

การกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือน บริเวณอำเภอเมือง
จังหวัดเชียงใหม่
(NEAR SURFACE SHEAR WAVE VELOCITY DISTRIBUTIONS IN
AMPHOE MAUNG, CHANG WAT CHIANG MAI)

จัดทำโดย
นายภิรายุ สุริชัยพาณิชย์
4932721023

อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ ดร.ฐานบ ธิติมากร

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิทยาศาสตร์บัณฑิต
ปีการศึกษา 2553
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่ส่ง/...../.....

(ดร.ฐานบ ฐิติมากร)
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณบุคคลหลายท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ กำลังใจ รวมทั้งความช่วยเหลือด้านต่างๆ ซึ่งช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดี อาทิ

อาจารย์ ดร. ฐานบ ธิติมากร (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ) หากปราศจากอาจารย์ โครงการเล่มนี้คงไม่สำเร็จสมบูรณ์เท่านี้

อาจารย์ สันติ ภัยหลบลี้ (กรรมการผู้ตรวจโครงการ) สำหรับความรู้ด้านแผ่นดินไหว หนังสือต่างๆ และคำแนะนำมากมาย รวมทั้งมุมมองในแง่ดี

อาจารย์ บุศราศิริ ชนะ (กรรมการผู้ตรวจโครงการ) สำหรับคำแนะนำดีๆ ที่แนบคืนมา กับรายงานความก้าวหน้า

คุณ สุเมธ พันธุวงศ์ราช ชีรพงศ์ จิรัฎฐิภัทร์ และพรเลิศ เจียมจรัสรังษี (นิสิตภาควิชา ธรณีวิทยา) สำหรับความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล

และสุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า รวมทั้งผู้ที่คอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจหลายท่านที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้

Title (English) : NEAR SURFACE SHEAR-WAVE VELOCITY DISTRIBUTIONS IN
AMPHOE MUANG CHANGWAT CHIANG MAI

Title (Thai) : การกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือนระดับตื้น บริเวณอำเภอเมือง
จังหวัดเชียงใหม่

Student : Mr. PIRAYU SURICHAIPANICH

ID : 4932721023

ADVISOR : Dr. THANOP THITIMAKORN

YEAR : 2009

ABSTRACT

The shear wave velocity (V_s) of near surface soil is very important parameter in geotechnical earthquake engineering design. To get the V_s profile of soil, it generally acquires additional data obtained from borehole technique which is very expensive and time consuming. In this study, the V_s profile is carried out using the Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) on 44 sites in Amphoe Muang, Changwat Chiang Mai. Moreover, the weighted average V_s down to 30 meters ($V_{s(30)}$) was calculated for each site. Site class was then assigned to each MASW sites based on the recommendations of the 1997 National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) provisions to develop the site classification map of the study area. Based on the $V_{s(30)}$, the major part of the study area are predominantly classified as site class "D" with the average $V_{s(30)}$ of 298 m/s. Likewise, those sites located in the northwestern part of the area which are generally colluvial and some part of alluvial deposits have $V_{s(30)}$ greater than 360 m/s; therefore site class "C" has been assigned to them. As recommended by NEHRP, the soils with the lower shear-wave velocity values will experience more earthquake ground shaking than those of the bedrock due to the wave amplifying properties of the soil. Hence, the results of this study implied that the major part of the study area may experience a substantial ground shaking due to amplification of the soft soils.

หัวข้อ (ภาษาอังกฤษ) : NEAR SURFACE SHEAR-WAVE VELOCITY DISTRIBUTIONS
IN AMPHOE MUANG CHANGWAT CHIANG MAI

หัวข้อ (ภาษาไทย) : การกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณอำเภอเมือง จังหวัด
เชียงใหม่

นิสิต : นายภิรายุ สุริชัยพาณิชย์

รหัส : 4932721023

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.ฐานบ ธิติมากร

ปีการศึกษา : 2552

บทคัดย่อ

ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear-wave Velocity) บริเวณผิวดินเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญสำหรับวิศวกรรมธรณีแผ่นดินไหวในการออกแบบรากฐานโครงสร้างทางวิศวกรรมในบริเวณเสี่ยงภัยของแผ่นดินไหว หนึ่งในบริเวณดังกล่าวคือพื้นที่ศึกษาในบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

ความเร็วคลื่นเฉือนของดินสามารถทำการวัดได้หลายวิธีทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้ เวลานานและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาวิธีการวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนในสนามที่มีราคา ถูกและสามารถทำได้รวดเร็ว วิธีนี้เรียกว่า การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนผิวดินแบบหลายช่องรับสัญญาณ (Multi-channel Analysis of Surface Wave (MASW)) ซึ่งมีทั้งหมด 44 จุด ในพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ยังคำนวณค่าความเร็ว คลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร ($V_{s(30)}$) สำหรับกำหนดประเภทของความเร็วคลื่นเฉือนซึ่งเป็นพื้นฐานของข้อกำหนด NEHRP ปี ค.ศ.1997 (National Earthquake Hazards Reduction Program) ในการทำแผนที่จำแนกดินในพื้นที่ศึกษา โดยค่า $V_{s(30)}$ ส่วนใหญ่ของพื้นที่อยู่ในประเภท D มีค่าเฉลี่ยที่ 298 เมตรต่อวินาที นอกจากนี้บริเวณตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่ซึ่งดินส่วนใหญ่เป็นตะกอนเชิงเขาประกอบด้วย ตะกอนแม่น้ำบางส่วน มีค่า $V_{s(30)}$ มากกว่า 360 เมตรต่อวินาที ดินบริเวณนี้จึงจัดอยู่ในประเภท C

จากการแนะนำโดย NEHRP ดินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำมีการขยายการสั่นสะเทือนจากการเกิดแผ่นดินไหวมากกว่าดินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนสูง ดังนั้นผลจากการศึกษาบอกเป็นนัยว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของพื้นที่ศึกษามีคุณสมบัติขยายการสั่นสะเทือน

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	A
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	B
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	C
บทที่ 1: บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
วัตถุประสงค์	4
ขอบเขตการศึกษา	4
บทที่ 2: ธรณีวิทยาทั่วไป	5
ลักษณะทางธรณีวิทยาทั่วไปของแอ่งเชิงใหม่-ลำพูน	5
ลักษณะทางธรณีวิทยาทั่วไปของพื้นที่ที่ศึกษา	6
ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง	9
บริเวณที่มีความเสี่ยงต่อภัยแผ่นดินไหวสูงในประเทศไทย	11
ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน	12
บทที่ 4: ผลที่ได้และการแปลผล	26
บทที่ 5: อภิปรายและสรุปผล	30
เอกสารอ้างอิง	32
ภาคผนวก	34
ภาคผนวก ก ข้อมูล MASW	34
ภาคผนวก ข ความเร็วคลื่นเฉือน ณ ความลึกต่างๆ	42

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 หน่วยตะกอนในพื้นที่	20
ตารางที่ 4.1 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนและการจำแนกประเภทพื้นที่ ณ ตำแหน่งที่เก็บข้อมูล MASW	27
ตารางที่ 5.1 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยของตะกอนแต่ละหน่วย	30

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 1.1 พื้นที่ศึกษา	4
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างชั้นตะกอน บริเวณริมแม่น้ำปิง	6
รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางแนวเหนือ - ใต้ ของ typical subsoil ในพื้นที่ศึกษา	7
รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางแนวตะวันออก - ตะวันตก ของ typical subsoil ในพื้นที่ศึกษา	8
รูปที่ 2.4 แผนที่ธรณีสัณฐาน บริเวณจังหวัดเชียงใหม่	8
รูปที่ 2.5 ตำแหน่งของรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย	10
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวในประเทศไทยและบริเวณใกล้เคียง	12
รูปที่ 2.7 แผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย (แสดงค่า g)	13
รูปที่ 2.8 แผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในประเทศไทย (แสดงค่าเมอร์คัลลี)	14
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย	17
รูปที่ 3.2 การจำแนกประเภทพื้นที่โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือน	18
รูปที่ 3.3 แผนที่ธรณีวิทยา บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่	19
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ และตำแหน่งที่กำหนดสำหรับเก็บข้อมูล MASW	20
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QFL	20
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QFF	21
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QC	21
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QA	21
รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QF	22
รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QEL	22
รูปที่ 3.11 แผนที่ธรณีวิทยาและตำแหน่งการเก็บข้อมูล MASW	23
รูปที่ 3.12 เครื่องมือที่ใช้	23
รูปที่ 3.13 การเก็บข้อมูลคลื่นพื้นผิวด้วยวิธี MASW	24
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล MASW	25

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่	26
รูปที่ 4.2 แผนที่ความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่	28
รูปที่ 4.3 แผนที่การจำแนกประเภทพื้นที่จากความเร็วคลื่นเฉือน	29
รูปที่ 5.1 เส้นตัดขวาง 2 เส้น ในพื้นที่	30
รูปที่ 5.2 แสดงความเร็วคลื่นเฉือนของตะกอนแต่ละประเภท	31

บทที่ 1 บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การศึกษาผลกระทบจากแผ่นดินไหวในประเทศไทยได้มีความสำคัญและมีการศึกษากันอย่างจริงจังในช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา จากบันทึกการเกิดแผ่นดินไหวในอดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงให้เห็นว่าได้มีการเกิดแผ่นดินไหวขนาดปานกลางเกิดขึ้นหลายครั้งในภาคเหนือ ของประเทศไทย รวมทั้งข้อมูลการศึกษารอยเลื่อนมีพลังในภาคเหนือของประเทศไทยโดย ปัญญา จารุศิริ และคณะ (2543) แสดงให้เห็นว่ารอยเลื่อนมีพลังเหล่านี้มีความสามารถก่อให้เกิดแผ่นดินไหวขนาดปานกลางถึงใหญ่ได้ ซึ่งจังหวัดเชียงใหม่ ตั้งอยู่ไม่ห่างจากรอยเลื่อนเหล่านี้มากนัก จึงทำให้โอกาสที่จังหวัดเชียงใหม่โดยเฉพาะอย่างยิ่งอำเภอเมืองจะได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวดังกล่าวมีโอกาเป็นไปได้อีกมาก

นอกจากนั้นแล้วสภาพทางธรณีวิทยาของตัวเมืองเชียงใหม่ยังอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม เช่น อาคาร สะพาน รวมถึงระบบสาธารณูปโภคอื่นๆ ถ้าหากเกิดแผ่นดินไหวขนาดปานกลางถึงใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจาก ตัวเมืองเชียงใหม่ตั้งอยู่บนชั้นดินตะกอนที่ไม่แข็งตัว โดยดินดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สามารถขยายการสั่นสะเทือนให้มีความแรงมากขึ้น

คุณสมบัติการขยายการสั่นสะเทือนจากการเกิดแผ่นดินไหวของดินสามารถทำการคาดคะเนได้จากความเร็วของคลื่นเฉือน (Shear-wave Velocity) ของดิน โดยที่ดินที่ความเร็วคลื่นเฉือนต่ำมีกำลังขยายสูงกว่าดินที่ความเร็วคลื่นเฉือนสูง ความเร็วของคลื่นเฉือนสามารถวัดได้หลายวิธี ทั้งในสนามและ ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมักจะใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่สูง ปัจจุบันนี้มีการพัฒนาวิธีการวัดความเร็วคลื่นเฉือนในสนามที่มีราคาถูกลงและสามารถทำได้รวดเร็ว วิธีนี้เรียกว่า การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ (Multi-channel Analysis of Surface Wave (MASW)) (Park และคณะ, 1999)

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาและปรับปรุงข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้มีการออกแบบพัฒนาให้ครอบคลุมเรื่องกำลังรับน้ำหนักและความยืดหยุ่นของโครงสร้าง ซึ่งจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะการเคลื่อนตัวของพื้นผิวดิน (Ground motion) (สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2549) โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงลักษณะทางธรณีวิทยาและการกระตัวของความเร็วคลื่นเฉือนของดินบริเวณตัวเมืองเชียงใหม่รวมถึงพื้นที่ใกล้เคียง การศึกษาครั้งนี้ทำให้ทราบถึงลักษณะการขยายแรงแผ่นดินไหวของดินเนื่องจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวดิน รวมถึงการกระจายตัวของดินดังกล่าวในพื้นที่อำเภอเมืองเชียงใหม่ เพื่อ ทำให้เกิดประโยชน์ต่อการวางแผนการพัฒนาและวางแผนป้องกันภัยพิบัติอันเกิดจากแผ่นดินไหวต่อไปในอนาคต

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

Seed และคณะ (1987) ศึกษาคุณสมบัติการขยายแรงแผ่นดินไหวของดินบริเวณกรุงเทพมหานครหลังจากการเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ในปี ค.ศ. 1985 จากแผ่นดินไหวดังกล่าวทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างต่างๆ ในเม็กซิโกซิตี้เป็นอย่างมาก โดยเป็นผลมาจากการที่ดินในเม็กซิโกซิตี้มีคุณสมบัติการขยายแรงแผ่นดินไหวค่อนข้างมาก จากการศึกษาครั้งนี้ทำให้เกิดการตื่นตัวในศึกษาถึงคุณสมบัติของดินดังกล่าวในพื้นที่ต่างๆที่มีการสร้างเมืองอยู่บนชั้นดินที่มีคุณสมบัติคล้าย คลึงกับเม็กซิโกซิตี้

Nutalaya (1985) และ Hinthong (1995) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับรอยเลื่อนมีพลังในบริเวณประเทศไทยและพบว่ามียรอยเลื่อนที่คาดว่าจะยังมีพลังอยู่ทั้งหมด 22 รอยเลื่อน โดยที่ 7 รอยเลื่อนอยู่ในภาคเหนือของประเทศไทย โดยมีรอยเลื่อนที่คาดว่าจะยังมีพลัง 2 แนว วางตัวอยู่ระหว่างจังหวัดเชียงใหม่และเชียงราย คือรอยเลื่อนแม่ทาและรอยเลื่อนเถิน ซึ่ง จากการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่าแนวโน้มที่เกิดแผ่นดินไหวมากกว่า 6 ริกเตอร์ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยนั้นมีโอกาสเป็นไปได้

Ron Street และคณะ (2001) ได้จำแนกดินด้วยวิธี NEHRP ซึ่งเป็นการจำแนกดินตามความเร็วคลื่นเฉือน พบว่าสภาพของดินบริเวณแม่น้ำมิสซิสซิปปีมีอิทธิพลต่อลักษณะการสั่นสะเทือนของพื้นดินในขณะเกิดแผ่นดินไหว โดยเฉพาะดินที่อยู่ลึกลงไปประมาณ 100-1000 เมตร โดยใช้ความเร็วของคลื่นเฉือน ซึ่งความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่บริเวณแม่น้ำมิสซิสซิปปี เหนือระดับความลึก 30 เมตร มีค่า 180-360 เมตรต่อวินาที รวมทั้งความเร็วคลื่นเฉือนเหนือระดับ 30 เมตร ที่ห่างจากที่ราบน้ำท่วมถึง (Floodplain) ไปทางทิศตะวันตกของรัฐเคนตักกีและทิศตะวันตกของรัฐเทนเนสซีมีค่า 200-300 เมตรต่อวินาที ทั้งสองจึงถูกจัดประเภทเป็น Class D ในขณะที่ดินบริเวณทิศตะวันตกของรัฐเคนตักกีมีความเร็วของคลื่นเฉือนมากกว่า 360 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงถูกจัดเป็นประเภท Class C (360-760 เมตรต่อวินาที) ผลที่ได้คือ บริเวณที่มีคุณสมบัติการขยายแรงและคาบการเคลื่อนตัวของดินมากกว่าคือบริเวณที่จัด เป็น Class C

Srisoros (2003) จัดทำแผนที่เสี่ยงภัยจากแผ่นดินไหวในพื้นที่ตัวเมืองเชียงใหม่โดยใช้วิธี Microtremor โดยเก็บข้อมูล Microtremor รอบๆ พื้นที่อำเภอเมืองเชียงใหม่ทั้งหมด 102 จุด โดยทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติของดิน ณ จุดที่ทำการสำรวจ ซึ่งจากผลการศึกษาบ่งชี้ว่า บริเวณตำบล Somsai ทางตะวันตกของอำเภอเมือง รวมถึงพื้นที่ทางด้านเหนือของตำบล Sarapee มีค่าความถี่ธรรมชาติของดินอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 16 วินาที ซึ่งอาจ ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างที่มีความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของดิน

Stephenson และคณะ (2005) เปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการสำรวจคลื่นสั้นสะเทือนพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ (MASW) และการหักเหของ microtremor (ReMi) จาก 4 หลุมเจาะที่ระดับความลึกอย่างน้อย 260 เมตร ในหุบเขา Santa Clara รัฐแคลิฟอร์เนียเพื่อหาความใกล้เคียงของข้อมูลจาก 2 วิธีกับการวัด downhole โดยความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 50 และ 100 เมตร ซึ่งให้เห็นว่าข้อมูลจากวิธีทั้งสอง ตรงกับระดับความลึกในช่วง 15% ของความลึกของหลุมเจาะ ในขณะที่ Spectral amplifications ที่ได้จากการวัดคลื่นเฉือนในแต่ละหลุมเจาะที่ความลึกระดับ 15% คล้ายกับที่ได้จากวิธี MASW และ ReMi ผลที่ได้ทั้งหมดจึงสรุปว่าวิธี MASW และ ReMi เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนและสามารถประเมินคุณสมบัติการขยายแรงสั้นสะเทือนในแต่ละเมืองได้

Juntamat (2006) ทำการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพฯ ระหว่างวิธีการวิเคราะห์คลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ (MASW) และวิธีวัดจากหลุมเจาะ ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบพบว่าทั้งสองวิธีมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 13% แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์คลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณสามารถเชื่อถือได้ ในขณะที่ผลการเปรียบเทียบการจำแนกชนิดดินโดยค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากทั้งสองวิธีมีค่าต่างกันน้อยมาก เพราะฉะนั้นการหาความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีการวิเคราะห์คลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณจึงเป็นวิธีที่สามารถเชื่อถือได้อีกทั้งเป็นวิธีที่ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการวัดจากหลุมเจาะ

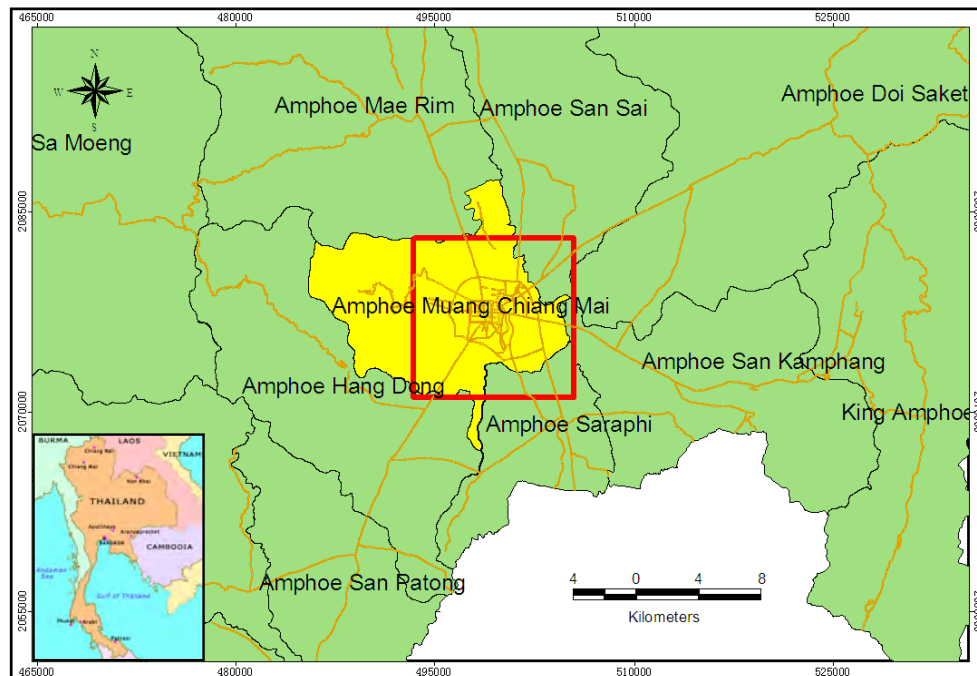
Mahajan (2008) เก็บข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนจำนวน 50 จุด บริเวณดินในตัวเมือง Dehradun ซึ่งเกิดจากการสะสมตัวแบบ Fan Deposits ตั้งอยู่ใน Siwilik Basin โดยใช้วิธี MASW พบว่าข้อมูลเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือนเหนือระดับความลึก 30 เมตร มีความเร็วอยู่ในช่วง 180-360 เมตรต่อวินาที จึงจำแนกให้เป็น Class D ในขณะที่ดินบริเวณทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออก และทิศตะวันออกเฉียงใต้ของตัวเมืองถูกจัดให้เป็น Class C เนื่องจากความเร็วคลื่นเฉือนมีค่าระหว่าง 360-760 เมตรต่อวินาที ตามการจำแนกด้วยวิธี NEHRP อีกทั้งบางพื้นที่ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้มีค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือนน้อยกว่า 180 เมตรต่อวินาที จึงจัดเป็น Class E จากข้อมูลดังกล่าว บริเวณที่มีคุณสมบัติการขยายแรงสั้นสะเทือนกลับเป็นพื้นที่ใน Class C

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. ศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาของดินในพื้นที่อำเภอเมืองเชียงใหม่
2. ศึกษาลักษณะเฉพาะของความเร็วคลื่นเฉือนของดินแต่ละกลุ่มที่อยู่ในบริเวณอำเภอเมืองเชียงใหม่
3. สร้างแผนที่แสดงการกระจายตัวของดินบริเวณอำเภอเมืองเชียงใหม่
4. ทำแผนที่แสดงการกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือนของดินบริเวณอำเภอเมืองเชียงใหม่

ขอบเขตของการศึกษา (Scope of work)

งานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากข้อมูลคลื่นผิวดินในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ในพื้นที่ครอบคลุม 99.55 ตร.กม. (รูปที่ 1.1) เพื่อจัดทำแผนที่ความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่ดังกล่าว เพื่อเกิดประโยชน์ต่อกา รวางแผนการพัฒนาและวางแผนป้องกันภัยพิบัติอันเกิดจากแผ่นดินไหวต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1.1 พื้นที่ที่ศึกษา ซึ่งอยู่ในกรอบสีแดง

บทที่ 2 ลักษณะทางธรณีวิทยา

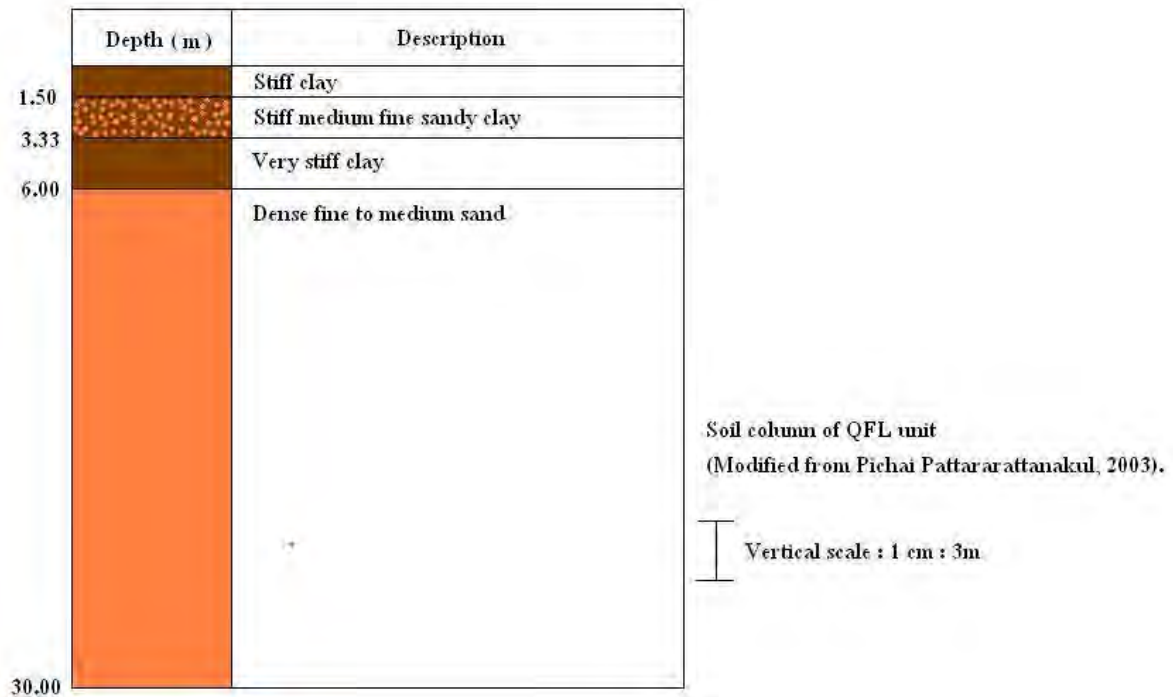
ธรณีวิทยาควอเทอร์นารี (Quaternary geology) ของภาคเหนือและภาคตะวันตกตอนบน เกือบทั้งหมดสะสมตัวในแอ่งระหว่างภูเขา (intermontane basin) ซึ่งแอ่งดังกล่าวเกิดจากรอยเลื่อน ก่อให้เกิดการเคลื่อนลงเป็นบล็อกแบบที่เรียกว่ากราเบนหรือกึ่งกราเบน (graben or half-graben) เช่น แอ่งเชียงใหม่ แอ่งลำปาง แอ่งลี้ เป็นต้น (ธรณีวิทยาประเทศไทย, 2544)

ตะกอนที่สะสมในแอ่งต่างๆ เป็นกลุ่มตะกอนที่เกิดจากกระบวนการธารน้ำพา (fluvial process) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดยุคควอเทอร์นารี โดยมีแม่น้ำสายหลัก 4 สาย คือ แม่น้ำปิง แม่น้ำวัง แม่น้ำยม และแม่น้ำน่าน โดยการไหลจากเหนือลงใต้ผ่านแอ่งระหว่างภูเขาต่างๆ ของแม่น้ำทั้ง 4 สายนี้ ก่อให้เกิดที่ราบน้ำท่วมถึง (flood plain) ตลอดสองฝั่งแม่น้ำ บริเวณที่ห่างจากแม่น้ำออกไปจะมีระดับที่สูงกว่าเป็นที่ลาดลอนคลื่นของตะพักลำน้ำ (terrace) ตะกอนเศษหินเชิงเขา (colluvium) และตะกอนน้ำพารูปพัด (alluvial fan) (รูปที่ 2.4)

ลักษณะทางธรณีวิทยาทั่วไปของแอ่งเชียงใหม่-ลำพูน

พื้นที่บริเวณแอ่งเชียงใหม่-ลำพูนรองรับด้วยหินร่วนคลุมพื้นที่ประมาณ 4,000 ตารางกิโลเมตร ความหนาเฉลี่ย 200 – 500 เมตร ประกอบด้วยหินร่วน 2 ชนิด คือ ตะกอนน้ำพายุคปัจจุบัน (recent flood plain deposits) และตะกอนน้ำพายุคเก่า (older alluvial deposits หรือ terrace deposits) (ธรณีวิทยาประเทศไทย, 2544)

ตะกอนน้ำพายุคปัจจุบัน คือ ตะกอนจากแม่น้ำปิง ความหนาเฉลี่ยของตะกอนประมาณ 20 – 50 เมตร อยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 20 – 80 เมตร ความยาวประมาณ 120 กิโลเมตร โดยยาวไปตามแม่น้ำปิง ลักษณะของตะกอนประกอบด้วยกรวดทรายที่มีการคัดขนาดดี มีชั้นดินเหนียวแทรกเป็นชั้นบางๆ และในหลายพื้นที่มีชั้นดินเหนียวปิดทับอยู่บนชั้นกรวดทราย (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างชั้นตะกอนบริเวณริมแม่น้ำปิง ดัดแปลงจาก
(พิชัย ภัทรรัตนกุล, 2546)

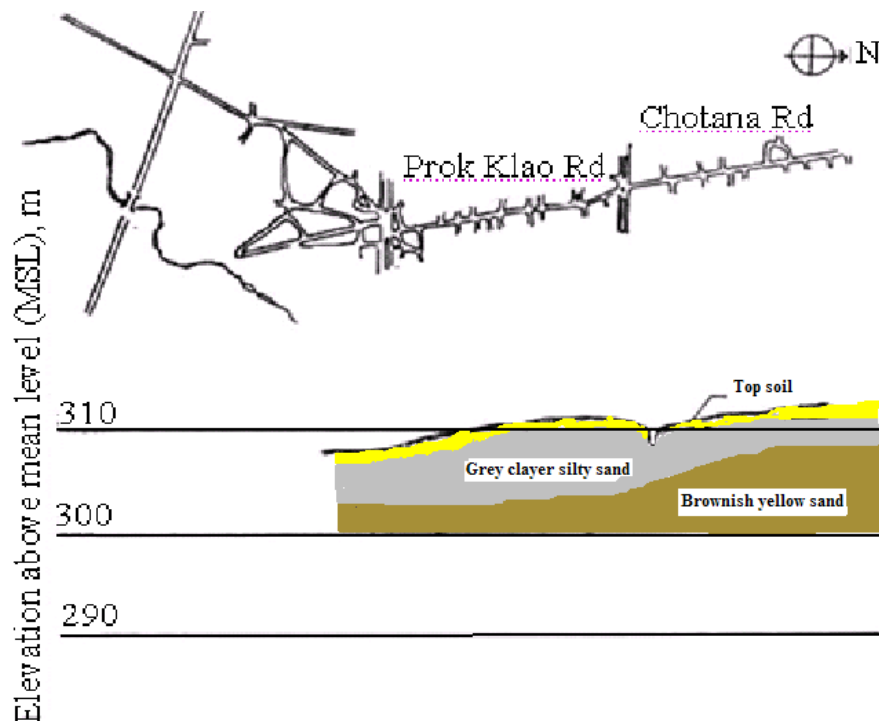
ตะกอนน้ำพายุคเก่าหรือตะกอนตะพักลำน้ำ (terrace deposits) ประกอบด้วยกรวดทรายและดินเหนียวโผล่ให้เห็นเป็นที่ราบขั้นบันไดบริเวณของแอ่ง แบ่งได้ 2 ชุด คือ ตะกอนตะพักลำน้ำระดับต่ำ (low terrace deposits) และ ตะกอนตะพักลำน้ำระดับสูง (high terrace deposits) ทั้งสองนี้ประกอบด้วยดินเหนียวและทรายละเอียดโดยมีชั้นกรวดและทรายหยาบแทรกสลับเป็นชั้นบางๆ หรือ เป็นเลนส์ ความหนาประมาณ 30 – 70 เมตร ลึกจากผิวดินประมาณ 100 – 150 เมตร

ลักษณะทางธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่

การเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาประกอบกับการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกในแนวตั้ง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนของแผ่นดิน (Tertiary Faulting) แผ่นดินทรุดตัวเป็นแอ่ง เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยเฉพาะแรงภายนอกที่ทำให้เกิดการกัดเซาะสึกกร่อน การพัดพาโดยน้ำและปัจจัยอื่นๆ ก่อให้เกิดการทับถมในแอ่งที่ราบเชียงใหม่- ลำพูน แม่น้ำปิงและสาขาซึ่งไหลมาจากเทือกเขาทางเหนือได้พัดเอาตะกอนต่างๆมาทับถมในแอ่งบริเวณที่แม่น้ำปิงไหลผ่าน รูปแบบของลำน้ำปิงในยุคเทอร์เชียรีเห็นได้จากตะพักลำน้ำระดับสูง (High Terrace) ซึ่งประกอบด้วยตะกอนจำพวกทราย (รูปที่ 2.2 และ 2.3) ทางตอนเหนือของเมืองเชียงใหม่ โดยตะพักลำน้ำเหล่านี้ เกิดจาก

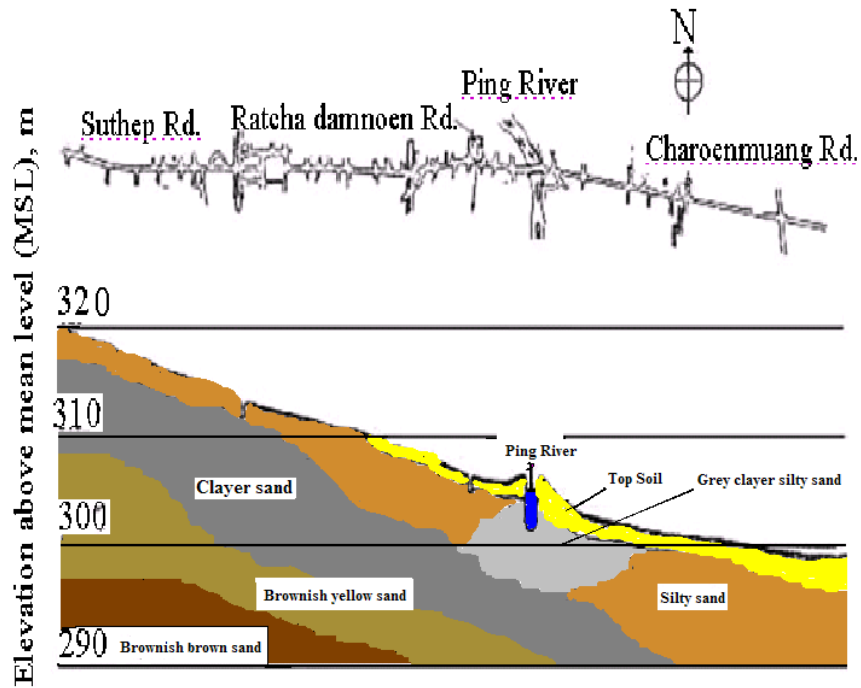
ตะกอนที่แม่น้ำปิงพามาทับถมหลายช่วงเวลาในอดีต จนมาถึงยุคควอเทอร์นารีที่แม่น้ำปิงกัดเซาะถึงระดับต่ำสุด จนทำให้เกิดการทับถมกลายเป็นที่ราบน้ำท่วมถึง (Flood Plain)

บริเวณทางตอนใต้ของเมืองเชียงใหม่ ความลาดเทของพื้นที่ประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ แม่น้ำปิงและลำน้ำสาขาที่พัดพาตะกอนมาทับถมทั้งบริเวณสองฝั่งลำน้ำ ท้องน้ำ และที่ราบน้ำท่วมถึง จากลักษณะทางธรณีสัณฐานดังกล่าว วัตถุหลายขนาดที่แม่น้ำพามาทับถม ทำให้บริเวณท้องน้ำและสองฝั่งลำน้ำตื้นเขิน เกิดการไหลบ่าและเกิดทางน้ำหลายสายมีลักษณะเป็นแม่น้ำประสานสาย (Braided Stream) บริเวณแอ่งที่ราบเชียงใหม่-ลำพูนมีลำธารจำนวนมากไหลลงมาจากภูเขารอบแอ่ง ในฤดูน้ำหลากปากลำ ธารต่างๆจึงเป็นที่ตกตะกอนและเป็นดินดอนสามเหลี่ยม โดยดินดอนสามเหลี่ยมนี้สิ้นสุดบริเวณธารประสานสายของแม่น้ำปิงและไหลเจาะช่องแคบออกไป ซึ่ง อยู่บริเวณตำบลวังลูน อำเภอฮอดในปัจจุบัน เป็นปากธารของแอ่งที่ราบเชียงใหม่-ลำพูน ดินดอนสามเหลี่ยมที่อยู่โดยรอบแอ่งเชียงใหม่-ลำพูน มีลักษณะเรียงกันเป็นที่ราบลาดเอียงหรือที่ราบเชิงเขา (Piedmont Plain) ดินบริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นดินปนทรายหรือปนกรวดทราย (ศุทธิณีทองสะอาด, 2531)

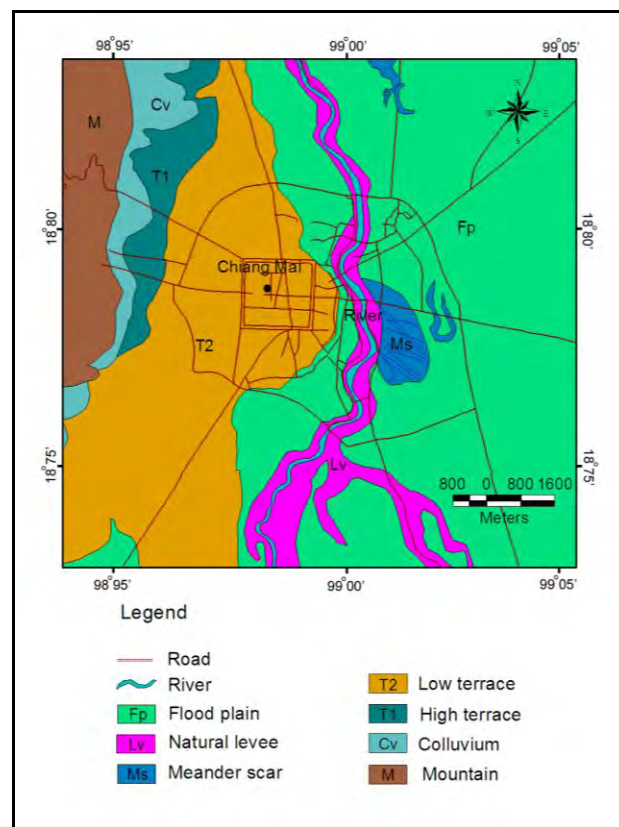


รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางในแนวเหนือ-ใต้ ของ typical subsoil บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ที่ดัดแปลงมาจาก Anantasech and Thanadpipat (1985)

(ดัดแปลงจาก พิชัย ภัทรรัตน์กุล, 2546)



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางในแนวตะวันออก-ตะวันตก ของ Typical subsoil บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ที่ดัดแปลงมาจาก Anantasech and Thanadpipat (1985)
(ดัดแปลงจาก พิชัย ภัทรรัตน์กุล, 2546)

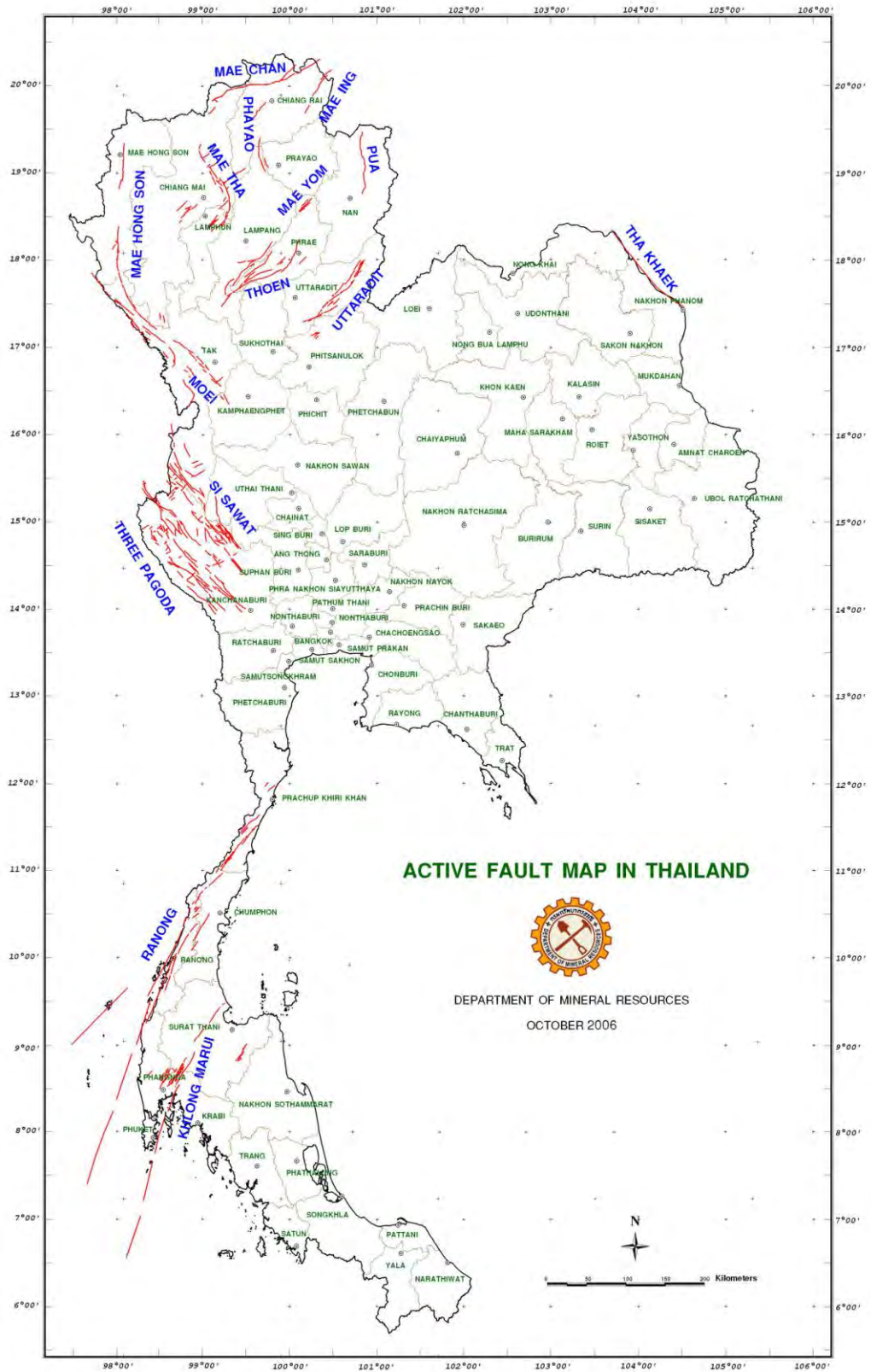


รูปที่ 2.4 แผนที่ธรณีสัณฐาน บริเวณจังหวัดเชียงใหม่

ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง

ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของชั้นหินในบริเวณภาคเหนือทั้งหมดที่พบปรากฏอยู่ในปัจจุบันได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกที่เกิดขึ้นในยุคต่างๆ อย่างน้อย 3 ครั้ง คือ การเคลื่อนไหวของเปลือกโลกตอนต้นยุค Carboniferous การเคลื่อนไหวของเปลือกโลกตอนปลายยุคไทรแอสซิก และการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกยุคครีเทเชียสถึงยุคเทอร์เชียรี ผลจากการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกทั้ง 3 ครั้ง ก่อให้เกิดโครงสร้างของชั้นหินในทิศทางต่างกันคือ แนวการโค้งงอของชั้นหินในทิศเหนือ-ใต้ รวมทั้งแนวตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นโครงสร้างของชั้นหินตั้งแต่กลางมหายุคพาลีโอโซอิก มาจนถึงยุคไทรแอสซิกในมหายุคมีโซโซอิก

โครงสร้างทางธรณีวิทยาตอนกลางภาคเหนือตั้งแต่ฝั่งตะวันออกของแอ่งเชียงใหม่ไปถึงส่วนที่มีผลทำให้เกิดรอยเลื่อนใหญ่ที่วางตัวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ที่ชื่อว่า รอยเลื่อนน่าน-อุตรดิตถ์ หรือ รอยเลื่อนเดียนเบียนฟู (Dien Bien Phu Fault) ระหว่างรอยเลื่อนแม่ทาซึ่งอยู่ใกล้กับพื้นที่ที่ศึกษา และรอยเลื่อนน่าน-อุตรดิตถ์ ยังมีรอยเลื่อนที่วางตัวในแนวเดียวกันอีกหลายรอยเลื่อน (ปัญญา จารุศิริ และคณะ, 2543) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งของรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย (www.dmr.go.th)

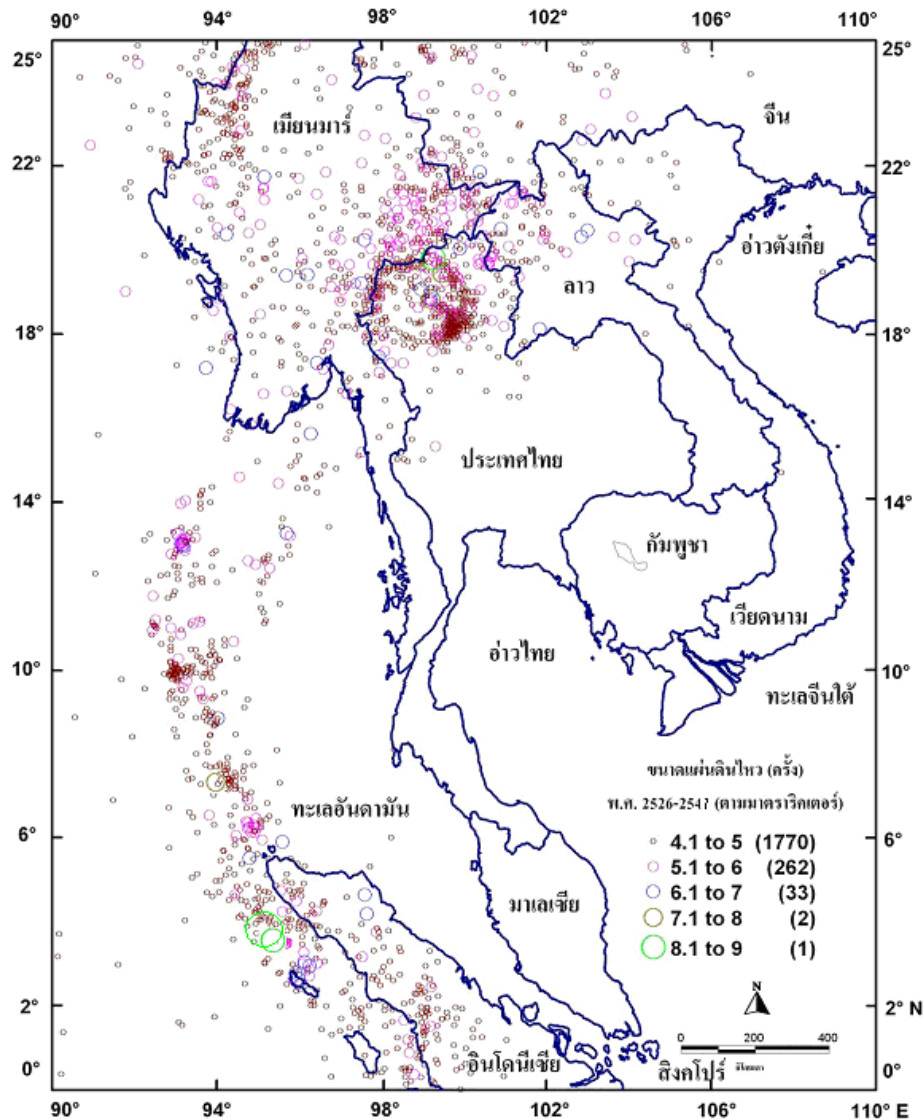
การรวบรวมข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหวในประวัติศาสตร์ของ ปริญญา นุตาลัย และคณะ (2528) และสิริลักษณ์ จันทรวงศ์ (2526) เช่น ศิลาคาริก จดหมายเหตุ บันทึกต่างๆทั้งทางดาราศาสตร์และประวัติศาสตร์ (ปริญญา จารุศิริ และคณะ, 2543) ระบุว่าในปี พ.ศ. 1558 ได้เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่บริเวณโยนกนคร ทำให้แผ่นดินยุบตัวลงกลายเป็นหนองน้ำขนาดใหญ่ รวมทั้งเป็นผลให้เมืองทั้งเมืองเกิดการล่มสลาย นอกจากนี้ ในปี พ.ศ. 2024, พ.ศ. 2088 และ พ.ศ. 2258 ได้มีแผ่นดินไหวเกิดขึ้น ซึ่งรู้สึกได้ที่จังหวัดเชียงใหม่ ในระดับ VI, VII และ VIII (ตามมาตราเมอร์คัลลี) ซึ่งเหตุการณ์เมื่อปี พ.ศ. 2088 ได้ก่อให้เกิดความเสียหายแก่องค์พระเจดีย์หลวง ที่ตั้งอยู่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ มียอดสูง 80 เมตร พังทลายลงมา

จากข้อมูลประวัติศาสตร์ดังกล่าว ทำให้เราทราบได้ว่า ประเทศไทยเคยมีแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงจนทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากมา โดยตำแหน่งและขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในคาบเวลา 80 ปี ได้แสดงในรูปที่ 2.7

แผ่นดินไหวเป็นภัยธรรมชาติที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน สิ่งก่อสร้าง แผ่นดินไหวเกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน โดยเกิดขึ้นได้ทั้งจากการกระทำของธรรมชาติและมนุษย์ ซึ่งหนึ่งในสาเหตุของการเกิดแผ่นดินไหวนั้น เกิดจากแนวรอยเลื่อน ที่ยังสามารถเคลื่อนตัวในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศ ได้แก่ รอยเลื่อนแม่ทา รอยเลื่อนแพ้ว รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ รอยเลื่อนคลองมะรุย เป็นต้น (ปริญญา จารุศิริ และคณะ, 2543)

บริเวณที่มีความเสี่ยงต่อภัยแผ่นดินไหวสูงในประเทศไทย (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2550) ได้แก่

1. บริเวณที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว ตามแนวรอยเลื่อนทั้งภายในและภายนอกประเทศส่วนใหญ่อยู่บริเวณ ภาคเหนือและตะวันตก ของประเทศไทย
2. บริเวณที่เคยมีประวัติการเกิดแผ่นดินไหวในอดีตและมีความเสียหายเกิดขึ้น จากนั้นเว้นช่วงการเกิดแผ่นดินไหว เป็นระยะเวลานาน ๆ
3. บริเวณที่เป็นดินอ่อนซึ่งสามารถขยายการสั่นสะเทือนได้ดี เช่น บริเวณที่มีดินเหนียวอยู่ใต้พื้นดินเป็นชั้นหนา เช่น บริเวณที่ลุ่ม หรืออยู่ใกล้ปากแม่น้ำ เป็นต้น



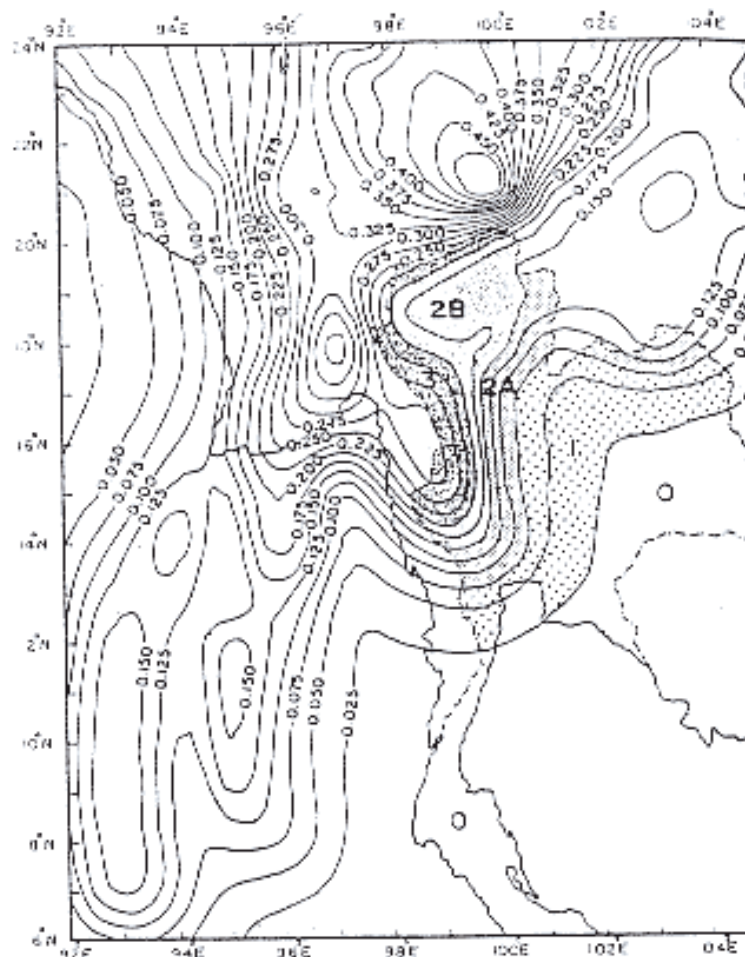
รูปที่ 2.6 แสดงตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวในประเทศไทยและบริเวณใกล้เคียง
(www.tmdseismology.com)

ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration)

ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration; PGA) เป็นค่าที่มีความสำคัญในการออกแบบเชิงวิศวกรรมของอาคารในบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวมีหน่วยเป็นค่าอัตราเร่ง ฟุต/วินาที² หรือ เซนติเมตร/วินาที² หรือ เป็นสัดส่วนของค่าอัตราเร่งหรือแรงโน้มถ่วงของโลก (% ของค่า g) หรือหน่วยเป็นกาล (gal) (ประมาณ 980 gal เท่ากับ 1 g หรือ 9.8 เมตรต่อวินาที²) ค่า PGA สามารถหาได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือ จากการวิเคราะห์จากคลื่นความสั่นสะเทือนที่ตรวจวัด

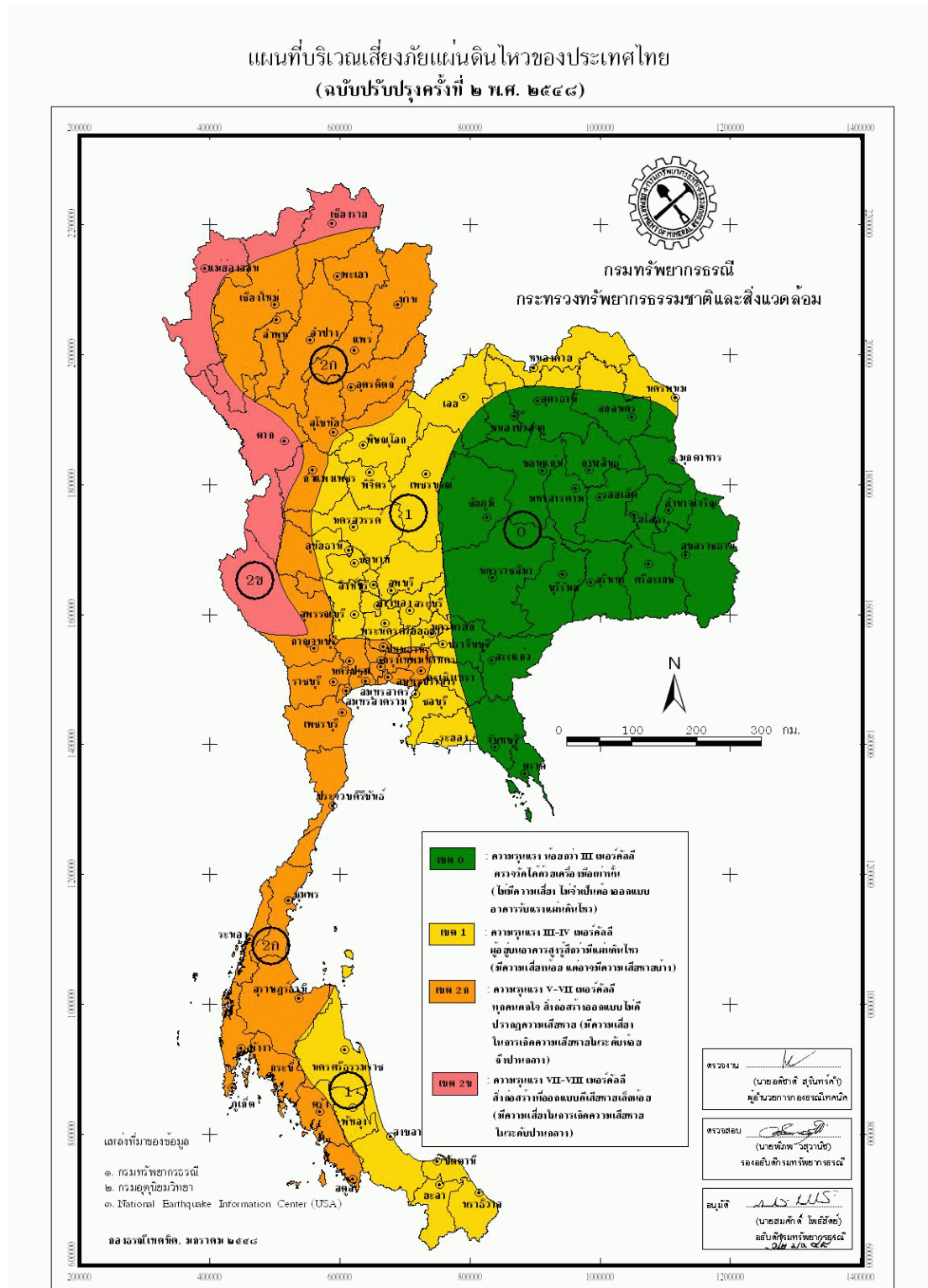
โดยทั่วไปในทางวิศวกรรมมักคำนึงถึงค่าอัตราเร่งสูงสุด เพราะกฎข้อที่สองของนิวตัน แรงเป็นสัดส่วนตรงกับมวลและอัตราเร่งยกกำลังสอง จึงเข้าใจว่าอัตราเร่งสูงจากแผ่นดินไหวขนาดใหญ่กว่าให้แรงมากกว่า แต่ก็มิใช่ข้อยกเว้นเช่นกัน บางครั้งแผ่นดินไหวขนาดใหญ่กว่าไม่จำเป็นต้องให้ค่าอัตราเร่งสูงสุดที่มากกว่า เช่นแผ่นดินไหวขนาด 6.5 อาจมีอัตราเร่งสูงสุดเท่ากับแผ่นดินไหวขนาด 4.5 ก็ได้

จากการคำนวณค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน โดย เป็นหนึ่ง วานิชชัย และคณะ (2537) ค่า PGA สูงสุดในประเทศที่ได้อยู่ระหว่าง 0.11g-0.27g ซึ่งจังหวัดเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ย PGA 1.8g ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อผนวกรวมกับแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทยฉบับปรับปรุงของกรมทรัพยากรธรณี (2548) พบว่าจังหวัดเชียงใหม่ตั้งอยู่บริเวณ 2A หรือ 2ก ซึ่งมีความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายระดับปานกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 แผนที่เสี่ยงภัยของแผ่นดินไหว ตัวเลขกำกับเส้น contour คือ อัตราส่วนระหว่างความเร่งสูงสุดในแนวราบของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในคาบเวลา 50 ปี ต่อ ความเร่งของสแนมโน้ม

ถ่วงโลก โดย ดร. เป็นหนึ่ง วานิชชัย (www.thai-creation.com)



รูปที่ 2.8 แผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทย ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 2 (กรมทรัพยากรธรณี, 2548)

อีกตัวแปรหนึ่ง คือ องค์ประกอบด้านความถี่ (Frequency content) เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวประกอบด้วยคลื่นสั้นสะเทือนที่ความถี่ (Frequency) หรือ คาบ (period) ต่างกัน ผสมกันขึ้นเป็นคลื่นแผ่นดินไหว ดังนั้นคลื่นแผ่นดินไหวจึงมีความสูงของคลื่นสูงสุด ณ ค่าความถี่หรือคาบที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ยังอาจมีความสูงของคลื่น (Amplitude) สูงอยู่ในหลายช่วงความถี่หรือหลายคาบ ซึ่งให้ผลลัพธ์ต่อการสั้นสะเทือนที่แตกต่างกัน อัตราเร่งสูงสุด, ความเร็วสูงสุด และการเคลื่อนที่สูงสุด จะเกิดได้ที่คาบเวลา (หรือความถี่) ที่แตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้มีผลกระทบต่ออาคารสิ่งก่อสร้างแตกต่างกัน เพราะ อาคารแต่ละแบบ แต่ละรูปร่าง แต่ละวัสดุ มีคาบธรรมชาติ (Natural period) หรือความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของตัวเองต่างกัน

ดังนั้น โอกาสที่อาคารหรือโครงสร้าง จะเสียหายหรือไม่ มากหรือน้อย จึงขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของคาบธรรมชาติของอาคารและความถี่ของแผ่นดินไหว เช่น กรณีแผ่นดินไหว Michoacan พ.ศ.2528 ขนาด 8.1 เกิดขึ้นที่ชายฝั่งแปซิฟิก 360 กิโลเมตรจากเมืองเม็กซิโกซิตี แต่สร้างความเสียหายอย่างรุนแรง มีคนเสียชีวิต 9,500 คน ค่า g ที่มาถึงเมือง มีค่าเพียง 0.04g แต่สภาพชั้นดินของเมืองที่สอดคล้องกับคาบการสั้นสะเทือนของแผ่นดินไหวมีค่าประมาณ

2 วินาทีเท่ากัน ทำให้เกิดการขยาย ความสูงของคลื่น เกิดการสั้นอย่างรุนแรงด้วยอัตราเร่งกว่า 5 เท่าของการสั้นสะเทือนในพื้นที่ที่เป็นหินแข็ง อาคารที่เสียหาย เป็นอาคารที่มีคาบธรรมชาติเท่ากัน (ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์, 2543)

คุณสมบัติการขยายการสั้นสะเทือนจากแผ่นดินไหวโดยชั้นดิน

การศึกษาของ ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ (2543) พบว่าหากฐานรากของสิ่งก่อสร้างเป็นดินแล้ว คลื่นแผ่นดินไหวจะถูกขยาย ซึ่งจะขยายมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน ความหนาของชั้นดิน ส่วนประกอบด้านความถี่ (Frequency content) ของคลื่นแผ่นดินไหว ผลของแอ่ง (basin effect) เป็นต้น

ถึงแม้ว่าเส้นทางการเดินทางของคลื่นแผ่นดินไหวส่วนใหญ่อยู่ในชั้นหิน โดยมีเส้นทางผ่านชั้นดินด้านบนเพียงเล็กน้อย แต่คุณลักษณะของชั้นดิน ก็ส่งผลกระทบต่อรูปร่างความรุนแรงของการสั้นสะเทือนที่ผิวดิน เนื่องจากชั้นดินเมื่อรับคลื่นแผ่นดินไหวแล้ว จะขยายคลื่นเฉพาะบางความถี่ ในขณะที่เดียวกันก็จะทำหน้าที่กรองคลื่นบางความถี่ออก (สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2549)

การสั้นสะเทือนของดินนั้น เกิดจากการเคลื่อนตัวของคลื่น แผ่นดินไหว จากชั้นหินชั้นล่างผ่านชั้นดินชั้นสู่ผิวดิน เมื่อเกิดแผ่นดินไหว คลื่นการสั้น แผ่นดินไหว อันประกอบด้วยคลื่นเฉือน (Shear wave) และ คลื่นกด (Compression wave) จะเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็วสู่ชั้นเปลือกโลก เมื่อคลื่นแผ่นดินไหวมาถึงพื้นผิว จะก่อให้เกิดการสั้นสะเทือน ขนาด และเวลาในการสั้นสะเทือน ในขณะที่ปัจจัยการขยายการสั้นสะเทือนเกิดจากอัตราส่วนระหว่างความเข้มคลื่นแผ่นดินไหวของ

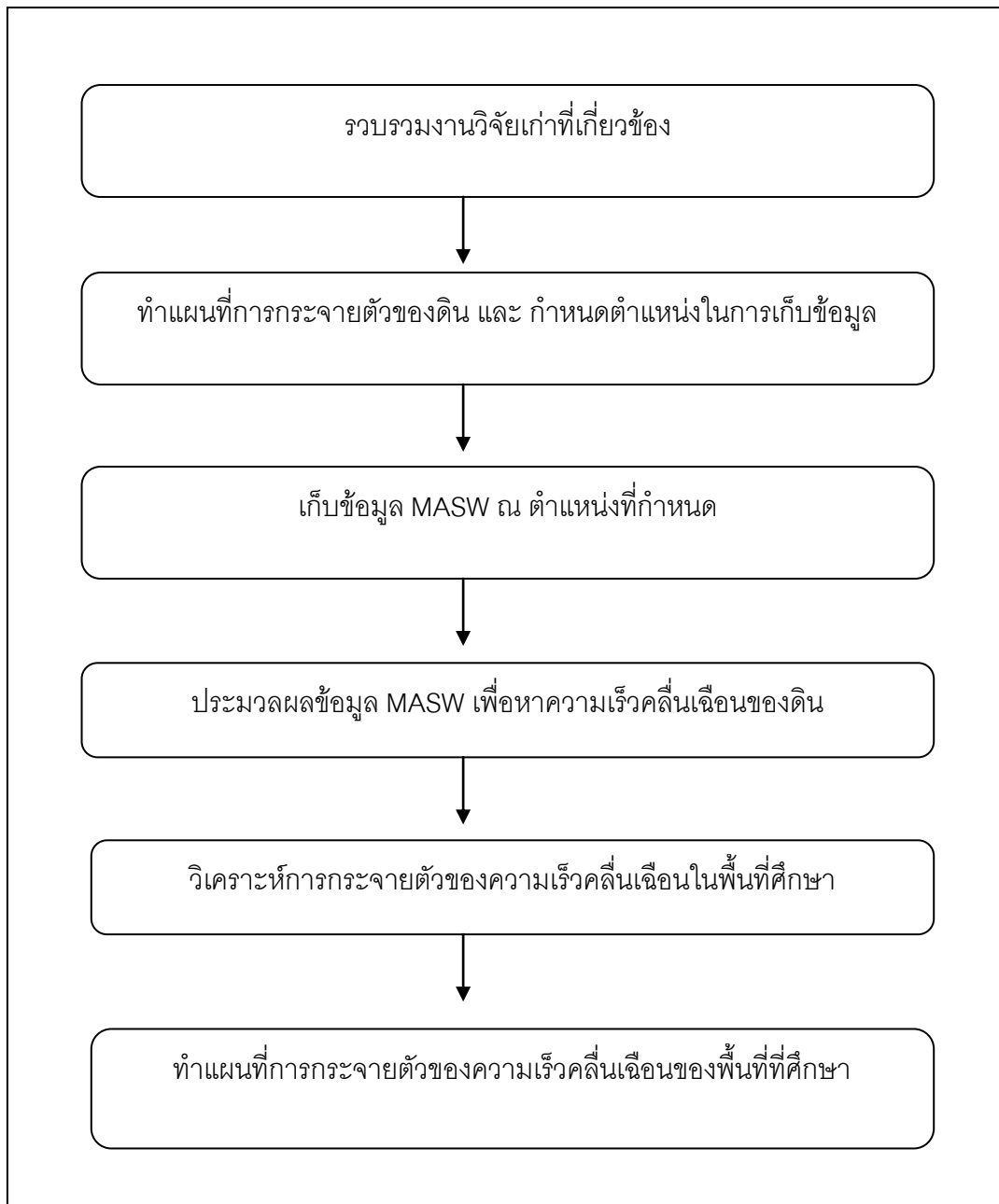
ดินชั้นบนต่อหินชั้นล่างที่เป็นหินฐาน นอกจากนี้อการขยาย การสั่นสะเทือนหาได้จากสูตรซึ่งเสนอ โดย Kanai (1957) ในสมการที่ 1 (พิชัย ภัทรรัตนกุล, 2546)

$$A = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1+k}{1-k} \left[1 - \left(\frac{T}{T_G} \right)^2 \right] \right]^2 + \left(\frac{0.3}{\sqrt{T_G}} \cdot \frac{T}{T_G} \right)^2}} \quad (1)$$

- เมื่อ A = ค่าการขยายการสั่นสะเทือนในดิน
 T = คาบการสั่นของคลื่นแผ่นดินไหว
 T_G = คาบของชั้นดิน
 k = $(p_1 \beta_1) * (p_2 \beta_2)$
 p_1 = ความหนาแน่นของชั้นดิน
 p_2 = ความหนาแน่นของหินฐาน
 β_1 = ความเร็วของคลื่นแผ่นดินไหวในชั้นดิน
 β_2 = ความเร็วของคลื่นแผ่นดินไหวในชั้นหินฐาน

บทที่ 3 ระเบียบงานวิจัย

ขั้นตอนการทำงานวิจัยถูกสรุปในตารางที่รูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

จากรูปที่ 3.1 **ขั้นแรก** คือ การรวบรวมข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับรอยเลื่อนมีพลัง ซึ่งสามารถก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนหรือแผ่นดินไหวจากพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งคลื่นเฉือน นอกจากนี้ยังรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาความเร็วคลื่นเฉือน (shear wave velocity) เพื่อใช้จำแนกดินแต่ละบริเวณที่มีความเร็วคลื่นเฉือนต่างกันออกเป็นคลาส (class) ต่างๆ ตามหลักของ National Earthquake Hazards Reduction Program provisions หรือ NEHRP (รูปที่ 3.2) โดยคลาสแต่ละคลาสสามารถบอกลักษณะความแข็งของดินซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับวิศวกรโยธาในการออกแบบโครงสร้างของฐานอาคารเพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว ตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

NEHRP site classification (BSSC, 1997)

Site class	Description	\bar{V}_s^a (m/s)
A	Hard rock	$\bar{V}_s > 1500$
B	Rock	$760 < \bar{V}_s \leq 1500$
C	Very dense soil and soft rock	$360 < \bar{V}_s \leq 760$
D	Stiff soil $15 \leq N^b \leq 50$ or $50 \text{ kPa} \leq s_u^c \leq 100 \text{ kPa}$	$180 < \bar{V}_s \leq 360$
E	Profile with more than 3 m of soft clay with $PI^d > 20$, $w^e \geq 40\%$, and $s_u < 25 \text{ kPa}$	$\bar{V}_s < 180$
F	(1) Soils susceptible to failure or collapse under seismic loading such as liquefiable soils, quick and highly sensitive clays, collapsible weakly cemented soils (2) Peats/highly organic clays with a thickness greater than 3 m. (3) Very high plasticity clays with a thickness greater than 8 m and $PI > 75$ (4) Very thick soft/medium stiff clays with a thickness greater than 36 m	

^a Average shear wave velocity in the upper 30 m.

^b SPT blow count.

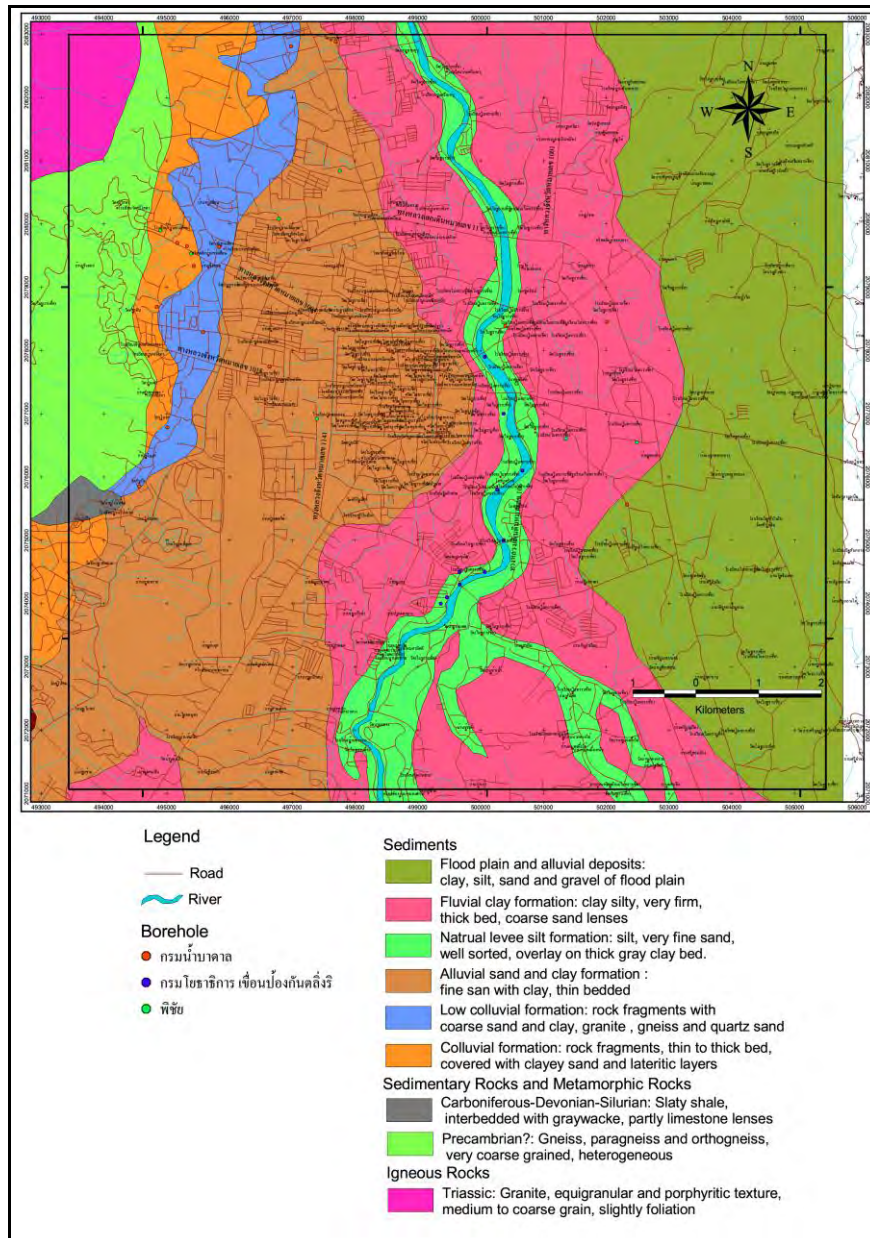
^c Undrained shear strength.

^d Plasticity index.

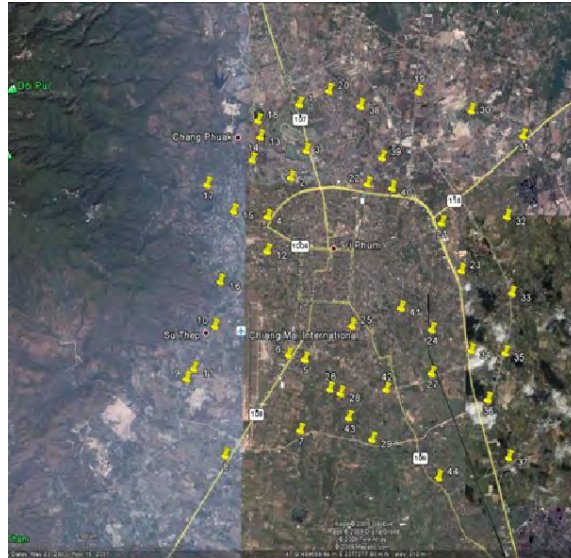
^e Water content.

รูปที่ 3.2 การจำแนกประเภทพื้นที่โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือน (BSSC, 1997)

ขั้นที่สอง คือ การทำแผนที่ธรณีวิทยาซึ่งปรับปรุงมาจากแผนธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี มาตราส่วน 1: 250,000 ระยะเวลาที่ 4746 I และภาพถ่ายทางอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และกำหนดตำแหน่งคร่าวๆ ในภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับการเก็บข้อมูล MASW (รูปที่ 3.4) ให้ครอบคลุมการกระจายตัวของดินในแผนที่ที่ได้



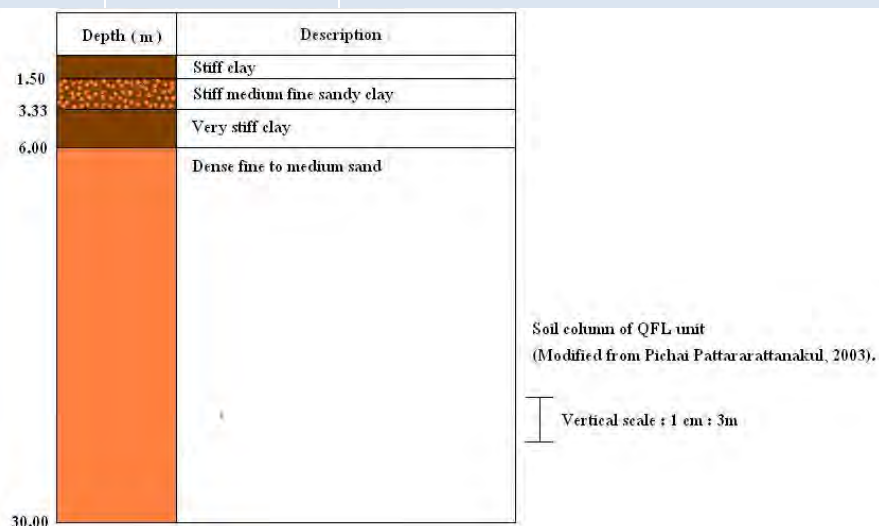
รูปที่ 3.3 แผนที่ธรณีวิทยา บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่



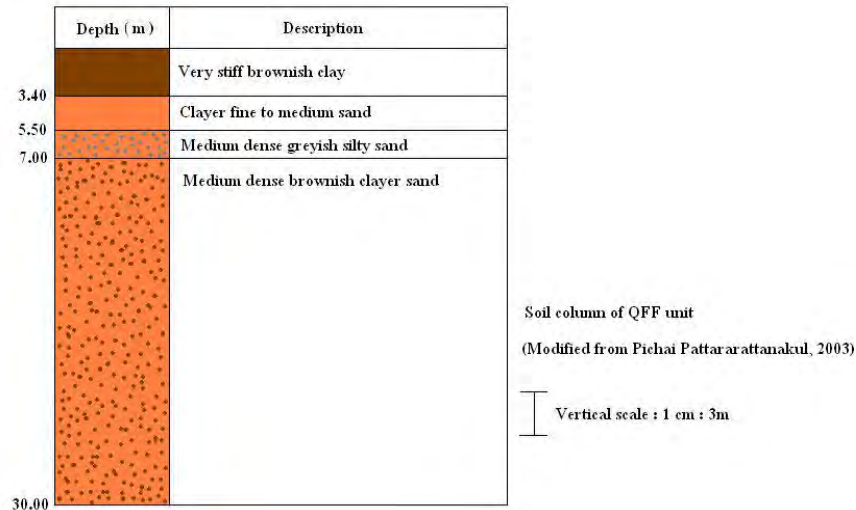
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ และตำแหน่งที่กำหนดสำหรับเก็บข้อมูล MASW

แผนที่ธรณีวิทยาดังกล่าวประกอบด้วย 6 Quaternary geologic units (ตารางที่ 3.1) ประกอบด้วยตัวอย่าง soil column ซึ่งดัดแปลงจากพิชัย ภัทรรัตนกุล (2546) ตารางที่ 3.1 แสดงหน่วยตะกอนที่พบในพื้นที่

1	Qfl (รูปที่ 3.5)	Natural levee silt formation
2	Qff (รูปที่ 3.6)	Fluvial clay formation
3	Qc (รูปที่ 3.7)	Colluvial formation
4	Qa (รูปที่ 3.8)	Alluvial sand and clay formation
5	Qf (รูปที่ 3.9)	Flood plain and alluvial deposits
6	Qel (รูปที่ 3.10)	Low colluvial formation



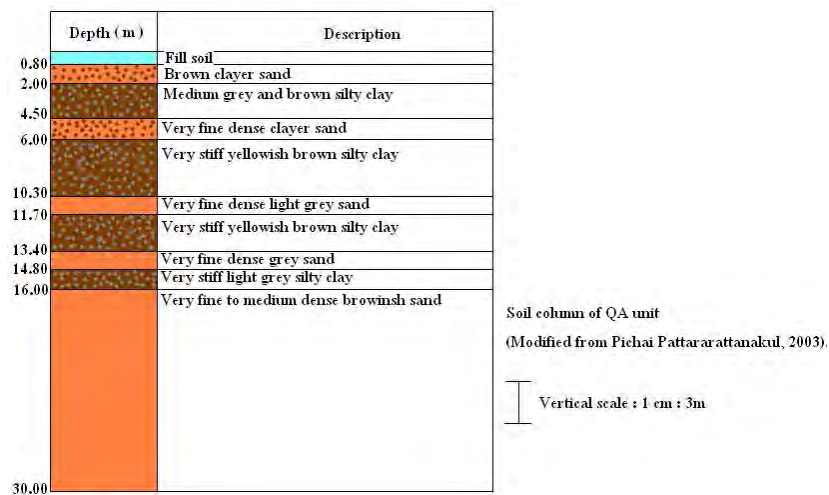
รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QFL



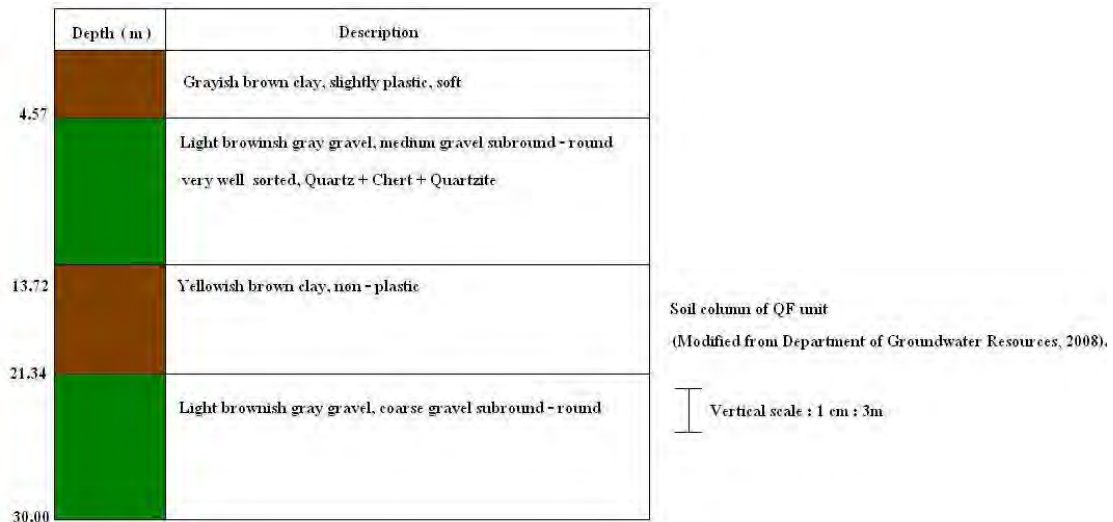
รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QFF



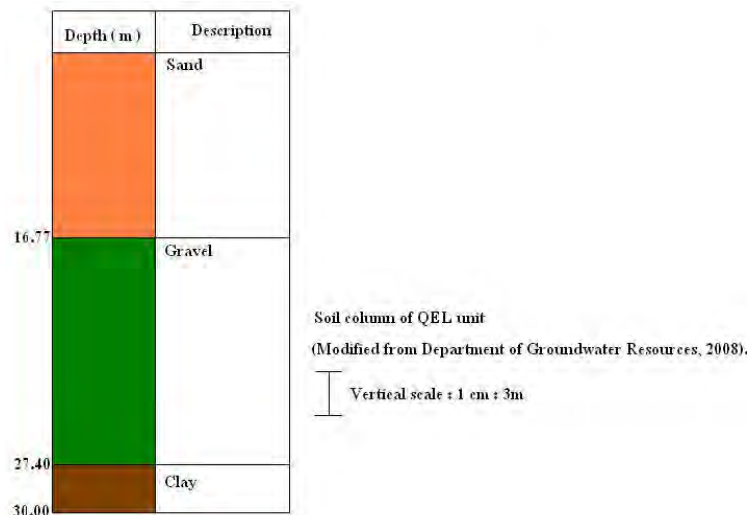
รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QC



รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QA



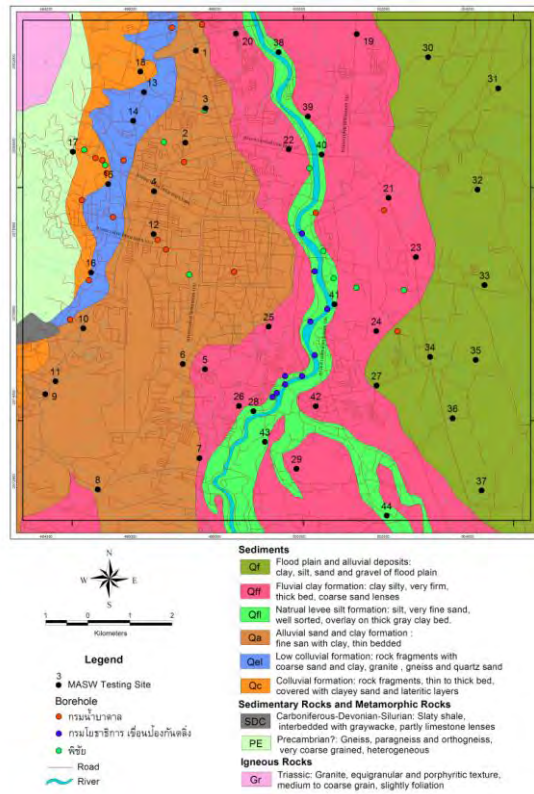
รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QF



รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างชั้นตะกอนของหน่วยตะกอน QEL

ชั้นที่สาม คือ เก็บข้อมูล MASW (ภาคผนวก ก) และพล็อตตำแหน่งที่เก็บลงในแผนที่ธรณีวิทยา เนื่องจากบางตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ในชั้นที่สองไม่สามารถเก็บข้อมูล MASW ได้เพราะเป็นที่ตั้งของสิ่งก่อสร้าง (รูปที่ 3.11) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ คือ (รูปที่ 3.12)

1. เครื่องตรวจวัดสัญญาณคลื่นสั่นสะเทือนแบบ 24 ช่องรับสัญญาณ
2. ตัวรับสัญญาณคลื่นสั่นสะเทือน ความถี่ 4.5 Hz. และแท่งอิเล็กทรอนิกส์ 24 แท่ง
3. ตัวกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนและแผ่นโลหะ
4. เทปวัดระยะ
5. เครื่อง GPS เพื่อกำหนดตำแหน่ง
6. สายเคเบิล 120 เมตร



รูปที่ 3.11 แผนที่ธรณีวิทยาและตำแหน่งการเก็บข้อมูล MASW



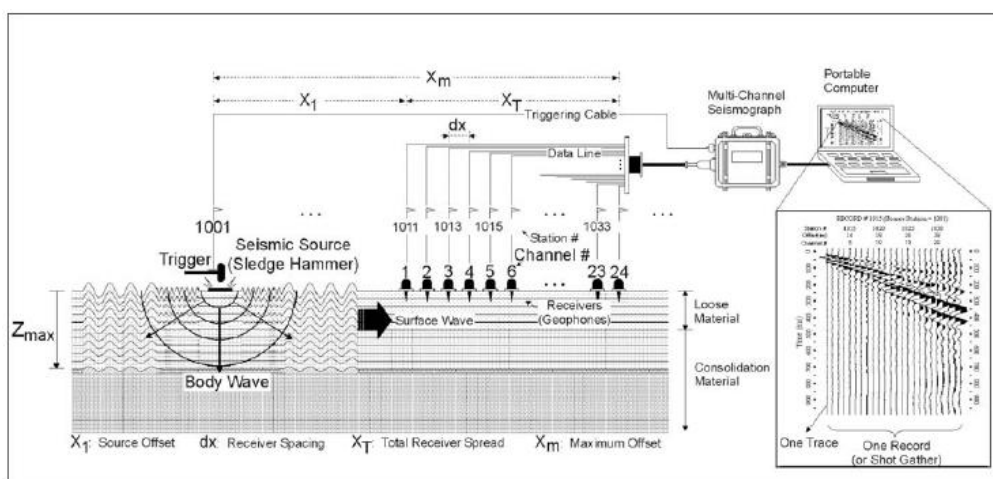
รูปที่ 3.12 เครื่องมือที่ใช้

ขั้นที่สี่ คือ ประมวลผลข้อมูล MASW เพื่อหาความเร็วคลื่นเฉือนของดิน โดยหลักการพื้นฐานของการสำรวจโดยใช้คลื่นสั้นสะท้อนพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ (MASW) (ภาคผนวก ข)

MASW เป็นวิธีหนึ่งในการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน (Seismic Methods) โดยตรวจวัดการเคลื่อนตัวของคลื่นพื้นผิวประเภทคลื่นเรลีย์ (Rayleigh Wave) แล้วแปลงคลื่นพื้นผิวให้เป็นความเร็วคลื่นเฉือน คลื่นพื้นผิวนั้นมักจัดให้เป็นคลื่นรบกวน (Noise) ในการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนทั่วไป และต้องกำจัดออกในขั้นการประมวลผล แต่วิธี MASW นี้ คลื่นพื้นผิวถูกจัดให้เป็นสัญญาณที่ต้องการ คลื่นพื้นผิวมีคุณสมบัติเด่นคือ คลื่นผิวดินสามารถให้กำเนิดได้ง่าย รวมทั้งสามารถตรวจจับและแยกแยะได้ง่ายเมื่อเทียบกับคลื่นชนิดอื่น

วิธีการเก็บข้อมูล MASW

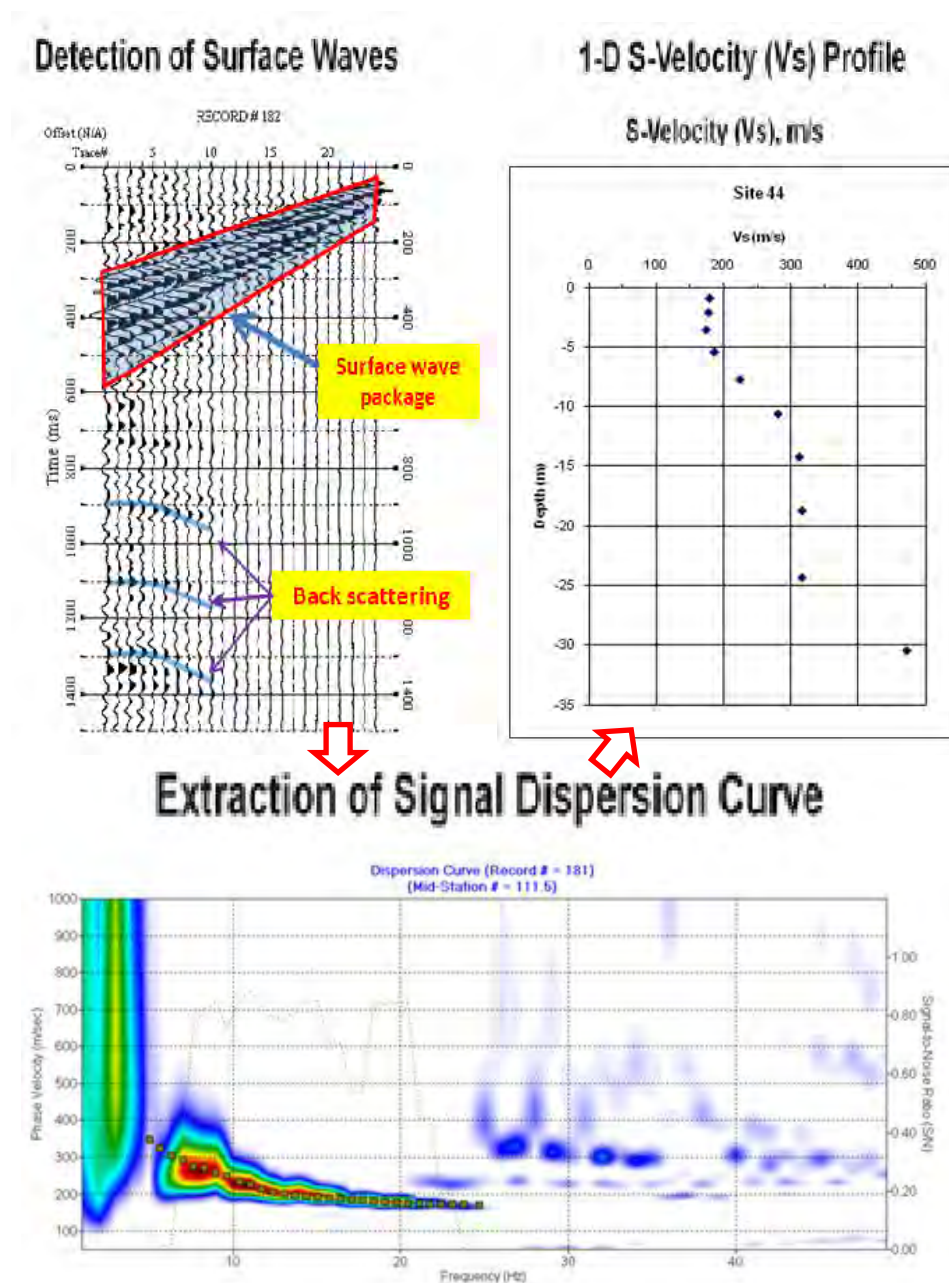
การเก็บข้อมูล MASW มีความใกล้เคียงกับการเก็บข้อมูลวิธีการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนทั่วไป ความแตกต่างคือ วิธีการ MASW ใช้ตัวรับสัญญาณที่มีความถี่ต่ำในช่วง 4-8 Hz ดังรูปที่ 3.16 แสดงการเก็บข้อมูลในสนาม ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ได้แก่ เครื่องรับสัญญาณ เครื่องคอมพิวเตอร์ ตัวรับสัญญาณ เครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยการเก็บข้อมูลเริ่มจากการวางตัวรับสัญญาณหลายๆ ตัว ลงบนพื้นดินเป็นแนวเส้นตรงที่ระยะห่างเท่ากับ dx จากนั้นให้กำเนิดคลื่นพื้นผิวในระยะห่างจากตัวรับสัญญาณตัวที่ 1 ที่ระยะ x_1 สัญญาณที่ถูกตรวจจับได้จากตัวรับทุกตัวจะถูกส่งไปที่เครื่องบันทึกสัญญาณ แล้วส่งต่อไปเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.13 การเก็บข้อมูลคลื่นพื้นผิวดังด้วยวิธี MASW (Park และคณะ, 1999)

การประมวลผลข้อมูล MASW

การประมวลผลผลข้อมูล MASW ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยขั้นตอนที่ 1 คือการนำข้อมูลที่อยู่ในคอมพิวเตอร์มาผ่านกระบวนการเบื้องต้นในการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ให้เหมาะสมสำหรับข้อมูลแต่ละชุด จากนั้นเปลี่ยนข้อมูลจากขั้นที่ 1 ให้อยู่ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วคลื่นพื้นผิวซึ่งเป็นขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนที่ 3 คือการหาความเร็วคลื่นเฉือนจากกราฟในขั้นตอนที่ 2 ด้วยวิธี Inversion ผลที่ได้คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนและความลึก



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล MASW (Park และคณะ. 1999)

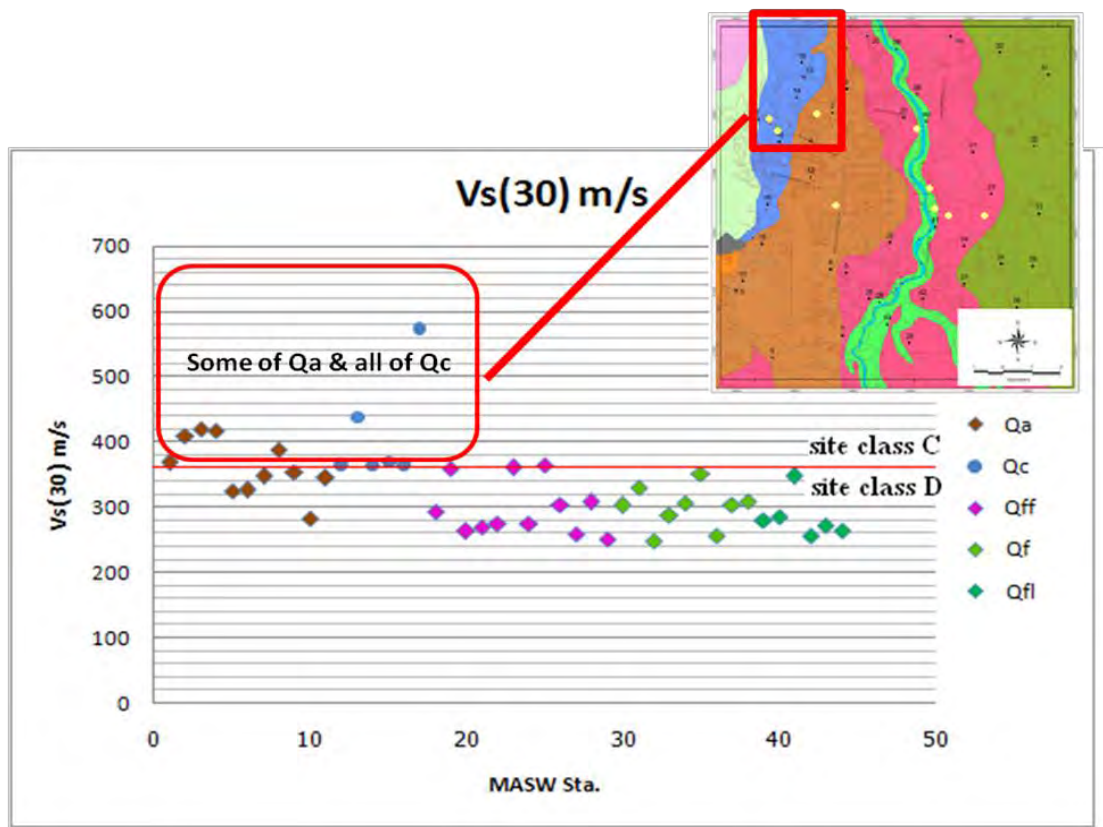
บทที่ 4 การแปลผลข้อมูลและผลที่ได้

การวิเคราะห์การกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่ศึกษา โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร จากภาคผนวก ข นำมาเฉลี่ยโดยใช้สูตรตามสมการ (2) เนื่องจากความลึกระดับนี้เป็นระดับของการวางโครงสร้างฐานรากทางวิศวกรรม

$$V_s(30) = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n d_i/V_{si}} \quad (2)$$

จากนั้นเทียบความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้กับ NEHRP classification (รูปที่ 3.2) โดยการเปรียบเทียบพบว่าตะกอนในพื้นที่ที่ทำการศึกษานั้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พื้นที่ประเภท C และ D (site class C and D) (ตารางที่ 3.2) โดยมีการกระจายตัวของข้อมูลดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 พบว่าพื้นที่ที่มีการกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือนระหว่าง 360 – 760 m/s ซึ่งจัดให้เป็นประเภท C นั้นกระจายตัวอยู่ในบริเวณตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่ (กรอบสีแดง) ที่ประกอบด้วยตะกอนในกลุ่มตะกอนแข็ง (Qc) และกลุ่มตะกอนแม่น้ำ (Qa) บางส่วน



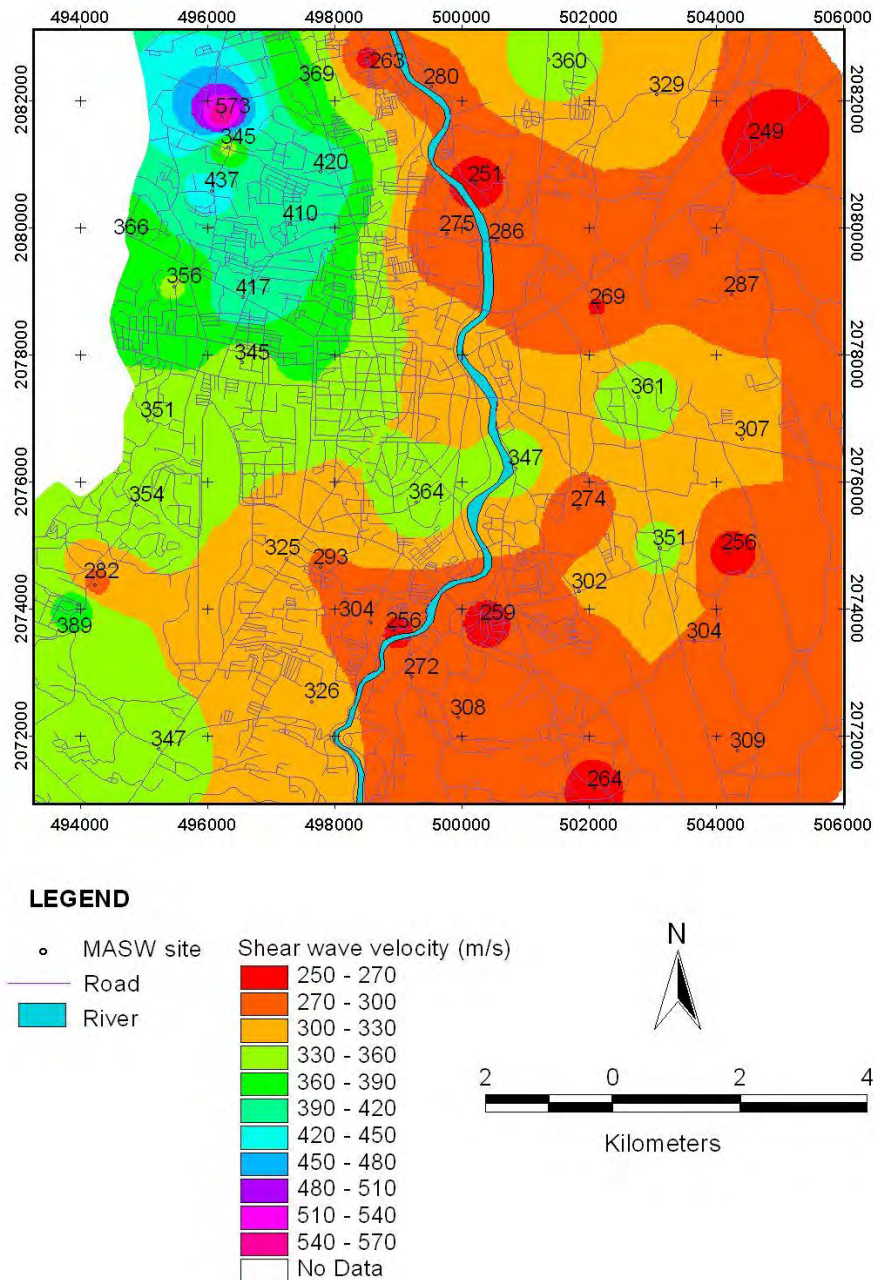
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนและการจำแนกประเภทพื้นที่ ณ ตำแหน่งที่เก็บข้อมูล

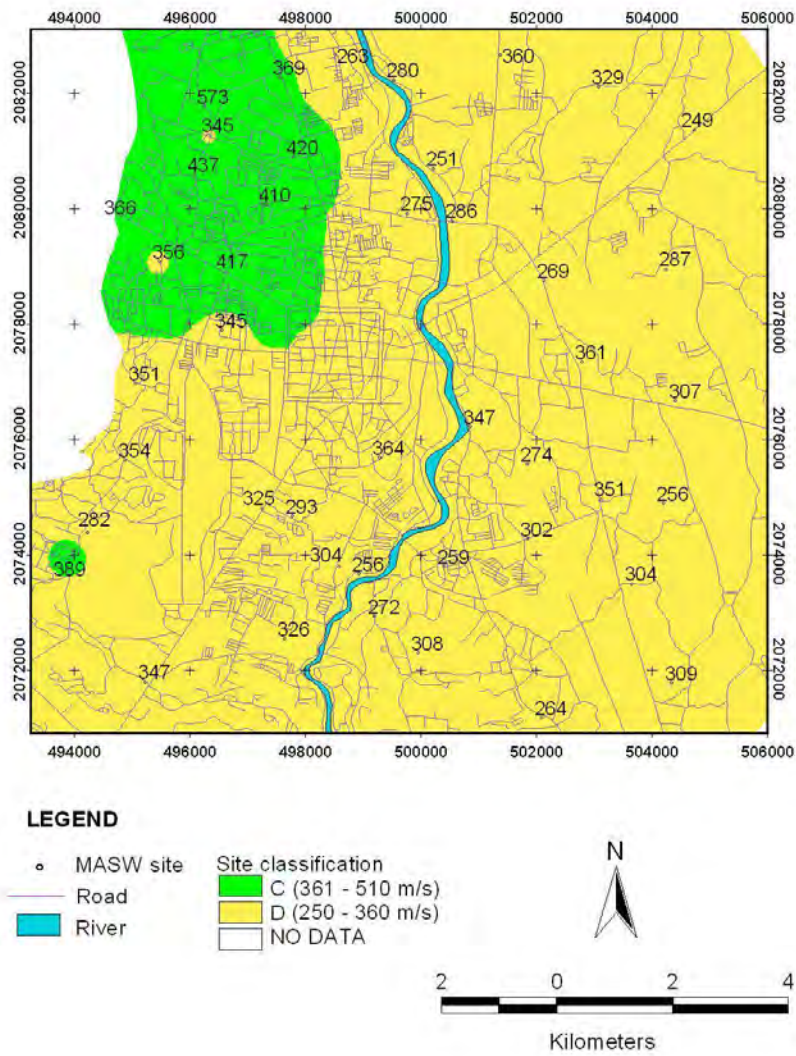
MASW

Position	Geologic symbol	UTM Grid x	UTM Grid y	Vs(30)m/s	site classification
1	Qa	497548	2082263	369	C
2	Qa	497297	2080069	410	C
3	Qa	497778	2080885	420	C
4	Qa	496555	2078909	417	C
5	Qff	497767	2074667	293	D
6	Qa	497238	2074791	325	D
7	Qa	497633	2072546	326	D
8	Qa	495220	2071800	347	D
9	Qa	493978	2074074	389	C
10	Qa	494877	2075642	354	D
11	Qa	494217	2074378	282	D
12	Qa	496545	2077886	345	D
13	Qel	496316	2081272	345	C
14	Qel	496063	2080588	437	C
15	Qel	495469	2079080	356	C
16	Qel	495058	2076972	351	C
17	Qc	494631	2079849	366	C
18	Qc	496234	2081760	573	C
19	Qff	501366	2082656	360	C
20	Qff	498502	2082667	263	D
21	Qff	502125	2078753	269	D
22	Qff	499752	2079909	275	D
23	Qff	502773	2077340	361	C
24	Qff	501832	2075576	274	D
25	Qff	499277	2075683	364	C
26	Qff	498572	2073791	304	D
27	Qf	501837	2074276	302	D
28	Qfl	498918	2073665	256	D
29	Qff	499938	2072294	308	D
30	Qf	503063	2082104	329	D
31	Qf	504727	2081362	249	D
32	Qf	504233	2078949	287	D
33	Qf	504402	2076672	307	D
34	Qf	503108	2074963	351	D
35	Qf	504194	2074888	256	D
36	Qf	503643	2073498	304	D
37	Qf	504332	2071776	309	D
38	Qfl	499514	2082224	280	D
39	Qff	500206	2080691	251	D
40	Qfl	500533	2079786	286	D
41	Qfl	500841	2076216	347	D
42	Qff	500395	2073787	259	D
43	Qfl	499190	2072935	272	D
44	Qfl	502079	2071175	264	D

การทำแผนที่การกระจายตัวของความเร็วคลื่นเฉือนของพื้นที่ที่ศึกษา สามารถทำโดยนำความเร็วคลื่นเฉือนจากตารางที่ 4.1 ใส่ในโปรแกรม Arcview 3.2 เพื่อแบ่งขอบเขตโดยกำหนดช่วงความต่างระดับ (contour interval) เท่ากับ 10 (รูปที่ 4.2) เพื่อนำไปประยุกต์สำหรับการจำแนกประเภทของพื้นที่ (site classification) (รูปที่ 4.3) โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือน (BSSC, 1997)



รูปที่ 4.2 แผนที่ความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่



รูปที่ 4.3 แผนที่การจำแนกประเภทพื้นที่จากความเร็วคลื่นเฉือน

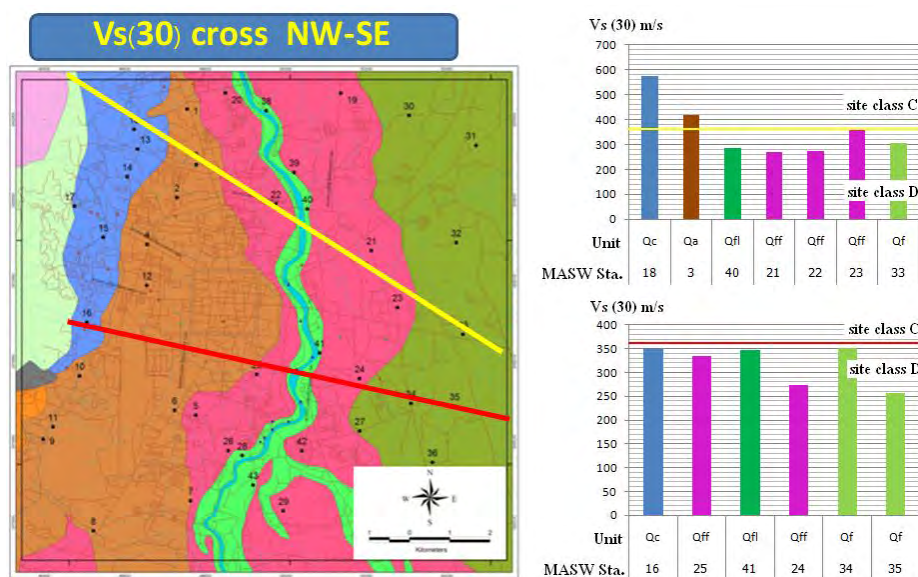
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผล

ลักษณะธรณีวิทยาของตะกอนในพื้นที่ที่สามารถจำแนกได้ 5 ประเภท ตามตารางที่ 3.1 ในขณะที่แผนที่การจำแนกประเภทของตะกอนที่ได้จากความเร็วคลื่นเฉือนทั้ง 44 จุด แบ่ง 2 ประเภท จากแผนที่การกระจายตัวของประเภทพื้นที่และการลากเส้นตัดขวางในพื้นที่ 2 เส้น ให้ผ่านจุดที่เก็บข้อมูลมากที่สุด (รูปที่ 5.1) พบว่าตะกอนส่วนใหญ่ที่ปกคลุมอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ จัดเป็นประเภท D ที่เกิดจากกระบวนการสะสมตัวทางน้ำ ซึ่งมีอ่อนตัวกว่าประเภท C (BSSC, 1997) ที่กระจายตัวอยู่บริเวณตะวันตกเฉียงเหนือ บริเวณเทือกเขาสุเทพ โดยส่วนใหญ่เป็นตะกอนเชิงเขาที่เกิดจากการผุพังและสะสมตัวอยู่กับที่

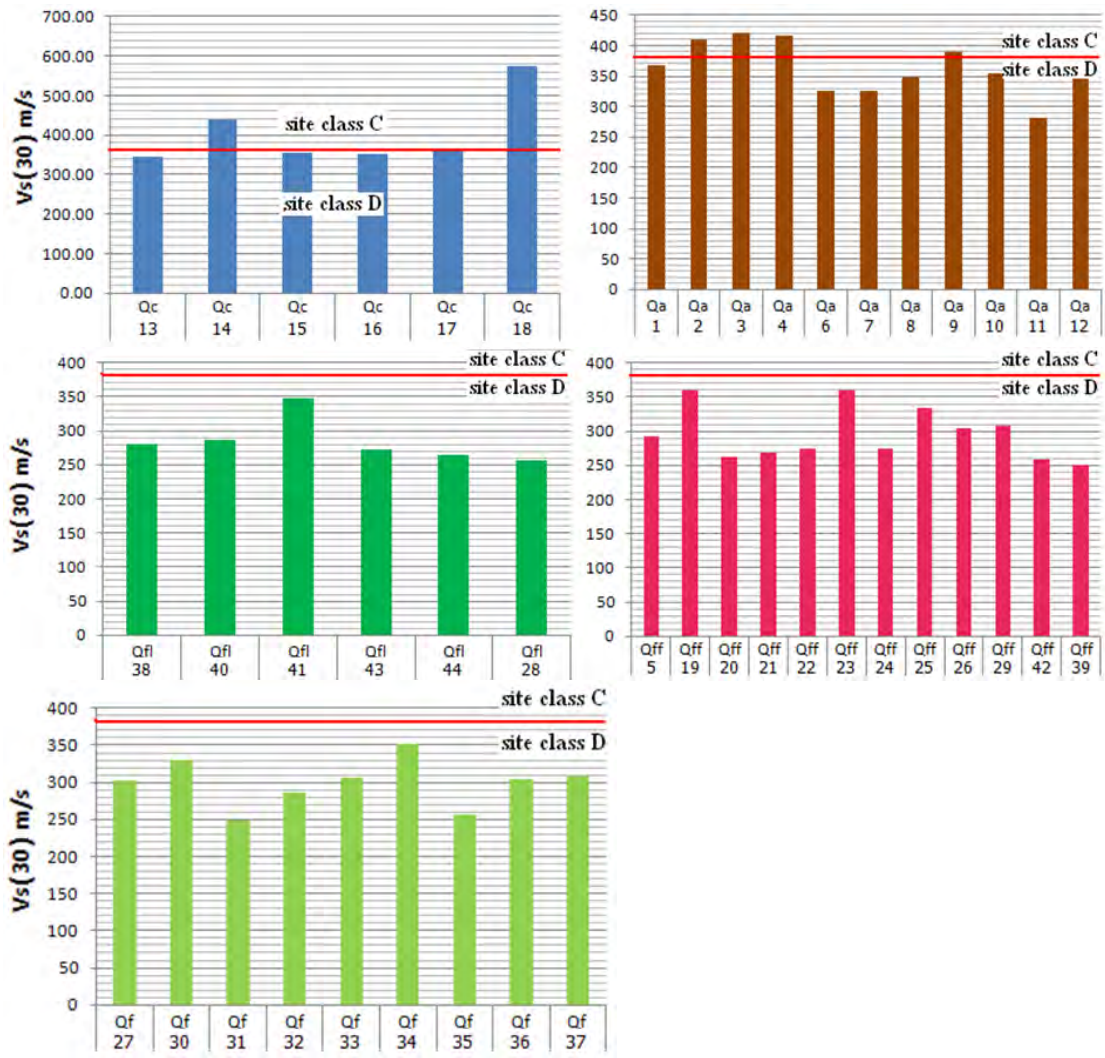
หากพิจารณาความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยของตะกอนแต่ละประเภทตามตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 พบว่า ตะกอน 2 ประเภท คือ Qa และ Qc มีค่าเฉลี่ยอยู่ในการจำแนกพื้นที่ประเภท C ในขณะที่ประเภทอื่นมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยอยู่ในประเภท D ซึ่งมีความเสี่ยงสูงในการขยายแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและมีหลายตัวแปรใน NEHRP provisions สำหรับการวางแผนก่อสร้างรากฐานและโครงสร้างทางวิศวกรรมในพื้นที่ดังกล่าว

ตารางที่ 5.1 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของตะกอนแต่ละประเภท

ประเภทของตะกอน	Qc	Qa	Qfl	Qff	Qf
ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย (m/s)	404.67	362.00	284.00	296.00	299.00
Site class	C	C	D	D	D



รูปที่ 5.1 เส้นตัดขวาง 2 เส้น ในพื้นที่



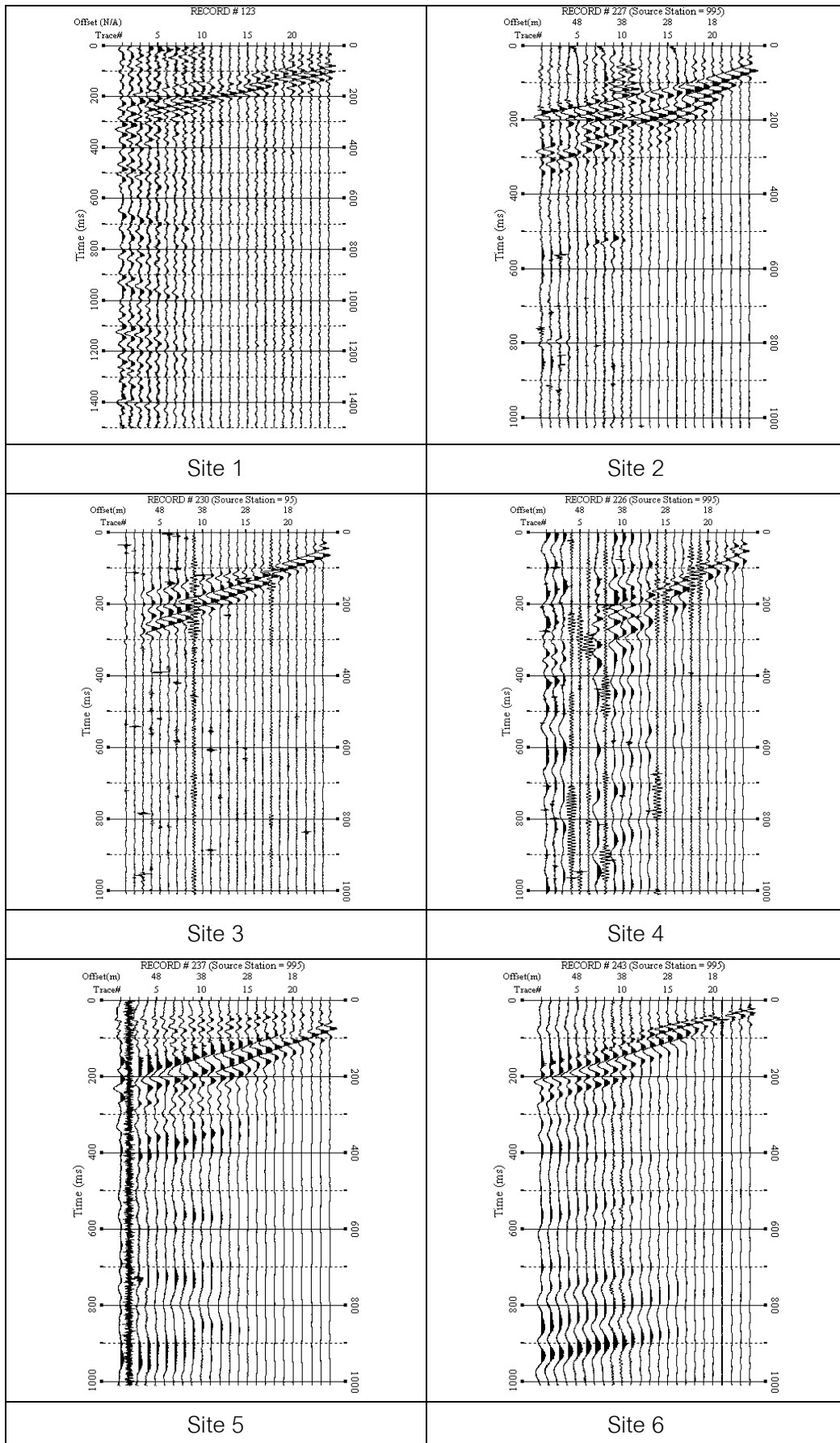
รูปที่ 5.2 แสดงความเร็วคลื่นเฉือนของตะกอนแต่ละประเภท

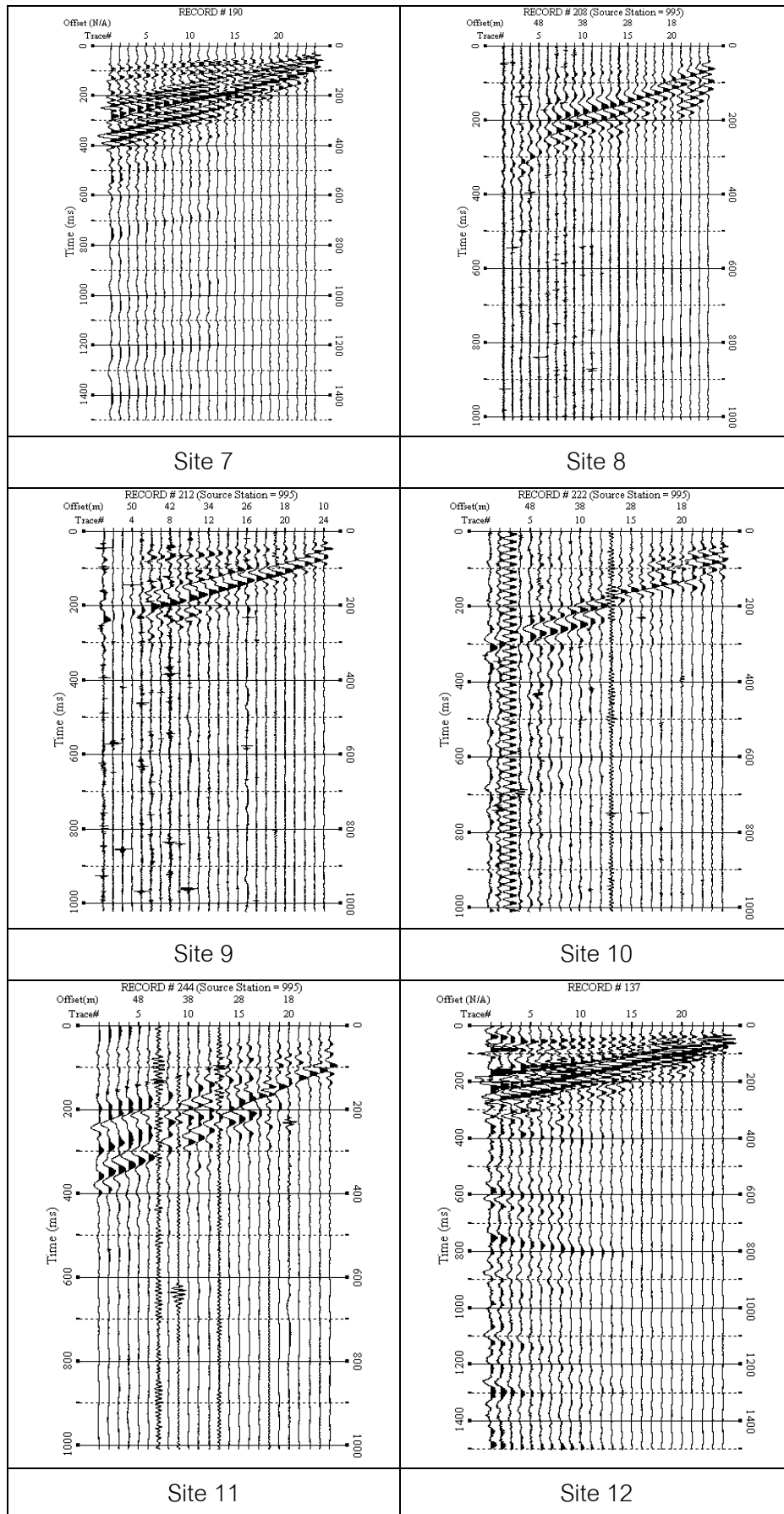
เอกสารอ้างอิง

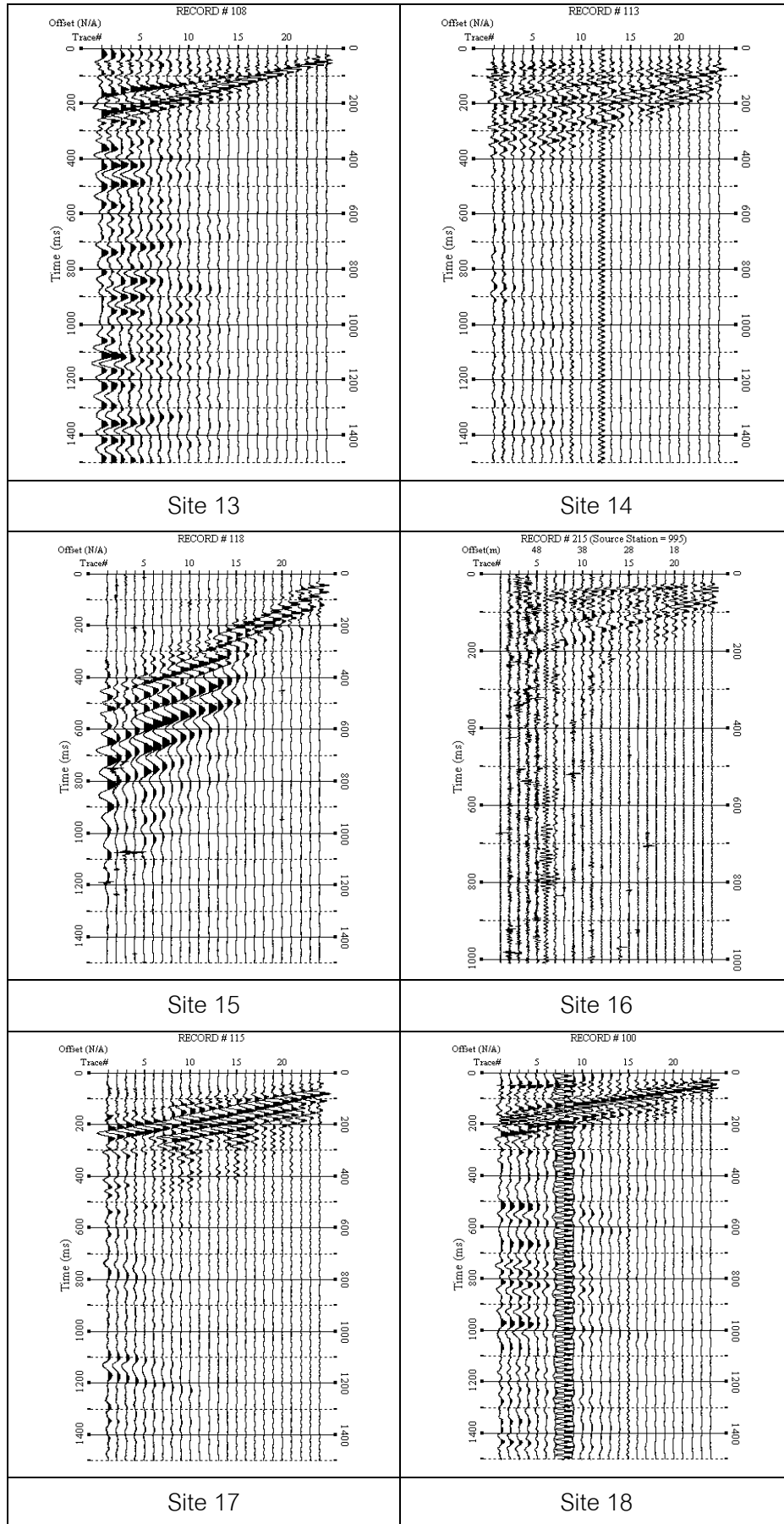
- กรมทรัพยากรธรณี, 2544. ธรณีวิทยาประเทศไทย เฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคล เฉลิมพระชนมพรรษา 6 รอบ 5 ธันวาคม 2552, กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม, 556 หน้า.
- ปัญญา จารุศิริ, สุวิทย์ ไคสุวรรณม, วิโรจน์ ดาวฤกษ์, บุรินทร์ เวชบันเทิง และสุทธิพันธ์ ขุทธานนท์ 2543. รายงานวิจัย (ฉบับสมบูรณ์) แผ่นดินไหวในประเทศไทย และพื้นแผ่นดินเอเชียตะวันออกเฉียงใต้, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เสนอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว), 171 หน้า.
- ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์, 2543. กฎกระทรวงฯ กับการออกแบบอาคารต้านภัยแผ่นดินไหว, โยธา สาร ฉบับมกราคม – มีนาคม 2543, คณะกรรมการแผ่นดินไหวแห่งชาติ
- พิชัย ภัทรรัตนกุล, 2546. กำลังต้านทานการเกิดสภาวะลึควีแฟกชันของชั้นดินทรายในภาคเหนือของประเทศไทย วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 2549. พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์, กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 248 หน้า.
- ศุภินี ทองสะอาด, 2531. การศึกษาร่องรอยทางน้ำเก่าของแม่น้ำปิงในบริเวณที่ราบเชียงใหม่-ลำพูน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- Mahajan, A.K., NEHRP soil classification and estimation of 1-D site effect of Dehradun fan deposits using shear wave velocity, Engineering Geology, volume 104, Issues 3-4 , 23 March 2009, Pages 232-240.
- BSSC, 1997. Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings, Part 1 – Provisions. Prepared by Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Nutalaya, P., Sodsri, S. and Arnold, E. P., 1985. Southeast Asia Association of Seismology and Earthquake Engineering, Series on Seismology, v. II – Thailand, Bangkok, 403 p.
- Nutalaya, P. and Shrestha, 1990. Earthquake ground motions and seismic risk in Thailand, Proc. 1990 Annual Conf., Engineering Institute of Thailand, Bangkok, pp 55-57.

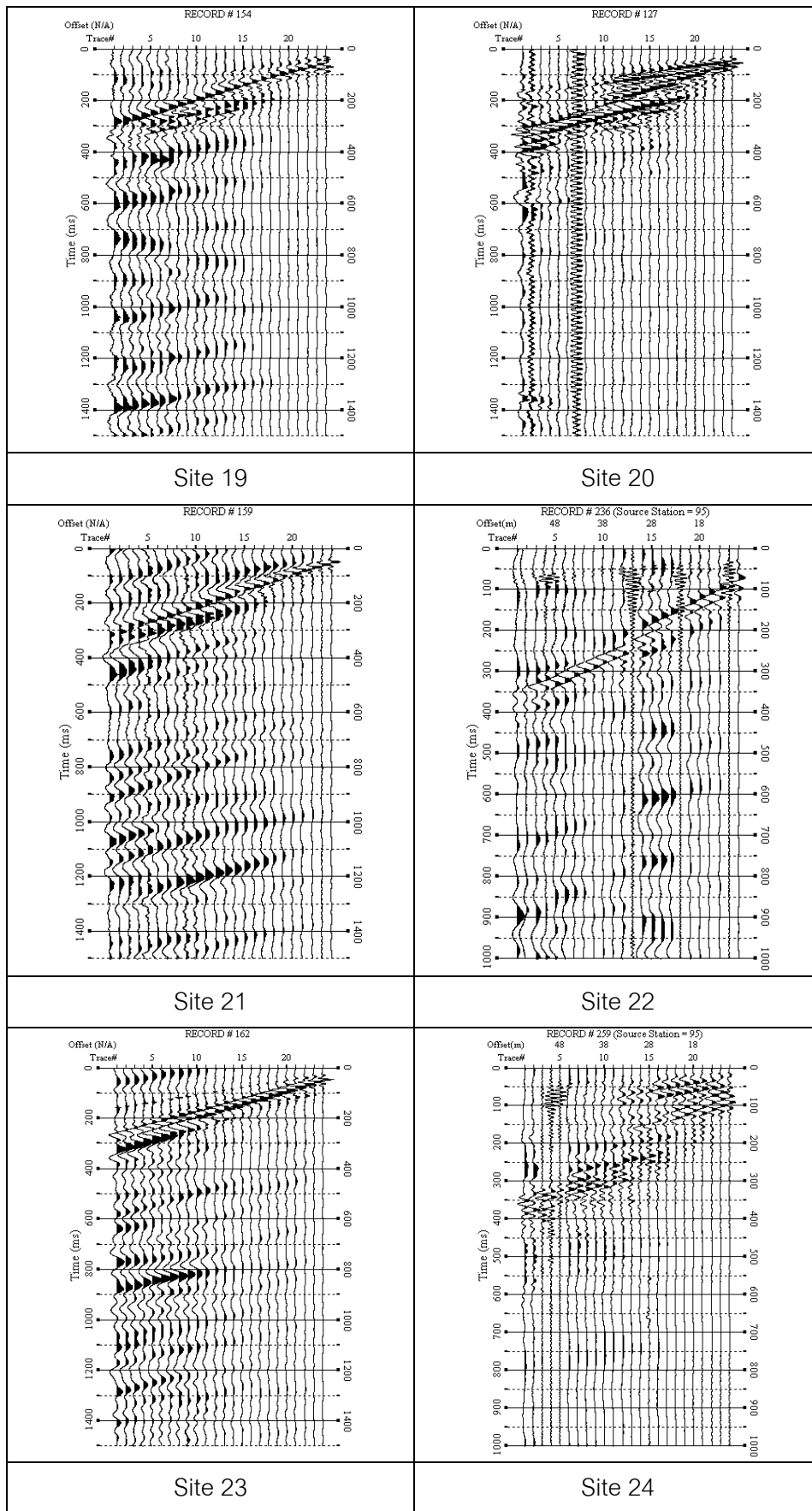
- Seed, H.B., Romo, M.P., Sun, J., Jaime, A., Lysmer, J., 1987. Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the Earthquake September 19, 1985. Report UCB/EERC - 87/15. Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley. 112 p.
- Srisoros, W., 2003. Seismic Microzonation of Chiang Mai City Using Microtremor Observations, M. Eng. AIT Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.
- Street, R., Edward W., Zhenming W., James B., Harris., 2001. NEHRP soil classification for estimating site-dependent seismic coefficient in the Upper Mississippi Embayment, Engineering Geology, Volume 62, Issues 1-3, October 2001, page 123-135.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 1999. Multi-channel analysis of surface waves. Geophysics 64(3), 800-808.
- Prapaporn Juntamat. 2007. COMPARISON OF SHEAR -WAVE VELOCITY PROFILES OF BANGKOK SUBSOILS FROM MASW AND BOREHOLE MEASUREMENTS., Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

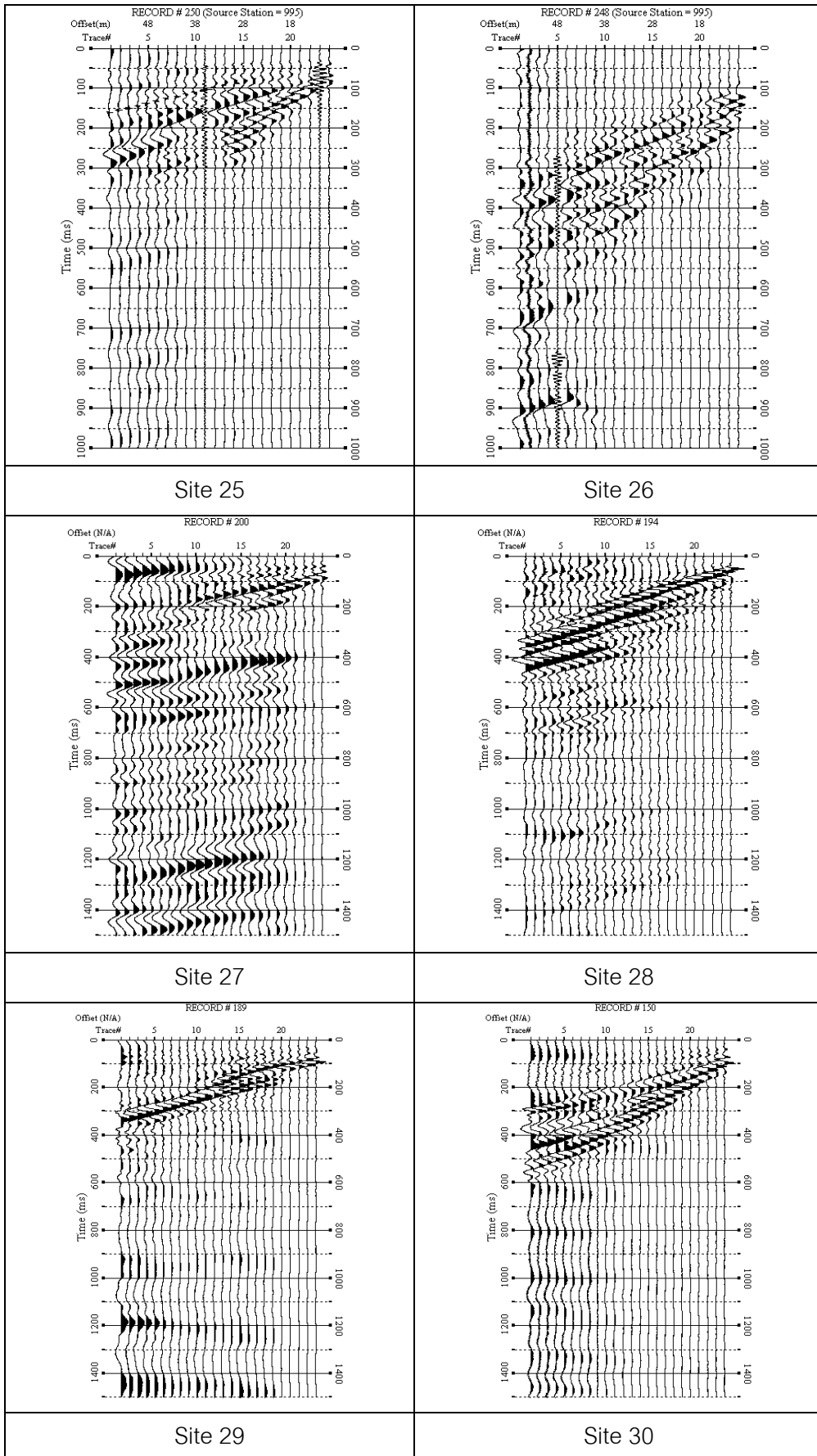
ภาคผนวก ก ข้อมูล MASW

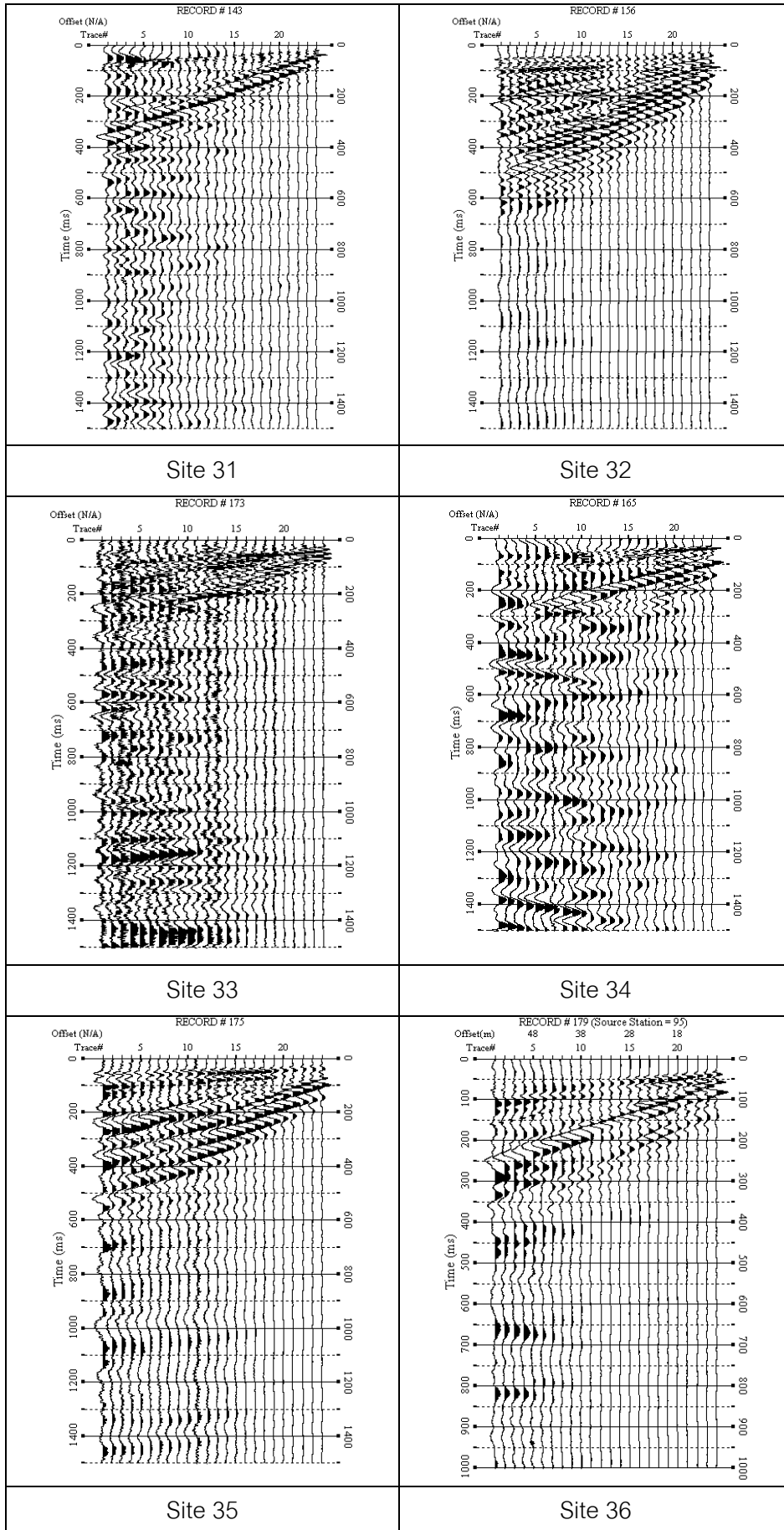


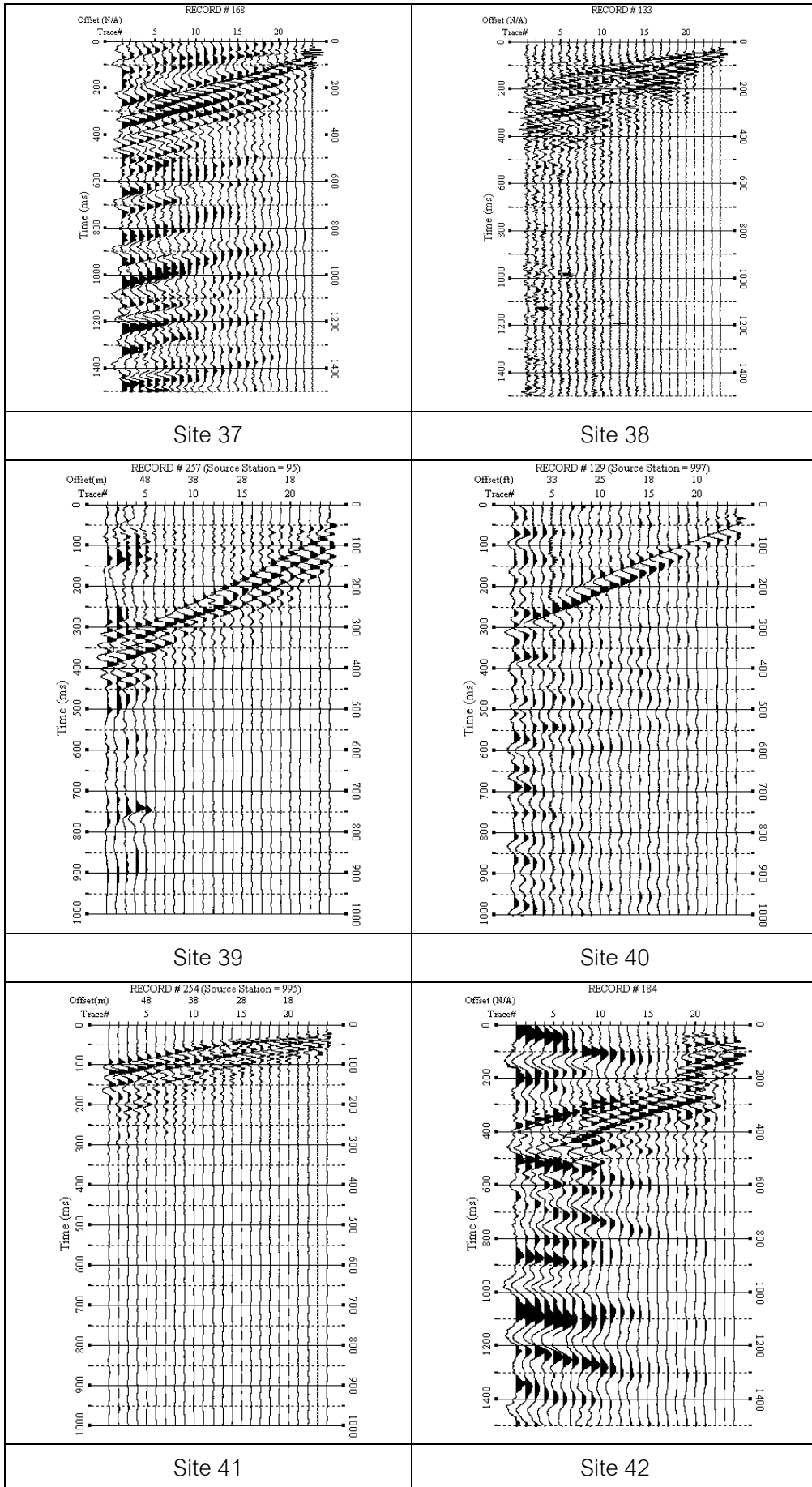


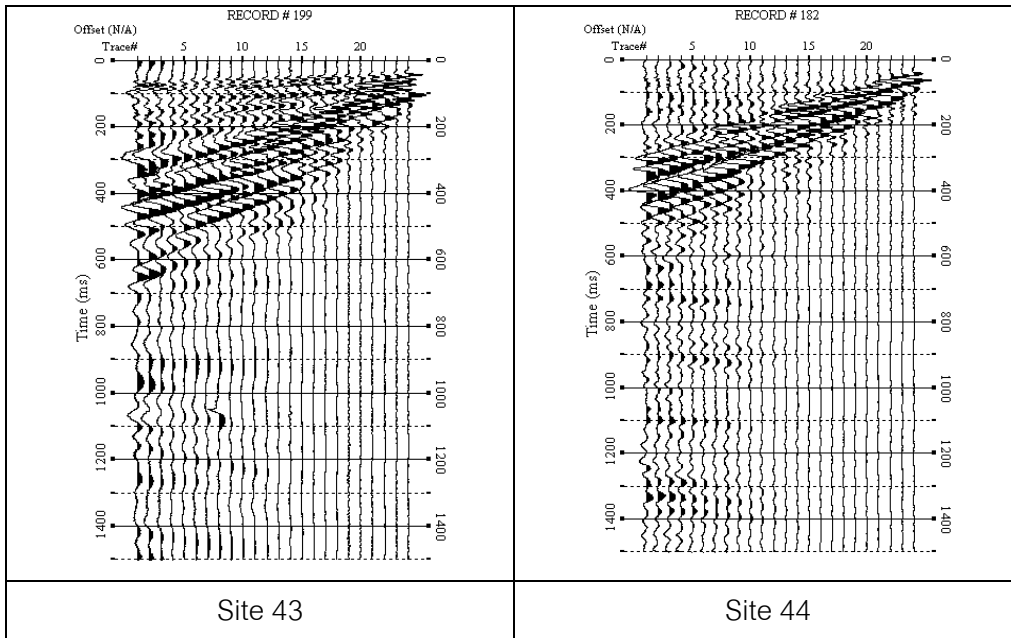




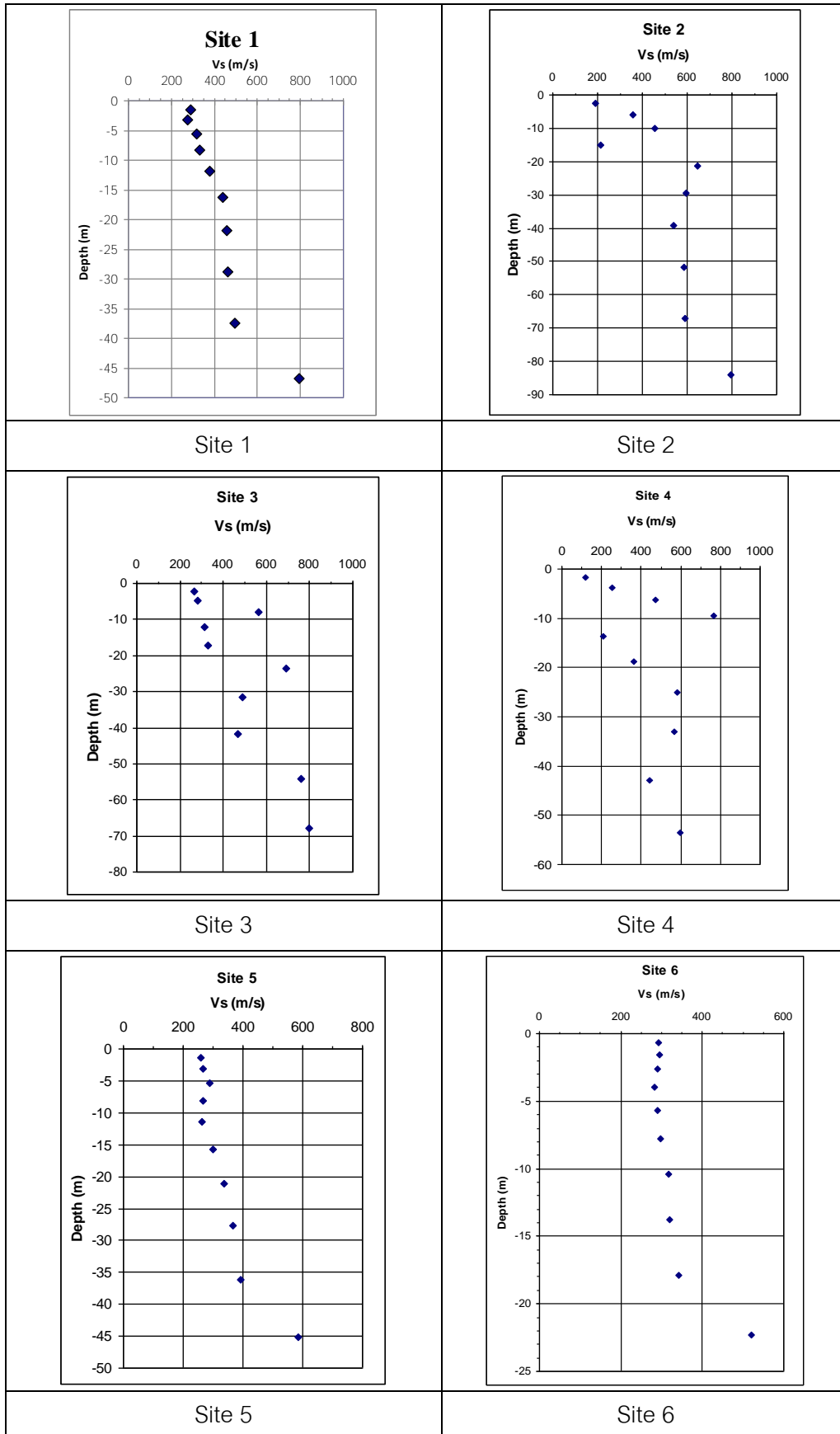


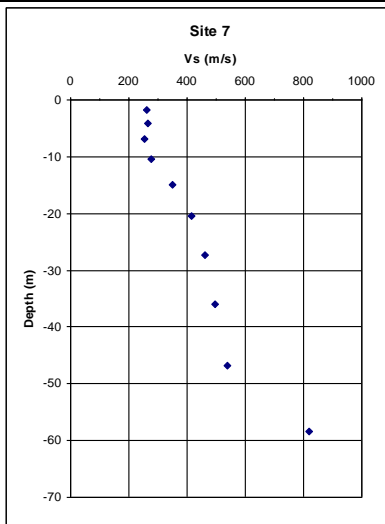




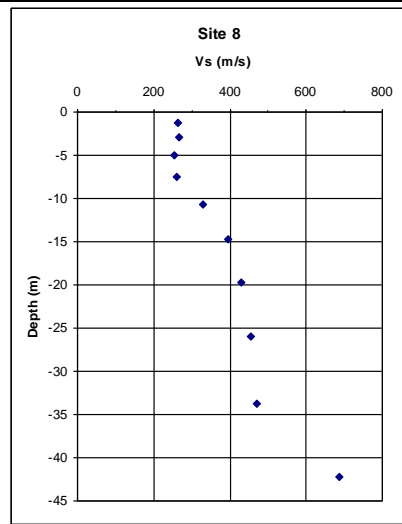


ภาคผนวก ข ความเร็วคลื่นเฉือน ณ ความลึกต่างๆ

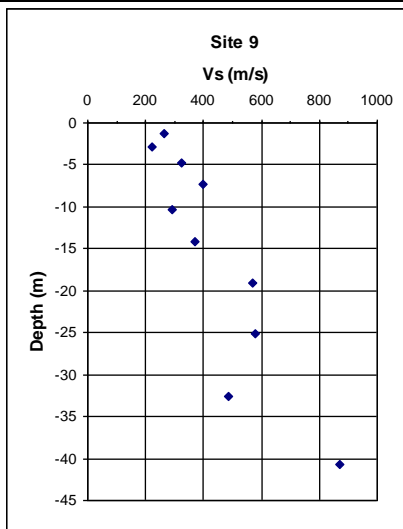




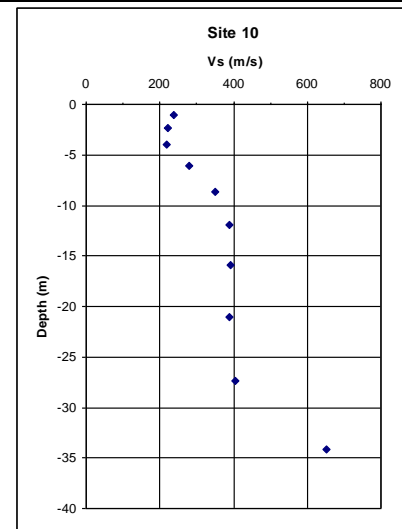
Site 7



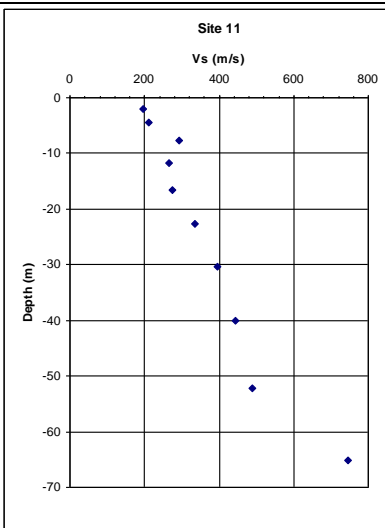
Site 8



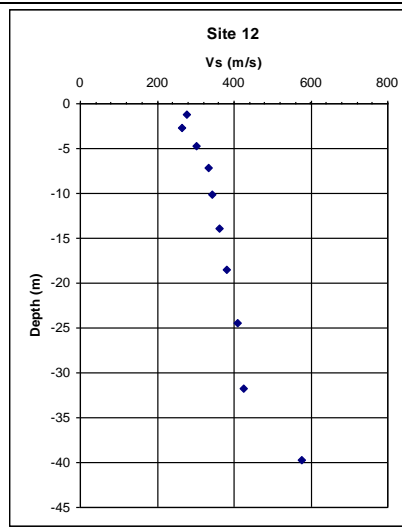
Site 9



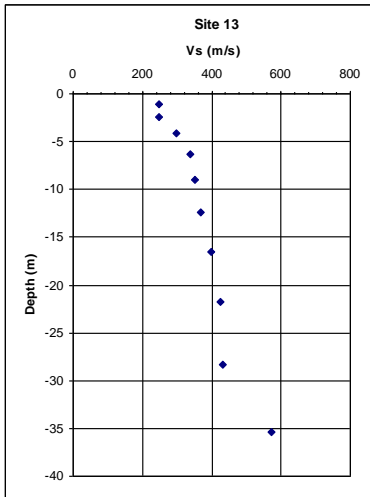
Site 10



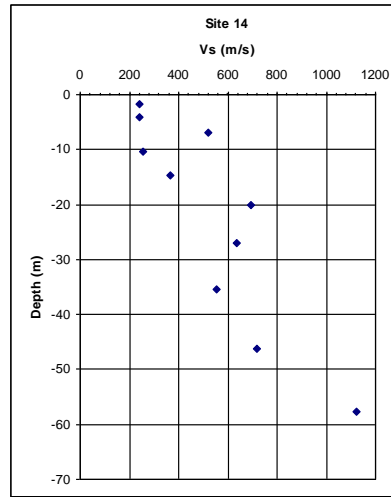
Site 11



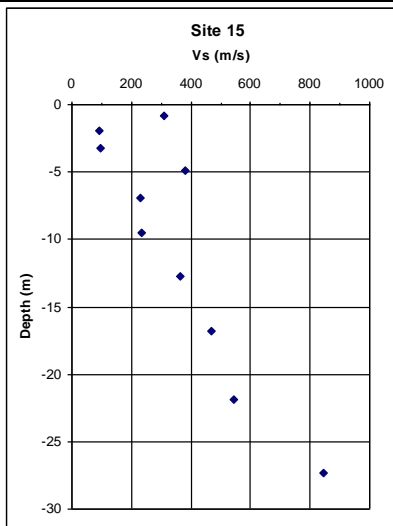
Site 12



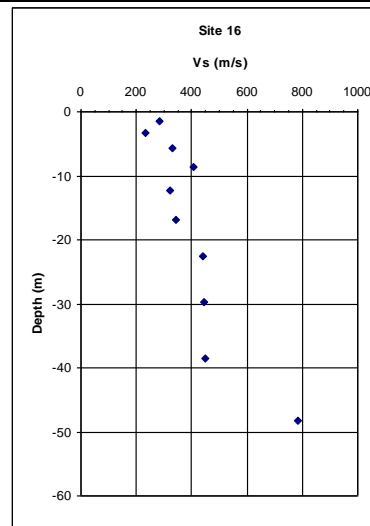
Site 13



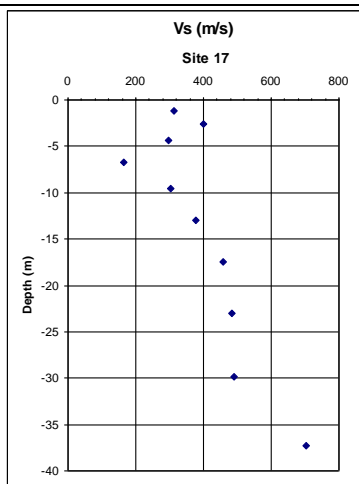
Site 14



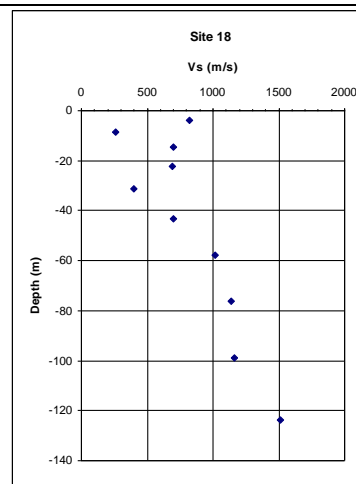
Site 15



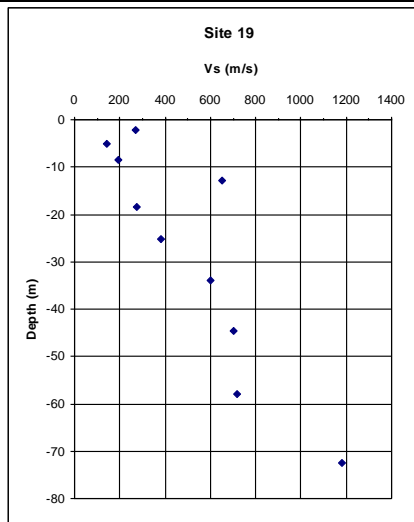
Site 16



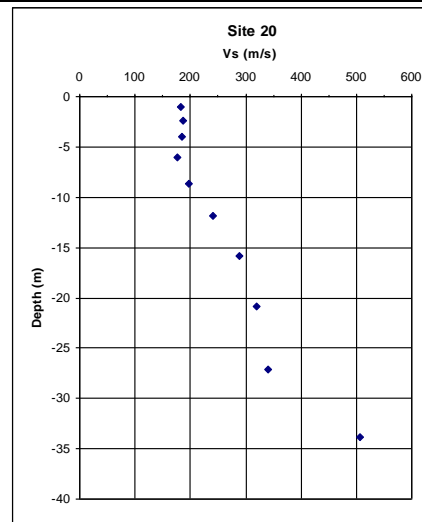
Site 17



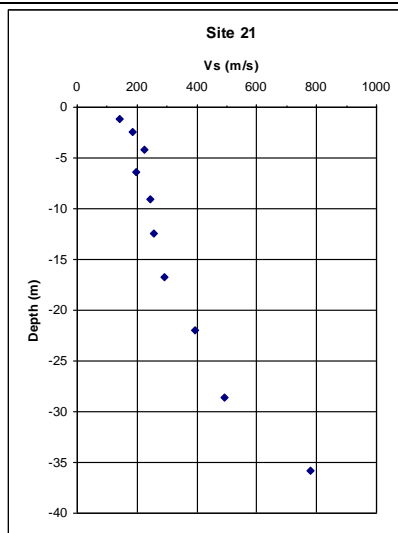
Site 18



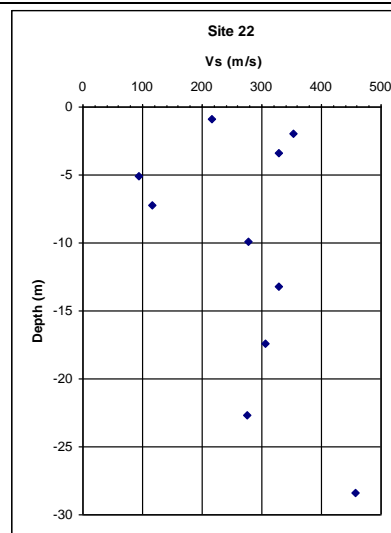
Site 19



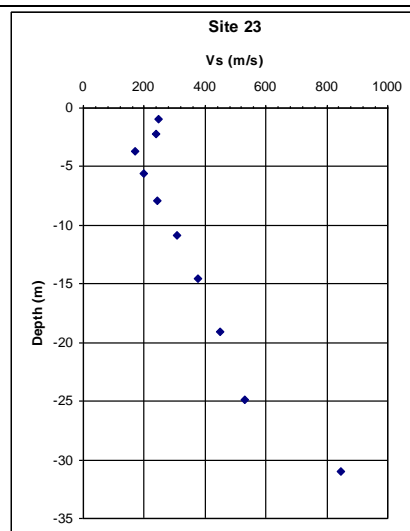
Site 20



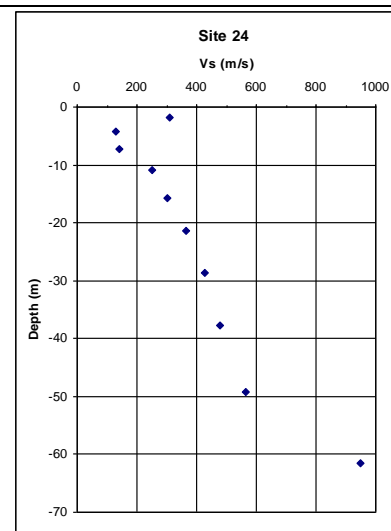
Site 21



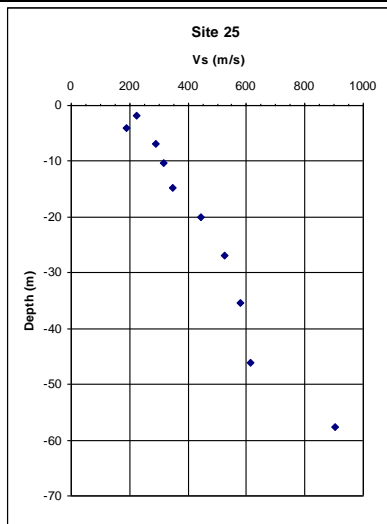
Site 22



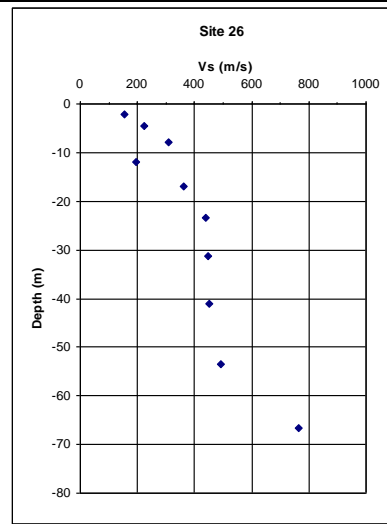
Site 23



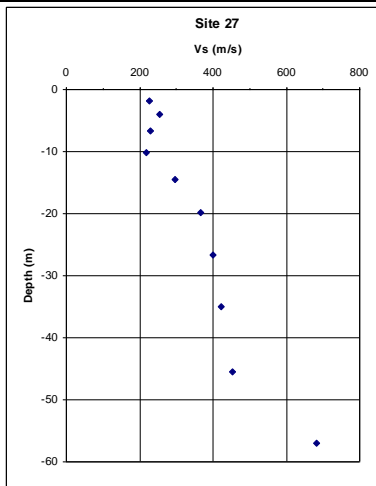
Site 24



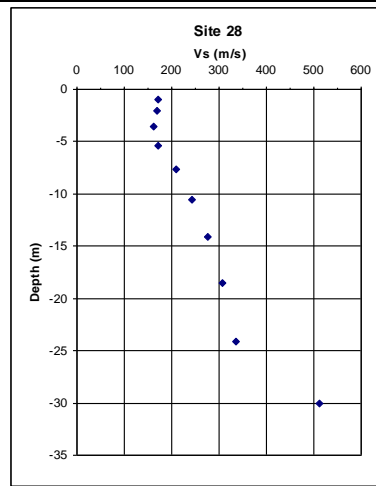
Site 25



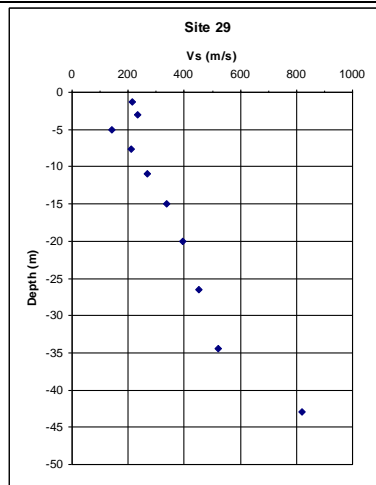
Site 26



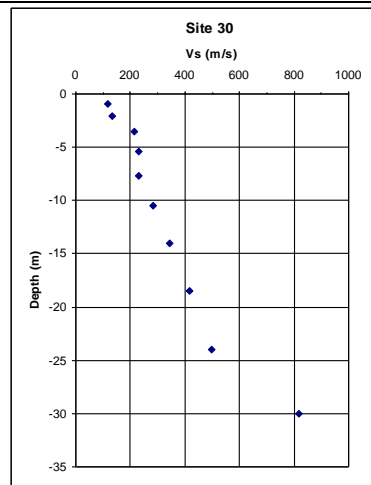
Site 27



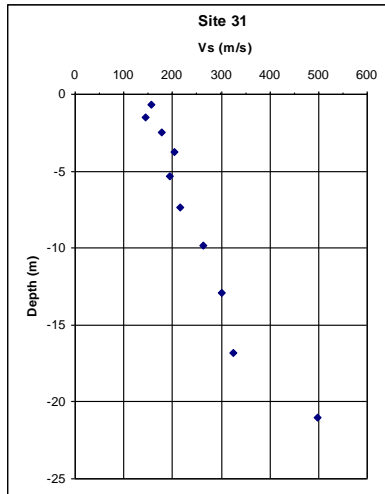
Site 28



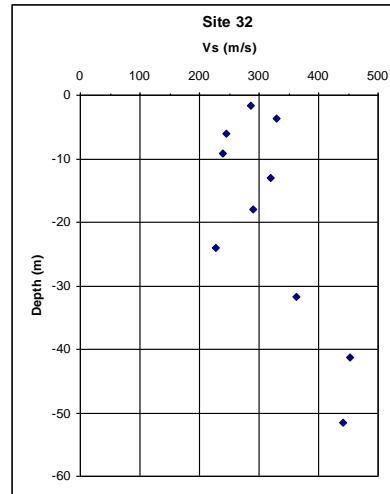
Site 29



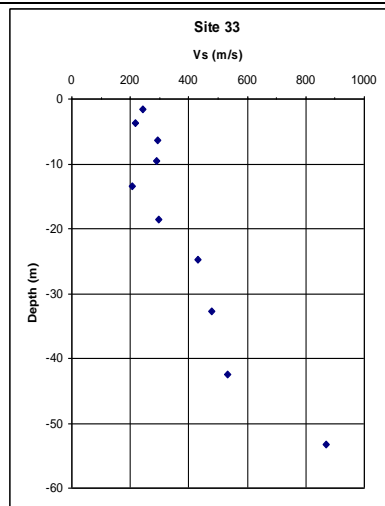
Site 30



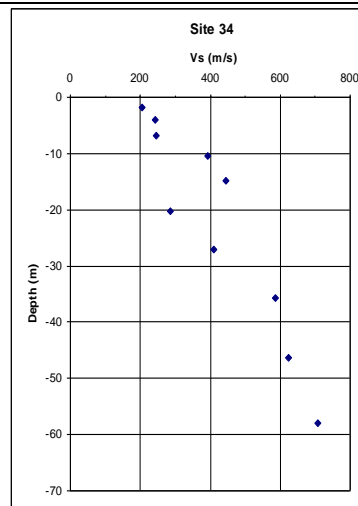
Site 31



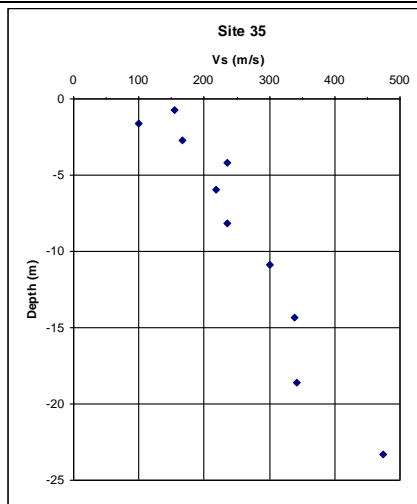
Site 32



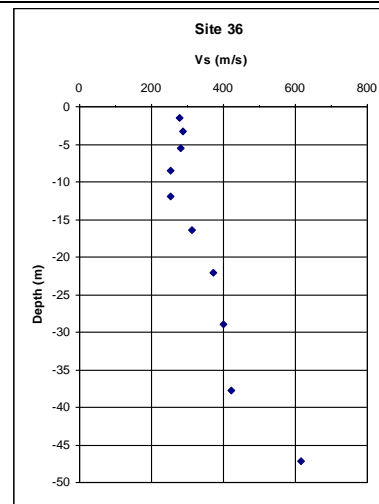
Site 33



Site 34



Site 35



Site 36

