระดับค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด โดยคิดจากโอกาส 10% ในรอบ 50 ปี
(Warnitchai และ Lisantono, 1996)

ตารางที่ 3.2 ค่าความเร่งพื้นดินสูงสุด โดยการประมาณอิงจากตามพื้นที่ 0-4 (Warnitchai และ Lisantono, 1996)

พื้นที่	ค่า PGA
0	<0.025g
1	0.025g-0.075g
2A	0.075g-0.15g
2B	0.15g-0.2g
3	0.2g-0.3g
4	>0.3g

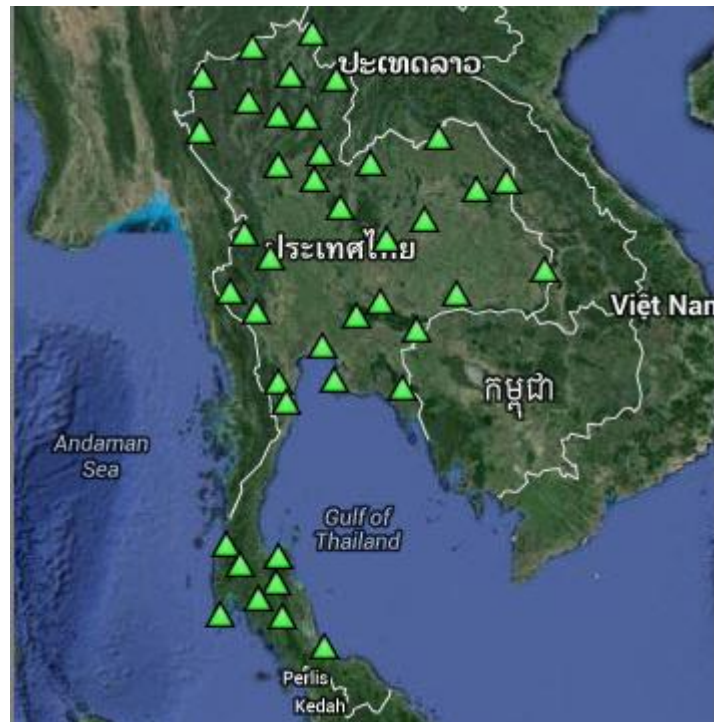
ภาคเหนือของประเทศไทยประกอบไปด้วยจังหวัดทั้งหมด 17 จังหวัดแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 93,690 ตารางกิโลเมตร มีลักษณะภูมิประเทศเป็นเทือกเขา พื้นที่ทางด้านตะวันตกจะสูงกว่าด้านตะวันออก พื้นที่ส่วนใหญ่จะลาดลงมาทางด้านทิศใต้ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแม่น้ำที่สำคัญ โดยมีชายแดนติดกับประเทศพม่า และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว จังหวัดที่มีขนาดใหญ่ที่สุด คือจังหวัดเชียงใหม่มีพื้นที่ 22,800 ตารางกิโลเมตร



รูปที่ 3.3 ภาคเหนือของประเทศไทย

3.2 ข้อมูลแผ่นดินไหว

ข้อมูลแผ่นดินไหว ได้มาจากการเก็บข้อมูลจากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว และสถานีตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดิน จากเครื่องมือวัดความเร็วอนุภาคดิน (Seismometer) และเครื่องมือตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดิน (Accelerometer) สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา มีสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวกระจายอยู่ทั่วประเทศ ดังรูปที่ 3.4 และสถานีตรวจวัดอัตราเร่งของพื้นดิน ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งสถานีตรวรวัดแผ่นดินไหว (สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557)

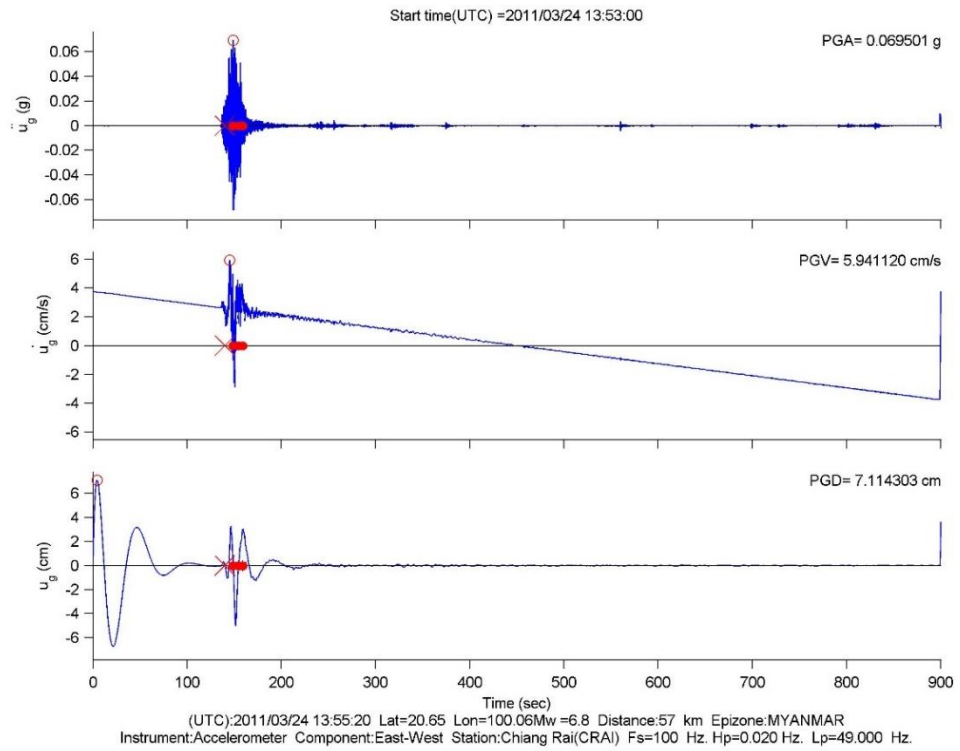


รูปที่ 3.5 ตำแหน่งสถานีตรวรวัดอัตราเร่งของพื้นดิน (สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557)

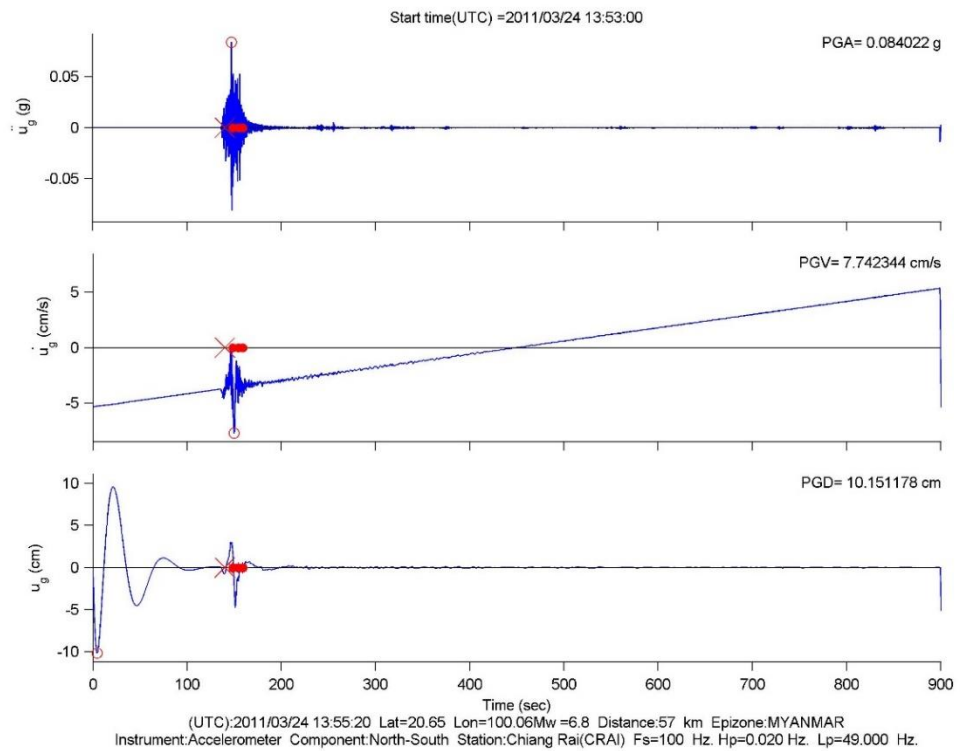
โดยข้อมูลแผ่นดินไหวที่ทำการตรวจวัดได้จากสถานีตรวจวัดที่เลือกมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์คือข้อมูลแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่ประเทศพม่า ในวันที่ 24 มีนาคม 2554 และตรวจวัดได้ที่สถานีต่างๆ ดังตารางที่ 3.3 เพื่อนำไปวิเคราะห์โดยพิจารณาจากค่า PGA ตัวอย่างดังรูปที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 ซึ่งจะตรวจวัดทั้งค่าความเร่ง ความเร็ว และระยะเคลื่อนตัวของพื้นดิน โดยจะทำการตรวจวัดทั้งสามแกน

ตารางที่ 3.3 รายชื่อสถานีตรวจวัดที่นำมาวิเคราะห์

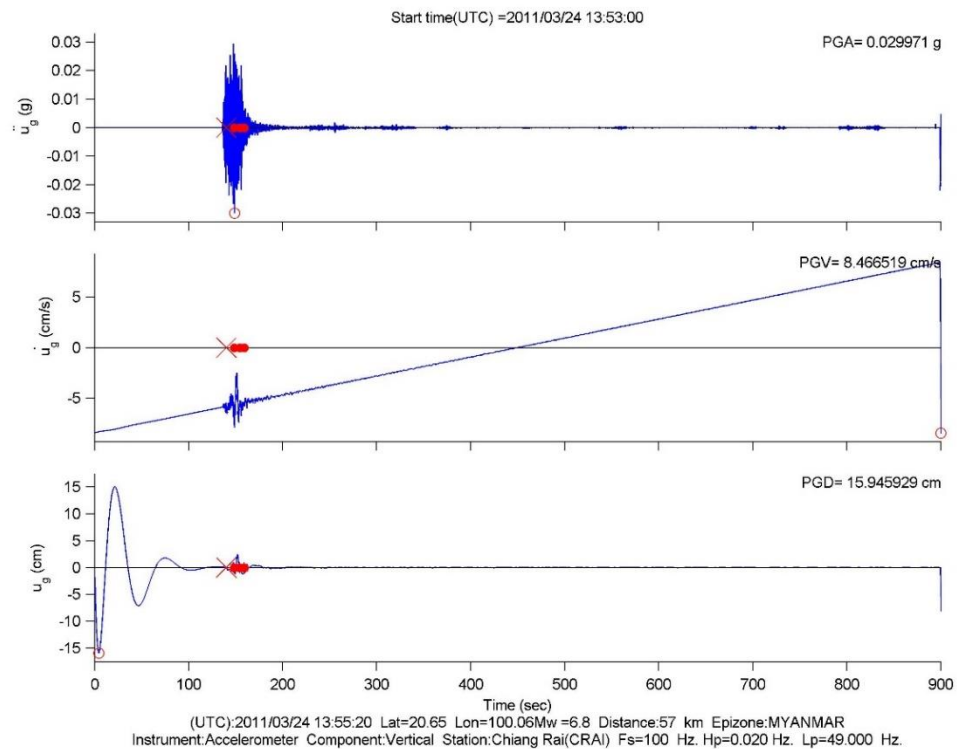
ตัวย่อสถานี	จังหวัด	PGA East-West (g)	PGA North-South (g)	PGA Vertical (g)
CRAI	เชียงราย	0.069501	0.084022	0.029971
CMMT	เชียงใหม่	0.002207	0.001697	0.002469
MHIT	แม่ฮ่องสอน	0.007466	0.006863	0.003398
LAMP	ลำปาง	0.003579	0.002897	0.00219
UMPA	ตาก	0.000682	0.000601	0.000555
UTHA	อุทัยธานี	0.000111	0.000000	0.000081
NAN	น่าน	0.00251	0.002437	0.001523
PAYA	พะเยา	0.013487	0.018193	0.009899
UTTA	อุตรดิตถ์	0.001334	0.000594	0.000733
PHIT	พิษณุโลก	0.001369	0.001056	0.00111
SUKH	สุโขทัย	0.001192	0.000774	0.000839
PHRA	แพร่	0.081613	0.084267	0.086194



รูปที่ 3.6 กราฟที่ได้จากการตรวจวัดในแนวตะวันออก-ตะวันตก จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 3.7 กราฟที่ได้จากการตรวจวัดในแนวเหนือ-ใต้ จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 3.8 กราฟที่ได้จากการตรวจวัดในแนวตั้ง จังหวัดเชียงราย

3.3 ข้อมูลสภาพชั้นดิน

ข้อมูลสภาพดินใช้ข้อมูลดินจากข้อมูลหลุมเจาะของทั้ง 17 จังหวัดในบริเวณภาคเหนือ ซึ่งมาจากแหล่งต่างๆ รวมถึงที่ได้มาจากการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินทั่วประเทศ ของกรมโยธาธิการและผังเมือง ซึ่งค่าที่ต้องการของข้อมูลหลุมเจาะประกอบด้วย ค่า SPT, Unit weight และ %Finer ตัวอย่างดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะทำการสุ่มเลือกหลุมเจาะขึ้นมาในแต่ละจังหวัดทั้ง 17 จังหวัด ดังตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.10 โดยจะทำการสมมติระดับน้ำอยู่ที่ระดับผิวดิน เนื่องจากลักษณะของชั้นดินในภาคเหนือจะเป็นทรายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำได้รวดเร็ว

DEPTH (m.)		SAMPLE TYPE	GROUP SYMBOL	ATTERBERG'S LIMITS (%)			MC. %	UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH ksc.		POCKET PENETROMETER TEST ksc.		UNIT WEIGHT γ	SPT Blow/ft	TORVANE SHEAR TEST ksc.			DIRECT SHEAR TEST ksc.		GRAIN SIZE ANALYSIS (% Finer)	
FORM	TO	No.		LL	PL	PI		Q _u	Q _{v/2}	UP	UP/2	γ _t	N ₆₀	PS	RS _v	ST	C (ksc.)	φ (°)	No. 4	No. 200
0.00	1.50	PA																		
1.50	1.95	SS-1	CL	-	NP	-	9.80	-	-	-	-	1.67	9						95.21	14.86
3.00	3.45	SS-2	CL	-	NP	-	14.88	-	-	-	-	1.88	8						76.06	6.78
4.50	4.95	SS-3	CL	-	NP	-	17.57	-	-	-	-	1.79	7						92.84	5.28
6.00	6.45	SS-4	CL	-	NP	-	20.36	-	-	-	-	1.60	3						89.93	5.88
7.50	7.95	SS-5	CL	-	NP	-	11.24	-	-	-	-	1.87	24						52.70	4.34
9.00	9.45	SS-6	CL	-	NP	-	17.86	-	-	-	-	1.75	22						96.79	4.58
10.50	10.95	SS-7	CL	-	NP	-	13.14	-	-	-	-	1.74	20					32°	88.43	8.84
12.00	12.45	SS-8	SM	-	NP	-	9.83	-	-	-	-	1.77	24						73.43	15.60
13.50	13.95	SS-9	SW-SM	-	NP	-	16.37	-	-	-	-	1.70	19						91.12	16.41
15.00	15.45	SS-10	SP-SM	-	NP	-	15.40	-	-	-	-	1.84	40						98.81	16.26
16.50	16.95	SS-11	CL	-	NP	-	10.30	-	-	-	-	1.91	37						62.10	8.36
18.00	18.45	SS-12	SM	-	NP	-	15.27	-	-	-	-	1.97	34						91.97	9.87
19.50	19.95	SS-13	SM	-	NP	-	18.25	-	-	-	-	1.94	28						92.17	15.87
21.00	21.45	SS-14	SM	-	NP	-	14.80	-	-	-	-	1.99	30						96.75	12.72
22.50	22.95	SS-15	SM	-	NP	-	13.90	-	-	-	-	1.93	30						89.69	9.94
END OF BORING																				

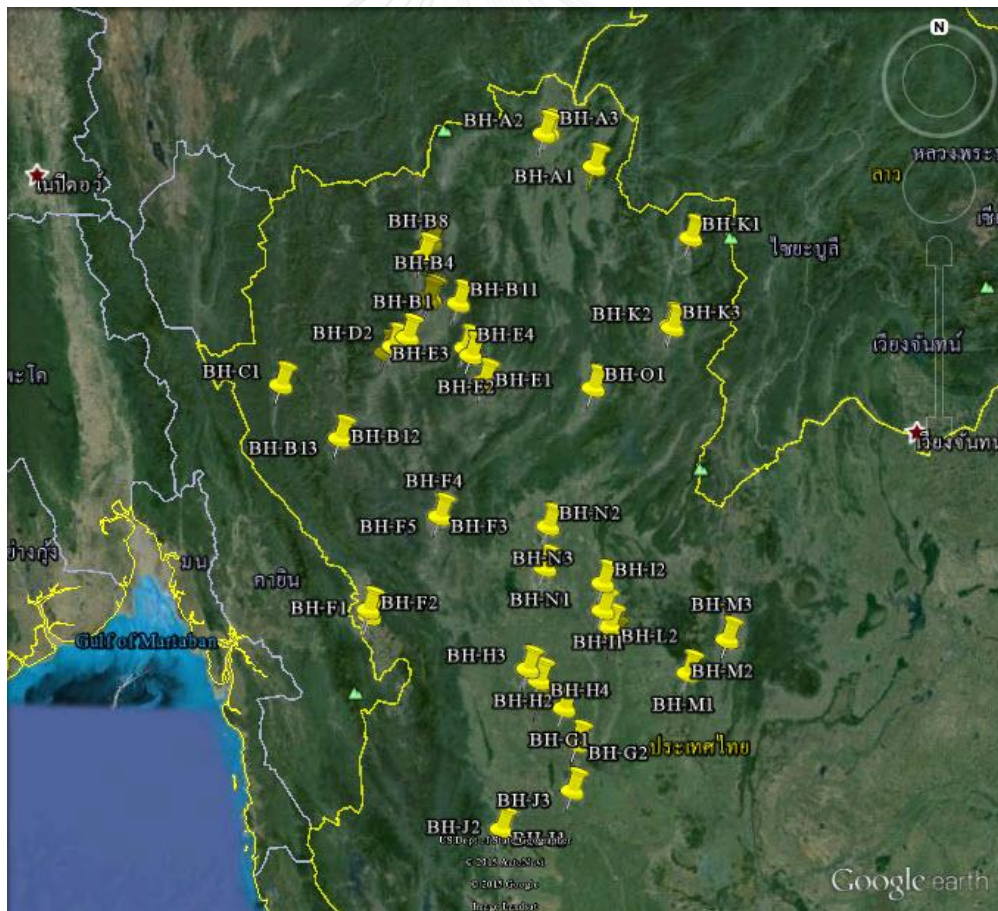
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างข้อมูลหลุมเจาะ (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2557)

ตารางที่ 3.4 รายชื่อตำแหน่งหลุมเจาะที่นำมาวิเคราะห์

ลำดับ	หลุมเจาะ	จังหวัด	อำเภอ	Latitude N	Longitude E
1	BH-A1	เชียงราย	เทิง	19.681	100.198
2	BH-A2	เชียงราย	เมือง	19.909	99.832
3	BH-A3	เชียงราย	เมือง	19.924	99.863
4	BH-B1	เชียงใหม่	ดอยหล่อ	18.495	98.844
5	BH-B2	เชียงใหม่	เมือง	18.746	98.985
6	BH-B3	เชียงใหม่	เมือง	18.768	99.002
7	BH-B4	เชียงใหม่	เมือง	18.763	99.003
8	BH-B5	เชียงใหม่	เมือง	18.771	99.002
9	BH-B6	เชียงใหม่	เมือง	18.774	99.003
10	BH-B7	เชียงใหม่	เมือง	18.784	99.004
11	BH-B8	เชียงใหม่	แม่แตง	19.053	98.954
12	BH-B9	เชียงใหม่	แม่แตง	19.159	99.011

13	BH-B10	เชียงใหม่	แม่แตง	19.148	99.008
14	BH-B11	เชียงใหม่	สันกำแพง	18.730	99.212
15	BH-B12	เชียงใหม่	อมก๋อย	17.797	98.360
16	BH-B13	เชียงใหม่	อมก๋อย	17.797	98.358
17	BH-B14	เชียงใหม่	จอมทอง	18.386	98.687
18	BH-C1	แม่ฮ่องสอน	แม่สะเรียง	18.161	97.927
19	BH-D1	ลำพูน	กิ่งอำเภอเวียงหนอง	18.432	98.741
20	BH-D2	ลำพูน	กิ่งอำเภอเวียงหนอง	18.431	98.743
21	BH-E1	ลำปาง	เกาะคา	18.190	99.397
22	BH-E2	ลำปาง	ห้างฉัตร	18.372	99.304
23	BH-E3	ลำปาง	ห้างฉัตร	18.372	99.304
24	BH-E4	ลำปาง	ห้างฉัตร	18.422	99.266
25	BH-F1	ตาก	แม่สอด	16.621	98.574
26	BH-F2	ตาก	แม่สอด	16.578	98.584
27	BH-F3	ตาก	สามเงา	17.267	99.083
28	BH-F4	ตาก	สามเงา	17.267	99.083
29	BH-F5	ตาก	สามเงา	17.264	99.077
30	BH-G1	นครสวรรค์	บรรพตพิสัย	15.947	99.980
31	BH-G2	นครสวรรค์	เมือง	15.703	100.074
32	BH-G3	นครสวรรค์	เมือง	15.701	100.073
33	BH-H1	กำแพงเพชร	ขาณุวรลักษบุรี	15.998	99.806
34	BH-H2	กำแพงเพชร	คลองขลุง	16.217	99.720
35	BH-H3	กำแพงเพชร	คลองขลุง	16.220	99.720
36	BH-H4	กำแพงเพชร	คลองขลุง	16.139	99.801
37	BH-I1	พิษณุโลก	บางกระทุ่ม	16.623	100.258
38	BH-I2	พิษณุโลก	เมือง	16.811	100.257
39	BH-J1	อุทัยธานี	บ้านไร่	15.103	99.533
40	BH-J2	อุทัยธานี	บ้านไร่	15.103	99.533
41	BH-J3	อุทัยธานี	เมือง	15.372	100.042
42	BH-K1	น่าน	ปัว	19.188	100.902

43	BH-K2	น่าน	เวียงสา	18.565	100.762
44	BH-K3	น่าน	เวียงสา	18.578	100.750
45	BH-L1	พิจิตร	เมือง	16.432	100.332
46	BH-L2	พิจิตร	เมือง	16.514	100.305
47	BH-M1	เพชรบูรณ์	ชนแดน	16.187	100.871
48	BH-M2	เพชรบูรณ์	เมือง	16.416	101.153
49	BH-M3	เพชรบูรณ์	เมือง	16.416	101.153
50	BH-N1	สุโขทัย	เมือง	16.916	99.841
51	BH-N2	สุโขทัย	ศรีสำโรง	17.199	99.861
52	BH-N3	สุโขทัย	สวรรคโลก	17.200	99.863
53	BH-O1	แพร่	เมือง	18.150	100.187



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของข้อมูลหลุมเจาะที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากได้ข้อมูลแผ่นดินไหว และข้อมูลตัวอย่างหลุมเจาะครบถ้วนแล้ว จึงนำข้อมูลไปทำการเตรียมไฟล์ในการป้อนข้อมูลเพื่อให้โปรแกรมได้ทำการคำนวณดังต่อไปนี้

3.4.1 นำข้อมูลแผ่นดินไหวในวันที่ 24 มีนาคม 2554 มาเลือกช่วงข้อมูลดิบขณะเกิดแผ่นดินไหวเพียง 4000 ค่า ในแต่ละแกน เพื่อนำมาสร้างไฟล์ในการป้อนข้อมูลแผ่นดินไหว

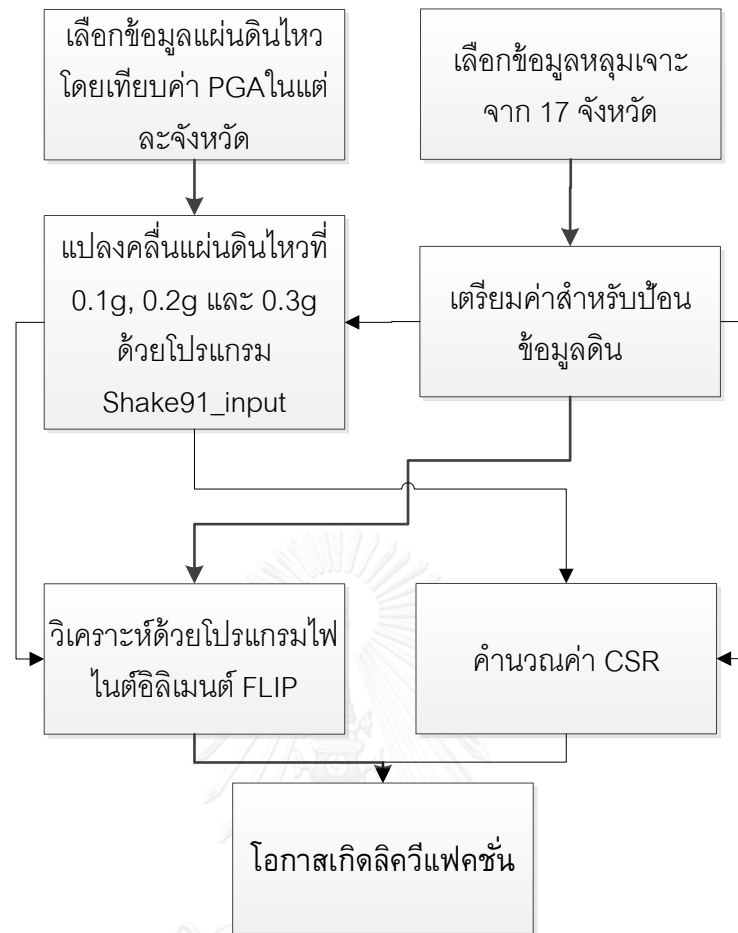
3.4.2 ทำการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวจากคลื่นผิวดินเป็นคลื่นที่ระดับล่างสุดของกันหลุมด้วย Shake91_input โดยทำการแปลงคลื่นผิวดินเป็น 0.1g, 0.2g และ 0.3g

3.4.3 นำข้อมูลหลุมเจาะทั้ง 17 จังหวัดมาสร้างไฟล์ในการป้อนข้อมูลในแต่ละจังหวัด ซึ่งจะแบ่งเป็นชั้นดินต่างๆ เพื่อป้อนคุณสมบัติของดิน

3.4.4 นำไปคำนวณอัตราส่วนแรงดันน้ำในดินกับค่าความเค้นประสิทธิผล ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (FLIP) ในแต่ละข้อมูลหลุมเจาะ

3.4.5 คำนวณค่า CSR ในแต่ละข้อมูลหลุมเจาะ ด้วยวิธีวิจักรความเค้น

3.4.6 นำข้อมูลอัตราส่วนแรงดันน้ำในดินกับค่าความเค้นประสิทธิผล มาวิเคราะห์โอกาสเกิดลิควิแฟคชัน



รูปที่ 3.11 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูล

บทที่ 4 ผลการวิจัย

จากข้อมูลลักษณะชั้นดิน ทั้ง 17 จังหวัด ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุด 0.1g, 0.2g และ 0.3g โดยใช้อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผลเป็นเกณฑ์ โดยที่ค่าอัตราส่วนจะบอกถึงร้อยละของการเกิดลิควิแฟคชัน

4.1 อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล

จากข้อมูลชั้นดินเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FLIP แล้วจะนำเฉพาะอัตราส่วนแรงดันน้ำที่มากที่สุดมาเพียงหลุมละหนึ่งค่า โดยจะทำการวิเคราะห์ด้วยค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.1g, 0.2g และ 0.3g ได้ผลดังตารางที่ 4.1 ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล หากมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าเกิดลิควิแฟคชันโดยสมบูรณ์ หรือเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การเกิด คือ 100%

ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราส่วนแรงดันน้ำที่มากที่สุด ที่ความเร่งพื้นผิวสูงสุดต่างกัน

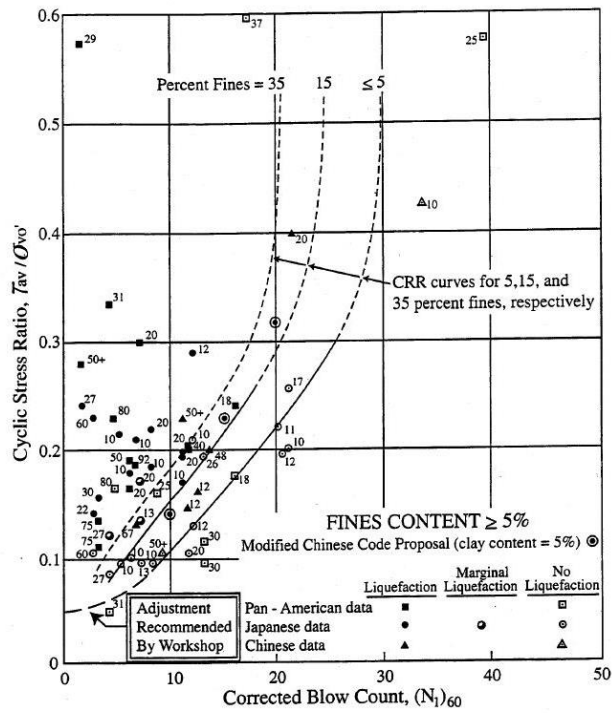
ลำดับ	หลุมเจาะ	จังหวัด	PGA		
			0.1g	0.2g	0.3g
1	BH-A1	เชียงราย	0.248	0.741	0.832
2	BH-A2	เชียงราย	0.118	0.165	0.191
3	BH-A3	เชียงราย	0.737	0.936	0.961
4	BH-B1	เชียงใหม่	0.388	0.867	0.920
5	BH-B2	เชียงใหม่	0.945	0.980	0.986
6	BH-B3	เชียงใหม่	0.365	0.840	0.903
7	BH-B4	เชียงใหม่	0.336	0.924	0.958
8	BH-B5	เชียงใหม่	0.898	0.966	0.979
9	BH-B6	เชียงใหม่	0.128	0.491	0.661
10	BH-B7	เชียงใหม่	0.124	0.230	0.476
11	BH-B8	เชียงใหม่	0.979	0.989	0.991

12	BH-B9	เชียงใหม่	0.943	0.980	0.986
13	BH-B10	เชียงใหม่	0.981	0.990	0.992
14	BH-B11	เชียงใหม่	0.023	0.069	0.168
15	BH-B12	เชียงใหม่	0.822	0.941	0.961
16	BH-B13	เชียงใหม่	0.987	0.992	0.993
17	BH-B14	เชียงใหม่	0.980	0.990	0.992
18	BH-C1	แม่ฮ่องสอน	0.018	0.045	0.083
19	BH-D1	ลำพูน	0.007	0.011	0.021
20	BH-D2	ลำพูน	0.011	0.025	0.046
21	BH-E1	ลำปาง	0.084	0.704	0.974
22	BH-E2	ลำปาง	0.030	0.085	0.173
23	BH-E3	ลำปาง	0.011	0.025	0.048
24	BH-E4	ลำปาง	0.008	0.015	0.026
25	BH-F1	ตาก	0.019	0.043	0.079
26	BH-F2	ตาก	0.123	0.381	0.889
27	BH-F3	ตาก	0.035	0.085	0.156
28	BH-F4	ตาก	0.137	0.345	0.576
29	BH-F5	ตาก	0.041	0.101	0.165
30	BH-G1	นครสวรรค์	0.209	0.862	0.923
31	BH-G2	นครสวรรค์	0.206	0.827	0.908
32	BH-G3	นครสวรรค์	0.005	0.013	0.040
33	BH-H1	กำแพงเพชร	0.381	0.948	0.964
34	BH-H2	กำแพงเพชร	0.433	0.954	0.969
35	BH-H3	กำแพงเพชร	0.039	0.116	0.309
36	BH-H4	กำแพงเพชร	0.259	0.818	0.930
37	BH-I1	พิษณุโลก	0.039	0.133	0.268
38	BH-I2	พิษณุโลก	0.267	0.965	0.986
39	BH-J1	อุทัยธานี	0.011	0.040	0.109
40	BH-J2	อุทัยธานี	0.956	0.981	0.986
41	BH-J3	อุทัยธานี	0.021	0.091	0.140

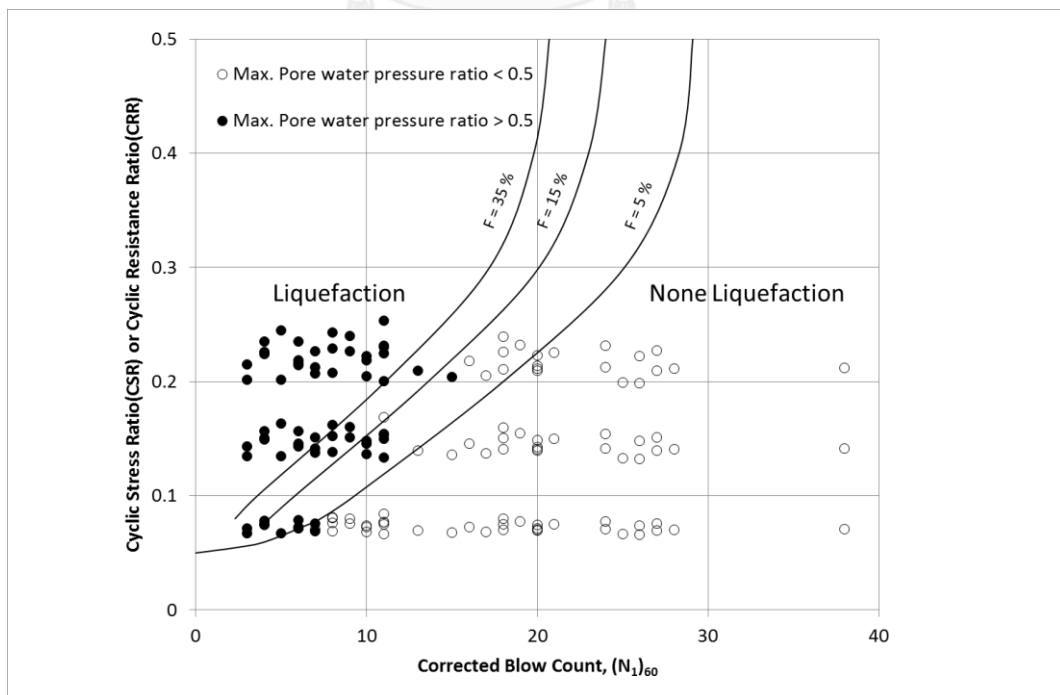
42	BH-K1	น่าน	0.098	0.241	0.422
43	BH-K2	น่าน	0.349	0.868	0.923
44	BH-K3	น่าน	0.962	0.984	0.988
45	BH-L1	พิจิตร	0.048	0.168	0.384
46	BH-L2	พิจิตร	0.211	0.931	0.964
47	BH-M1	เพชรบูรณ์	0.005	0.005	0.005
48	BH-M2	เพชรบูรณ์	0.164	0.689	0.899
49	BH-M3	เพชรบูรณ์	0.017	0.037	0.058
50	BH-N1	สุโขทัย	0.026	0.327	0.601
51	BH-N2	สุโขทัย	0.005	0.010	0.024
52	BH-N3	สุโขทัย	0.017	0.047	0.085
53	BH-O1	แพร่	0.011	0.028	0.052

4.2 การประเมินโอกาสเกิดลิควิแพคชั่น

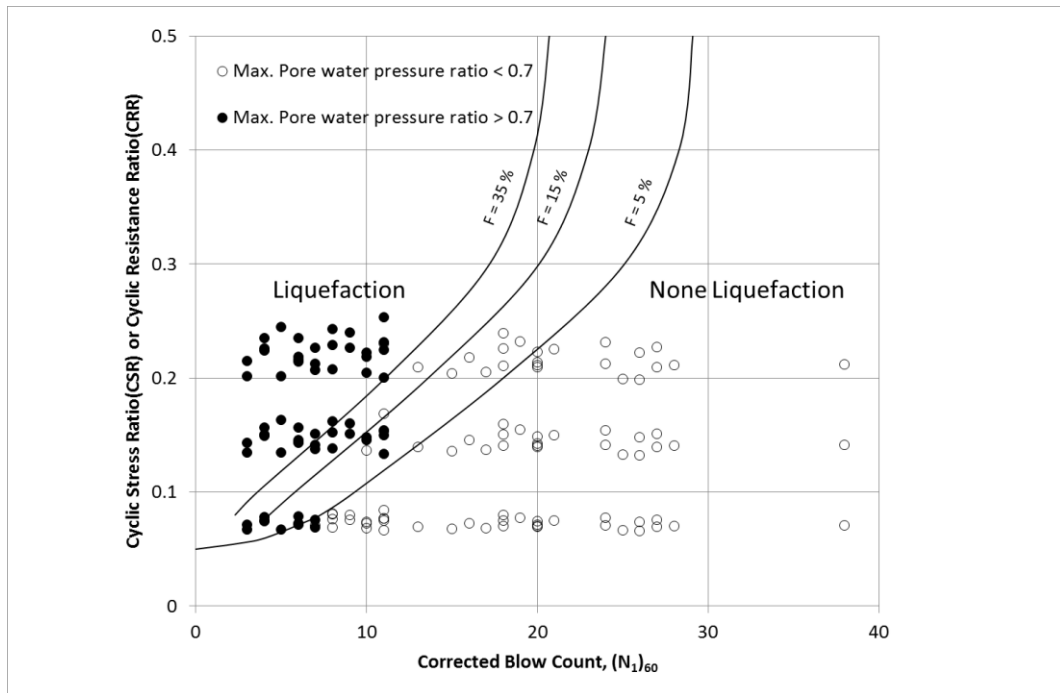
ข้อมูลดินทั้ง 53 หลุมเจาะสามารถประเมินค่า CSR จากค่าความเร่งพื้นผิวจากค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.1g, 0.2g และ 0.3g โดยสรุปข้อมูลได้ตามตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ เพื่อนำผลไปพล็อตกราฟร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ของวัฏจักรความเค้น CSR ที่เกิดลิควิแพคชั่น และค่าการตอกเข็มมาตรฐาน SPT สำหรับแผ่นดินไหวขนาด $M_w = 7.5$ ของ (Seed, Tokimatsu และคณะ, 1985, Youd และ Idriss, 1997) ดังรูปที่ 4.1 โดยจะใช้อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิภาพ ที่ 0.5, 0.7 และ 0.9 เป็นเกณฑ์ จะได้ดังรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 พบว่าโอกาสที่จะเกิดลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนที่ อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิภาพ ที่ 0.5, 0.7 และ 0.9 สอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ของวัฏจักรความเค้น CSR ที่เกิดลิควิแพคชั่น และค่าการตอกเข็มมาตรฐาน SPT ของ ซึ่งการเกิดลิควิแพคชั่นจะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ทางด้านซ้ายของกราฟ



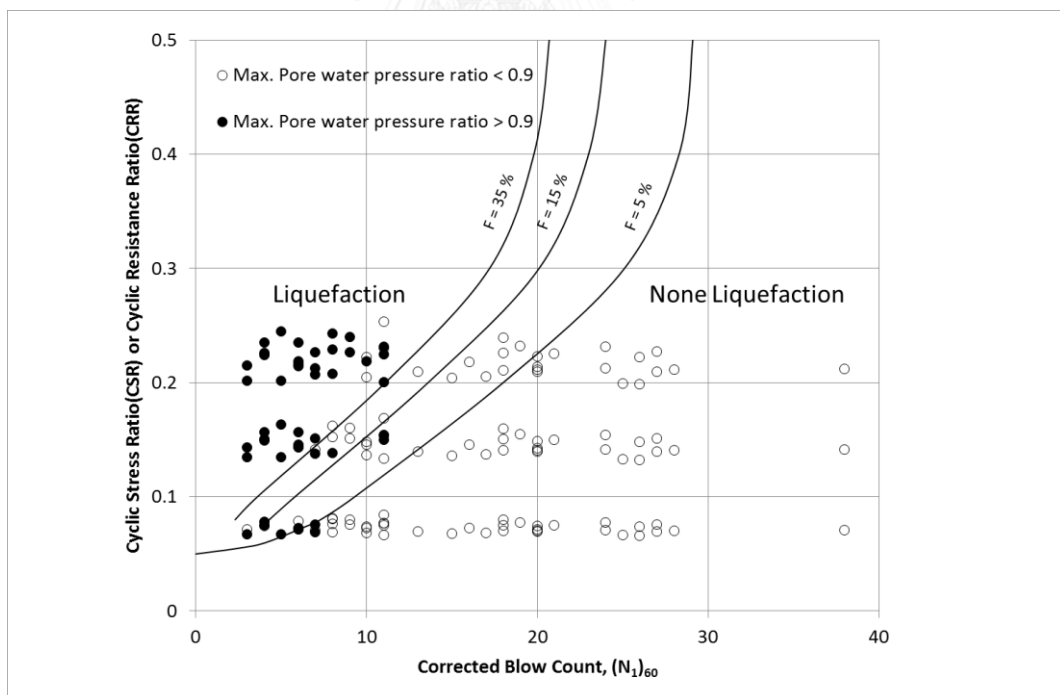
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ของวัฏจักรความเค้น CSR ที่เกิดลิควิแฟคชั่น และค่าการตอกเข็มมาตรฐาน SPT สำหรับแผ่นดินไหวขนาด $M_w = 7.5$ (Seed, Tokimatsu และคณะ, 1985, Youd และ Idriss, 1997)



รูปที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.5



รูปที่ 4.3 อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.7



รูปที่ 4.4 อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.9

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปข้อมูลการคำนวณการเกิดลิควิเฟคชันเมื่อ PGA = 0.1g

ลำดับ	หลุมเจาะ	ความลึก (เมตร)	ชนิด	σ_v (t/m ²)	σ'_v (t/m ²)	FC%	SPT N-value	PGA	CSR	$\Delta u/\sigma'$
1	BH-A1	2.70	SM	2.951	2.538	28	10	0.1	0.074	0.248
2	BH-A2	0.98	SM	1.989	1.745	14	45	0.1	0.074	0.118
3	BH-A3	5.70	SW-SM	5.581	4.849	6	3	0.1	0.072	0.737
4	BH-B1	2.70	SW-SM	2.826	2.386	10	9	0.1	0.076	0.388
5	BH-B2	0.98	SM	1.775	1.463	48	4	0.1	0.078	0.945
6	BH-B3	2.70	SM	3.322	2.618	47	8	0.1	0.081	0.365
7	BH-B4	2.70	SM	3.169	2.618	42	11	0.1	0.077	0.336
8	BH-B5	2.70	SM	3.165	2.573	15	6	0.1	0.078	0.898
9	BH-B6	0.98	SW-SM	1.404	1.336	9	15	0.1	0.068	0.128
10	BH-B7	2.70	SM	3.110	2.569	29	24	0.1	0.077	0.124
11	BH-B8	0.98	SW-SM	1.482	1.425	8	5	0.1	0.067	0.979
12	BH-B9	5.70	SW-SM	5.352	4.837	7	7	0.1	0.069	0.943
13	BH-B10	2.70	SW	2.839	2.532	1	6	0.1	0.072	0.981
14	BH-B11	2.70	SM	3.077	2.783	15	28	0.1	0.071	0.023
15	BH-B12	2.70	SM	2.821	2.409	45	4	0.1	0.075	0.822
16	BH-B13	4.20	SW-SM	3.933	3.296	2	4	0.1	0.075	0.987
17	BH-B14	0.98	SP	1.580	1.350	5	7	0.1	0.076	0.980
18	BH-C1	2.70	SM	3.146	2.708	16	26	0.1	0.074	0.018
19	BH-D1	0.98	SM	1.521	1.396	0	20	0.1	0.070	0.007
20	BH-D2	0.98	SM	1.541	1.397	44	20	0.1	0.071	0.011
21	BH-E1	2.70	SP	2.655	2.393	3	7	0.1	0.071	0.084
22	BH-E2	0.73	SP-SM	0.914	0.893	6	26	0.1	0.066	0.030
23	BH-E3	0.73	SM	0.972	0.948	25	25	0.1	0.066	0.011
24	BH-E4	0.73	SM	1.218	1.047	38	18	0.1	0.075	0.008
25	BH-F1	0.98	SW	1.706	1.578	38	20	0.1	0.070	0.019
26	BH-F2	0.98	SM	1.667	1.276	37	11	0.1	0.084	0.123
27	BH-F3	5.70	SM	5.456	4.533	18	21	0.1	0.075	0.035
28	BH-F4	7.20	SM	6.671	5.344	26	11	0.1	0.077	0.137
29	BH-F5	4.20	SM	4.050	3.301	48	19	0.1	0.077	0.041
30	BH-G1	2.95	SM	3.373	2.683	23	9	0.1	0.080	0.209

31	BH-G2	5.70	SM	6.193	5.298	17	10	0.1	0.073	0.206
32	BH-G3	0.98	SM	1.892	1.725	59	48	0.1	0.071	0.005
33	BH-H1	2.95	SM	2.959	2.722	30	8	0.1	0.069	0.381
34	BH-H2	1.73	SW-SM	2.864	2.456	9	11	0.1	0.075	0.433
35	BH-H3	5.70	SC	5.828	4.802	40	27	0.1	0.076	0.039
36	BH-H4	11.70	SM	12.240	10.235	17	11	0.1	0.067	0.259
37	BH-I1	2.70	SC	3.415	2.996	21	16	0.1	0.073	0.039
38	BH-I2	2.70	SP-SM	3.103	2.456	8	8	0.1	0.081	0.267
39	BH-J1	0.73	SM	1.138	1.076	17	17	0.1	0.069	0.011
40	BH-J2	2.20	SM	1.983	1.889	34	3	0.1	0.067	0.956
41	BH-J3	7.20	SP	7.736	6.393	11	20	0.1	0.074	0.021
42	BH-K1	2.70	SM	3.525	3.166	22	57	0.1	0.071	0.098
43	BH-K2	5.70	SP-SM	5.753	4.703	9	8	0.1	0.076	0.349
44	BH-K3	2.70	SP-SM	2.962	2.595	6	6	0.1	0.073	0.962
45	BH-L1	7.20	SM	7.916	6.329	22	41	0.1	0.077	0.048
46	BH-L2	0.98	SM	1.511	1.355	29	6	0.1	0.072	0.211
47	BH-M1	1.95	SC	2.033	1.856	25	18	0.1	0.070	0.005
48	BH-M2	0.73	SM	1.073	1.017	24	10	0.1	0.068	0.164
49	BH-M3	0.98	SM	1.492	1.363	26	38	0.1	0.071	0.017
50	BH-N1	0.98	SM	1.560	1.445	46	13	0.1	0.070	0.026
51	BH-N2	0.98	SW-SM	1.823	1.689	6	27	0.1	0.070	0.005
52	BH-N3	0.98	SM	1.745	1.593	28	24	0.1	0.071	0.017
53	BH-O1	4.20	SM	4.259	3.365	23	18	0.1	0.080	0.011

ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปข้อมูลการคำนวณการเกิดลิควิเฟคชันเมื่อ PGA = 0.2g

ลำดับ	หลุมเจาะ	ความลึก (เมตร)	ชนิด	σ_v (t/m ²)	σ'_v (t/m ²)	FC%	SPT N-value	PGA	CSR	$\Delta u/\sigma'$
1	BH-A1	2.70	SM	2.951	2.538	28	10	0.2	0.148	0.741
2	BH-A2	0.98	SM	1.989	1.745	14	45	0.2	0.147	0.165
3	BH-A3	5.70	SW-SM	5.581	4.849	6	3	0.2	0.144	0.936
4	BH-B1	2.70	SW-SM	2.826	2.386	10	9	0.2	0.151	0.867
5	BH-B2	0.98	SM	1.775	1.463	48	4	0.2	0.157	0.980
6	BH-B3	2.70	SM	3.322	2.618	47	8	0.2	0.162	0.840

7	BH-B4	2.70	SM	3.169	2.618	42	11	0.2	0.154	0.924
8	BH-B5	2.70	SM	3.165	2.573	15	6	0.2	0.157	0.966
9	BH-B6	0.98	SW-SM	1.404	1.336	9	15	0.2	0.136	0.491
10	BH-B7	2.70	SM	3.110	2.569	29	24	0.2	0.154	0.230
11	BH-B8	0.98	SW-SM	1.482	1.425	8	5	0.2	0.134	0.989
12	BH-B9	5.70	SW-SM	5.352	4.837	7	7	0.2	0.138	0.980
13	BH-B10	2.70	SW	2.839	2.532	1	6	0.2	0.143	0.990
14	BH-B11	2.70	SM	3.077	2.783	15	28	0.2	0.141	0.069
15	BH-B12	2.70	SM	2.821	2.409	45	4	0.2	0.149	0.941
16	BH-B13	4.20	SW-SM	3.933	3.296	2	4	0.2	0.151	0.992
17	BH-B14	0.98	SP	1.580	1.350	5	7	0.2	0.151	0.990
18	BH-C1	2.70	SM	3.146	2.708	16	26	0.2	0.148	0.045
19	BH-D1	0.98	SM	1.521	1.396	0	20	0.2	0.141	0.011
20	BH-D2	0.98	SM	1.541	1.397	44	20	0.2	0.143	0.025
21	BH-E1	2.70	SP	2.655	2.393	3	7	0.2	0.142	0.704
22	BH-E2	0.73	SP-SM	0.914	0.893	6	26	0.2	0.133	0.085
23	BH-E3	0.73	SM	0.972	0.948	25	25	0.2	0.133	0.025
24	BH-E4	0.73	SM	1.218	1.047	38	18	0.2	0.151	0.015
25	BH-F1	0.98	SW	1.706	1.578	38	20	0.2	0.140	0.043
26	BH-F2	0.98	SM	1.667	1.276	37	11	0.2	0.169	0.381
27	BH-F3	5.70	SM	5.456	4.533	18	21	0.2	0.150	0.085
28	BH-F4	7.20	SM	6.671	5.344	26	11	0.2	0.153	0.345
29	BH-F5	4.20	SM	4.050	3.301	48	19	0.2	0.155	0.101
30	BH-G1	2.95	SM	3.373	2.683	23	9	0.2	0.160	0.862
31	BH-G2	5.70	SM	6.193	5.298	17	10	0.2	0.146	0.827
32	BH-G3	0.98	SM	1.892	1.725	59	48	0.2	0.142	0.013
33	BH-H1	2.95	SM	2.959	2.722	30	8	0.2	0.138	0.948
34	BH-H2	1.73	SW-SM	2.864	2.456	9	11	0.2	0.150	0.954
35	BH-H3	5.70	SC	5.828	4.802	40	27	0.2	0.151	0.116
36	BH-H4	11.70	SM	12.240	10.235	17	11	0.2	0.134	0.818
37	BH-I1	2.70	SC	3.415	2.996	21	16	0.2	0.145	0.133
38	BH-I2	2.70	SP-SM	3.103	2.456	8	8	0.2	0.163	0.965
39	BH-J1	0.73	SM	1.138	1.076	17	17	0.2	0.137	0.040
40	BH-J2	2.20	SM	1.983	1.889	34	3	0.2	0.134	0.981

41	BH-J3	7.20	SP	7.736	6.393	11	20	0.2	0.149	0.091
42	BH-K1	2.70	SM	3.525	3.166	22	57	0.2	0.142	0.241
43	BH-K2	5.70	SP-SM	5.753	4.703	9	8	0.2	0.153	0.868
44	BH-K3	2.70	SP-SM	2.962	2.595	6	6	0.2	0.146	0.984
45	BH-L1	7.20	SM	7.916	6.329	22	41	0.2	0.154	0.168
46	BH-L2	0.98	SM	1.511	1.355	29	6	0.2	0.144	0.931
47	BH-M1	1.95	SC	2.033	1.856	25	18	0.2	0.141	0.005
48	BH-M2	0.73	SM	1.073	1.017	24	10	0.2	0.137	0.689
49	BH-M3	0.98	SM	1.492	1.363	26	38	0.2	0.142	0.037
50	BH-N1	0.98	SM	1.560	1.445	46	13	0.2	0.140	0.327
51	BH-N2	0.98	SW-SM	1.823	1.689	6	27	0.2	0.140	0.010
52	BH-N3	0.98	SM	1.745	1.593	28	24	0.2	0.142	0.047
53	BH-O1	4.20	SM	4.259	3.365	23	18	0.2	0.160	0.028

ตารางที่ 4.4 ตารางสรุปข้อมูลการคำนวณการเกิดลิควิเฟคชันเมื่อ PGA = 0.3g

ลำดับ	หลุมเจาะ	ความลึก (เมตร)	ชนิด	σ_v (t/m ²)	σ'_v (t/m ²)	FC%	SPT N-value	PGA	CSR	$\Delta u/\sigma'$
1	BH-A1	2.70	SM	2.951	2.538	28	10	0.3	0.222	0.832
2	BH-A2	0.98	SM	1.989	1.745	14	45	0.3	0.221	0.191
3	BH-A3	5.70	SW-SM	5.581	4.849	6	3	0.3	0.215	0.961
4	BH-B1	2.70	SW-SM	2.826	2.386	10	9	0.3	0.227	0.920
5	BH-B2	0.98	SM	1.775	1.463	48	4	0.3	0.235	0.986
6	BH-B3	2.70	SM	3.322	2.618	47	8	0.3	0.243	0.903
7	BH-B4	2.70	SM	3.169	2.618	42	11	0.3	0.232	0.958
8	BH-B5	2.70	SM	3.165	2.573	15	6	0.3	0.235	0.979
9	BH-B6	0.98	SW-SM	1.404	1.336	9	15	0.3	0.204	0.661
10	BH-B7	2.70	SM	3.110	2.569	29	24	0.3	0.232	0.476
11	BH-B8	0.98	SW-SM	1.482	1.425	8	5	0.3	0.202	0.991
12	BH-B9	5.70	SW-SM	5.352	4.837	7	7	0.3	0.207	0.986
13	BH-B10	2.70	SW	2.839	2.532	1	6	0.3	0.215	0.992
14	BH-B11	2.70	SM	3.077	2.783	15	28	0.3	0.212	0.168
15	BH-B12	2.70	SM	2.821	2.409	45	4	0.3	0.224	0.961
16	BH-B13	4.20	SW-SM	3.933	3.296	2	4	0.3	0.226	0.993

17	BH-B14	0.98	SP	1.580	1.350	5	7	0.3	0.227	0.992
18	BH-C1	2.70	SM	3.146	2.708	16	26	0.3	0.222	0.083
19	BH-D1	0.98	SM	1.521	1.396	0	20	0.3	0.211	0.021
20	BH-D2	0.98	SM	1.541	1.397	44	20	0.3	0.214	0.046
21	BH-E1	2.70	SP	2.655	2.393	3	7	0.3	0.212	0.974
22	BH-E2	0.73	SP-SM	0.914	0.893	6	26	0.3	0.199	0.173
23	BH-E3	0.73	SM	0.972	0.948	25	25	0.3	0.199	0.048
24	BH-E4	0.73	SM	1.218	1.047	38	18	0.3	0.226	0.026
25	BH-F1	0.98	SW	1.706	1.578	38	20	0.3	0.210	0.079
26	BH-F2	0.98	SM	1.667	1.276	37	11	0.3	0.253	0.889
27	BH-F3	5.70	SM	5.456	4.533	18	21	0.3	0.225	0.156
28	BH-F4	7.20	SM	6.671	5.344	26	11	0.3	0.230	0.576
29	BH-F5	4.20	SM	4.050	3.301	48	19	0.3	0.232	0.165
30	BH-G1	2.95	SM	3.373	2.683	23	9	0.3	0.240	0.923
31	BH-G2	5.70	SM	6.193	5.298	17	10	0.3	0.219	0.908
32	BH-G3	0.98	SM	1.892	1.725	59	48	0.3	0.213	0.040
33	BH-H1	2.95	SM	2.959	2.722	30	8	0.3	0.208	0.964
34	BH-H2	1.73	SW-SM	2.864	2.456	9	11	0.3	0.225	0.969
35	BH-H3	5.70	SC	5.828	4.802	40	27	0.3	0.227	0.309
36	BH-H4	11.70	SM	12.240	10.235	17	11	0.3	0.200	0.930
37	BH-I1	2.70	SC	3.415	2.996	21	16	0.3	0.218	0.268
38	BH-I2	2.70	SP-SM	3.103	2.456	8	8	0.3	0.245	0.986
39	BH-J1	0.73	SM	1.138	1.076	17	17	0.3	0.206	0.109
40	BH-J2	2.20	SM	1.983	1.889	34	3	0.3	0.202	0.986
41	BH-J3	7.20	SP	7.736	6.393	11	20	0.3	0.223	0.140
42	BH-K1	2.70	SM	3.525	3.166	22	57	0.3	0.213	0.422
43	BH-K2	5.70	SP-SM	5.753	4.703	9	8	0.3	0.229	0.923
44	BH-K3	2.70	SP-SM	2.962	2.595	6	6	0.3	0.218	0.988
45	BH-L1	7.20	SM	7.916	6.329	22	41	0.3	0.230	0.384
46	BH-L2	0.98	SM	1.511	1.355	29	6	0.3	0.216	0.964
47	BH-M1	1.95	SC	2.033	1.856	25	18	0.3	0.211	0.005
48	BH-M2	0.73	SM	1.073	1.017	24	10	0.3	0.205	0.899
49	BH-M3	0.98	SM	1.492	1.363	26	38	0.3	0.212	0.058
50	BH-N1	0.98	SM	1.560	1.445	46	13	0.3	0.209	0.601

51	BH-N2	0.98	SW-SM	1.823	1.689	6	27	0.3	0.209	0.024
52	BH-N3	0.98	SM	1.745	1.593	28	24	0.3	0.212	0.085
53	BH-O1	4.20	SM	4.259	3.365	23	18	0.3	0.240	0.052

จากตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 จำนวนหลุมเจาะทั้งหมด 53 หลุมสามารถคิดเป็นร้อยละที่เกิดลิควิแพคชันแบบบางส่วนได้ดังตารางที่ 4.5 โดยแบ่งตามความเร่งพื้นผิวสูงสุด และสามารถประมาณค่า SPT และความลึกของชั้นทรายสรุปได้ดังตารางที่ 4.6 สามารถสรุปได้ว่าลักษณะของชั้นทรายที่มีค่า SPT ต่ำกว่า 7 blows/ft และมีความลึกไม่เกิน 6 เมตร มีโอกาสที่จะเกิดการลิควิแพคชันแบบบางส่วนได้ ที่ $PGA=0.1g$ และลักษณะของชั้นทรายที่มีค่า SPT ต่ำกว่า 11 blows/ft และมีความลึกไม่เกิน 12 เมตร มีโอกาสที่จะเกิดการลิควิแพคชันแบบบางส่วนได้ ที่ $PGA=0.2g$

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงร้อยละของข้อมูลที่เกิดลิควิแพคชันแบบบางส่วน

$\Delta u/\sigma'$	0.1g	0.2g	0.3g
0.5	20.75%	47.17%	54.72%
0.7	20.75%	45.28%	49.06%
0.9	15.09%	30.19%	43.40%

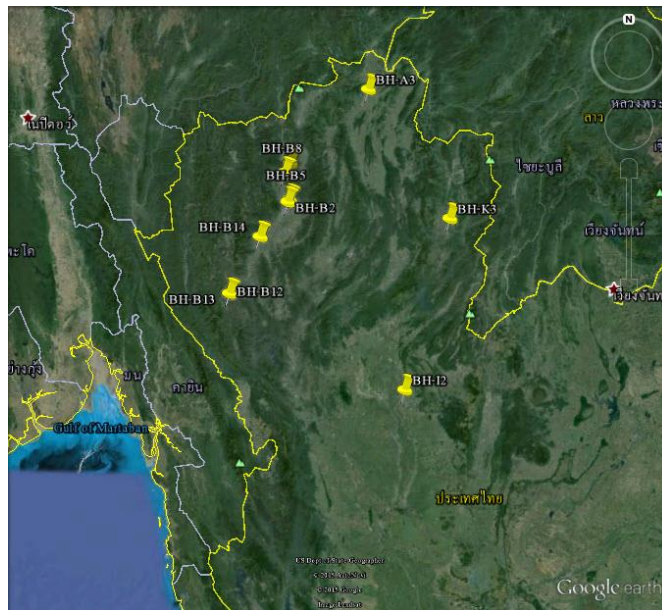
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าของ SPT และความลึกของชั้นทรายของข้อมูลที่เกิดลิควิแพคชันแบบบางส่วน

$\Delta u/\sigma'$	0.1g	0.2g	0.3g
0.5	<7, 6 m	<11, 12 m	<15, 12 m
0.7	<7, 6 m	<11, 12 m	<11, 12 m
0.9	<7, 6 m	<11, 12 m	<11, 12 m

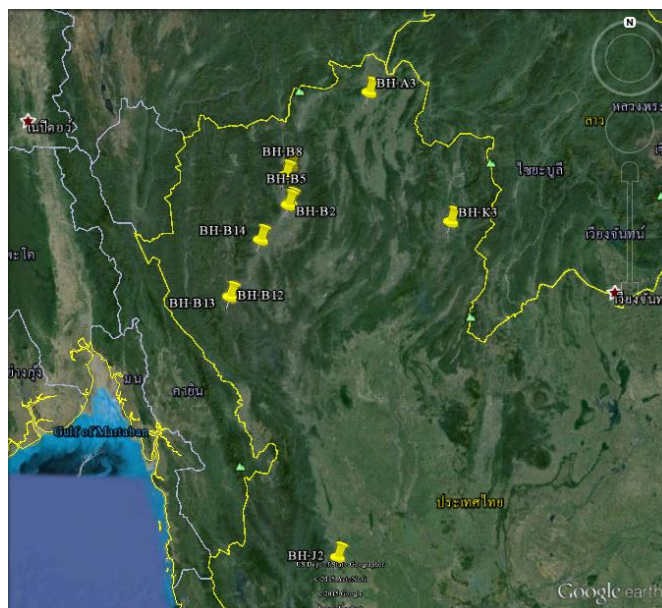
4.3 พื้นที่ที่เกิดลิควิแพคชัน

เมื่อนำพิกัดของสถานที่เกิดลิควิแพคชันแบบบางส่วนด้วยเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้ อัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.5, 0.7 และ 0.9 และค่าความเร่งพื้นผิว

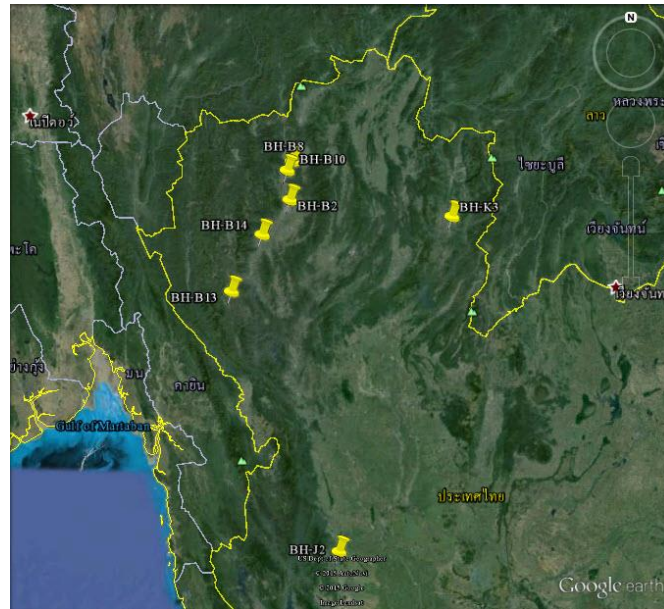
สูงสุดที่ 0.1g, 0.2g และ 0.3g ดังรูปที่ 4.5-4.13 พบว่าเมื่อแผ่นดินไหวส่งผลให้เกิดความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.1g พื้นที่ที่เกิดลิควิแพคชั่นจะจำกัดอยู่เพียงภาคเหนือตอนบน คือจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และน่าน แต่เมื่อเกิดแผ่นดินไหวส่งผลให้เกิดความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.2g นั้นพื้นที่ที่เกิดลิควิแพคชั่นจะเปลี่ยนไป คือสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในบริเวณภาคเหนือ และถ้าเกิดแผ่นดินไหวส่งผลให้เกิดความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.3g จะเกิดลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนกระจายอยู่ในภาคเหนือเป็นจำนวนมาก



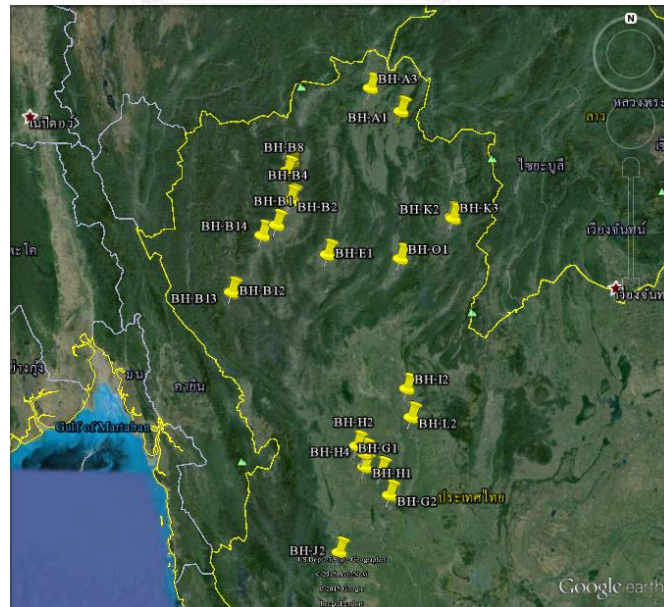
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งที่เกิดลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.5 และค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.1g



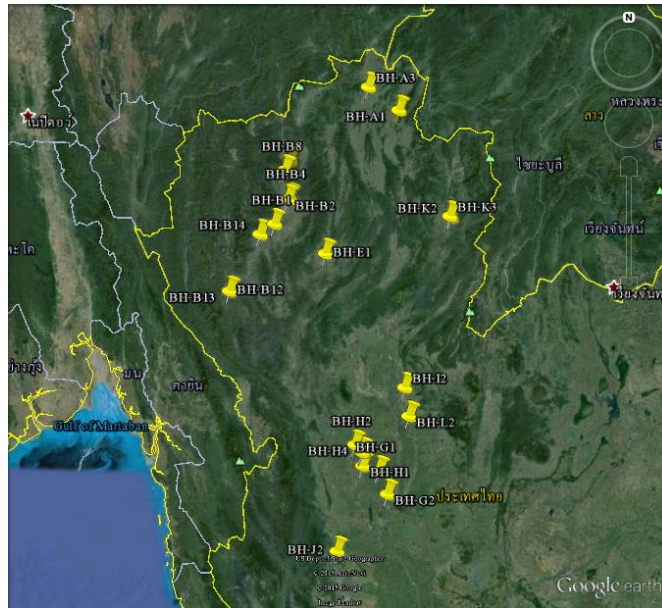
รูปที่ 4.6 ตำแหน่งที่เกิดลิควิแพคชั้นแบบบางส่วนเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.7 และค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.1g



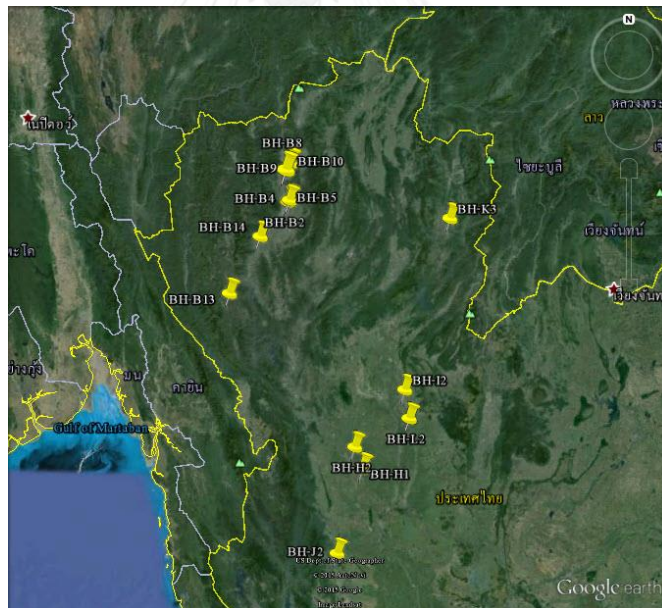
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งที่เกิดลิควิแพคชั้นแบบบางส่วนเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.9 และค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.1g



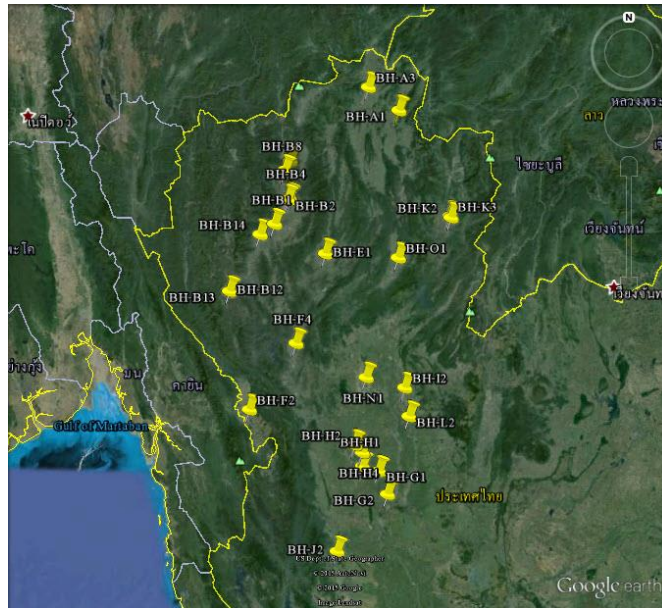
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งที่เกิดลิควิแพคชั้นแบบบางส่วนเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.5 และค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.2g



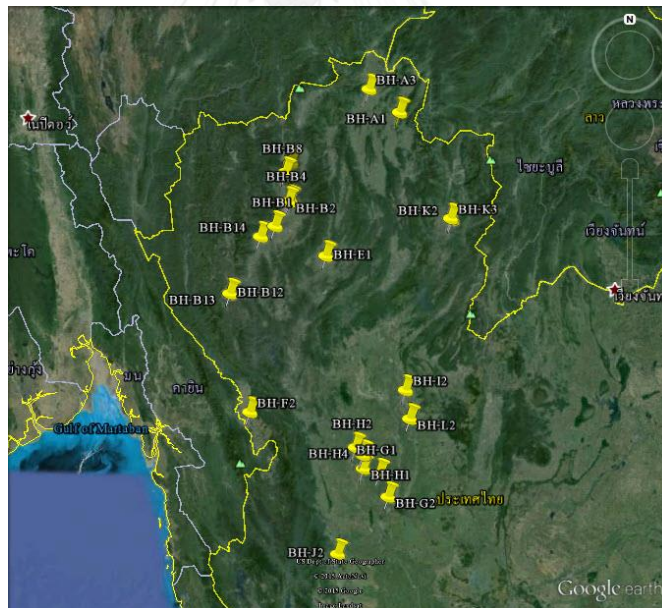
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งที่เกิดลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.7 และค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.2g



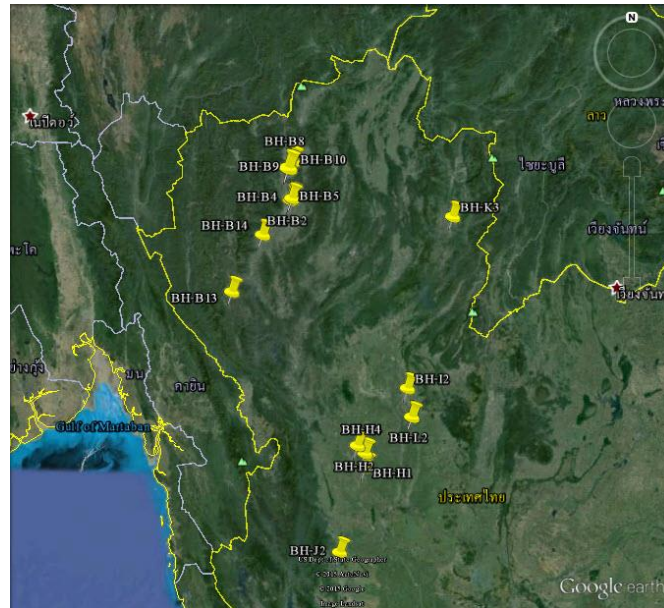
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งที่เกิดลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.9 และค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.2g



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งที่เกิดลิควิแพคชั้นแบบบางส่วนเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.5 และค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.3g



รูปที่ 4.12 ตำแหน่งที่เกิดลิควิแพคชั้นแบบบางส่วนเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.7 และค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.3g



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งที่เกิดลิควิแพคชันแบบบางส่วนเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผล ที่ 0.9 และค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.3g

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป และอภิปรายผลการวิจัย

5.1.1 ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผลที่คำนวณได้ด้วยโปรแกรม FLIP เป็นไปทิศทางเดียวกับกราฟความสัมพันธ์ของวัฏจักรความเค้น CSR ที่เกิดลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนและค่าการตอกเข็มมาตรฐาน SPT สำหรับแผ่นดินไหวขนาด Mw = 7.5 ของ Seed et al., 1985; Youd and Idriss, 1997

5.1.2 จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเกิดลิควิแพคชั่นที่เกิดขึ้นในภาคเหนือ สามารถพบได้ในลักษณะชั้นดิน ที่เป็นชั้นทรายแน่นปานกลางถึงชั้นทรายหลวม ลักษณะของชั้นทรายที่มีค่า SPT ต่ำกว่า 7 blows/ft และมีความลึกไม่เกิน 6 เมตร มีโอกาสที่จะเกิดการลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนได้ ที่ PGA=0.1g และลักษณะของชั้นทรายที่มีค่า SPT ต่ำกว่า 11 blows/ft และมีความลึกไม่เกิน 12 เมตร มีโอกาสที่จะเกิดการลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนได้ ที่ PGA=0.2g

5.1.3 จากการระบุตำแหน่งของข้อมูลหลุมเจาะพบว่าโอกาสที่จะเกิดลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนในพื้นที่ภาคเหนือ จากคลื่นที่มีค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดขนาดเดียวกับที่เคยเกิดขึ้นที่แม่สาย และแม่ลาว คือ 0.2g สามารถพบการเกิดลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนที่มีอัตราส่วนระหว่างแรงดันน้ำในดิน กับค่าความเค้นประสิทธิผลเป็น 0.5 ถึง 47% ของจำนวนข้อมูลหลุมเจาะที่ 53 หลุม

5.1.4 การออกแบบโครงสร้างฐานราก และโครงสร้างบนดิน ในพื้นที่ภาคเหนือจะต้องคำนึงถึงการเกิดลิควิแพคชั่นในลักษณะชั้นดินที่มีชั้นทรายแน่นปานกลางและหลวม โดยเฉพาะจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และน่าน เนื่องจากผลการคำนวณพบว่าแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดค่าความเร่งพื้นผิวสูงสุดที่ 0.1g ก็สามารถทำให้พบเห็นการเกิดลิควิแพคชั่นแบบบางส่วนขึ้นได้ ดังนั้นจะต้องระมัดระวังการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดการสูญเสียการรับกำลังแบกทานของดิน จากการเกิดแผ่นดินไหวครั้งต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการเกิดลิควีแฟคชั่นระดับน้ำจะมีผลต่อการเกิดลิควีแฟคชั่น แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ระดับน้ำอยู่ที่ผิวดิน จึงควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเพื่อหาถึงระดับน้ำสูงสุดว่าอยู่ที่ระดับใด เพื่อที่จะลดการผิดพลาดจากการวิเคราะห์ข้อมูลได้ และข้อมูลชั้นดินที่สามารถใช้ได้ในการวิเคราะห์โอกาสเกิดทรายเหลวนั้นยังมีอยู่จำนวนจำกัด จึงควรหาข้อมูลหลุมเจาะมาจากแหล่งที่มาอื่นๆ อีกนอกจากข้อมูลของกรมโยธาธิการและผังเมือง เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์การเกิดลิควีแฟคชั่นในระดับจังหวัดได้ต่อไป



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมโยธาธิการและผังเมือง (2557). Retrieved 23 กรกฎาคม, 2557, from http://services.dpt.go.th/service_4/other/soil2551/.

จิตติ ปาลศรี และ อาณัติ เรืองรัมย์ (2552). ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน ค่าการตอกทดลองมาตรฐาน และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินในกรุงเทพมหานครและบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

บุญชัย อุกฤษฏชน และ ธวัชชัย สังขะวิไล (2547). การวิเคราะห์โอกาสการเกิด Liquefaction สำหรับชั้นทรายกรุงเทพฯ ชั้นแรก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, โรงแรมรีเจนท์ ซะอำ จ.เพชรบุรี.

บุรินทร์ เวชบรรเทิง ความรู้พื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับแผ่นดินไหว. กรุงเทพมหานคร, สำนักแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา.

พิชัย ภัทรรัตน์กุล (2546). วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปริญญาวิศวกรรมศาสตร ดุษฎีบัณฑิต.

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (2557). Retrieved 10 เมษายน, 2557, from <http://www.gerd.eng.ku.ac.th/>.

สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา (2557). Retrieved 10 พฤษภาคม, 2557, from <http://www.seismology.tmd.go.th/home.html>.

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์ และ เจษฎา เพ็องอักษร (2556). Probabilistic Analysis of Liquefaction Potential: the First Eyewitness Case in Thailand. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่.

ภาษาอังกฤษ

Ambraseys, N. N. (1988). "Engineering seismology: Part II." Earthquake Engineering & Structural Dynamics **17**(1): 51-105.

De Alba, P., et al. (1976). "Sand liquefaction in large-scale simple shear tests." Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE **102**(GT9): 909-927.

Fiegel, G. L. and B. L. Kutter (1992). The mechanism of liquefaction in layered soils. Report CR92.009. Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California.

Idriss, I. M. and J. I. Sun (1992). User's manual for SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, California.

Ishihara, K. (1984). Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of the pond deposit. Proceedings of International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, University of Missouri, St. Louis.

Ishihara, K. (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Ishihara, K. (1993). "Liquefaction and flow failure during earthquakes." Geotechnique **43**(3): 351-451.

Kayen, R. E., et al. (1992). Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data

Proceedings of the 4th Japan-U. S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Buffalo, New York.

Kramer, L. S. (1996). Geotechnical earthquake engineering. New Jersey, Prentice Hall.

Li, J. (2013). USER MANUAL FOR SHAKE91_INPUT, UCSD.

Liao, S. S. C. and R. V. Whitman (1986a). A catalog of liquefaction and nonliquefaction occurrences during earthquakes. Cambridge, Massachusetts, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

Liao, S. S. C. and R. V. Whitman (1986b). "Overburden correction factors for SPT in sand." Journal of Geotechnical Engineering **ASCE 112**(3): 373-377.

Lindeburg, M. R. (1998). Seismic design of building structures. Belmont, CA, Professional Publications, Inc.

Liu, H. and T. Qiao (1984). Liquefaction potential of saturated sand deposits underlying foundation of structure. Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA

Martin, G. R., et al. (1975). "Fundamentals of liquefaction under loading." Journal of the Geotechnical Engineering Division **ASCE 101**(GT5): 423-429.

Morita, T., et al. (1997). Simplified Method to Determine Parameter of FLIP. Japan, the port and harbor research institute ministry of transport.

Nuttalaya, P., et al. (1985). Series on seismology volume II Thailand. Bangkok., Southeast Asia Association of Seismology and Earthquake Engineering.

Seed, H. B. and I. M. Idriss (1971). "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential." Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE **97**(SM9): 1249-1273.

Seed, H. B., et al. (1985). "Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations." Journal of Geotechnical Engineering ASCE **111**(12): 1425-1445.

Seed, R. B. and L. F. Harder, Jr. (1990). SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength. Proceedings of H. Bolton Seed Memorial Symposium, University of California, Berkeley.

U.S. Geological Survey (2557). Retrieved 15 เมษายน, 2557, from <http://www.usgs.gov/>.

Warnitchai, P. and A. Lisantono (1996). Probabilistic seismic risk mapping for Thailand. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.

Youd, T. L. (1984). Recurrence of liquefaction at the same site. Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco.

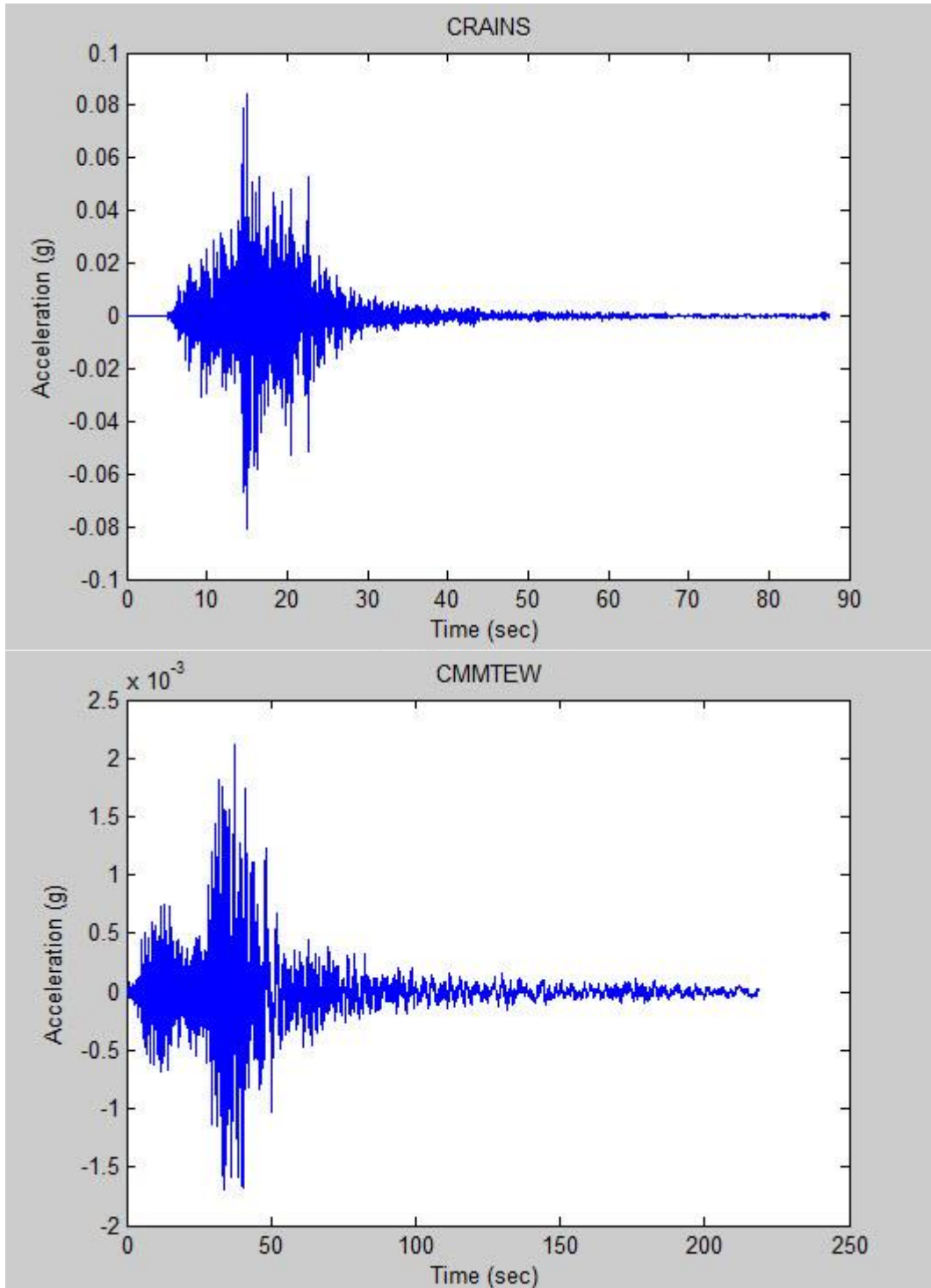
Youd, T. L. and I. M. Idriss (1997). Proceedings of NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, State University of New York at Buffalo.

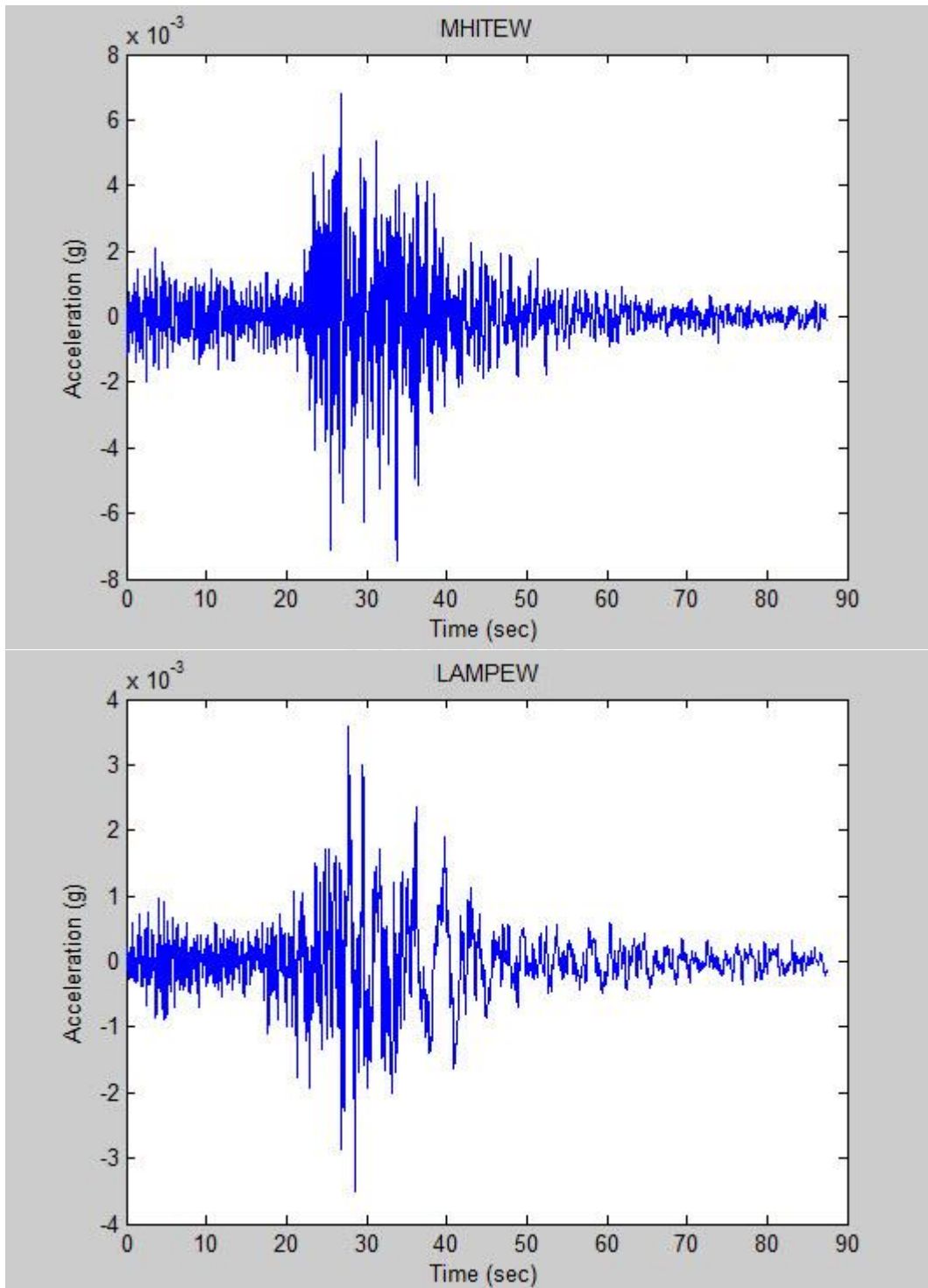


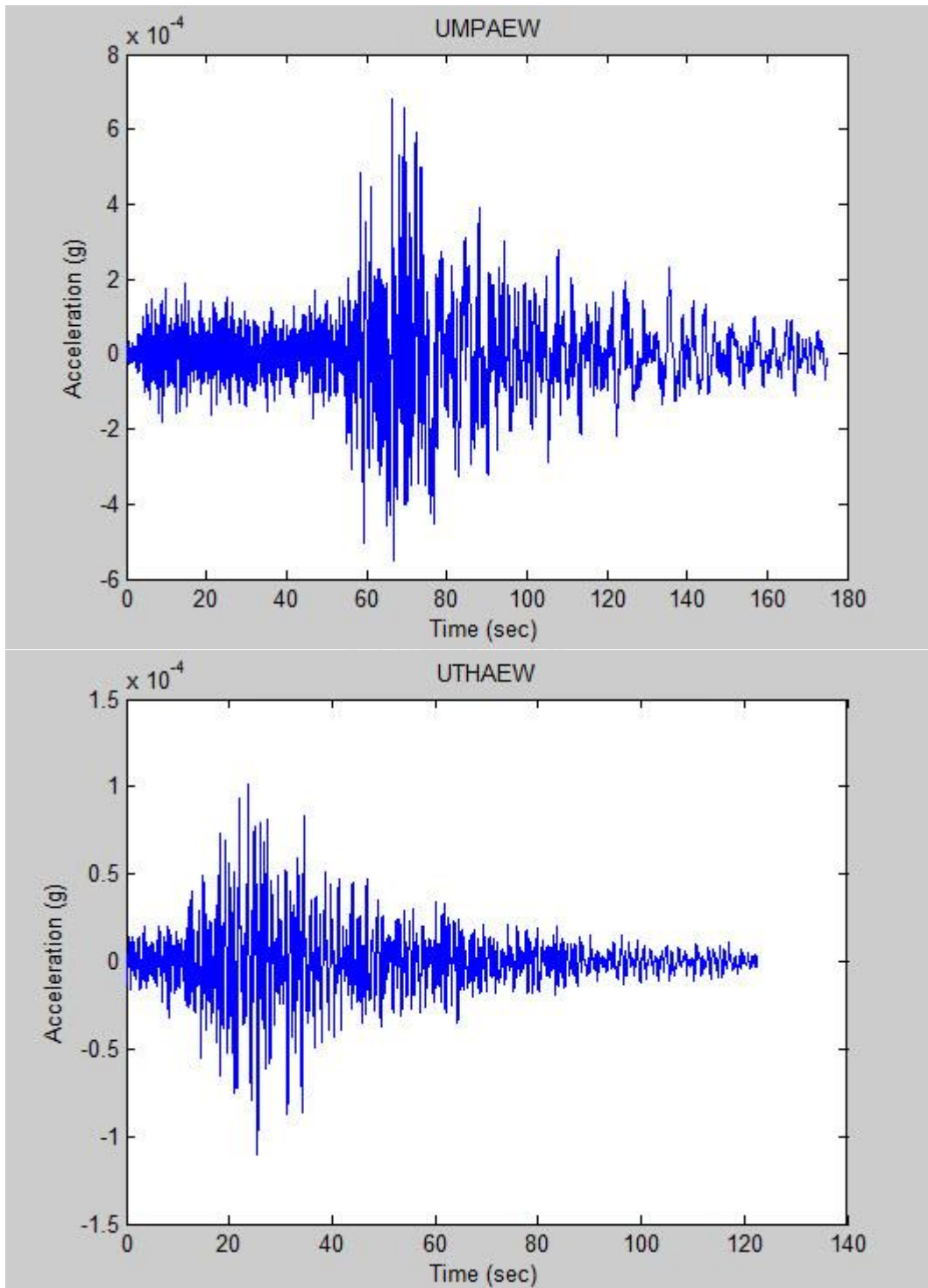
ภาคผนวก

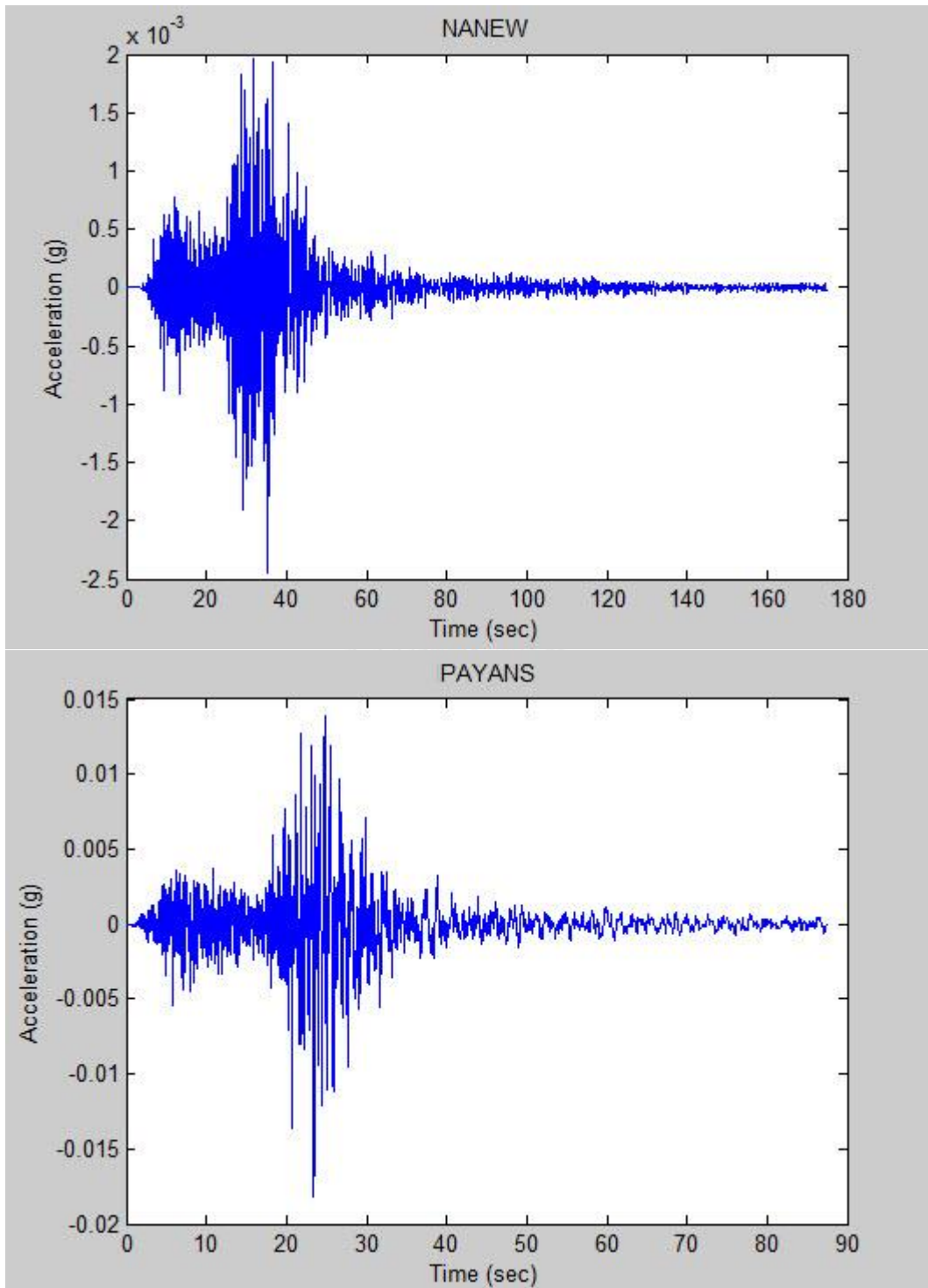
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

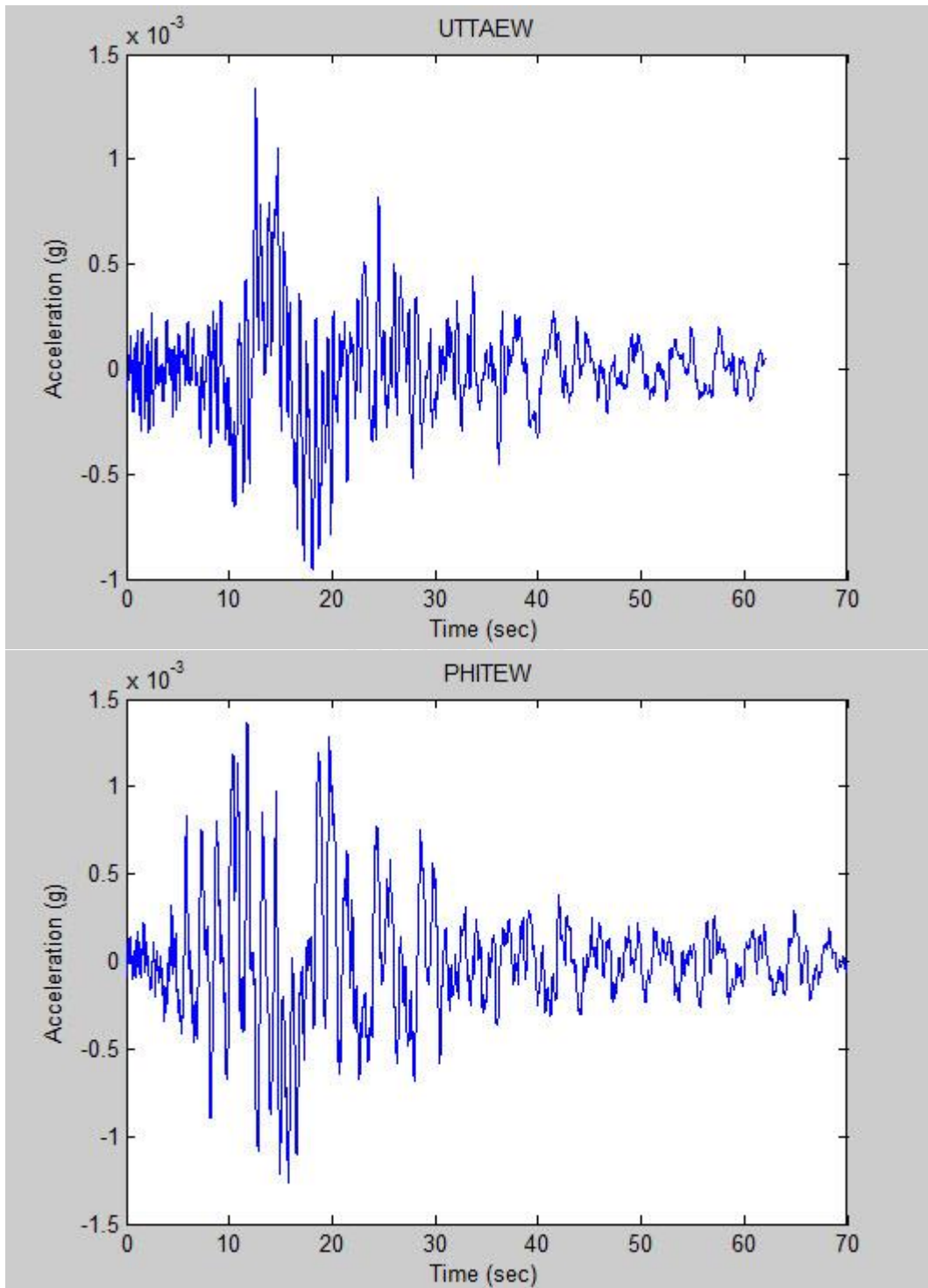
ภาคผนวก ก คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์

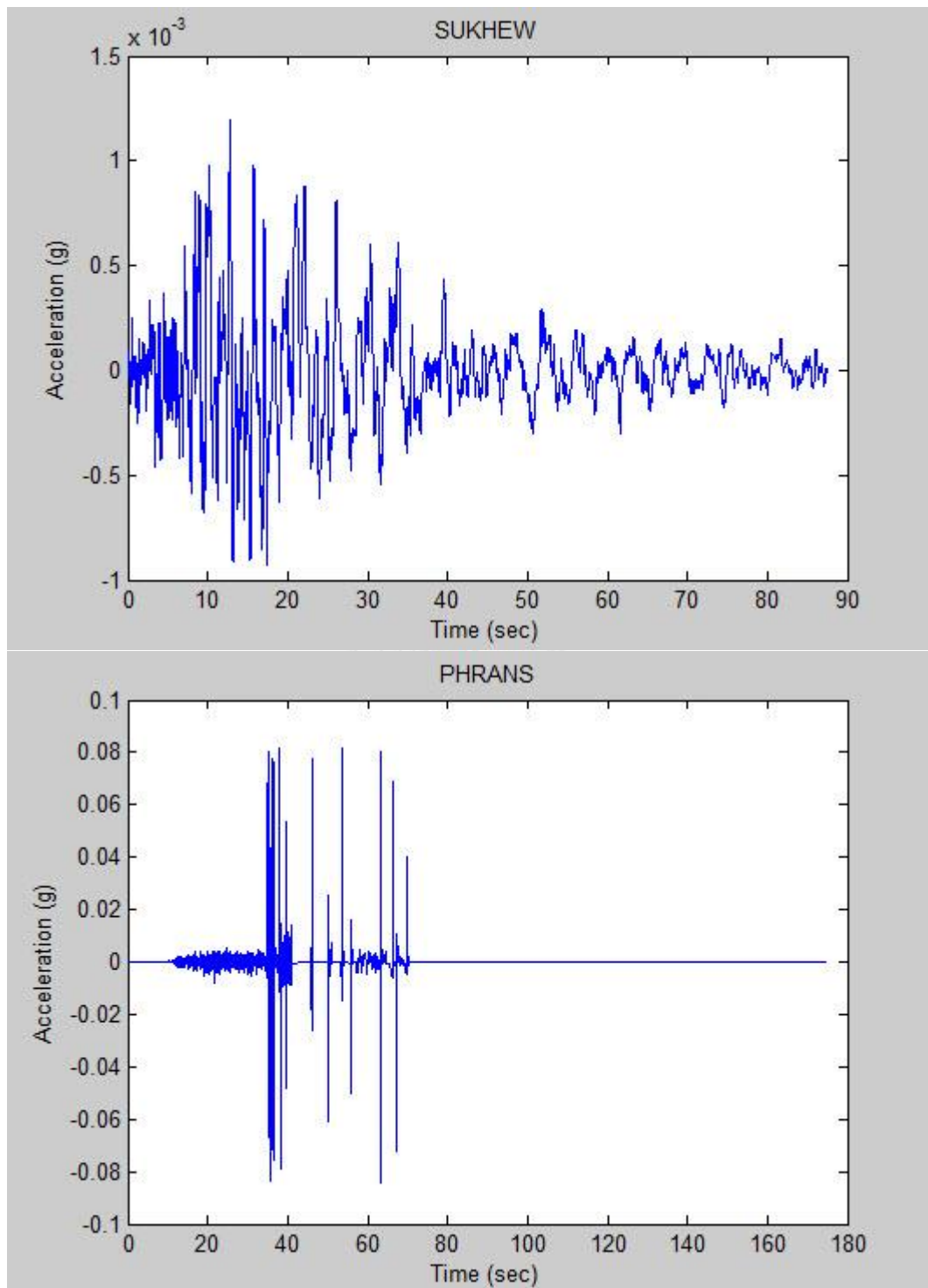












ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวีระเดช ธนพลังกร เกิดวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาโยธา ภาควิชาโรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ฯ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2556

ได้รับทุนการศึกษามูลนิธิ ศาตราจารย์ ดร.ชัย มุกตพันธุ์ ในปี พ.ศ. 2554 และได้รับทุนการศึกษาวิศวกรรมโยธา จุฬาฯ 100 ปี ประเภท Full Scholarship ในปี พ.ศ. 2556

