



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เนื่องจากแผ่นดินไหว

A Study of Response Behavior of Soft Bangkok Clay from Earthquakes

นามผู้วิจัย นายอำนาจ ชานูวิริยะกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิสักดิ์ ศรีลัมพ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ฐิวัตร บุญญฐิติ, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทวางกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เนื่องจากแผ่นดินไหว

A Study of Response Behavior of Soft Bangkok Clay from Earthquakes

โดย

นายอำนาจ ยานุกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2552

อำนาจ ขานูวิริยะกุล 2552: การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
เนื่องจากแผ่นดินไหว ปรินซ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธศรี ศรลัมพ์,
Ph.D. 192 หน้า

แผ่นดินไหวสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง เช่น บ้านพักอาศัย ตึกสูง โครงสร้าง
พื้นฐาน และเขื่อน ซึ่งจะนำไปสู่ความสูญเสียต่อชีวิตอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงการตอบสนอง
ของชั้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยเฉพาะชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Moh et al., 1969) บริเวณแอ่งตะกอน
ดินเหนียวบริเวณภาคกลางตอนล่าง ซึ่งชั้นดินเหนียวอ่อนทำให้ตัวแปรของคลื่นแผ่นดินไหวเปลี่ยนแปลง และ
อาจก่อให้เกิดการสั่นพ้องระหว่างอาคารกับชั้นดิน การศึกษานี้ได้นำเสนอถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการ
ตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยพิจารณาปัจจัย ได้แก่ ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน
ระดับความลึกของชั้นเสมือนหิน (Rock-liked layer) ที่เหมาะสมกับแบบจำลอง อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็ง
ระดับลึก และคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดิน โดยการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินดำเนินการ
โดยการทดสอบความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนาม เปรียบเทียบกับสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical
equation) เพื่อเลือกใช้ค่าตัวแปรคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินให้เหมาะสมกับแบบจำลองสำหรับงานวิจัย การ
วิเคราะห์ดำเนินการโดยวิธีการตอบสนองในลักษณะ 1 มิติ โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์แบบ
Linear equivalent และศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาเพื่อปรับให้เหมาะสมกับชั้นดินกรุงเทพฯ
จากนั้นได้ประเมินการตอบสนองเชิงพื้นที่ตามพฤติกรรมตอบสนองของชั้นดินจากแรงกระทำแผ่นดินไหว
ที่วิเคราะห์จากข้อมูลหลุมเจาะ 39 ตำแหน่ง ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

จากการศึกษาพบว่าระดับความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมของแบบจำลองอยู่ที่ความลึก 120
เมตร และชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกอยู่ในระดับลึกไม่มีผลต่อการตอบสนองที่ผิวดิน นอกจากนี้ยังพบว่าการ
ขยายอัตราเร่งที่ผิวดินจะมีค่าสูงสุดเมื่อชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนา 6-10 เมตร และมีคาบการสั่นไหวของ
พื้นดินแปรผันตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน นอกจากนี้ยังได้เสนอสมการตอบสนองสำหรับการ
ออกแบบตามพื้นที่ความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับ UBC code (1997) เอาไว้ในงานวิจัยนี้
ด้วย

Amnarj Yanuviriyakul 2009: A Study of Response Behavior of Soft Bangkok Clay from Earthquakes. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Suttisak Soralump, Ph.D. 192 pages.

Earthquake is a natural hazard that could cause a serious damage to civil engineering structures. Especially when seismic wave passes through soft Bangkok clay layers in which amplification of ground acceleration might be occurred. This research studied the factors that affected soil's response due to seismic wave. The effect from soft clay thickness, depth to rock-liked layer, an influence of stiff clay layer and dynamic soil properties were considered. Moreover shear wave velocity of soil layer obtain from field tests are compared with shear wave velocity obtained from empirical equations in order to choose suitable equation for the model. The study found that the appropriate elevation of rock-liked layer for the model is 120 meter and stiff clay layer in the deeper depth doesn't have an effect to ground surface response. Besides, the result shows that the amplification factor will increase when soft clay thickness decreased. The maximum amplification is reached when soft clay thickness is between 6 to 10 meters. However, the amplification of soft clay thickness lower than 6 meter seems to increase with soft clay thickness. Furthermore, predominant period increases with soft clay thickness. Lastly, this study proposed design response spectrum for soft Bangkok clay in various thickness of soft clay. These response spectrum are also compared with UBC code (1997)

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ บิดา มารดา ที่ได้รับการสนับสนุนและส่งเสริมทางด้านการศึกษา และคอยเป็นกำลังใจในชีวิตเสมอมา รวมทั้งขอขอบพระคุณต่อ ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการประสิทธิประสาทวิชาความรู้เพื่อให้ได้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ขึ้น พร้อมทั้งคณะกรรมการที่ปรึกษาประกอบด้วย รศ.ดร.วรากร ไม่เรียง และ รศ.ดร.จิรวัด บุญญะฐิติ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และเสนอแนะแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์นี้แล้วเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณบรรพต กุลสุวรรณ นักวิจัยประจำศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานรากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำสำหรับการดำเนินงานในวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้ง คุณเชิดพันธุ์ อมรกุล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือข้อมูลการวิเคราะห์ลักษณะชั้นดิน อีกทั้งขอขอบคุณ รศ.ดร.จิรวัด บุญญะฐิติ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการทดสอบ MASWM สำหรับงานวิจัยนี้ รวมทั้งขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิจัย มก. รหัสโครงการวิจัย ว-ท(ค) 53.51 ของสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ และบุคคลอื่นทั้งหมดในศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก พี่น้องชาววิศวกรรมปฐพี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน ซึ่งไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด สำหรับคำแนะนำ กำลังใจ ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยรู้สึกทราบดีซึ่งในพระคุณอย่างยิ่ง และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อส่วนรวม

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอให้ทุกคนมีความสุขดีทั้งหมด ทั้งปวงจงดลบันดาลให้เกิดความสุข ความเจริญแก่ บิดา มารดา ครอบครัว ของข้าพเจ้า รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อน พี่ น้อง ทุกคน ที่เป็นส่วนร่วม และส่งเสริมให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถจนประสบความสำเร็จในการศึกษา

อำนาจ ขานูวิริยะกุล

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	90
อุปกรณ์	90
วิธีการ	90
ผลและวิจารณ์	97
สรุปและข้อเสนอแนะ	143
สรุป	143
ข้อเสนอแนะ	146
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	147
ภาคผนวก	152
ภาคผนวก ก	153
ภาคผนวก ข	187
ภาคผนวก ค	190
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	192

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามตรา Modified Mercalli Intensity (MMI)	6
2	แบบจำลองลดทอนพลังงานและพื้นที่ที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน	10
3	สรุปคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	33
4	สรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	34
5	ค่าคงที่และฟังก์ชันต่างๆ ที่ใช้เพื่อประมาณค่า G_{max}	42
6	ตารางประมาณค่า $(K_2)_{max}$ จากค่า Void ratio or Relative Density	45
7	Values of $(K_2)_{max}$ for Various N_I Values	45
8	ความสัมพันธ์ของค่า OCR และ PI ที่มีอิทธิพลต่อค่า G_{max}	46
9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PI และ ค่า k	47
10	ตารางแสดงตัวอย่างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_{max} และผลการทดสอบ ภาคสนามด้วยวิธีต่างๆ (SPT, CPT, DMT)	50
11	ผลกระทบเนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่า G_{max} , G/G_{max} และ λ	67
12	Geological data of soil sediment	78
13	Predominant Periods from the Microtremor Analysis and the One Dimensional Site Response Analysis at Low strain Level	84
14	แหล่งข้อมูลอัตราเร่งของพื้นดิน (Ground motion)	92
15	ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน กรุงเทพฯ	98
16	องค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์	98
17	ค่าประมาณของ V_{max}/A_{max} ที่ตรวจวัด ณ สถานีที่ห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว ไม่เกิน 50 กม.	98
18	คุณสมบัติดินจากการเจาะสำรวจบริเวณสนามรักบี้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และการแปลผลค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน โดย KU's equation และ Ashford's (1997)	123

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเปรียบเทียบขนาดของแผ่นดินไหวโดยการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ	10
2	เปรียบเทียบผลของแบบจำลองการลดทอนพลังงานแบบต่างๆ	11
3	ความเปลี่ยนแปลงของขนาด และส่วนประกอบความถี่ ของความเร่ง ความเร็ว และการเคลื่อนตัวของคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro	15
4	Response spectra จากคลื่นแผ่นดินไหว 2 เหตุการณ์	16
5	Fourier amplitude spectrum จากการสั่นสะเทือน 2 เหตุการณ์	17
6	การประมาณระยะเวลาของการสั่นสะเทือนตามวิธี Bracketed duration	18
7	ตำแหน่งรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย	21
8	แผนที่แสดงการแบ่งพื้นที่ของตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวตั้งแต่ปี ค.ศ.1910-2000	22
9	แผนที่กลุ่มรอยเลื่อนบริเวณพื้นที่ศึกษาและใกล้เคียง	23
10	แนวรอยต่อของแผ่นเปลือกโลก	23
11	ตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหว ที่มีขนาดตั้งแต่ 5 ริคเตอร์ขึ้นไป ในประเทศไทย และบริเวณใกล้เคียง ตั้งแต่ปี ค.ศ.1973 ถึง มิถุนายน ค.ศ.2008	24
12	โครงสร้างทางธรณีวิทยาภาคกลาง (ภาพตัดแนว เหนือ-ใต้)	27
13	สภาพทางปฐพีในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลาง	28
14	Isopach Map ของความหนาดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	29
15	ภาพตัดแอ่งชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	30
16	โครงสร้างชั้นดินโดยทั่วไปของ Bangkok clay	32
17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักต่อความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ	36
18	ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained Shear Strength ต่อความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity Index ต่อความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ	38
20	ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT ต่อความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	38
21	Backbone curve showing typical variation of G_{sec} with shear strain	40
22	ค่าของ K_2 สำหรับทรายที่ระดับความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างๆ	44
23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_f และค่าที่ได้จากสมการ	49
24	ลักษณะโดยทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ และค่า Shear wave velocity ของชั้นดิน	53
25	S-wave velocity profile for eight sites in the greater Bangkok area	54
26	Shear wave velocity profile with depth from SCPT	55
27	Seismic cross-hole test	56
28	Seismic Down-hole (Up-hole)	57
29	ตัวอย่างการตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนในชั้นดินกรุงเทพโดยวิธี Down-hole	58
30	ตัวอย่างการตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนในชั้นดินกรุงเทพโดย Seismic Cone	58
31	ลักษณะโดยทั่วไปของการทดสอบโดยวิธี SASW	59
32	Dispersion Curves and V_s Profile from Kasetsart University's Rugby Field	60
33	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบในสนามด้วยวิธี MASW	61
34	ตัวอย่างของคลื่นที่ Geophone แต่ละตัวสามารถบันทึกได้จากวิธี MASW	61
35	ลักษณะการเปลี่ยนรูปของ Piezoelectric Bender Element ตามกระแสไฟฟ้า	63
36	Shear Modulus Reduction Curve and Damping Curve different PI	65
37	Modulus Reduction Curve ของดินเหนียวกรุงเทพฯ	66
38	Damping ratio ของดินเหนียวกรุงเทพฯ	66
39	นิยามของตัวแปรต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของคลื่นแรงบิดใน 1 มิติ	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธี Linear equivalent	72
41	ตัวอย่างการวิเคราะห์ตัวแปรและคุณสมบัติของคลื่นแผ่นดินไหวด้วยโปรแกรม SeismoSignal	73
42	Plan and section view of NTT Kobe Ekimae Building and location of seismograph	75
43	Acceleration time history at GL-65 m	75
44	ลักษณะชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์ของ Inaba et al. (2000)	76
45	Distribution of Maximum acceleration and velocity	77
46	Acceleration time history at GL and GL-20 m	77
47	Acceleration Fourier Spectra	78
48	Elastic response spectra of predicted ground motion in Bangkok	80
49	พื้นที่สำหรับการศึกษาวิจัย Seismic Microzonation	81
50	Variation of the Predominant Period in Greater Bangkok	82
51	Variation of the Predominant Period inside Bangkok Metropolitan Area	82
52	Soil Profiles at Nine Different Sites in Greater Bangkok	83
53	Variation of Predominant Period with the Thickness of Soft Clay Layer	85
54	Comparison between the Predominant Period Obtained from the Microtremor analysis and SHAKE91	85
55	Variation of the Predominant Period in Greater Bangkok at PGA of 0.14g	86
56	Variation of the Predominant Period in Greater Bangkok at PGA of 0.22g	86
57	Changes in shear wave velocity, suspension logging tests performed in 1986 and 2000	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
58	Changes in Compressibility and Shear modulus (Mexico City)	87
59	Evolution of Dynamic Stiffness and Damping in Clay sample (Mexico City)	88
60	Simplified soil profiles at SCT and CAO sites	89
61	Evolution of Response Spectra with Acceleration measured at a rock outcrop during the 19 September 1985 event	89
62	Evolution of Response Spectra with Acceleration measured at a rock outcrop during the June 1999 event	90
63	แผนภูมิดำเนินการวิจัย	93
64	คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Chi-Chi Earthquake 20 กันยายน ค.ศ.1999	100
65	คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Trinidad, California Earthquake 8 พฤศจิกายน ค.ศ. 1980	100
66	คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Victoria, Mexico Earthquake 9 มิถุนายน ค.ศ.1980	101
67	คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lytle creek Earthquake 12 กันยายน ค.ศ.1970	101
68	คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lander Earthquake 28 มิถุนายน ค.ศ.1992	102
69	คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Tabas, Iran Earthquake 16 กันยายน ค.ศ.1978	102
70	คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Kocaeli, Turkey Earthquake 17 สิงหาคม ค.ศ.1999	103
71	Shear wave velocity profile ของชั้นดินกรุงเทพฯ สำหรับการวิเคราะห์หาชั้นเสมือนหิน	105
72	Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์กรณีระดับความลึกของชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร ของเหตุการณ์ Chi Chi earthquake 20 กันยายน ค.ศ.1999	106
73	Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์กรณีระดับความลึกของชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร ของเหตุการณ์ Trinidad, California earthquake 8 พฤศจิกายน ค.ศ.1980	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
74	Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์กรณีระดับความลึกของชั้น เสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร ของเหตุการณ์ Victoria, Mexico earthquake 9 มิถุนายน ค.ศ.1980	107
75	Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์กรณีระดับความลึกของชั้น เสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร ของเหตุการณ์ Lytle creek earthquake 12 กันยายน ค.ศ.1970	107
76	การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งตามความลึกของเหตุการณ์ Chi chi earthquake 20 กันยายน ค.ศ.1999 กรณีระดับชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร	108
77	การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งตามความลึกของเหตุการณ์ Trinidad, California earthquake 8 พฤศจิกายน ค.ศ.1980 กรณีระดับชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร	108
78	การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งตามความลึกของเหตุการณ์ Victoria, Mexico earthquake 9 มิถุนายน ค.ศ.1980 กรณีระดับชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร	109
79	การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งตามความลึกของเหตุการณ์ Lytle creek earthquake 12 กันยายน ค.ศ.1970 กรณีระดับชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร	109
80	ลักษณะชั้นดินของหลุมเจาะสำรวจระดับลึก 600 เมตร (บางขุนเทียน กรุงเทพฯ, KE Station)	111
81	แบบจำลองชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งแทรกในชั้น ทรายระดับลึก	112
82	Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์กรณีชั้นดินเหนียวแข็งแทรก ระดับลึก กระทำโดยคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lander earthquake 28 มิถุนายน ค.ศ.1992	113

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
83	อิทธิพลความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งระดับลึกต่อการเปลี่ยนแปลงของ Shear strain (%) และ Amplification factor กระทำโดยคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lander earthquake 28 มิถุนายน ค.ศ.1992	113
84	เปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ยต่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์	114
85	เปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ยต่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ กรณีปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ เท่ากับ 0.1g	114
86	การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) ต่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ กรณีปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ เท่ากับ 0.1g	115
87	การเปลี่ยนแปลงของ Predominant period เฉลี่ยของการตอบสนองคลื่นความเร่งที่ผิวดินตามความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์	116
88	การเปลี่ยนแปลงของ Predominant period เฉลี่ยของการตอบสนองคลื่นความเร่งที่ผิวดินตามความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนกรณีปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ เท่ากับ 0.1g	116
89	Normalized acceleration response spectrum และกำหนดช่วงคาบการตอบสนองด้วย Bandwidth ของชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-18 เมตร	117
90	ตำแหน่งการทดสอบ SASW และ MASWM บริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	121
91	ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนระหว่างผลทดสอบในสนามด้วย SASW และ MASWM กับการคำนวณด้วย Empirical equation จากข้อมูลหลุมเจาะบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	122
92	Shear wave velocity profiles ของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จากการทดสอบ MASWM	122
93	ความสัมพันธ์ระหว่าง S_u กับ V_s ของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	124

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
94	ความสัมพันธ์ระหว่าง w_n (%) กับ V_s ของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	124
95	ตำแหน่งข้อมูลหลุมเจาะและตำแหน่งกริดสำหรับวิเคราะห์ลักษณะการวางตัวของชั้นดิน	126
96	เส้นชั้นความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา	126
97	ตำแหน่งตัวแทนสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพื้นที่	127
98	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน กับความหนาชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์	129
99	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายความเร่งที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ย กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา	129
100	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน กับความหนาชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ กรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1g	130
101	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายความเร่งที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ย กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา กรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1g	130
102	แผนที่การขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ย จากการตอบสนองของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์	131
103	แผนที่การขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ย จากการตอบสนองของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวกรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1	131
104	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน กับความหนาชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์	134
105	ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเด่นของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดินเฉลี่ย กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา	134

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
106 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน กับความหนา ชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ กรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่น แผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1g	135
107 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเด่นของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดินเฉลี่ย กับความหนาชั้น ดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา กรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ เท่ากับ 0.1g	135
108	
109 แผนทีคาบเด่นของการสั่นไหวบริเวณผิวดิน (Predominant period) เฉลี่ย จากการ ตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์	136
110 แผนทีคาบเด่นของการสั่นไหวบริเวณผิวดิน (Predominant period) เฉลี่ย จากการ ตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวกรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1g	136
111 ความสัมพันธ์ของคาบการสั่นไหวจากทฤษฎี Bandwidth กับความหนาชั้นดิน เหนียวอ่อน	138
112 แผนภาพแสดงลำดับการวิเคราะห์ Design response spectrum	138
113 Design response spectrum สำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-9 เมตร	139
114 Design response spectrum สำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 10-12 เมตร	139
115 Design response spectrum สำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 13-15 เมตร	140
116 Design response spectrum สำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 16-18 เมตร	140
117 Design response spectrum จากผลการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเนื่องจาก คลื่นแผ่นดินไหวในพื้นที่ศึกษา	141
118 ลักษณะของชั้นดินทั่วไปสำหรับใช้วิเคราะห์ในแบบจำลอง	143

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

λ	Damping
e	Void ratio
$G_{\max}$	Maximum shear modulus
γ	Shear strain
γ_c	Cyclic shear strain
M_0	Seismic moment
M_L	Richter local magnitude
M_S	Surface wave magnitude
m_b	Body wave magnitude
M_w	Moment magnitude
OCR	Overconsolidation ratio
PGA	Peak ground acceleration
T_p	Predominant period
V_s	Shear wave velocity
ξ	Damping ration

การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เนื่องจาก แผ่นดินไหว

A Study of Response Behavior of Soft Bangkok Clay from Earthquakes

คำนำ

ในอดีตเชื่อกันว่าประเทศไทยปลอดภัยจากภัยแผ่นดินไหว เนื่องจากไม่มีเหตุการณ์ที่รุนแรงจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว และในปัจจุบันมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการก่อสร้างอาคาร และโครงสร้างพื้นฐานขึ้นมากมาย ซึ่งไม่ได้มีการออกแบบให้โครงสร้างสามารถต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น แม้ว่าในอดีตจะมีกฎหมายว่าด้วยการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวสำหรับประเทศไทยที่กำหนดไว้ในกฎกระทรวงฉบับที่ 49 (พ.ศ.2540) ซึ่งได้ต้นแบบจากมาตรฐาน Uniform Building Code ฉบับปี ค.ศ. 1985 ของประเทศสหรัฐอเมริกา แต่การออกแบบอาคารส่วนมาก ไม่นิยมนำไปใช้เนื่องจากทำให้มูลค่าโครงการเพิ่มสูงขึ้น

เหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยและบริเวณใกล้เคียงมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้นบ่อยครั้ง บางครั้งสร้างความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างมหาศาล เช่น การเกิดคลื่นยักษ์ได้น้ำ (Tsunami) เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2547 ทำให้มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 3 แสนคน และสิ่งก่อสร้างถูกทำลายจำนวนมาก และในอาคารสูงในกรุงเทพฯ บางแห่งรับรู้ถึงกันสั่นเนื่องจากแผ่นดินไหว ถึงแม้จุดศูนย์กลางจะอยู่ห่างจากกรุงเทพฯ ประมาณ 1,200 กิโลเมตร ทำให้มีการตระหนักถึงผลกระทบจากแผ่นดินไหวมากขึ้น

ปัจจุบันองค์ความรู้ด้านแผ่นดินไหวมีการพัฒนาไปมาก ทำให้การศึกษาเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหว มีความใกล้เคียงขึ้นมากกว่าในอดีต ประกอบกับมีผลการศึกษาด้านธรณีวิทยาแผ่นดินไหวที่ทำให้ได้ข้อมูลด้านรอยเลื่อนมีพลัง (Active Fault) มากขึ้นจากอดีต โดยพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย จะอยู่บริเวณภาคเหนือ และภาคตะวันตก เพราะเป็นพื้นที่ที่อยู่ใกล้กับแนวรอยเลื่อนต่างๆ ซึ่งอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานคร ประมาณ 250 – 1,000 กิโลเมตร แต่จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ Mexico City ในปี ค.ศ.1985 ศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ห่างจากใจกลางเมืองประมาณ 350 กิโลเมตร และมีลักษณะของชั้นดินใน

พื้นที่ Mexico City เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนาล้ากับการวางตัวของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งมีพฤติกรรมในการขยายคลื่นแผ่นดินไหวส่งผลให้มีการขยายสัญญาณประมาณ 4 เท่า สร้างความเสียหายหรือผลกระทบให้กับองค์อาคารต่างๆ ประกอบกับปัจจุบันมีการก่อสร้างอาคารมีความสูงมากขึ้น มีสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร แม้กรุงเทพฯ ถึงจะไม่ได้อยู่ในบริเวณแผ่นดินไหวใหญ่ แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้นบ่อยครั้ง โดยมีศูนย์กลางทั้งในและนอกประเทศ บางครั้งส่งแรงสั่นสะเทือนรู้สึกได้โดยทั่วไป โดยเฉพาะประชาชนที่อยู่บนอาคารสูง และอาจก่อให้เกิดความเสียหายเล็กน้อยแก่อาคาร

การศึกษาระดับความรุนแรงสูงสุดของแผ่นดินไหวที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาและจัดแบ่งเขตพื้นที่ออกเป็นเขตต่างๆ คือ เขต 1 พื้นที่หรือบริเวณที่เป็นดินอ่อนมาก เขต 2 พื้นที่หรือบริเวณที่อยู่ใกล้รอยเลื่อน และเขตเฝ้าระวัง พื้นที่พิเศษในภาคใต้ที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว (นคร, 2549) ดังนั้นจึงต้องศึกษาถึงพฤติกรรมในการขยายคลื่นแผ่นดินไหวในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่าง นอกจากนี้แล้วยังสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบ หรือการศึกษาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหวอย่างถูกต้องต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จากแรงกระทำแผ่นดินไหว
2. เพื่อจำแนกพื้นที่ตามพฤติกรรมการตอบสนองของพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จากแรงกระทำแผ่นดินไหว และกำหนดสเปกตรัมการตอบสนองที่ผิวดิน (Response spectrum) เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบอาคาร
3. ศึกษาคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
4. เพื่อศึกษาแบบจำลอง และขอบเขตจำกัดที่เหมาะสม อันได้แก่ ระดับความลึกของชั้นดินเสมือน และอิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกตัวอยู่ในชั้นดินระดับลึก
5. ศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นชั้นดินเหนียวอ่อนต่อพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดิน

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการตอบสนองของชั้นดินในลักษณะ 1 มิติ
2. ศึกษาเฉพาะพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

การตรวจเอกสาร

แผ่นดินไหว

ความรุนแรงและขนาดของแผ่นดินไหว

การกำหนดความรุนแรง และขนาดของแผ่นดินไหวสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน ทั้งวิธีวัดจากความรู้สึก วิธีการประมาณขนาดแบบหยาบตั้งแต่การเปรียบเทียบจนถึงวิธีการนำข้อมูลจากเครื่องตรวจวัดคลื่นแผ่นดินไหว

ความรุนแรงของแผ่นดินไหว (Earthquake Intensity)

การวัดด้วยวิธีนี้ เป็นการวัดขนาดของแผ่นดินไหวที่เก่าแก่ที่สุด เป็นการอธิบายในเชิงคุณภาพถึงความเสียหายและปฏิกิริยาตอบสนองของประชาชน ณ ตำแหน่งใดๆ จากการเกิดแผ่นดินไหว โดยเริ่มการประมาณความรุนแรงโดยใช้มาตรา Rossi-Forel (RF Scale) ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้มาตราวัดความรุนแรงแผ่นดินไหวแบบ Modified Mercalli Intensity (MMI) (Richter, 1958) ดังแสดงนิยามของระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตรา MMI ดังตารางที่ 1

ขนาดของแผ่นดินไหว (Earthquake Magnitude)

การวัดขนาดของแผ่นดินไหววิธีนี้ทำให้เป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้นโดยการใช้เครื่องมือตรวจวัดการสั่นสะเทือนของพื้นดิน ซึ่งเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการประมวลผลและตีความข้อมูลที่ได้ ช่วยให้วิศวกรสามารถนิยามขนาดของแผ่นดินไหวได้อย่างถูกต้องมากขึ้น (สุพจน์, 2549) โดยขนาดของแผ่นดินไหวแบ่งออกได้ประมาณ 5 ประเภทดังนี้

Seismic Moment

จากพื้นฐานทฤษฎีการคืนตัวทางอีลาสติก (Elastic rebound theory) วิศวกรสามารถประมาณพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวได้ดังนี้

$$M_0 = \mu \cdot A \cdot \bar{D} \quad (1)$$

โดย μ คือ กำลังรับน้ำหนัก (Rupture strength) ของวัสดุ (หิน) ตลอดแนว Fault
 A คือ พื้นที่การวิบัติ (Rupture area)
 $\bar{D}$ คือ ปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นของรอยแตก

Richter local magnitude

Charles Richter (Richter, 1935) ได้เสนอวิธีการสำหรับการประมาณของแผ่นดินไหวโดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดโดยเครื่องมือ Wood-Anderson Seismograph และเป็นข้อมูลแผ่นดินไหวระดับตื้น ศูนย์กลางแผ่นดินไหวห่างไปไม่เกิน 600 กิโลเมตร (Local earthquake) โดยที่ขนาดแผ่นดินไหวของ Richter จะมีค่าดังนี้

$$M_L = \log_{10} \cdot A_{100} \quad (2)$$

โดยที่ A_{100} คือ ขนาดสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดโดย Wood-Anderson Seismograph (μm) ที่อยู่ห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวเป็นระยะทาง 100 กิโลเมตร M_L เป็นขนาดของแผ่นดินไหวที่ได้รับความนิยม และรู้จักกันมากที่สุด

Surface wave magnitude

วิธีการกำหนดขนาดของแผ่นดินไหวตามชนิดของคลื่นแผ่นดินไหว โดยระยะที่ห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวมากๆ Body wave ส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืน ทำให้ Surface wave เป็นคลื่นที่มีอิทธิพลต่อการสั่นสะเทือนของพื้นดิน ซึ่งวิธีการของ Richter ไม่มีการแยกประเภทของคลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้ Gutenberg and Richter (1936) ได้เสนอการกำหนดขนาดของแผ่นดินไหวจาก Surface wave ซึ่งนิยมใช้กำหนดขนาดแผ่นดินไหวระดับตื้น (ลึกไม่เกิน 70 กิโลเมตร) และเป็นแผ่นดินไหวระยะไกล (ศูนย์กลางแผ่นดินไหวห่างจากจุดตรวจวัดมากกว่า 1,000 กิโลเมตร) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$M_s = \log_{10} \cdot A + 1.66 \log_{10} \Delta + 2.0 \quad (3)$$

โดย A คือ ขนาดสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ผิวดิน (μm)
 Δ คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวของเครื่องตรวจวัด โดยวัดเป็น
 มุมตามแกนของโลก

ตารางที่ 1 ความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตรา Modified Mercalli Intensity (MMI)

ความรุนแรง	คำอธิบาย
I	ตรวจวัดได้โดยเครื่องมือวัดความสั่นสะเทือนเท่านั้น
II	รู้สึกได้เฉพาะคนที่มีความรู้สึกไว คนที่อยู่หนึ่ง ๆ ในอาคารสูง และอาจสังเกตเห็นการแกว่งไกวของสิ่งของที่แขวนอยู่
III	คนอยู่ในบ้านจะรู้สึกได้โดยเฉพาะคนที่อยู่ในชั้นบนของอาคารสูง แต่คนส่วนใหญ่ยังไม่รู้สึกว่าเกิดแผ่นดินไหว
IV	ผู้ที่อยู่ในบ้านจะรู้สึกกันทั่ว ส่วนผู้ที่อยู่นอกบ้านจะไม่ค่อยรู้สึก ถ้าเป็นเวลากลางคืนอาจทำให้บางคนตื่นจากหลับ ข้าวของในบ้าน เช่น ถ้วยชาม ภาชนะต่าง ๆ บนโต๊ะ ลั่นไหหรือลั่นปึงปึง รถยนต์ที่จอดอยู่สั่นไหวโคลงเคลงเห็นได้ชัด
V	แทบทุกคนรู้สึกได้ว่าเกิดแผ่นดินไหว ถ้วยชามตกแตก วัตถุที่วางไว้ไม่มั่นคงล้มคว่ำ ต้นไม้เสาไฟฟ้า และวัตถุที่มีความสูงแกว่งไกวเห็นได้ชัด ลูกตุ้มนาฬิกาหยุดแกว่ง
VI	ทุกคนรู้สึกได้ว่าเกิดแผ่นดินไหว หลายคนตกใจวิ่งออกนอกอาคารบ้านเรือน ถ้วยชาม ภาชนะต่าง ๆ เครื่องแก้วแตก หนังสือหล่นจากชั้นวาง เครื่องเรือนหนัก ๆ บางชิ้นเคลื่อนที่ ผนังปูนหลุดกะเทาะ
VII	สิ่งก่อสร้างเริ่มปรากฏความเสียหายเล็กน้อยถึงปานกลาง อาคารที่ออกแบบสร้างไว้ไม่ดีจะเสียหายมาก คนที่ขับรถอยู่จะรู้สึกถึงความผิดปกติ
VIII	อาคารที่ออกแบบสร้างธรรมดาเสียหายบางส่วน ผนังตึกพังทลาย ทراسและโคลนบนพื้นดินถูกดันขึ้นมากล้ายกับน้ำพุ ระดับน้ำในบ่อ หนอง บึง เปลี่ยนแปลง เครื่องเรือนหนัก ๆ เคลื่อนที่ คนที่กำลังขับรถควบคุมรถได้ลำบาก
IX	สิ่งก่อสร้างที่ออกแบบไว้อย่างดีเสียหายมาก ตัวอาคารเคลื่อนออกจากฐานราก แผ่นดินเกิดรอยแยก ท่อน้ำใต้ดินเสียหาย
X	สิ่งก่อสร้างทำด้วยไม้ที่ออกแบบไว้อย่างดีถูกทำลาย แผ่นดินแยกรุนแรง รางรถไฟบิดงอ เกิดดินถล่ม โดยเฉพาะที่ลาดชันริมฝั่งแม่น้ำ น้ำในแม่น้ำล้นคลองกระฉอกทำให้เกิดคลื่นซัดและอาจทำให้เกิดน้ำท่วมฉับพลัน

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ความรุนแรง	คำอธิบาย
XI	อาคารสิ่งก่อสร้างพังทลายเกือบทั้งหมด สะพานพังพินาศ เกิดแผ่นดินแยกกว้างขวาง ท่อน้ำและท่อแก๊สใต้ดินเสียหายใช้การไม่ได้ พื้นดินเป็นลอนขรุขระ บริเวณที่เป็นดินอ่อนกลายเป็นลูกคลื่น รางรถไฟบิดงอจนใช้การไม่ได้
XII	ทุกสิ่งทุกอย่างถูกทำลายหมดสิ้น เส้นแนวสายตาและระดับสายตาบิดเบน พื้นดินเคลื่อนไหวเป็นคลื่น วัตถุกระเด็นขึ้นไปในอากาศ

ที่มา: สุพจน์ (2549)

Body wave magnitude

ในกรณีที่แผ่นดินไหวเกิดขึ้นที่ระดับลึกมาก (Deep focus earthquake) การตรวจวัด ขนาดของ Surface wave จะทำได้ยาก Gutenberg (1945) ได้เสนอวิธีในการคำนวณขนาดของแผ่นดินไหวประเภทนี้จาก p-wave ดังนี้

$$m_b = \log_{10} \cdot A - \log_{10} \cdot T + 0.01\Delta + 5.9 \quad (4)$$

โดย A คือ ขนาดสูงสุดของการเคลื่อนตัวที่ผิวดิน (μm)
T คือ คาบการเคลื่อนตัวของ P-wave (โดยทั่วไปประมาณ 1 วินาที)

Moment magnitude

การคำนวณขนาดของแผ่นดินไหวข้างต้น เป็นการคำนวณจากคุณลักษณะการเคลื่อนตัวของมวลดินโดยใช้เครื่องมือตรวจวัด ซึ่งพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา ระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว ไม่สอดคล้องกับอัตราการเพิ่มของขนาดแผ่นดินไหวจากการคำนวณข้างต้น คุณลักษณะการเคลื่อนตัวของชั้นดินจากการตรวจวัดจะไม่ตอบสนองต่อขนาดแผ่นดินไหวที่เพิ่มขึ้น โดยเรียกคุณลักษณะเช่นนี้ว่า การอิ่มตัว (Saturation) โดยที่ m_b และ M_L จะเริ่มอิ่มตัวที่ขนาดประมาณ 6-7 ในขณะที่ M_S จะเริ่มอิ่มตัวที่ขนาดประมาณ 8 ดังภาพที่ 1 ทั้งนี้เพื่อให้สามารถคำนวณขนาดของแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ได้อย่างถูกต้อง Kanamori (1977) และ Hanks and

Kanamori (1979) ได้เสนอวิธีการคำนวณ Moment magnitude โดยคำนวณขนาดของแผ่นดินไหว จากค่า Seismic moment (M_0) โดยตรงดังนี้

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 10.7 \quad (5)$$

โดย M_0 คือ Seismic moment (dyne-cm)

Bolt (1989) ได้เสนอแนะการตรวจวัดแผ่นดินไหวระดับตื้น (Shallow earthquake) ไว้ดังนี้ m_b และ M_L ใช้สำหรับแผ่นดินไหวที่มีขนาดประมาณ 3-7 โดย M_S เหมาะกับแผ่นดินไหวขนาด 5-7.5 และ M_w ใช้กับแผ่นดินไหวที่มีขนาดสูงกว่า 7.5 ขึ้นไป

แบบจำลองลดทอนพลังงาน (Attenuation Model)

แบบจำลองการลดทอนพลังงาน คือแบบจำลองที่อธิบายการลดทอนค่าอัตราเร่งของพื้นดิน จากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวไปตามแนวรัศมี ซึ่งจะใช้แบบจำลองดังกล่าวในการกำหนดอัตราเร่งของพื้นดินที่บริเวณฐานรากเขื่อนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีแบบจำลองการลดทอนพลังงานอันเนื่องมาจากการขาดแคลนข้อมูลการตรวจวัดที่เพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองการลดทอนพลังงานจากพื้นที่อื่นๆ ในโลก ดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 2

Warnitchai et al. (2001) ทำการศึกษาผลกระทบจากแผ่นดินไหวบริเวณกรุงเทพมหานคร โดยนำแบบจำลองการลดทอนพลังงาน คือ แบบจำลองสำหรับลดอัตราเร่งของพื้นดินตามระยะทาง จากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว เพื่อนำมาใช้สำหรับหาอัตราเร่งที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ต่อไป โดยจัดแบบจำลองออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 เป็นแบบจำลอง 4 แบบ ที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับฝั่งตะวันตกของทวีปอเมริกาเหนือ (Western North America, WNA)

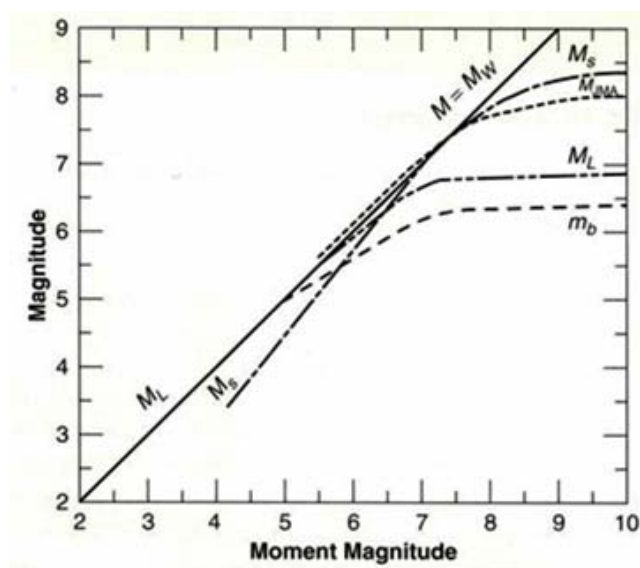
กลุ่มที่ 2 เป็นแบบจำลอง 2 แบบที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับทวีปยุโรป ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ข้อมูลของเครือข่ายสถานีตรวจวัดยุโรป-อิตาลี (Europe, EU)

แบบจำลอง WNA และ EU เป็นแบบจำลองที่แสดงลักษณะการลดทอนความรุนแรงของแผ่นดินไหวประเภท Shallow Crustal Earthquakes ในภูมิภาคที่มีอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกสูง (Active Continental Regions)

กลุ่มที่ 3 เป็นแบบจำลอง 3 แบบ ที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับบริเวณตอนกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาเหนือ (Central and Eastern North America, CENA) เป็นแบบจำลองที่แสดงลักษณะการลดทอนความรุนแรงของแผ่นดินไหวประเภท Shallow Crustal Earthquakes ในภูมิภาคที่แผ่นเปลือกโลกมีเสถียรภาพสูง (Stable Continental Regions)

กลุ่มที่ 4 เป็นแบบจำลอง Esteva เป็นจำลองที่แสดงลักษณะการลดทอนความรุนแรงของแผ่นดินไหวประเภท Shallow Crustal Earthquakes ในภูมิภาคที่แผ่นเปลือกโลกมีเสถียรภาพสูง (Stable Continental Regions)

สำหรับการเลือกใช้แบบจำลองนั้นได้จากการเปรียบเทียบลักษณะการลดทอนความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่คำนวณจากแบบจำลองเหล่านี้กับค่าที่ประมาณได้จากแผนที่ Isoseismic Map ของแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ในอดีต ในภูมิภาคนี้ดังภาพที่ 4 อันได้แก่ Mandaley Earthquake, 1912 ขนาด 8 ริคเตอร์, Pegu Earthquake, 1930 ขนาด 7.2 ริคเตอร์ และ Pyu Earthquake, 1930 ขนาด 7.2 ริคเตอร์ ผลการเปรียบเทียบแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะการลดทอนความรุนแรงของแผ่นดินไหวในเหตุการณ์เหล่านี้มีความคล้ายคลึงกับที่คำนวณได้จากแบบจำลอง CENA และ Esteva มากกว่าแบบจำลอง WNA และ EU แม้จะไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนเนื่องจากข้อมูลจำกัด แบบจำลอง CENA และ Esteva ถูกพิจารณาว่าเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในภูมิภาคนี้



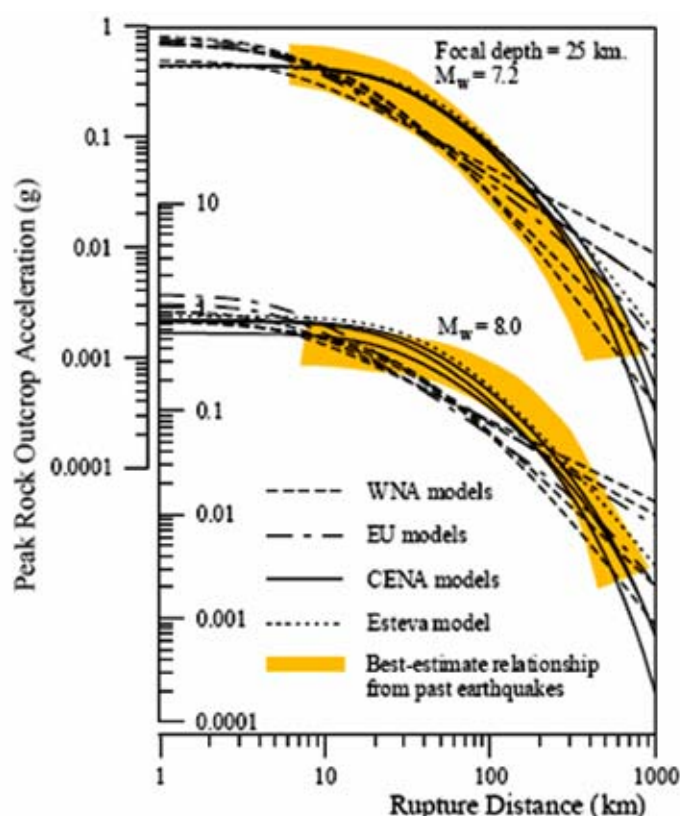
ภาพที่ 1 การเปรียบเทียบขนาดของแผ่นดินไหวโดยการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ

ที่มา: สุพจน์ (2549)

ตารางที่ 2 แบบจำลองลดทอนพลังงานและพื้นที่ที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

แบบจำลอง	ผู้สร้าง	พื้นที่ที่เหมาะสมในการใช้ แบบจำลอง
1. WNA	Boore et al. (1997)	Shallow Crustal Earthquake in Active Area.
	Abrahamson and Silva(1997)	
	Campbell and Bozorgnia (1994)	
	Sadigh et al.(1993)	
2. EU	Ambraseys and Bommer (1992)	Shallow Crustal Earthquake in Stable Continental Region.
	Sabetta and Pugliese(1987)	
3. CENA	Toro and McGuire(1987)	
	Hwang and Huo (1997)	
	Atkinson and Boore (1995)	
4. ESTEVA	Esteva (1973)	

ที่มา: Warntichai *et al.* (2001)



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองการลดทอนพลังงานแบบต่างๆ

ที่มา: Warnitchai *et al.* (2001)

ตัวแปรคลื่นแผ่นดินไหว

ข้อมูลการเคลื่อนตัวของชั้นดินขณะเกิดแผ่นดินไหวประกอบด้วยข้อมูลจำนวนมาก มหาศาล เช่นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีการบันทึกไว้ทุกๆ 0.02 วินาทีซึ่งเกิดขึ้นนานกว่า 30 วินาทีจะทำให้มีข้อมูลประมาณ 2,000-3,000 ข้อมูล ส่งผลให้ทำการวิเคราะห์โดยละเอียดนั้นทำได้ยากในทางวิศวกรรม วิศวกรสามารถลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวด้วยการหาค่าตัวแปรคลื่นแผ่นดินไหว (Strong ground motion) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่สำคัญ 3 ชนิดได้แก่ ตัวแปรด้านขนาด (Amplitude parameters) ตัวแปรด้านส่วนประกอบของความถี่ (Frequency content) และตัวแปรด้านเวลา (Duration parameters) โดยการเลือกใช้วิธีในการคำนวณหาตัวแทนจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ศึกษา ซึ่งโดยทั่วไปมักจำเป็นต้องใช้วิธีการหลายๆ วิธีและตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวแปรขึ้นไปเพื่อประกอบการตัดสินใจ

1. ตัวแปรด้านขนาด (Amplitude parameters)

1.1 ความเร่งสูงสุด (Peak acceleration)

ค่าความเร่งสูงสุด สามารถหาได้จากค่าสูงสุดในแนวราบ เนื่องจากส่งผลโดยตรงกับแรงเฉื่อยที่กระทำต่อโครงสร้างมากกว่าความเร่งในแนวดิ่งเนื่องจากการออกแบบโครงสร้างจะมีความปลอดภัยจากแรงโน้มถ่วงค่อนข้างสูง นอกจากนี้ค่าความเร่งสูงสุดในแนวราบมีความสัมพันธ์กับมาตรวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหว แต่อย่างไรก็ตามค่าความเร่งสูงสุดไม่สามารถบอกคุณลักษณะของการสั่นสะเทือนได้ทั้งหมด จำเป็นต้องทราบถึงระยะเวลา และส่วนประกอบความถี่ของการสั่นสะเทือนนั้นๆ ประกอบด้วย

1.2 ความเร็วสูงสุด (Peak velocity)

ค่าความเร็วในแนวราบ เป็นตัวแปรที่มีประโยชน์อีกตัวแปรหนึ่งในลักษณะเดียวกันกับความเร่ง เนื่องจากกราฟของความเร็วได้รับอิทธิพลจากคลื่นที่มีความถี่ปานกลาง (ภาพที่ 3) ดังนั้นจึงสามารถบ่งชี้ความเสียหายที่อาจเกิดกับโครงสร้างที่มีความถี่ธรรมชาติในช่วงความถี่ปานกลางได้ดีกว่าค่าความเร่งสูงสุด

1.3 การเคลื่อนตัวสูงสุด (Peak displacement)

ค่าการเคลื่อนตัวจะได้ออกมาจากการอินทิเกรตสองครั้งจากค่าความเร่ง ทำให้ขาดความน่าเชื่อถือและประกอบกับสัญญาณรบกวนจำนวนมาก ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวราบจึงเป็นตัวแปรด้านขนาดที่ใช้กันน้อยมาก

1.4 ค่าความเร่งประสิทธิผล (Effective design acceleration)

เนื่องจากค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ความถี่สูง มักไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างมากนัก ดังนั้น Benjamin and Associates (1988) ได้เสนอให้ทำการกรองคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า 8 Hz ออกก่อนแล้วจึงหาค่าความเร่งสูงสุดจากคลื่นที่ผ่านการกรองแล้ว นอกจากนี้ Kennedy (1980)

ได้เสนอให้ค่าความเร่งประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ 1.25 เท่าของค่าความเร่งสูงสุดอันดับสามที่ได้จากคลื่นที่ผ่านการกรองแล้ว (สุพจน์, 2549)

2. ตัวแปรด้านส่วนประกอบของความถี่ (Frequency content parameters)

การตอบสนองของโครงสร้างทางวิศวกรรมเช่น อาคาร สะพาน เขื่อน และอื่นๆ มีความไวในการตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ต่างๆ กันออกไป ซึ่งแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหวเกิดจากการผสมผสานคลื่นหลากหลายความถี่เข้าด้วยกัน ดังนั้นการศึกษาส่วนประกอบด้านความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหวสามารถกำหนดคุณลักษณะของแผ่นดินไหวนั้นๆ รวมถึงการวิเคราะห์การตอบสนองโครงสร้างต่อแผ่นดินไหว (สุพจน์, 2549)

2.1 Fourier spectrum of ground motion

กราฟการสั่นสะเทือนกับเวลาที่ได้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวหนึ่งๆ สามารถกระจายออกในรูปของคลื่นที่มีความถี่สม่ำเสมอหลายๆ คลื่นโดยใช้สูตรของ Fourier ดังนี้

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (6)$$

โดยที่ $x(t)$ คือ การสั่นสะเทือนที่เป็น Irregular motion
 c_n, ϕ_n คือ ขนาด (Amplitude) และมุมแตกต่าง (Phase different) ของคลื่น Harmonic ที่มีความถี่ ω_n

2.2 Power spectrum

การสั่นสะเทือนเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวสามารถอธิบายได้ในรูปของ Power spectrum (Power spectral density function) ซึ่งมีประโยชน์ในการประเมินการสั่นสะเทือนทางสถิติ (Clough and Penzien, 1975) โดยที่ค่า Power spectrum ที่ความถี่หนึ่งๆ $G(\omega)$ สามารถประเมินได้จากขนาดของคลื่น Harmonic (c_n) ที่ได้จากการกระจายอนุกรม Fourier ดังนี้

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi T_d} c_n^2 \quad (7)$$

โดยที่ T_d คือ ช่วงเวลาของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น (Duration)

2.3 Response spectra

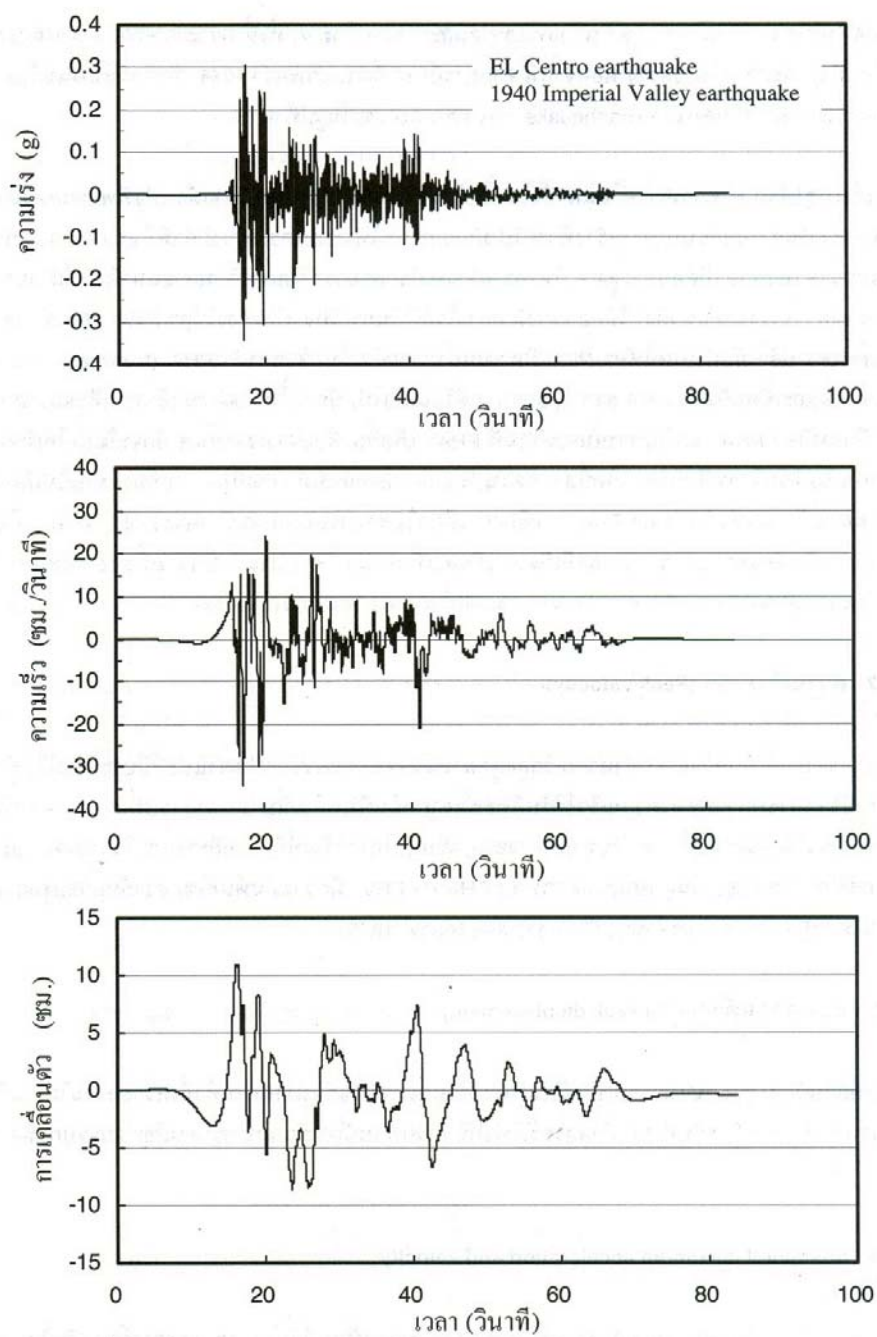
Response spectrum เป็นวิธีการแจกแจงความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือนที่ใช้กันมากในทางวิศวกรรม โดยเป็นการอธิบายการตอบสนองสูงสุด (ความเร่ง ความเร็ว หรือ การเคลื่อนตัว) ของระบบ Single degree of freedom (SDOF) ต่อรูปแบบการสั่นสะเทือนหนึ่งๆ โดยแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองที่ต้องการ และความถี่ธรรมชาติ และค่าความหน่วงของระบบ SDOF นั้นๆ ดังตัวอย่างของ Response spectra ของคลื่น El-Centro และ Petrolia ในภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าระบบที่มีค่าความถี่ธรรมชาติสูง (บ้าน ที่อยู่อาศัยทั่วไป) จะได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนมาก ในขณะที่ระบบที่มีความถี่ธรรมชาติต่ำ (อาคารสูง) จะได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวในแนวราบของชั้นดินมาก ดังนั้นผู้ที่อาศัยอยู่บนอาคารสูงจึงรู้สึกถึงการโยกตัวที่ความถี่ต่ำ ในขณะที่ผู้ที่อาศัยในอาคารที่พักอาศัยขนาดเล็กจะรู้สึกถึงการสั่นสะเทือนที่เร็วกว่า

2.4 Spectral parameters

Response spectrum ไม่ได้แสดงคุณลักษณะของคลื่นการสั่นสะเทือนโดยตรง แต่บ่งชี้ถึงการตอบสนองของโครงสร้างที่มีค่าความถี่ธรรมชาติต่างๆ ต่อคลื่นการสั่นสะเทือนนั้นๆ แทน โดยกราฟ Response spectrum ประกอบด้วยข้อมูลจำนวนมาก ดังนั้นการแปลผลให้ง่ายขึ้นจึงมีการเสนอให้มีการอ่านค่าตัวแปรเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการอธิบายดังนี้

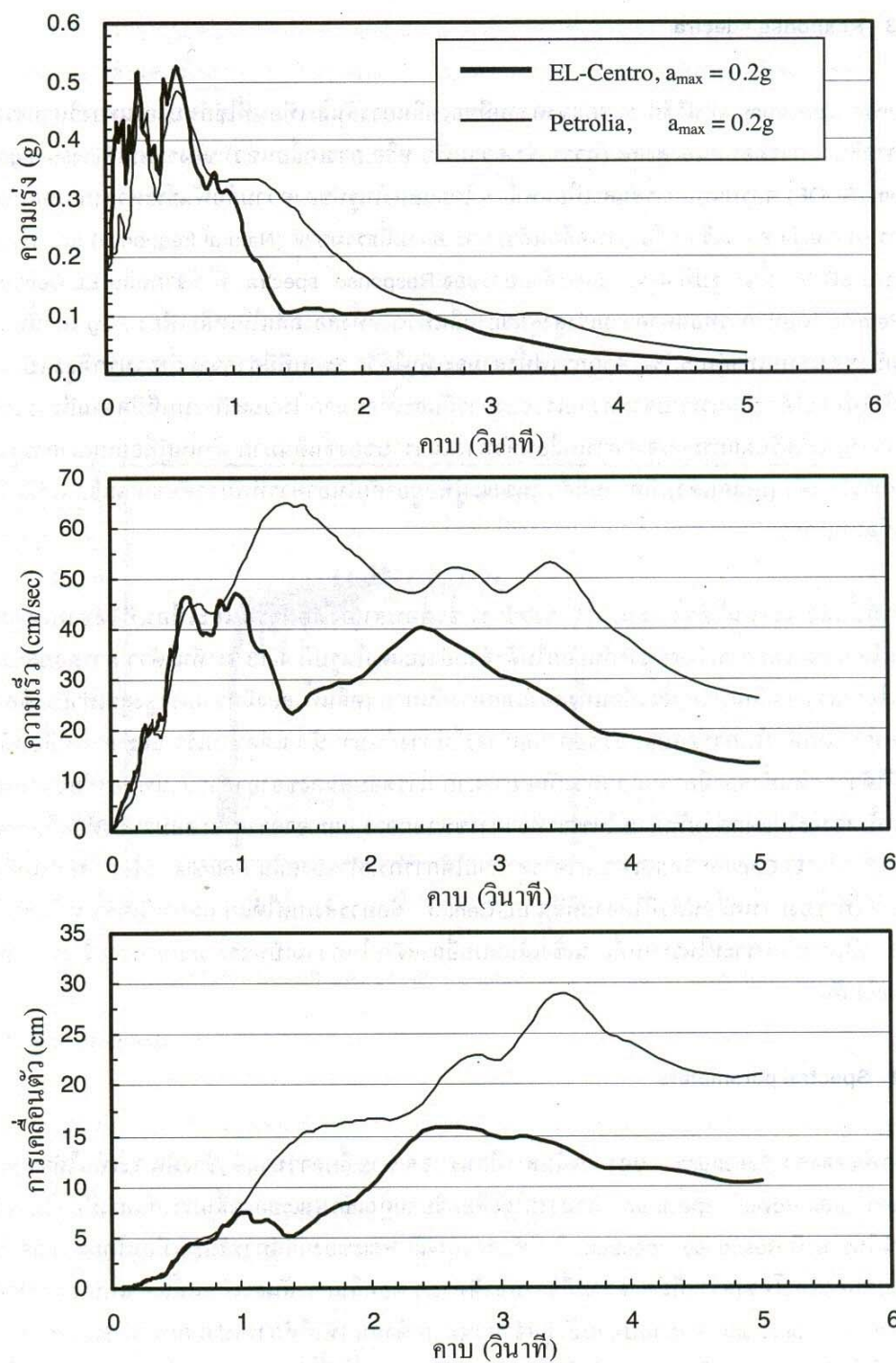
2.4.1 Predominant period, T_p

เป็นค่าตัวแทนของกราฟ Spectrum ที่มีประโยชน์มาก โดยค่า T_p ได้แก่คาบของการสั่นสะเทือนที่ให้ค่าขนาดสูงสุดจากกราฟ Fourier amplitude spectrum โดยทำการเฉลี่ยและปรับกราฟให้มีความสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามค่า T_p มีประโยชน์ในกรณีที่คลื่นการสั่นสะเทือนมีส่วนประกอบของคลื่นที่มีขนาดต่างกันมาก ดังตัวอย่างในภาพที่ 5 พบว่ากราฟทั้งสองมีค่า T_p ใกล้เคียงกัน แต่คุณลักษณะของการสั่นสะเทือนต่างกันมาก (สุพจน์, 2549)



ภาพที่ 3 ความเปลี่ยนแปลงของขนาด และส่วนประกอบความถี่ ของความเร่ง ความเร็ว และการเคลื่อนตัวของคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro

ที่มา: สุพจน์ (2549)

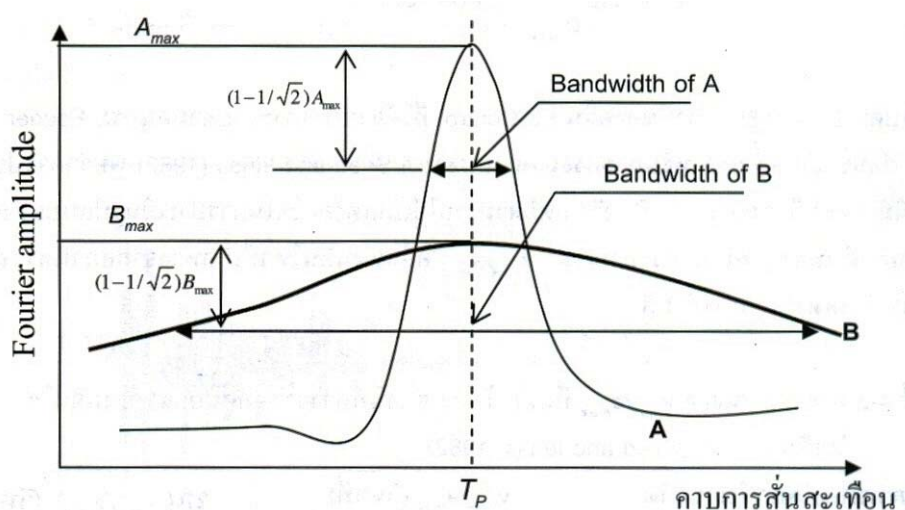


ภาพที่ 4 Response spectra จากคลื่นแผ่นดินไหว 2 เหตุการณ์

ที่มา: สุพจน์ (2549)

2.4.2 Bandwidth

เมื่อค่า T_p ไม่สามารถสื่อถึงการกระจายของคลื่นการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่างๆ ดังนั้น จึงมีการเสนอให้ใช้ Bandwidth เป็นตัวประกอบเพื่ออธิบายคุณลักษณะการกระจายของคลื่นการสั่นสะเทือน โดย Bandwidth เป็นตัวเลขที่บอกช่วงของความถี่ที่ค่า Fourier amplitude มีค่าตั้งแต่ $1/\sqrt{2}$ ของค่าสูงสุดขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุดดังภาพที่ 5 (สุพจน์, 2549)

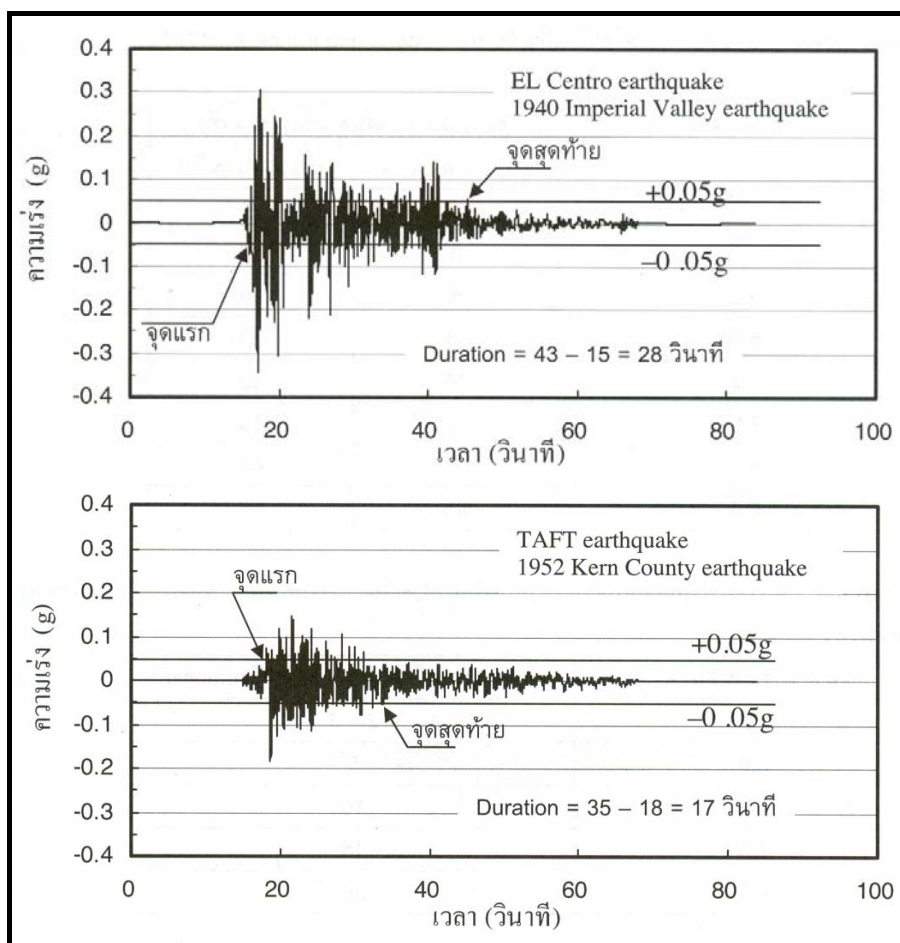


ภาพที่ 5 Fourier amplitude spectrum จากการสั่นสะเทือน 2 เหตุการณ์

ที่มา: สุพจน์ (2549)

3. ตัวแปรทางด้านระยะเวลาของการสั่นสะเทือน (Duration)

การคำนวณเพื่อหาค่าระยะเวลาการสั่นสะเทือนจากกราฟแสดงการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากเครื่องมือตรวจวัดแต่ละชนิดจะเริ่ม และหยุดการบันทึกที่ระดับสัญญาณที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง โดย Bolt (1969) ได้เสนอวิธีการที่เรียกว่า *Bracketed duration* ในการกำหนดระยะเวลาการสั่นสะเทือนโดยกำหนดให้ระยะเวลาการสั่นสะเทือนมีค่าเท่ากับช่วงเวลาที่ค่าความเร่งเกิน $\pm 0.05g$ เป็นครั้งแรก และครั้งสุดท้าย (สุพจน์, 2549) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การประมาณระยะเวลาของการสั่นสะเทือนตามวิธี Bracketed duration

ที่มา: สุพจน์ (2549)

แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย

เราต่างทราบว่าการเคลื่อนไหวยุ่ตลอดเวลา เปลือกโลกซึ่งเป็นส่วนที่เปราะบางย่อมได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนไหวดังกล่าวรุนแรงกว่าเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ ของโลก การเคลื่อนไหวกายในโลกลำให้เกิดความเค้นและความเครียดขึ้นในเปลือกโลก จึงก่อให้เกิดลักษณะต่างๆ ขึ้นในเปลือกโลก เช่น โกงงอ คดโค้ง แตก หรือยุบลง รอยแตกที่เกิดขึ้นในเปลือกโลก ซึ่งรอยแตกต่างๆ นั้นเองเป็นแหล่งกำเนิดของแผ่นดินไหว เราเรียกรอยแตกเหล่านี้ว่า “รอยเลื่อน” (faults) ข้อมูลจาก กรมทรัพยากรธรณี (2549) สรุปได้ว่าประเทศไทยมีรอยเลื่อนมีพลังจำนวน 15 รอยเลื่อน (ภาพที่ 7)

เขตรอยเลื่อนที่สำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหว และมีผลกระทบต่อประเทศไทย ได้แก่ รอยเลื่อนในเขตตะวันตกของประเทศไทย-ตะวันออกของประเทศพม่า ซึ่งได้แก่ เขตรอยเลื่อนสะแกง เขตรอยเลื่อนพานหลวง รอยเลื่อนทั้งสองนี้มีแนวแยกต่อเนื่องมาทางตะวันตกของประเทศไทย ไล่จากทางตอนบนลงมามาตอนล่าง อันได้แก่เขตรอยเลื่อนเมย-วังเจ้า เขตรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ และเขตรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ตามลำดับ ในเขตภาคเหนือของประเทศไทย มีเขตรอยเลื่อนแม่ทา, เขตรอยเลื่อนแพร่-เถิน รอยเลื่อนแม่จัน ซึ่งยังคงมีการเคลื่อนไหวอยู่ และรอยเลื่อนอุตรดิตถ์ (น้ำปาด) เป็นต้น แนวทางและโอกาสการเกิดแผ่นดินไหวในย่านประเทศไทย และประเทศโดยรอบข้างเคียง ศึกษาได้จากการแบ่งขอบเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (Seismic Source Zone) ซึ่งปริญญา นุตาลัย และคณะ (2538) เป็นผู้ทำการวิจัยและศึกษาไว้โดยสามารถแบ่งเขตต่าง ๆ ในบริเวณประเทศไทย และประเทศไทยใกล้เคียง ออกได้ 12 เขต ทั้งนี้อาศัยสภาพลักษณะทางเทคนิค (tectonic setting) และโครงสร้างทางเทคนิค (tectonic structure) ประกอบกับประวัติการเกิดแผ่นดินไหวที่บันทึกได้เป็นบรรทัดฐาน โดยเฉพาะอาศัยแผนที่ธรณีวิทยา แผ่นดินไหว (seismo tectonic map) ที่สร้างขึ้นจากข้อมูล เหล่านั้นด้วย

สำหรับประเทศไทยแหล่งที่จะมีกำเนิดแผ่นดินไหวน่าจะตกอยู่ในเขตภาคตะวันตกของประเทศไทย ซึ่งเป็นเขตต่อเนื่องมาจากเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวแนวตะนาวศรี (เขต F) และเขตภาคเหนือของประเทศไทย (เขต G) (ภาพที่ 8) การเกิดแผ่นดินไหวซ้ำและผลกระทบต่อประเทศไทย สามารถศึกษาได้จากสถิติและข้อมูลต่างๆ อันได้แก่ จำนวนครั้งที่เกิดขนาด ความรุนแรงที่รู้สึกได้ และประเภทที่เกิดตามระดับความลึกตามรายงานใน series of seismology ซึ่งเผยแพร่โดยปริญญา นุตาลัย และคณะ (2538)

นอกจากนั้น การศึกษาข้อมูลและสถิติต่างๆ จากการเผยแพร่ของกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่าแผ่นดินไหวที่มีขนาด 7 ริกเตอร์หรือมากกว่ามักจะเกิดอยู่นอกประเทศไทย ส่วนใหญ่เกิดอยู่ในเขตพรมแดนจีน-พม่า, ประเทศพม่า, ประเทศจีนตอนใต้ ในทะเลอันดามันและ หมู่เกาะสุมาตราตอนเหนือ ซึ่งอยู่ในเขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (seismic source zone) อื่นๆ นอกเหนือจากเขตตะวันตกและเหนือของประเทศไทย ส่วนใหญ่รู้สึกสั่นไหวได้ในประเทศไทยได้ แต่ไม่มีผลกระทบเสียหายรุนแรง และในบางครั้งสามารถรู้สึกสั่นสะเทือนได้ที่กรุงเทพฯ

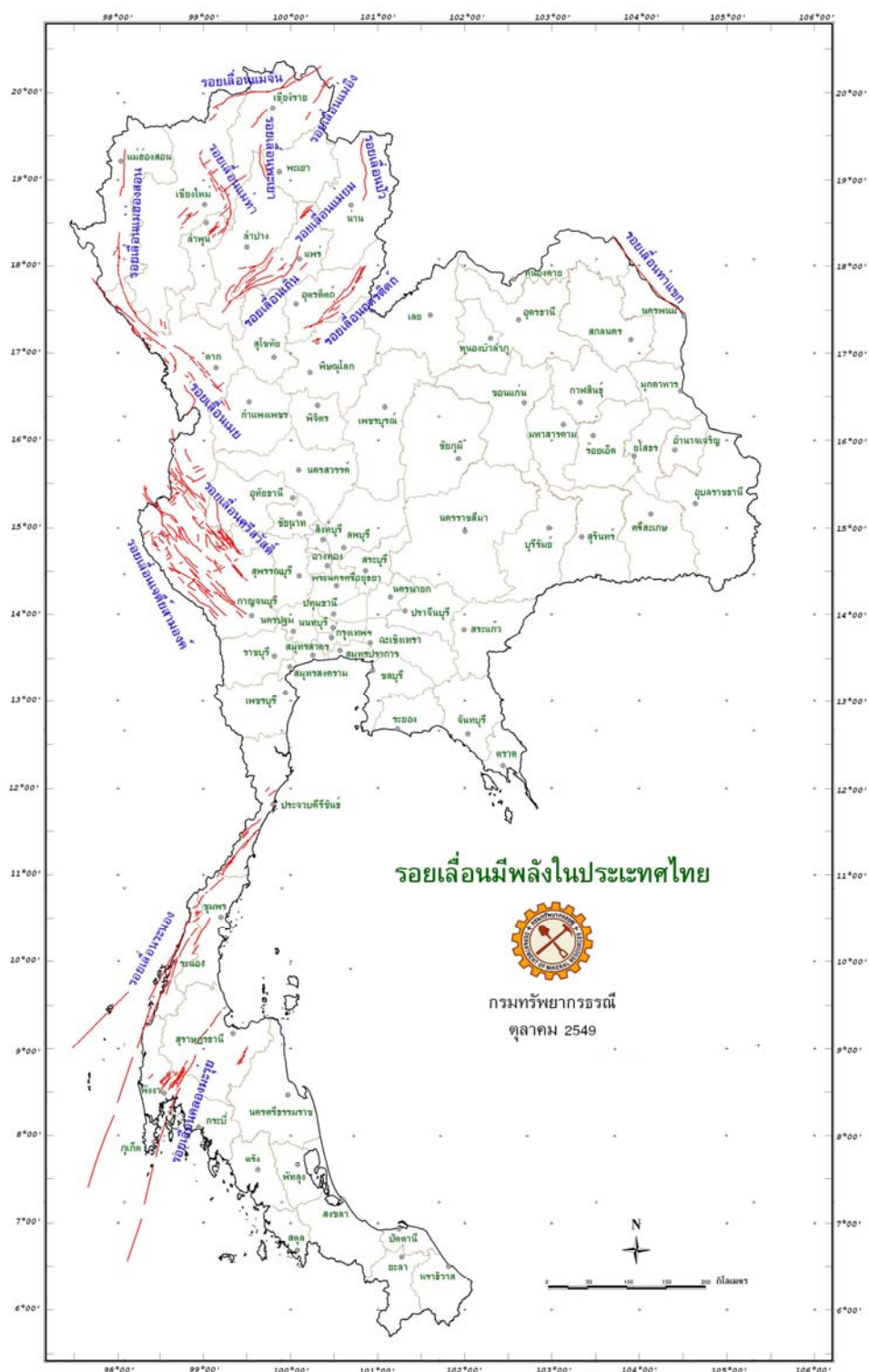
สำหรับที่เกิดในบริเวณเขตพรมแดนไทย-พม่า, ไทย-ลาว, ภาคเหนือ และตะวันตกของประเทศไทย (คือ เขตแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว เขต F และเขต G) มักจะมีขนาดเล็กถึงขนาดปาน

กลาง และสามารถรู้สึกสั่นไหวได้ในเขตภาคเหนือภาคตะวันตก และบางครั้งที่กรุงเทพฯ ด้วย ส่วนประเทศไทยด้านตะวันออกเฉียงเหนือจัดอยู่ในเขตที่มีเสถียรภาพทางเทคโทนิก ก่อนข้างปลอดภัย แผ่นดินไหว กล่าวโดยสรุป ประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่ที่อาจเรียกได้ว่าค่อนข้างสงบ ไม่มีแผ่นดินไหวรุนแรงน่าจะอยู่อันดับ เขตเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวต่ำ (low seismic risk zone) ถึงเขตเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวปานกลาง (intermediate seismic risk zone)

รอยเลื่อนมีพลังที่อาจส่งผลกระทบต่อกรุงเทพมหานครได้คือ รอยเลื่อนในจังหวัดกาญจนบุรี เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่เกิดแผ่นดินไหวค่อนข้างรุนแรง และบ่อยกว่ารอยเลื่อนอื่นๆ อีกทั้งมีระยะทางไม่ห่างจากกรุงเทพมหานครมากนัก ซึ่งมีรอยเลื่อนมีพลังที่สำคัญอยู่ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์และ กลุ่มรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์

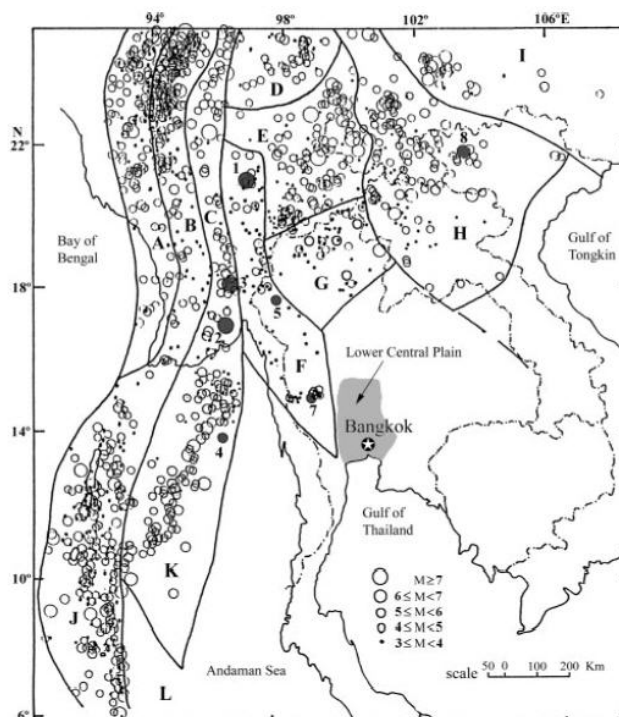
รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ วางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ต่อเนื่องมาจากกลุ่มรอยเลื่อนมีพลังสะเทียง (Sakang Fault) ในประเทศเมียนมาร์ มีความยาวประมาณ 210 กม. และมีความกว้างประมาณ 25 กิโลเมตร (ภาพที่ 9) ผ่านเข้ามาทางเขตอำเภอสังขละบุรีและทองผาภูมิ ใกล้เขื่อนวชิราลงกรณ์ ผ่านแม่น้ำแควน้อยและแควใหญ่ จนถึงตัวเมืองกาญจนบุรี ประกอบด้วยรอยเลื่อนต่างๆ 8 รอยเลื่อน วางตัวต่อเนื่องกัน และเคยเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่มาแล้วหลายครั้งในอดีต โดยครั้งสุดท้ายเกิดในบริเวณแถบรอยเลื่อนย่อยของกาเลีย ในเขตอำเภอสังขละบุรี เกิดขึ้นเมื่อประมาณ 2,200-5,000 ปี และมีอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนกลุ่มนี้ ตั้งแต่ 0.22-0.50 มม./ปี โดยมีขนาดความรุนแรงแผ่นดินไหวคำนวณได้ประมาณ 7.2 ริคเตอร์

กลุ่มรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ เป็นรอยเลื่อนที่แตกแขนงมาจากกลุ่มรอยเลื่อนพานหลวงในประเทศเมียนมาร์และวางตัวอยู่ระหว่างกลุ่มรอยเลื่อนแม่ปิงในเขตจังหวัดตาก และกลุ่มรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ทางตอนใต้ โดยวางตัวพาดผ่านอำเภอศรีสวัสดิ์ อำเภอบ่อพลอย และเขื่อนศรีนครินทร์ มีความยาวรวม 200 กิโลเมตร และมีความกว้างประมาณ 25 กิโลเมตร (ภาพที่ 9) ผลการคำนวณหาอายุการเคลื่อนตัวในอดีต จากการขุดร่องสำรวจบ้านแก่งแคบ ทางตอนใต้ของเขื่อนศรีนครินทร์ ประมาณ 10 กิโลเมตร พบว่าได้เคยเกิดแผ่นดินไหวครั้งสุดท้ายมีขนาดประมาณ 6.3 ริคเตอร์ เมื่อประมาณ 5,800 ปี และมีอัตราการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนเจ้าแณร ประมาณ 0.67 มม./ปี



ภาพที่ 7 ตำแหน่งรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี (2549)

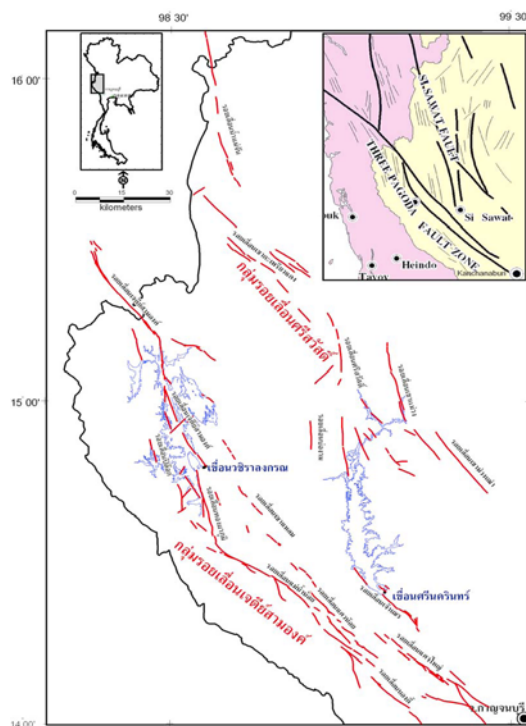


ภาพที่ 8 แผนที่แสดงการแบ่งพื้นที่ของตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวตั้งแต่ปี ค.ศ.1910-2000

ที่มา: ปริญา และคณะ (2538)

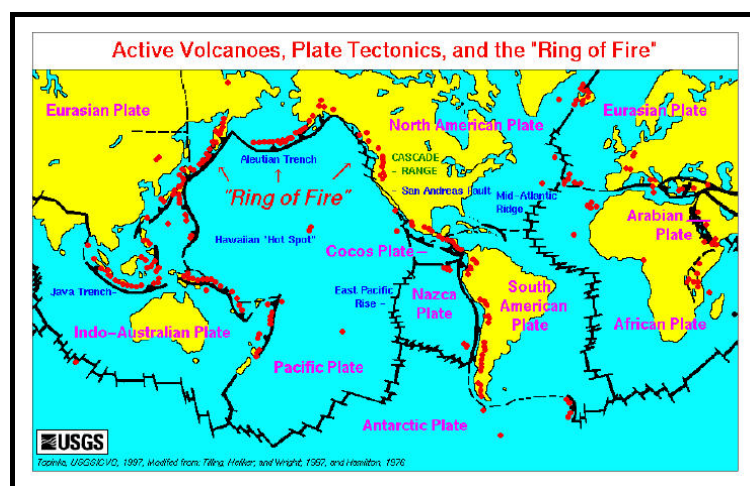
เหตุการณ์แผ่นดินไหว

เหตุการณ์การเกิดแผ่นดินไหวบริเวณประเทศไทยและใกล้เคียงนั้นจะเห็นได้ว่าเกิดขึ้นมากมายหลายครั้งตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรง เช่น เหตุการณ์แผ่นดินไหวเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม ค.ศ. 2004 ที่ส่งผลกระทบต่อภาคใต้ของประเทศไทย หรือ เหตุการณ์ที่ไม่มีผลกระทบต่อความเสียหายแต่สามารถที่จะรับรู้ความรู้สึกได้ เหตุผลที่ทำให้พื้นที่ในบริเวณนี้มีเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้นนั้นเนื่องสภาพธรณีวิทยาที่มีแผ่นเปลือกโลกที่สำคัญๆ คือ Eurasian Plate กับกลุ่มเปลือกโลก India-Australian Plate แสดงในภาพที่ 10 โดยในแผ่นเปลือกโลกนี้ยังมีรอยเลื่อนต่างๆ กระจายตัวอยู่มากมาย จากข้อมูลของ USGS (U.S. Geological Survey) ที่บันทึกข้อมูลแผ่นดินไหวตั้งแต่ปี ค.ศ.1973 จนถึง 1 มิ.ย. ค.ศ. 2008 แสดงในภาพที่ 11 พบว่าตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวส่วนใหญ่จะอยู่ตามแนวรอยต่อแผ่นทวีป (Plate Tectonic) ระหว่าง Indian Plate และ Eurasian Plate โดยเฉพาะบริเวณทะเลอันดามันเรื่อยขึ้นมาในประเทศเมียนมาร์ ซึ่งอยู่ทิศตะวันตกของประเทศไทย



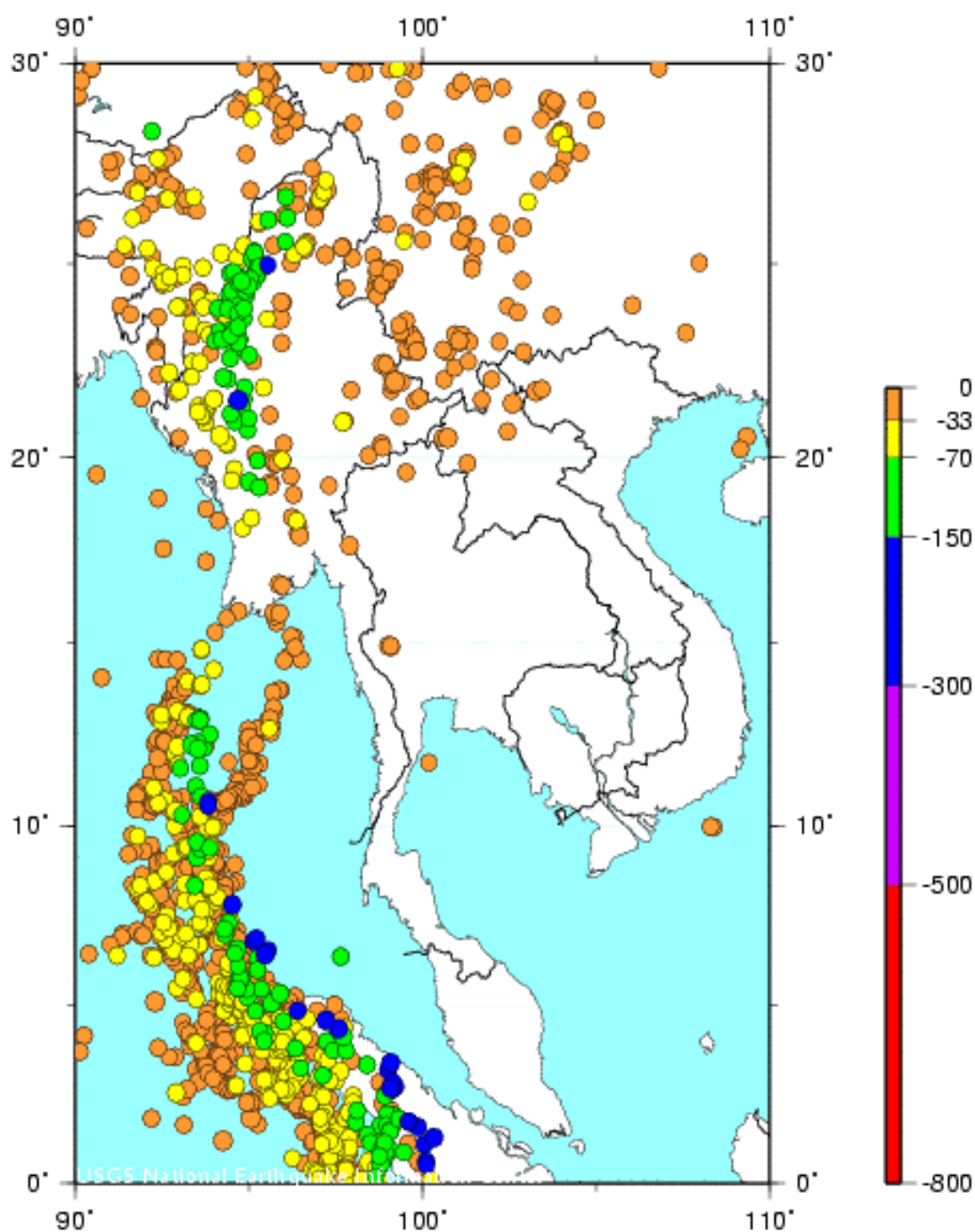
ภาพที่ 9 แผนที่กลุ่มรอยเลื่อนบริเวณพื้นที่ศึกษาและใกล้เคียง

ที่มา: ปัญญา และคณะ (2547)



ภาพที่ 10 แนวรอยต่อของแผ่นเปลือกโลก

ที่มา: USGS (N.D.)



ภาพที่ 11 ตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหว ที่มีขนาดตั้งแต่ 5 ริกเตอร์ขึ้นไป ในประเทศไทยและบริเวณใกล้เคียง ตั้งแต่ปี ค.ศ.1973 ถึง มิถุนายน ค.ศ.2008

ที่มา: USGS (2008)

ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

Moh *et al.* (1969) เป็นผู้ขนานนามเฉพาะชั้นดินส่วนที่เป็นดินเหนียวอ่อนที่วางตัวอยู่ตอนบนสุดของดินตะกอนในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างว่า “Bangkok Clay” รูปลักษณะของชั้นดินนี้เป็นรูปคล้ายแอ่งกระทะค่อนข้างลึก ท้องของแอ่งจะค่อนข้างมาทางปากอ่าวไทย ความหนาของชั้นดินส่วนใหญ่ประมาณ 10-18 เมตร ยกเว้นพื้นที่ทางตอนเหนือตั้งแต่จังหวัดปทุมธานีขึ้นไปจนสุดที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่ความหนาค่อยๆ ลดลงจาก 10 เมตร ไปเป็น 0 เมตร ที่ปลายด้านบนสุด สำหรับขอบของแอ่งฝั่งตะวันออกและตะวันตกมี ความชันและความหนาลดลงรวดเร็วมากกว่าด้านทิศเหนือ

สภาพธรณีวิทยาภาคกลางตอนล่าง

วิชาญ(2546) พื้นที่ภาคกลางตอนล่าง เดิมเป็นโครงสร้างของหินแกรนิตและหินแปรซึ่งเป็นหินในยุค Paleozoic epoch ถึง Mesozoic era (อายุมากกว่า 60 ล้านปี) เมื่อประมาณ 3 – 5 ล้านปีที่ผ่านมา ได้เกิดการทรุดตัวในลักษณะ block faulting เกิดเป็นแอ่งหินขนาดใหญ่ ปัจจุบันท้องของแอ่งหินอยู่ลึกประมาณ 2000 เมตร โดยมีขอบแอ่งด้านเหนือสุดอยู่ที่จังหวัดชัยนาท ดังแสดงในภาพที่ 12

ในช่วง 7 ล้านปีจนถึงปัจจุบัน (Quaternary period) ได้มีการตกตะกอนของชั้นดินบนแอ่งหินนี้ โดยส่วนใหญ่เป็นดินตะกอนน้ำจืดที่น้ำพัดพามาจากภูเขาทางเหนือ วางตัวอยู่กลางแอ่งและดินตะกอนจากภูเขาที่โอบอยู่สองฝั่งของแอ่ง วางตัวอยู่ด้านข้าง ความรู้เกี่ยวกับชั้นดินตะกอนต่าง ๆ ในแอ่งหินนี้ได้มีการสำรวจศึกษาอยู่เฉพาะช่วงความลึก 600 เมตรแรก (ดังแสดงในรูปที่ 12 นี้เช่นกัน) โดยในช่วงความลึกนี้พบว่า มีชั้นดินทรายซึ่งเป็นแหล่งเก็บน้ำใต้ดิน ที่มีความหนาค่อนข้างมาก (โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นที่อยู่ลึกลงไปมาก) จำนวน 8 ชั้น วางตัวสลับกับชั้นดินเหนียวที่บ่มน้ำที่ไม่หนามากนัก

ตอนบนสุดของพื้นที่ภาคกลางตอนล่าง เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำ (deltaic clay) ที่เกิดในยุค Holocene epoch ซึ่งเป็นยุคที่มีการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกและการยกระดับของน้ำทะเลอันเนื่องมาจากการละลายตัวของภูเขาน้ำแข็งทางขั้วโลกเหนือ การยกระดับของน้ำทะเลช่วงนี้เกิดขึ้นต่อเนื่องยาวนานมากกว่าหมื่นปี (ช่วง 20,000 – 5,000 ปีก่อนปัจจุบัน) เป็นการยก

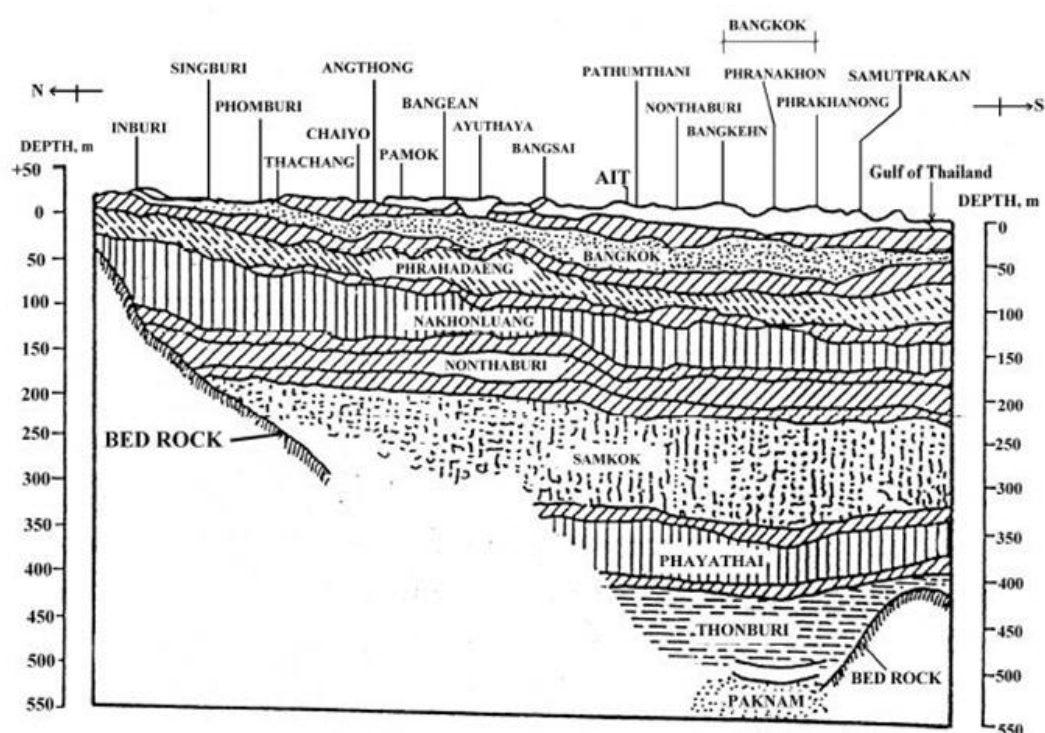
ระดับน้ำทะเลจาก -120 เมตร (MSL) จนถึงระดับที่สูงกว่า MSL เล็กน้อย แล้วมีการลดระดับน้ำทะเลลงอย่างช้าๆ ในช่วงหลังจาก 5,000 ปี จนถึงปัจจุบัน (สำหรับประเทศไทยการลดระดับน้ำทะเลเกิดเมื่อประมาณ 6,000 กว่าปีมาแล้ว) การเคลื่อนตัวของเปลือกโลกและการยกตัวของน้ำทะเลในช่วง 20,000 – 5,000 ปีก่อนปัจจุบัน ทำให้เกิดการตกตะกอนของชั้นดินอ่อนที่สำคัญในภูมิภาคต่าง ๆ ของโลกโดยทั่วไป อาทิเช่น อเมริกาเหนือ เม็กซิโก อเมริกากลางและคาริบเบียน อเมริกาใต้ ยุโรป รัสเซีย แอฟริกา ตะวันออกไกล ตะวันออกกลาง อินเดีย และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ดินตะกอนลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง

ตะกอนดินเหนียวอ่อน marine clay เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำ (deltaic clay) ที่ปกคลุมเกือบเต็มพื้นที่ราบลุ่มของภาคกลางตอนล่าง ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของ 14 จังหวัด รวมทั้งพื้นที่ทั้งหมดของกรุงเทพมหานคร ดังภาพที่ 13 (soft deltaic clay deposits) เหตุที่ดินตะกอนส่วนนี้ยังอ่อนตัวอยู่ เพราะเป็นตะกอนดินเหนียว ที่ถูกแม่น้ำพัดพาออกสู่ทะเลที่ปากอ่าวไทย แล้วเกิดการตกตะกอนในท้องทะเลลึก (โดยที่ดินตะกอนบางส่วนก็ถูกน้ำทะเล ผลักกลับมาตกที่ชายฝั่ง) ชั้นดินกว่าจะไหลพ้นระดับน้ำ ทะเล ก็มีความหนาแน่นพอสมควรแล้ว เมื่อไหลพ้นผิวน้ำทะเล จึงถูกแดดเฉพาะส่วนที่เป็นผิวบน (หนาประมาณ 3-5 เมตร) ทำให้แห้งและแข็งกว่า ส่วนชั้นดินที่ด้านล่างจึงยังคงสภาพที่อ่อนอยู่

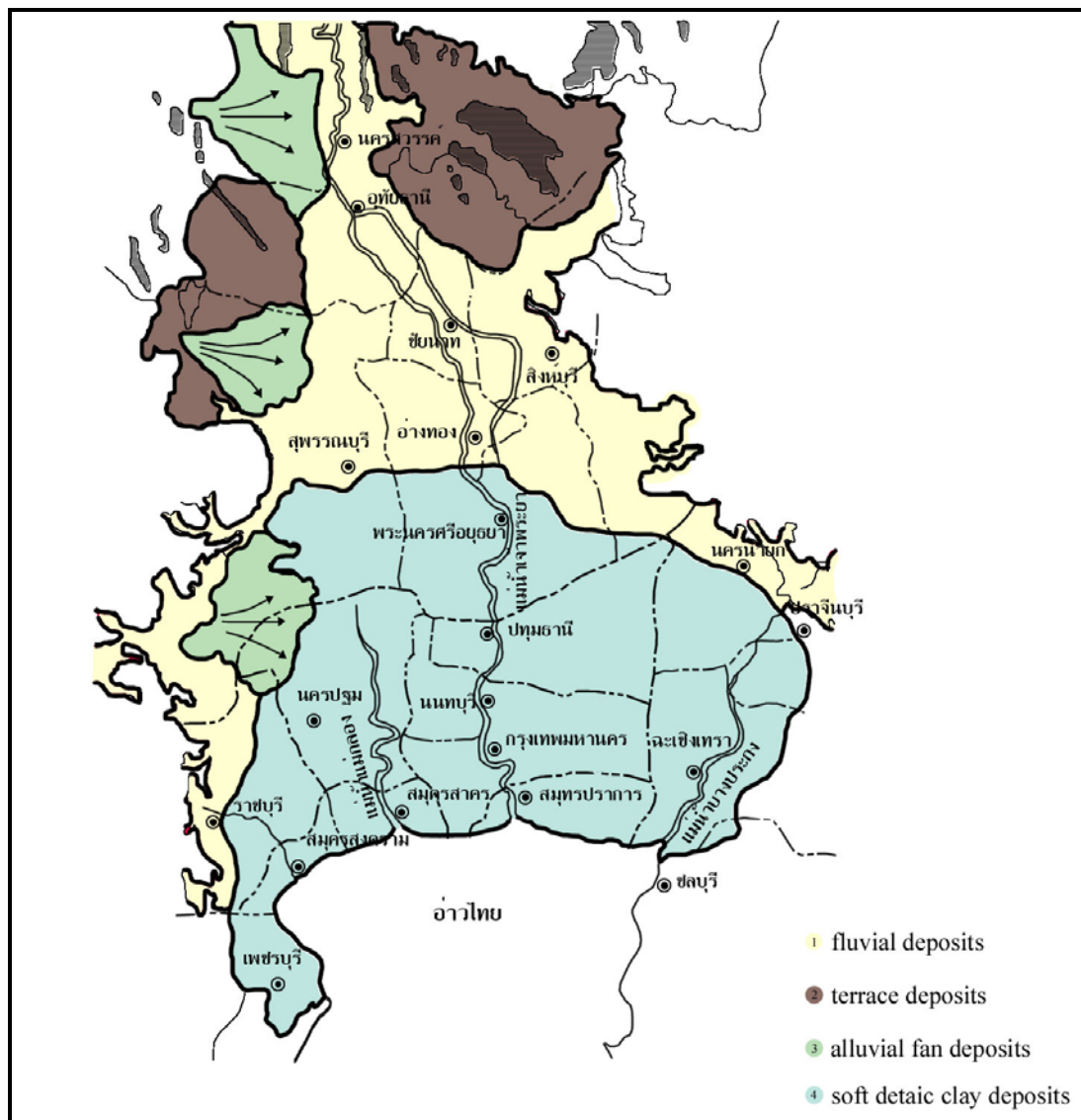
สำหรับประเทศไทย ได้เกิดชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำโดยมีแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำท่าจีนเป็นแกนหลัก ขนาบด้วยแม่น้ำบางปะกงและแม่น้ำแม่กลอง ตะกอนดินเหนียวส่วนใหญ่พัดพามาจากตอนเหนือของประเทศ ไหลลงสู่ท้องทะเลทางปากแม่น้ำ ดินตะกอนส่วนใหญ่ตกตะกอนสภาพน้ำเค็มในท้องทะเลเรียกว่า “marine clay” ในขณะที่บางส่วนตกตะกอนที่ชายฝั่งในสภาพน้ำกร่อยเรียกว่า “intertidal clay” ช่วงที่ระดับน้ำทะเลยกกระดืบ (transgression period) ดินตะกอนชายฝั่งจะวางตัวอยู่ใต้ชั้นดิน marine clay แต่ในช่วงที่ระดับน้ำทะเลลดระดับลง (regression period) ดินตะกอนชายฝั่งจะวางตัวอยู่บนชั้น marine clay ฉะนั้นชั้นดินเหนียวอ่อนปากแม่น้ำของประเทศไทย จึงประกอบด้วยชั้นดินตะกอน 3 ชุดคือ ดินตะกอนชายฝั่งวางตัวอยู่ตอนบน มีชั้น marine clay ที่ค่อนข้างหนาวางตัวถัดลงมา และมีชั้นดินตะกอนชายฝั่งอยู่ใต้ marine clay อีกชั้นหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 16 ชั้นดินเหนียวอ่อนนี้ได้รับการขนานนามว่า “Soft Bangkok clay” ปกคลุมพื้นที่ประมาณ 14,000 ตารางกิโลเมตร (ประมาณ 14 จังหวัด) เป็นตะกอนดินรูปแอ่งกระทะจากเส้นความลึกของท้องชั้นดินในภาพที่ 14 แสดงความหนาเฉลี่ยประมาณ 10 – 15 เมตร โดยมีส่วนที่หนาที่สุด

(ประมาณ 20 เมตร) อยู่บริเวณปากแม่น้ำบางปะกง ชั้นดินเหนียวอ่อนทั้งผืนนี้ วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็งที่เกิดตอนปลายของ Pleistocene epoch โดยมีชั้นดินทรายสลับกับชั้นดินเหนียว ที่เกิดในช่วงของ Pleistocene epoch นี้ จำนวนหลายชั้น วางตัวอยู่ถัดลงไปจนถึงความลึกนับพันเมตร จนกว่าจะถึง bed rock ภาพตัดของแอ่งชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ได้มีผู้จัดทำไว้ตามแนวเหนือ-ใต้ และแนวตะวันตก-ตะวันออก แสดงไว้ในภาพที่ 15



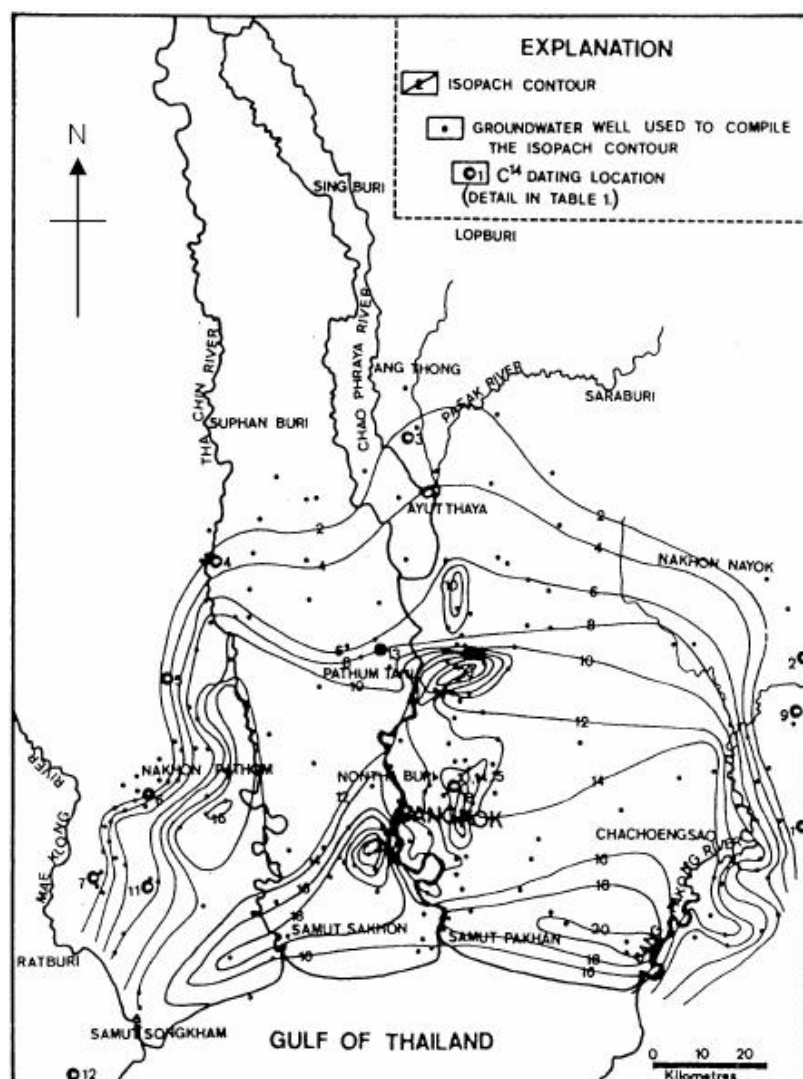
ภาพที่ 12 โครงสร้างทางธรณีวิทยาภาคกลาง (ภาพตัดแนวเหนือ-ใต้)

ที่มา: Moh *et al.* (1969)



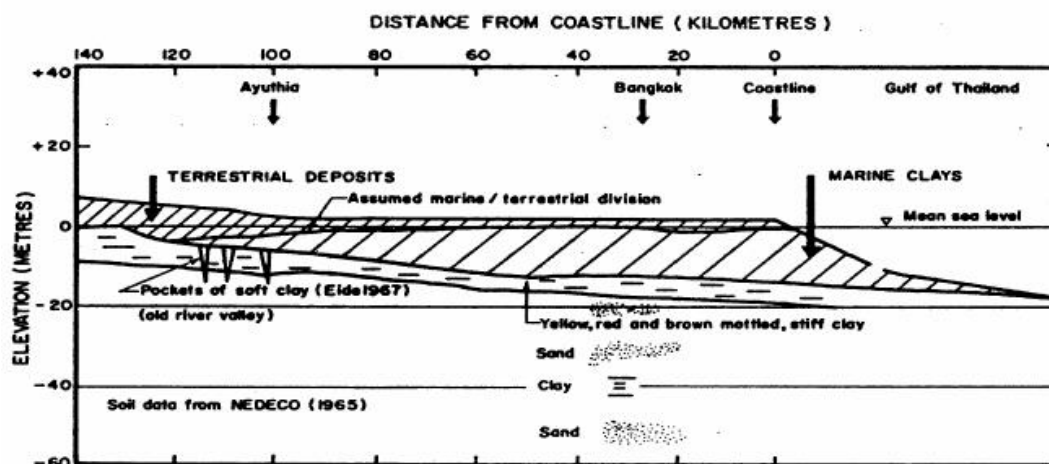
ภาพที่ 13 สภาพทางปฐพีในพื้นที่ราบลุ่มภาคกลาง

ที่มา: วิชาญ (2546)

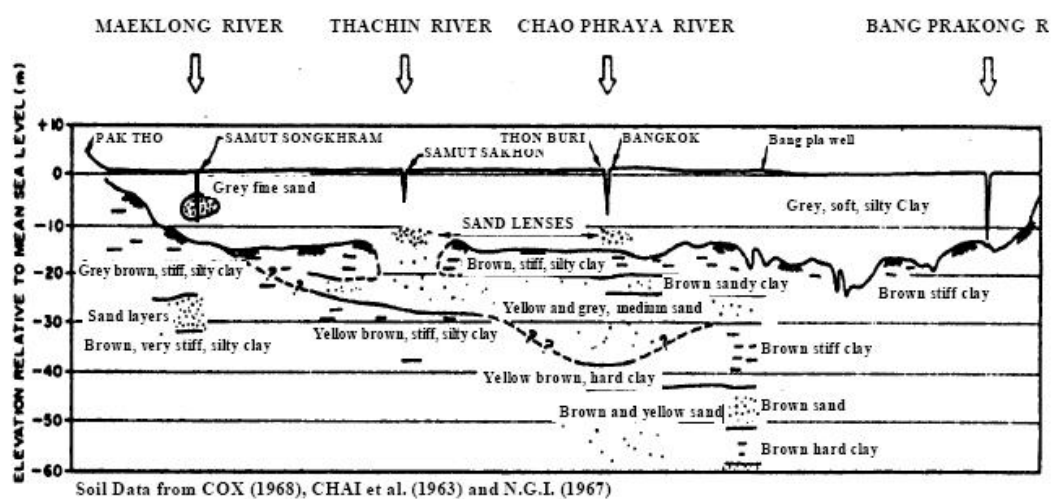


ภาพที่ 14 Isopach Map ของความหนาดินเหนียวอ่าวกรุงเทพ

ที่มา: Nutalaya and Rau (1981)



(ก) ภาพตัดแนวเหนือ - ใต้



(ข) ภาพตัดแนวตะวันออก - ตะวันตก

ภาพที่ 15 ภาพตัดแอ่งชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ที่มา: วิชาญ (2546)

รูปแบบและโครงสร้างชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

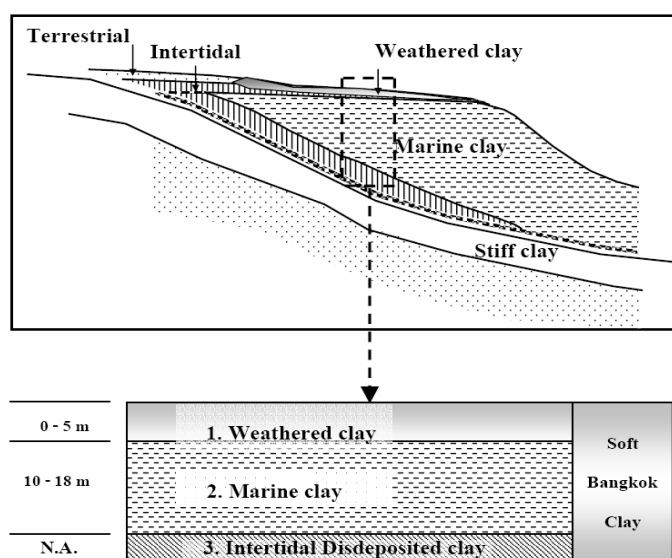
ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay) ส่วนที่อยู่เหนือน้ำจะถูกธรรมชาติทำให้แปรสภาพไปบางส่วน โดยเฉพาะส่วนที่อยู่ตอนบนของชั้นดิน จะถูกแดดเผาทำให้เกิดการตากแห้ง (desiccation) แล้วก่อตัวเป็นชั้น crust แข็ง หนาประมาณ 3 – 5 เมตร ชั้นดินส่วนบนนี้ยังถูกน้ำฝน แปรสภาพตามกระบวนการ weathering leaching และ cementation ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป จากเดิมมาก คุณสมบัติสำคัญที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากแดดและฝนคือ moisture content ลดลง กำลังสูงขึ้น liquidity index ลดลง pre-consolidation pressure สูงขึ้น compressibility ลดลง liquid limit และ plasticity index เพิ่มขึ้น เป็นต้น

ส่วนที่ 1 Crust คือ ดินเหนียวอ่อนประเภทดินตะกอนน้ำกร่อยชายฝั่ง (intertidal clay) ภายหลังถูกแดดและฝนแปรสภาพจนแห้งและแข็งปานกลาง ดินในชั้นนี้จะแข็งที่สุดที่ผิวบน กำลังของดินจะลดลงตามความลึกจนถึงค่าต่ำที่สุด ก็เป็นรอยต่อระหว่าง crust กับดิน marine clay ซึ่งอยู่ถัดไป ดังแสดงในภาพที่ 16 (สิ่งที่น่าสังเกตประการหนึ่งคือ ตรงรอยต่อระหว่างดินเหนียวทั้งสอง ส่วนนี้ มักจะมีเกลือผสมอยู่ในปริมาณที่สูง และกำลังของดินจะต่ำมากผิดปกติ) ดินจะอยู่ในสภาพ Overconsolidated และมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ตามที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

ส่วนที่ 2 marine clay คือ ดินเหนียวอ่อนที่ตกตะกอนในท้องทะเล และยังไม่ถูกแปรสภาพจากแดดฝน และน้ำใต้ดิน ดินส่วนนี้จึงยังคงสภาพที่เป็นดินอ่อนมีสถานะเป็น Normally Consolidated แต่อาจเกิด delayed compression จนมีลักษณะ Overconsolidated เล็กน้อยอย่างไรก็ตามกำลังของดินก็ยังคงต่ำ ตามเกณฑ์ของดินเหนียวอ่อน กำลังของดินส่วนนี้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกจนถึงระดับความลึกอันหนึ่ง ที่กำลังของดินเพิ่มขึ้นตามความลึกในสัดส่วนที่สูงกว่า ก็ถือว่าการสิ้นสุดของดินส่วนนี้

ส่วนที่ 3 medium clay คือ ดินเหนียวอ่อนชายฝั่งที่เกิดในช่วงน้ำทะเลยกระดับ (transgression period) จึงวางตัวอยู่ใต้ Soft marine clay เนื่องจากดินส่วนนี้เป็นดินตะกอนชายฝั่งทะเลจึงมีโอกาที่จะถูกตากแห้งได้ ดินจึงอยู่ในสภาพของ Medium clay ที่มีกำลังสูงกว่า Marine clay ที่ทับอยู่

ผลจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ส่วนบนดังกล่าวมานี้ ทำให้โครงสร้างของชั้นดินเหนียวอ่อน Bangkok clay มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน แสดงในภาพที่ 16 คือ



ภาพที่ 16 โครงสร้างชั้นดินโดยทั่วไปของ Bangkok clay

ที่มา: ดัดแปลงจาก ว.ส.ท. (2546)

คุณสมบัติที่สำคัญของดินเหนียวอ่อน

สภาพชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯและบริเวณใกล้เคียง จากผลการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินในบริเวณกรุงเทพมหานคร โดยนักวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาในอดีต พบว่าชั้นดินตั้งแต่ผิวดินจนถึงระดับความลึก -50 เมตร เป็นชั้นดินที่มีความสำคัญต่องานวิศวกรรมอย่างยิ่ง และสามารถแบ่งชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ออกตามหลักเกณฑ์ทางวิศวกรรมปฐพี โดยเรียงลำดับตามความลึกสรุปคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 สรุปคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

Layer	Reference	Particle size distribution :			Wn (%)	LL (%)	PL (%)	LI	γ_t (t/m3)	G_s
		Sand, %	Silt, %	Clay, %						
Weathered Clay	Gulachol (1970) Weathered Clay				51.2±6.9	77.5±2.1	33.9±0.5	0.4		2.71±0.1
	Brand (1971) Weathered Clay				62.9±4.2	89.6±5.1	38.6±2.4			
	Phuong (1973) Weathered Clay				50-90	80-100	30-45	0.6-1.0		2.66-2.7
	TASNEENART(1984) Weathered Clay				30-100	30-90	20-35	0.2-2.0	1.55-19	
Soft to Medium Clay	Moh et.al.(1969)(AIT) 4.5-7.5 m.	1-3	40-50	50-60	0-110	0-110	35-45	0.8-1.1		2.66-2.74
	Phuong(1973)(AIT)4.5-9.0 m.	1-4	35-65	55-90	80-120	80-120	25-65	0.6-1.0		2.66-2.72
	ศรีฤทัย(1982)(AIT)				63.5±11.5	63.5±12.8		1.172±0.584		2.66±0.035
	TSAl(1982)(AIT)				85-70	79-95	30-34	0.91-0.75		
	PARENTILLA(1983)				26.1±7.6	49.9±9.7	22.5±3.9	0.159±0.306	2.0±0.18	
	สุพัฒน์(2530) บางกอก				68.22±7.9	66.9±10.4	37.92±8.4	1.58±0.06		2.64±2.69
	อาคม (2542)				94.35	93.9	31.7	1.5		2.68±0.05
Stiff to Very Stiff Clay	ปลูต(2545) 5-15 m.				39.4-74	51.6-82.6	22.8-34.4		1.4-1.8	2.57
	Muktabhant et al.(1966)26-36 ft.				20-40	45-70	23-30		1.54-1.6	2.7-2.8
	Vongthiesree(1966)48 ft.				30	58	24		1.49	
	Hengchaovanich(1969) 36 ft.				20-30	59.5±5.9	22.6±1.6		1.61	2.74±0.02
	กวีวงศ์(2530) Stiff-Very Stiff Clay				27-30	52.58	23-26	0.1-0.2	1.9-2.0	2.65-2.71
	ปลูต (2545)15-25 m.				17.9-48.3	39.7-69.1	19.1-31.7		1.86-2.0	

ที่มา: องอาจ (2548)

ตารางที่ 4 สรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

Layer	Reference	Su (UC)	Sensitivity (UC)	Su (Vane)	Sensitivity (Vane)	SPT	e ₀	C _e	C _r	C _v
Soft to Medium Clay	ศรีบุญฤทธิ์(1982)2-14 m.	3.13±1.98	2.6±1.87	2.72±1.7	2.59±1.67		1.73±0.33	0.81±0.3	0.29±0.09	
	TSAI(1982)(AIT)						2.06±0.32	1.11±0.21	0.17±0.04	1.64±0.5
	TSAI(1982)(Nong Ngoo Hao)						2.99±0.51	1.42±0.49	0.2±0.07	9
	TSAI(1982)(Pathumwan)						1.68±0.38	0.78±0.2	0.14±0.07	1.47±0.5
	TSAI(1982)(Pom Prachul)						2.19±0.38	0.87±0.13	0.17±0.06	1.86±0.4
	PARENTILLA(1983)							0.21±0.14	0.16±0.18	4
	TASNEENART(1984) Soft Clay									2.04±1.1
	กวีวงศ์ (2530) Soft-Medium Clay	2.4-3.4		2.4-7.9			1.1-1.6	0.5-0.6	0.05-0.14	
	ปลื้ม(2545) 5-15 m.	4.48±2.6								
	Vongthiesree(1966)		1.3-1.5							
Stiff to Very Stiff Clay	Hengchaovanich(1969)	5.0-15	1.3							
	ศรีบุญฤทธิ์(1977) 14-25 m.	15.6±9.15						0.3±0.22	0.15±0.08	
	TASNEENART(1984) 1st Stiff Clay									
	TASNEENART(1984) 2nd Stiff Clay									
	กำธร(2529)	6.93±2.4				23.4±6.7				
	กวีวงศ์(2530) Stiff-Very Stiff Clay	10.0-12				23-25	0.74-0.84	0.74-0.84	0.03-0.08	
	ปลื้ม(2545)15-25 m.	12.1±8.8								

ที่มา: องอาจ (2548)

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ค่าหน่วยน้ำหนัก คือ ค่าที่ใช้แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของดิน ($\gamma = W/V$) สำหรับค่าหน่วยน้ำหนักของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้มีผู้ที่ทำการศึกษาและรวบรวมไว้เป็นจำนวนมาก และการศึกษาของ ปณฺฑ (2546) ซึ่งได้ทำการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจ ประกอบด้วยตัวอย่างจากกระบอกเปลือกบางจำนวน 1054 หลุม ที่ความลึก 0-70 เมตรและหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและความลึกดังแสดงในภาพที่ 17

สำหรับชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ เฉพาะช่วงความลึกประมาณ 0 -20 เมตรจากผิวดิน พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักแต่ละชั้นมีค่าโดยประมาณดังนี้

ชั้น Weathering Crust (0-5 m) ค่าหน่วยน้ำหนักจะมีค่า $1.45-2.10 \text{ t/m}^3$

ชั้น Marine Clay (5 -15 m) ค่าหน่วยน้ำหนักจะมีค่า $1.35-1.8 \text{ t/m}^3$

ชั้น Intertidal Deposited Clay (15-20 m) ค่าหน่วยน้ำหนักจะมีค่า $1.45-2.0 \text{ t/m}^3$

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

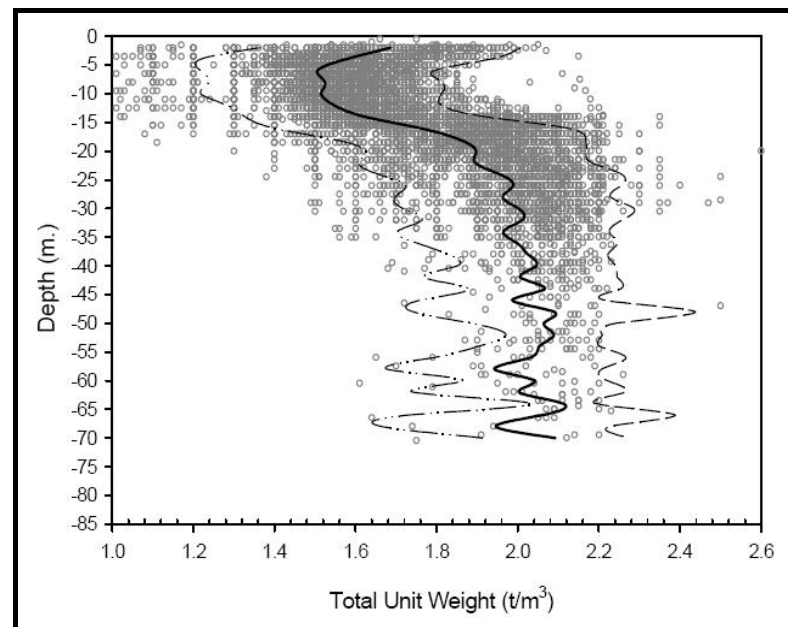
กำลังของดินเหนียวอ่อนในที่นี้คือความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของดินเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนพังโดยทั่วไปสามารถวัดได้ 2 แบบ ได้แก่ Effective strength และ total strength ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength และค่าจาก Vane Shear Test ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำ

ปณฺฑ (2546) ได้ทำการศึกษาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในเขตกรุงเทพมหานครตามความลึกพบว่าการกระจายตัวของข้อมูลที่ระดับความลึกเดียวกันค่อนข้างสูง ดังแสดงในภาพที่ 18 ซึ่งหากพิจารณาในช่วงความลึกตั้งแต่ 0- 20 เมตร (ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ) สามารถจำแนกได้ดังนี้

ชั้น Weathering Crust (0-5 m) กำลังต้านทานความเฉือนมีค่าประมาณ $2-10 \text{ t/m}^2$

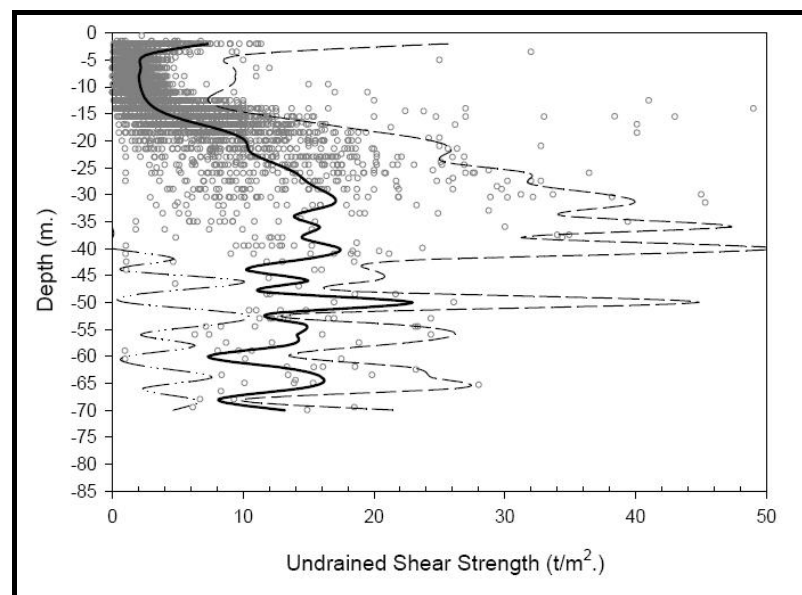
ชั้น Marine Clay (5 -15 m) กำลังต้านทานความเฉือนมีค่าประมาณ $1 -4.5 \text{ t/m}^2$

ชั้น Intertidal Deposited Clay (15-20 m) กำลังต้านทานความเฉือนมีค่าประมาณ $5-14 \text{ t/m}^2$



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักต่อความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ที่มา: ปณูฯ (2546)



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained Shear Strength ต่อความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อน
กรุงเทพฯ

ที่มา: ปณูฯ (2546)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity Index และความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ดัชนีความเหนียว (PI) คือผลต่างของ Liquid Limit และ Plastic Limit โดยจะพบว่าดินเหนียวอ่อนจะมีค่า PI สูงกว่าดินเหนียวแข็ง แสดงว่าดินที่มีค่า PI สูงจัดเป็นดินที่มีปริมาณดินเหนียวและธาตุดินเหนียวอยู่มาก จะมีการทรุดตัวสูงโดยขึ้นกับเวลา (สุรฉัตร, 2548)

นอกจากนี้ PI ยังสามารถนำไปใช้จำแนกและแบ่งลักษณะของชั้นดินได้ และยังเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในดินเหนียวอีกด้วย ซึ่ง ปณุต (2546) ได้รวบรวมเอาไว้ดังภาพที่ 19 พบว่าบริเวณชั้นดินเหนียวอ่อนนั้น มีการกระตัวค่อนข้างสูงซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

ชั้น Weathering Crust (0-5 m) ค่า Plasticity Index จะมีค่า 40 - 45

ชั้น Marine Clay (5 -15 m) ค่า Plasticity Index จะมีค่า 45 - 50

ชั้น Intertidal Deposited Clay (15-20 m) ค่า Plasticity Index จะมีค่า 30 - 40

ความสัมพันธ์ระหว่าง Standard Penetration Test (SPT) และความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

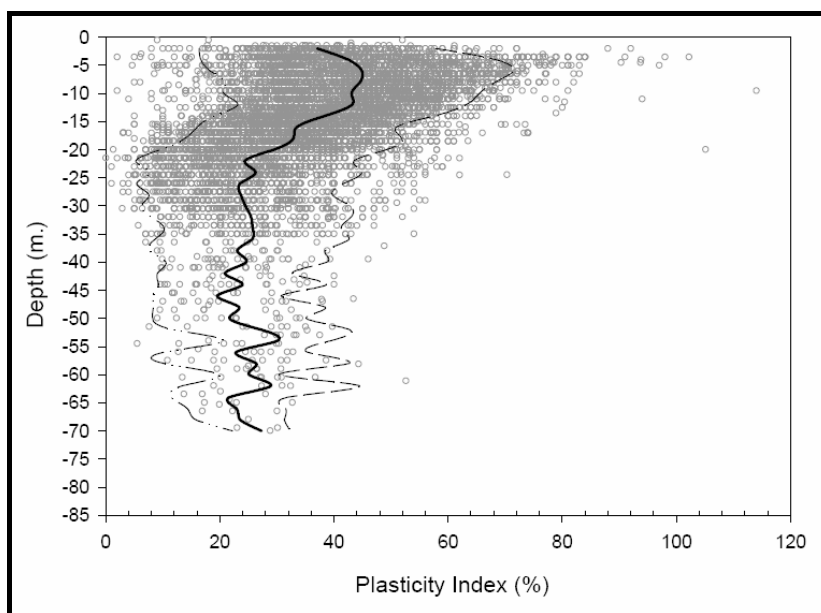
การทดสอบ SPT มีจุดประสงค์เพียงต้องการหา Relative density (D_r) ของดินร่วน (วิธีการทดสอบจาก ASTM D1586-67) (สุรฉัตร, 2548) แต่เนื่องจากการทดสอบที่ทำได้ง่าย จึงมีการนำค่า SPT มาแปลงผลเพื่อหาลำดับของชั้นดิน, จำแนกชนิดดิน และอื่นๆ อีกมากมาย โดยค่า SPT ยังนิยมนำไปใช้สำหรับการหาคุณสมบัติของดินทางด้านพลศาสตร์อีกด้วย

ปณุต (2546) ได้รวบรวมผลการทดสอบ SPT ของชั้นดินกรุงเทพฯ เอาไว้ดังภาพที่ 20 ซึ่งสามารถจำแนกตามบริเวณชั้นดินเหนียวได้ดังนี้

ชั้น Weathering Crust (0-5 m) ค่า SPT จะมีค่า 10 - 15

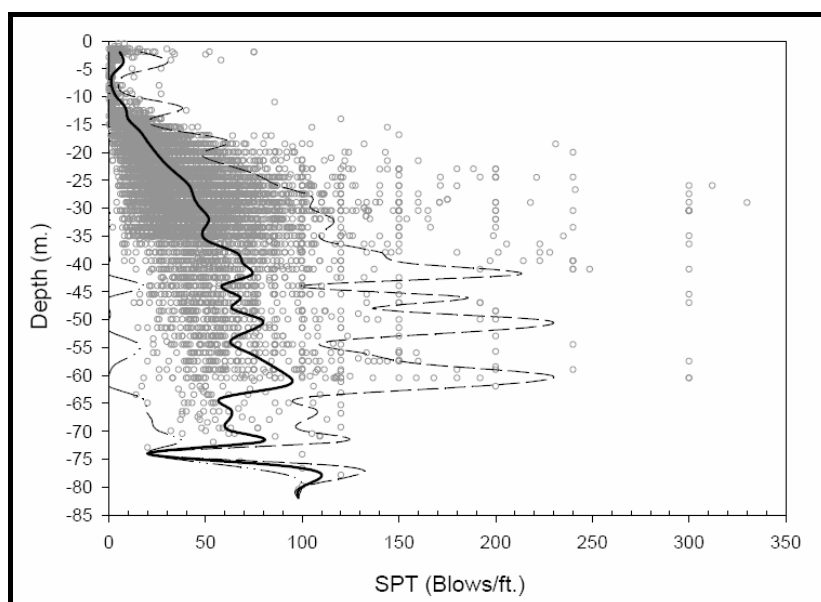
ชั้น Marine Clay (5 -15 m) ค่า SPT จะมีค่า 1 - 20

ชั้น Intertidal Deposited Clay (15-20 m) ค่า SPT จะมีค่า 20 - 30



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity Index ต่อความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ที่มา: ปณูฑ (2546)



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT ต่อความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ที่มา: ปณูฑ (2546)

คุณสมบัติของดินทางพลศาสตร์

ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์ (Dynamic soil properties) ที่จำเป็นสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ และความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถจำแนกเบื้องต้นได้ดังนี้ ค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum shear modulus, G_{max}) ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Shear wave velocity, V_s) และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือน และความหน่วงกับความเครียด (Strain dependent of Shear modulus and damping, G/G_{max} and λ with strain) โดยมีรายละเอียดดังนี้

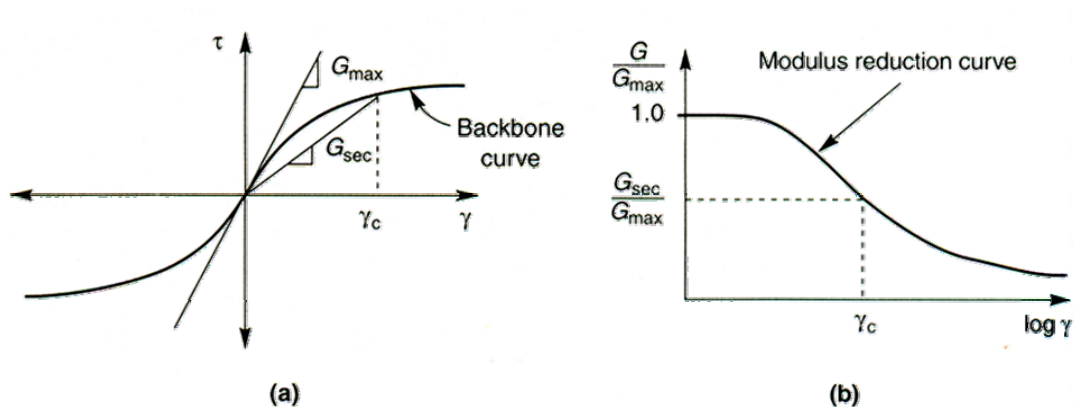
โมดูลัสเฉือน (Secant Shear Modulus, G_{sec})

ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำสามารถเกิด Undrained cyclic loads ได้จากการเกิดแผ่นดินไหว การตอกเสาเข็ม การจราจร หรือจากสาเหตุอื่นๆ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ Secant shear modulus (G_{sec}) สามารถหาได้จากการทดสอบ Cyclic Loading ดังภาพที่ 21 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวสามารถหาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum shear modulus, G_{max}) ได้อีกด้วยเมื่อพิจารณาค่าแรงเฉือนที่ความเครียดต่ำๆ (ต่ำกว่า 0.001%-strain)

โมดูลัสเฉือนสูงสุด (Maximum shear modulus, G_{max})

ค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (G_{max}) คือ ค่า G_{sec} ณ ตำแหน่งที่มีความเครียดต่ำมากๆ (ประมาณ 0.001%) ดังภาพที่ 21 ถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากสำหรับงานด้านพลศาสตร์ และการวิเคราะห์การตอบสนองของดินต่อแรงสั่นสะเทือน เช่น แรงแผ่นดินไหว ซึ่งมีความแตกต่างกันตามลักษณะกายภาพระหว่างดินทราย และดินเหนียว โดยมีปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อค่า G_{max} ประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (Tatsuoka and Shibuya, 1992)

- ความไม่สม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ (Inhomogeneity of material)
- ความสมบูรณ์ของตัวอย่างดิน (Sample disturbance)
- อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio)
- ขนาดของหน่วยแรง (Pressure level dependency)
- สภาวะของหน่วยแรง (Stress state dependency or stress induced anisotropy)



ภาพที่ 21 Backbone curve showing typical variation of $G_{\sec}$ with shear strain

ที่มา: Kramer (1996)

ทั้งนี้ผลกระทบของปัจจัยภายนอกต่างๆ ต่อค่า $G_{\max}$ ของดิน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทั่วๆ ได้ดังนี้

$$G_{\max} = A \cdot f(e) \cdot g(\sigma'_{ij}) \cdot h(OCR, PI, t) \quad (8)$$

โดยที่ $G_{\max}$ = โมดูลัสเฉือนที่ระดับความเครียดต่ำ

A = ค่าคงที่ของวัสดุ

e = อัตราส่วนช่องว่างดิน

$f(e)$ = ฟังก์ชันที่ใช้ในการอธิบายผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วนช่องว่าง

σ'_{ij} = ขนาดและสถานะของหน่วยแรง

$g(\sigma'_{ij})$ = ฟังก์ชันที่ใช้ในการอธิบายผลกระทบเนื่องจากขนาดและสถานะของหน่วยแรง

OCR = Over Consolidation Ratio

PI = Plasticity Index

t = time

$h(OCR, PI, t)$ = ฟังก์ชันที่ใช้ในการอธิบายผลกระทบเนื่อง Stress history และ อื่นๆ

สุพจน์ (2549) กล่าวว่าสำหรับรายละเอียดของแต่ละฟังก์ชันขึ้นอยู่กับชนิดของดินและวิธีการทดสอบเป็นหลัก โดยมีการนำเสนอฟังก์ชันไว้จำนวนมากเพื่อใช้ประมาณค่า G_{max} ซึ่งมีความคล้ายคลึงกัน จะแตกต่างกันเฉพาะค่าคงที่ เช่นฟังก์ชันที่ใช้สำหรับอธิบายผลกระทบของอัตราส่วนความหนาแน่นมักแสดงในรูปแบบดังนี้

$$f(e) = \frac{(k - e)^\lambda}{1 + e} \quad (9)$$

โดยที่ k และ λ เป็นค่าคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 5

ทั้งนี้ค่า $k = 2.17$ และ 2.97 เป็นค่าที่นิยมใช้กันมาก นอกจากนี้ในการศึกษาส่วนใหญ่มักจะอ้างอิงทฤษฎีด้านอีลาสติคของอนุภาคตามที่เสนอโดย Hertz

จากทฤษฎีทางอีลาสติคของอนุภาคทรงกลม ซึ่งค่า Young's Modulus ของอนุภาคเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สามของหน่วยแรงตั้งฉาก ทำให้ฟังก์ชันที่ใช้อธิบายผลกระทบของหน่วยแรงมักแสดงในรูปแบบของสมการ Exponential ดังนี้

$$g(\sigma_{ij}) = p'^n \quad (10)$$

เมื่อ p' คือ หน่วยแรงเฉลี่ย (Mean Stress) = $\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$
 n คือ ค่าคงที่ของวัสดุ

นอกจากนี้ยังมีผู้ที่ศึกษา และทำวิจัยเกี่ยวกับการหาค่า G_{max} โดยสมการ Empirical เอาไว้มากมาย สามารถแบ่งได้ตามชนิดของดินดังนี้

กรวด และ ทราย (Gravel and Sand)

Hardin and Drnevich (1972), Krizek (1974) และ Kuribuyashi et al. (1974) ได้ทำการศึกษา และแสดงความสัมพันธ์ของค่า G_{max} ของวัสดุจำพวกกรวดและทรายเอาไว้ว่า ขึ้นอยู่กับ

อิทธิพลของพารามิเตอร์หลัก 3 ชนิดคือ Confining pressure Strain amplitude และ Void ratio (หรือ Relative density)

ตารางที่ 5 ค่าคงที่และฟังก์ชันต่างๆ ที่ใช้เพื่อประมาณค่า G_{max}

	Reference	A	$f(e)$	n	Materials	Test
Sand	Hardin and Richart (1963)	7,000	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0.5	Ottawa sand	Resonant column
		3,300	$\frac{(2.97 - e)^2}{1 + e}$	0.5	Angular quartz	Resonant column
	Shibata and Soelarno (1975)	42,000	$\frac{(0.67 - e)}{1 + e}$	0.5	Clean sands	Ultrasonic test
	Iwasaki et al. (1978)	9,000	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0.38	Clean sands	Resonant column
	Kokusho (1980)	8,400	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0.5	Toyoura sand	Cyclic triaxial
	Yu and Richart (1984)		$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0.5	Clean sands	Resonant column
Clay	Hardin and Black (1968)	3,300	$\frac{(2.97 - e)^2}{1 + e}$	0.5	Kaolinite	Resonant column
	Marcuson and wahls (1972)	4,500	$\frac{(2.97 - e)^2}{1 + e}$	0.5	Kaolinite (PI=35)	Resonant column
		450	$\frac{(4.4 - e)^2}{1 + e}$	0.5	Bentonite (PI=60)	Resonant column
	Zen and Umehara (1978)	2,000-4,000	$\frac{(2.97 - e)^2}{1 + e}$	0.5	Remoiled clay	Resonant column
	Kokusho et al. (1982)	141	$\frac{(7.32 - e)^2}{1 + e}$	0.6	Undisturbed clay	Cyclic triaxial
	Shibuya and Tanaka (1996)	5,000	$e^{-1.5}$	0.5*	Undisturbed clay	Seismic cone

ตารางที่ 5 (ต่อ)

	Reference	A	f(e)	n	Materials	Test
Gravel	Prange (1981)	7,230	$\frac{(2.97 - e)^2}{1 + e}$	0.38	Ballast $D_{50} = 40 \text{ mm}$	Resonant column
	Kokusho and Esashi (1981)	13,000	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0.55	Crushed rock $D_{50} = 30 \text{ mm}$	Triaxial
		8,400	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0.60	Round gravel $D_{50} = 10 \text{ mm}$	Triaxial
	Tanaka et al. (1987)	3,080	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0.60	Gravel $D_{50} = 10 \text{ mm}$	Triaxial
	Goto et al. (1987)	1,200	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0.85	Gravel $D_{50} = 2 \text{ mm}$	Triaxial
	Nishio et al. (1985)	9,360	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0.44	Gravel $D_{50} = 10 \text{ mm}$	Triaxial

ที่มา: สุพจน์ (2549)

Hardin and Black (1968) เสนอความสัมพันธ์ของ Maximum Shear Modulus ตามอิทธิพลที่กล่าวไว้ข้างต้นดังนี้

$$G_{\max} = 3,230 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \sigma_m^{0.5} \quad (\text{angular sand}) \quad (11)$$

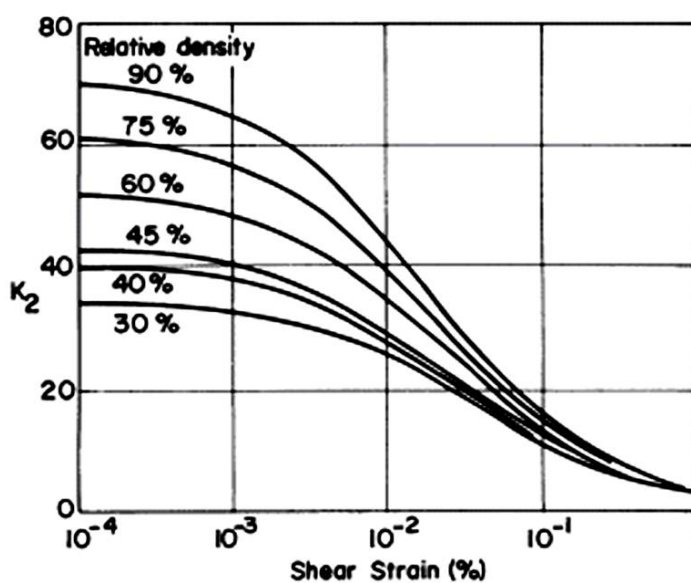
Das B.M (1992) สรุปว่าจากการสำรวจโดยรวมแล้ว การนำเสนอความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) จะแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบ โดย Seed and Idriss (1970) ได้รวบรวมผลการทดสอบและเสนอความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือน และ Confining Pressure ไว้ในรูปแบบสมการดังนี้

$$G_{\max} = 1,000(K_2)_{\max} (\sigma'_m)^{1/2} \quad (12)$$

โดยที่ ค่า $(K_2)_{\max}$ หาได้จากค่าความสัมพันธ์ของค่า Void ratio หรือ Relative Density และ

σ'_m (lb/ft²) ดังแสดงเอาไว้ในตารางที่ 6

โดยที่สมการดังกล่าวได้รวมอิทธิพลของอัตราส่วนช่องว่าง (หรือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์) และ Strain amplitude ไว้ในสัมประสิทธิ์ K_2 จากภาพที่ 22 ซึ่งได้จากการทดสอบตัวอย่าง Loose sands จำนวน 30 ตัวอย่าง และ Dense sands จำนวน 75 ตัวอย่าง ซึ่งหากพิจารณาที่ระดับความเครียดต่ำๆ (Small strain) ค่าของ $(K_2)_{\max}$ จะแสดงเอาไว้ในตารางที่ 6



ภาพที่ 22 ค่าของ K_2 สำหรับทรายที่ระดับความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างๆ

ที่มา: Seed and Idriss (1970)

ตารางที่ 6 ตารางประมาณค่า $(K_2)_{max}$ จากค่า Void ratio (e) หรือ Relative Density (D_r)

e	D_r (%)	$(K_2)_{max}$
0.9	30	34
0.8	40	40
0.7	45	43
0.6	60	52
0.5	75	59
0.4	90	70

ที่มา: Seed and Idriss (1970)

นอกจากนี้แล้ว Seed et al. (1986) ได้นำความสัมพันธ์ของค่า G_{max} กับผลจากการทดสอบในสนาม (SPT) ของ Ohta and Goto (1976) มาทำการพัฒนาให้อยู่ในสมการเดียวกัน โดยสามารถประมาณค่า $(K_2)_{max}$ ได้จากค่า $(N_1)_{60}$ ซึ่งเป็นค่าปรับแก้จากค่า SPT (N) ตามสมการที่ (13) ดังแสดงในตารางที่ 7

$$(K_2)_{max} = 20 \cdot (N_1)_{60}^{1/3} \quad (13)$$

ตารางที่ 7 ค่าของ $(K_2)_{max}$ สำหรับค่า $(N_1)_{60}$ ต่างๆ

$(N_1)_{60}$	$(K_2)_{max}$
5	34
8	40
10	43
18	52
28	61
44	71

ที่มา: Seed et al. (1986)

ดินที่มีความเหนียว (Clay and Plastic silts)

การประมาณค่า G_{max} ในดินที่มีความเหนียว นั้น นิยมใช้สมการที่มีความสัมพันธ์ของค่า Undrained shear Strength (S_u) ของดินเหนียว นำเสนอเอาไว้โดย Seed and Idriss (1970) ดังสมการ

$$G_{max} = 2,300 * S_u \quad (14)$$

นอกจากนี้ ยังมีผู้ศึกษาถึงอิทธิพลอื่นๆ โดยพิจารณาอิทธิพลของค่าดัชนีความเหนียว (PI) , Overconsolidation ratio (OCR) กับความสัมพันธ์ของค่า Undrained Strength (S_u) นำเสนอเอาไว้โดย Weiler (1988) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ และตารางที่ 8

$$G_{max} / S_u \quad \text{มีความสัมพันธ์กันดังตารางที่ 8}$$

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่า OCR และ PI ที่มีอิทธิพลต่อค่า G_{max}

Value of G_{max} / S_u	Overconsolidation ratio (OCR)		
Plasticity Index (PI)	1	2	5
15-20	1100	900	600
20-25	700	600	500
35-45	450	380	300

ที่มา: Weiler (1988)

Hardin and Black (1968) และ Hardin and Drnevich (1972) ได้ศึกษา และพัฒนาสูตรการหาค่า G_{max} โดยพิจารณาอิทธิพลของ Plasticity Index (PI) และ OCR รวมไว้กับปัจจัยอื่นๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่า G_{max} คือ

$$G_{max} = 3,230 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} OCR^k \cdot \sigma_m^{0.5} \quad (15)$$

- เมื่อ OCR = Overconsolidation ratio
 k = Overconsolidation ratio exponent (ตารางที่ 9)
 σ_m = Mean principal effective stress (kPa)

สำหรับดินเหนียวที่เป็นดินลึกษณะ Normally Consolidation ซึ่งมีค่า OCR เท่ากับ 1 จะทำให้อิทธิพลของค่า PI ไม่มีผลต่อค่า G_{max} และสำหรับ Cohesionless Soil อิทธิพลของค่าอัตราส่วนช่องว่าง และ σ_m เท่านั้นที่มีผลต่อค่า G_{max}

การประมาณค่า G_{max} จากความสัมพันธ์ของผลการทดสอบในสนาม

การทดสอบภาคสนามหลักๆ ที่ใช้สำหรับหาความสัมพันธ์กับค่า G_{max} ได้แก่ Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT) และ Dilatometer Test (DMT) เป็นต้น โดยสมการต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 10 โดยที่สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT กับค่า G_{max} เป็นสมการที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานมากที่สุด

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PI และ ค่า k

<i>Plasticity Index (PI)</i>	<i>k</i>
0	0.00
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
≥ 100	0.50

ที่มา: Hardin and Drnevich (1972)

Hardin and Black (1968) แสดงให้เห็นว่าผลของปัจจัยต่างๆ ต่อ G-value เมื่อใช้การแปลผลจากการทดสอบในสนาม โดยได้นำเสนอรูปแบบของสมการทั่วไปของ G-value ไว้ดังนี้

$$G = f(\sigma'_v, e_0, OCR, S_r, C, T, K) \quad (16)$$

เมื่อ	G = Shear Modulus	S_r = Degree of saturation
	σ'_v = Effective Overburden Pressure	C = Grain characteristics
	e_0 = Initial void ratio	K = Soil structure
	OCR = Over Consolidation Ratio	T = Temperature

งานวิจัยที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ของค่า G_{max} โดยหาสมการจากผลการทดสอบในสนาม ทำให้สามารถประมาณค่า G_{max} ได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากทดสอบในสนามโดย Shibuya and Tanaka (1996) และ Shibuya et al. (1997) ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของดินเหนียวจำนวน 7 แห่งจากทั่วโลก และนำเสนอไว้ในรูปแบบสมการ empirical ดังนี้

$$G_{max} = \alpha \cdot e_0^{-1.5} \sigma_v'^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (\text{Shibuya and Tanaka, 1996}) \quad (17)$$

$$G_{max} = \beta \cdot (1 + e_0)^{-2.4} \sigma_v'^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (\text{Shibuya et al., 1997}) \quad (18)$$

โดยที่ α และ β จะมีค่าประมาณ 5,000 และ 24,000 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสมการสำหรับดินที่อยู่ในสถานะ Normal consolidate จึงทำให้ค่า OCR ไม่ส่งผลต่อ G_{max} และสำหรับดินเหนียวในสถานะ Over-consolidated จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยเนื่องจาก OCR รวมอยู่ด้วย Shibuya et al. (1997) จึงได้นำสมการที่เสนอไว้โดย Jamolkoski et al. (1994) นำมาประยุกต์ให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปดังนี้

$$G_f = S_{vh} f(e) K_{0NC}^{0.25} (OCR)^{0.125} \sigma_v'^{0.5} \quad (19)$$

โดยที่ S_{vh} = ค่าคงที่ไว้มิติเนื่องจากผลกระทบของโครงสร้างดิน

โดย Shibuya and Tamrakar (2003) ได้ศึกษาวิจัยโดยเก็บตัวอย่าง และทดสอบจำนวน 3 แห่ง บริเวณกรุงเทพมหานคร ดังนี้ สุทธิสาร (SUT), สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) และหนองจุกเห่า (NNH) ได้สมการสำหรับประมาณค่า G_{max} ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ตามความสัมพันธ์ดังนี้

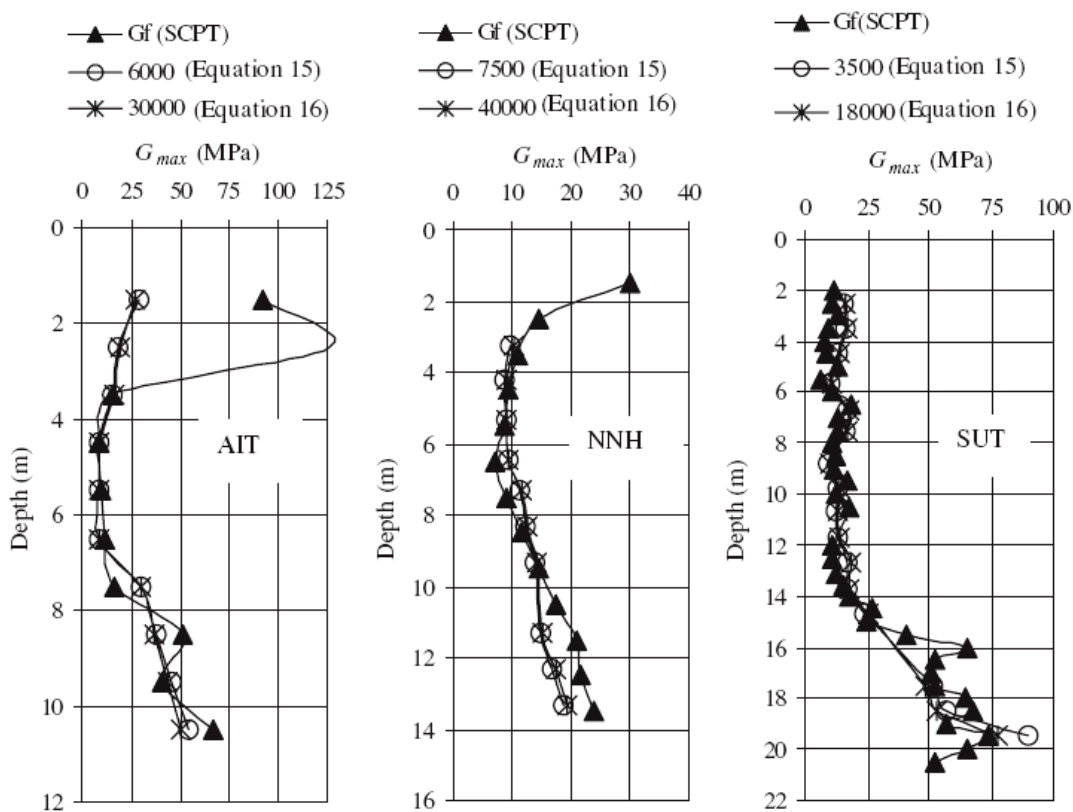
$$G_{\max} = (3,500; 6,000; 7,500) \cdot e_0^{-1.5} \cdot \sigma_v^{0.5} \cdot K_{0_{oc}}^{0.25} (OCR)^{0.125} \quad (20)$$

(SUT AIT NNH)

$$G_{\max} = (18,000; 30,000; 40,000) \cdot (1 + e_0)^{-2.4} \cdot \sigma_v^{0.5} \cdot K_{0_{oc}}^{0.25} (OCR)^{0.12} \quad (21)$$

(SUT AIT NNH)

ผลการเปรียบเทียบค่าระหว่างการประมาณค่า $G_{\max}$ จากสมการ และค่าที่ได้จากการทดสอบ
ในสนามแสดงไว้ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_f และค่าที่ได้จากสมการ

ที่มา: Shibuya and Tamrakar (2003)

ตารางที่ 10 ตารางแสดงตัวอย่างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_{max} และผลการทดสอบ
ภาคสนามด้วยวิธีต่างๆ (SPT, CPT, DMT)

การ ทดสอบ	สมการ	ประเภทดิน	อ้างอิง	หมายเหตุ
SPT	$G_{max} = 20,000(N_1)_{60}^{0.33} p^{0.5}$	Sand	Ohta and Goto (1976)	$G_{max}, p: lb / ft^2$
	$G_{max} = 325N_{60}^{0.68}$	Sand	Imai and Tonouchi (1982)	$G_{max}: kibs / ft^2$
	$G_{max} = N^{0.78}$	Sand	Imai and Yoshimura (1970)	$G_{max}: kPa,$ $N = 0.83N_{60}$
	$G_{max} = 1.22N^{0.62}$	Sand	Ohba and Toriumi (1970)	$G_{max}: kPa,$ $N = 0.83N_{60}$
	$G_{max} = 1.39N^{0.72}$	Sand	Ohta et al. (1972)	$G_{max}: kPa,$ $N = 0.83N_{60}$
	$G_{max} = 1.20N^{0.80}$	Sand	Osaki and Iwasaki (1973)	$G_{max}: kPa,$ $N = 0.83N_{60}$
CPT	$G_{max} = 1.58N^{0.67}$	Sand	Hara et al. (1974)	$G_{max}: kPa,$ $N = 0.83N_{60}$
	$G_{max} = 1,634q_c^{0.25} \sigma_v^{0.375}$	Quartz Sand	Rix and Stokoe (1991)	$G_{max}, q_c, \sigma_v: kPa$
DMT	$G_{max} = 406q_c^{0.695} e^{-1.13}$	Clay	Mayne and Rix (1993)	$G_{max}, q_c, \sigma_v: kPa$
	$G_{max} / E_d = 2.72 \pm 0.59$	Sand	Baldi et al. (1986)	Chamber test
	$G_{max} / E_d = 2.20 \pm 0.70$	Sand	Bellotti et al. (1986)	Field test
	$G_{max} = \frac{530}{(\sigma_v / p_a)^{0.25}} \frac{\gamma_D / \gamma_w - 1}{27 - \gamma_D / \gamma_w} K_0^{0.25} (p_a \sigma_v)^{0.5}$	Sand, silt, clay	Hryciw (1990)	$G_{max}, q_c, \sigma_v:$ same unit $\gamma_D = \text{unit weight}$ of soil

ที่มา: ดัดแปลงจาก Kramer (1996) และ Teachvorasinskun (2006)

G_{max} เป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ และยังมีความสัมพันธ์กับ ความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) ซึ่งเป็นอีกคุณสมบัติที่สำคัญทางด้านพลศาสตร์เช่นเดียวกัน โดยรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ความเร็วคลื่นแรงเฉือน (Shear wave velocity, V_s)

ความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) สามารถทำการทดสอบในสนามได้หลายวิธีในทดสอบ เช่น วิธีการ Crosshole and Downhole Seismic Test, Seismic Cone Penetration Test (SCPT), Spectral Analysis of Surface Waves Test (SASW) และ Multichannel Analysis of Surface Wave Method (MASWM) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีก็ให้ค่าที่แตกต่างกันตามกระบวนการ และวิธีการในการวิเคราะห์ นอกจากนั้นยังสามารถหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากความสัมพันธ์ของค่าจากการทดสอบ SPT, CPT และ DMT เป็นต้น โดยใช้สมการความสัมพันธ์ของค่า G_{max} ตามสมการที่ (22)

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{max} * g}{\gamma}} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\ \gamma &= \text{total unit weight (t/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

ข้อมูลการทดสอบวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) บริเวณกรุงเทพมหานคร ซึ่งได้ทำเอาไว้หลายวิธี โดย Shibuya et al. (1997) ได้ทำการทดสอบโดยวิธี Seismic Cone Penetration Test (SCPT) และ Ashford et al. (1997, 2000) ทำการทดสอบวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) โดยวิธี Downhole Seismic Test ซึ่งในแต่ละวิธีก็ให้ค่าที่แตกต่างกันอยู่บ้าง แต่ในภาพรวมมีความใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ประมาณ 60-100 m/s สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชั้นดินเหนียวอ่อน Mexico City และเพิ่มขึ้นจนถึงค่าประมาณ 200-250 m/s บริเวณชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก (First Stiff Clay) และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามความลึกของชั้นดิน ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันกับลักษณะค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ของชั้นดิน Mexico City โดยดูได้จากภาพที่ 24

Ashford et al. (1997, 2000) ดำเนินการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน บริเวณกรุงเทพฯ โดยวิธี Downhole Seismic Test ทั้ง 4 แห่ง คือ บริเวณ Asian Institute Technology (ความลึก 60 เมตร), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รังสิต (ความลึก 50 เมตร), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ความลึก 60 เมตร) และ ลาดกระบัง (ความลึก 15 เมตร) และใช้ค่า SPT N-values ประมาณค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน ถึงระดับความลึก 80 เมตร โดยที่ระดับความลึกมากกว่า 80 เมตร ไม่มีข้อมูลการสำรวจเพื่อใช้ ประมาณค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน จึงใช้การประมาณค่าจากอัตราการเพิ่มสูงขึ้นของ Shear-wave profile โดยที่ตั้งแต่ระดับความลึก 80 เมตร เท่ากับ 400 m/s และระดับต่ำกว่า 120 เมตร เท่ากับ 550 m/s ดังภาพที่ 25

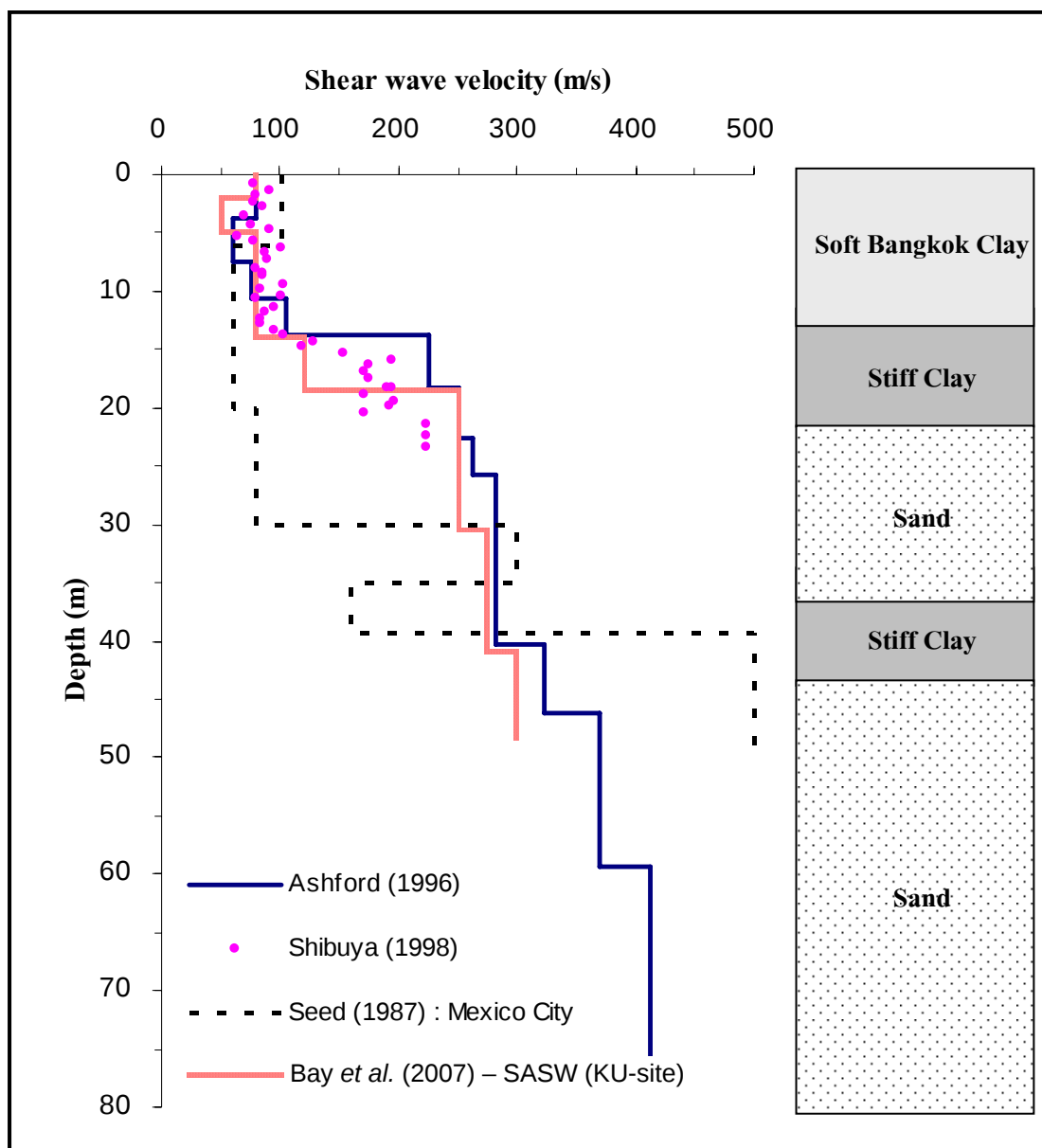
นอกจากนี้แล้ว Tulandhar et al. (2003) ยังได้รวบรวมข้อมูลการประมาณค่า ความเร็วคลื่นแรงเฉือน บริเวณรอบๆ กรุงเทพฯ ด้วยค่า SPT (N-values) และ S_u อีก 4 แห่ง (จตุจักร, นครปฐม, สมุทรสาคร และ Ban Tamru) ดังแสดงในภาพที่ 26

Shibuya S. and Tamrakar S.B. (2003) ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ รวมทั้งคุณสมบัติทางพลศาสตร์ด้วย โดยการวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน จะใช้วิธี Seismic Cone Penetration test (SCPT) ภายในกรุงเทพฯ (AIT, SUT and NNH) และเก็บตัวอย่างดิน เพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาความสัมพันธ์สำหรับประมาณค่า G_{max} ดังที่กล่าวไปแล้ว ซึ่งผลการทดสอบ SCPT ทั้ง 3 แห่ง ได้ผลตามที่แสดงในภาพที่ 26

AIT site: บริเวณ Weathered crust ค่า V_s มีค่าสูงกว่า 100 m/s, ที่ระดับ 4-8 เมตร ค่า V_s ประมาณ 60 -100 m/s และเพิ่มขึ้นระหว่างช่วง 100-260 m/s ตามระดับความลึกที่มากขึ้น

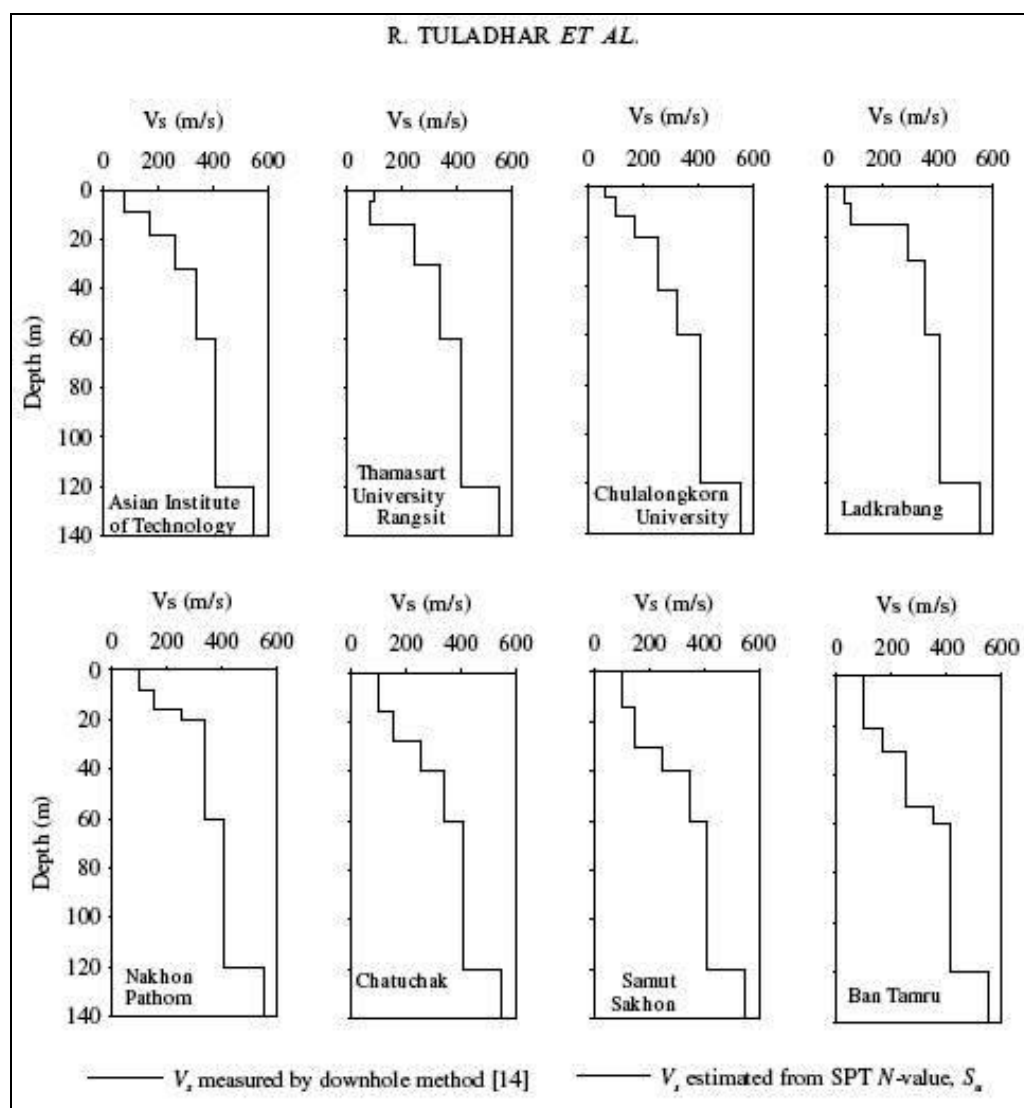
SUT site: ระดับความลึก 2-14 เมตร มีค่า V_s ประมาณ 70-100 m/s, จาก 15-23 เมตร มีค่า V_s เพิ่มขึ้นระหว่าง 120 m/s ถึง 200 m/s

NNH site: ระดับความลึก 2-14 m, ค่า V_s ประมาณ 70-125 m/s, ระดับความลึก 16-21 เมตร มีค่า V_s ระหว่าง 170-200 m/s



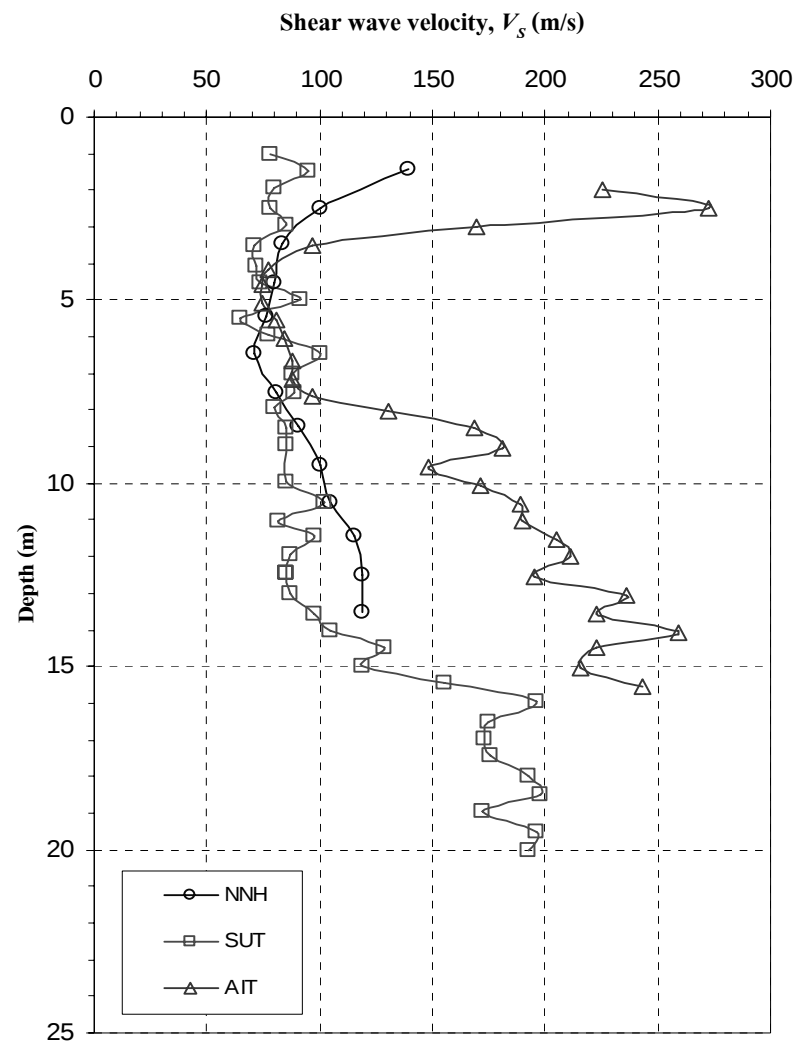
ภาพที่ 24 ลักษณะโดยทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ และค่า Shear wave velocity profile ของชั้นดิน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Warnitchai *et al.* (2001)



ภาพที่ 25 Shear wave velocity profile for eight sites in the greater Bangkok area.

ที่มา: Tulandhar *et al.* (2004)



ภาพที่ 26 Shear wave velocity profile with depth from SCPT

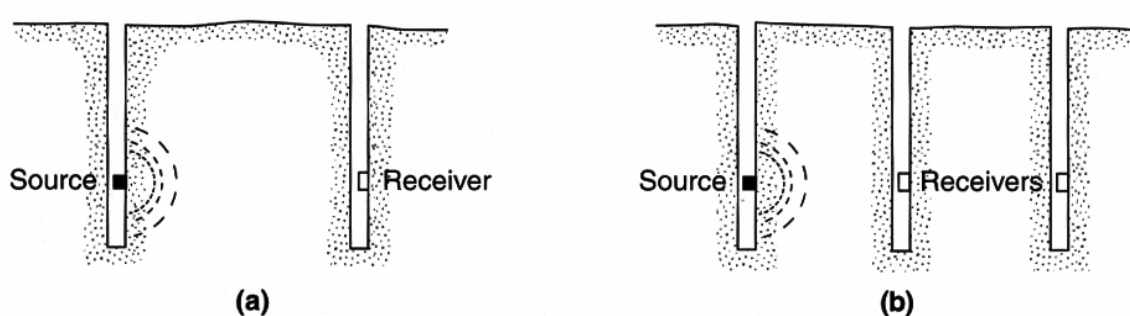
ที่มา: Shibuya and Tamrakar (2003)

การตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน

การทดสอบในสนาม

1. Seismic Cross-hole method

การทดสอบวิธีนี้จะต้องใช้หลุมเจาะสำรวจอย่างน้อย 2 หลุม สำหรับการสำรวจแต่ละครั้ง ซึ่งคลื่นจะถูกส่งผ่านในแนวราบระหว่างหลุมสำรวจ ดังภาพที่ 27 ซึ่งเป็นการลดความคลาดเคลื่อนในการส่งผ่านคลื่นหลายๆ ชั้นที่ไม่สม่ำเสมอในแนวดิ่งได้ และยังสามารถสำรวจในระดับลึกทำได้ง่ายขึ้น โดยทั่วไปมักจะใช้หลุมเจาะสำรวจจำนวน 3 หลุม เพื่อให้ตรวจวัดได้แม่นยำขึ้นโดยติดตั้งตัวรับสัญญาณไว้ในหลุมที่ 2 และ 3 โดยมีตัวกำเนิดคลื่นอยู่ในหลุมที่ 1 และอยู่ในระดับเดียวกัน



ภาพที่ 27 Seismic cross-hole test: (a) direct measurement using two-hole configuration;
(b) interval measurement using three-hole configuration

ที่มา: Kramer (1996)

2. Seismic Down-hole (Up-hole) methods

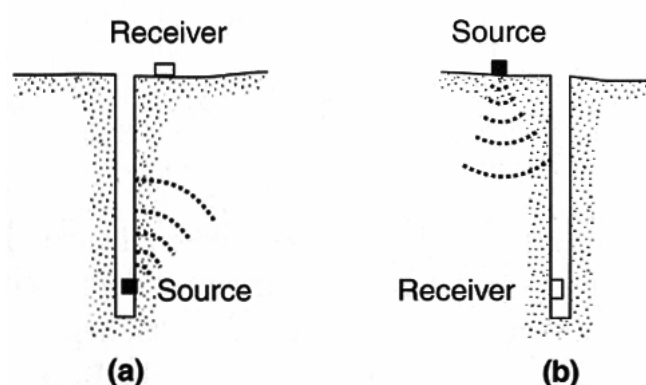
วิธีการนี้เป็นการตรวจวัดความเร็วคลื่นการสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง ตามความลึกของหลุมเจาะสำรวจในแนวดิ่ง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งสองวิธี แบบ Up-hole คือให้จุดกำเนิดคลื่นจากหลุมสำรวจ ส่งคลื่นผ่านตัวกลางมายังจุดรับสัญญาณบริเวณผิวดิน และแบบ Down-hole คือจุดกำเนิด

คลื่นอยู่บนผิวดิน และส่งคลื่นไปยังตัวรับสัญญาณที่ส่งไปในหลุมเจาะสำรวจตามระดับความลึก ดังแสดงในภาพที่ 28 ซึ่งแบบ Down-hole นิยมทดสอบมากกว่า เนื่องจากสามารถทำงานได้ง่ายกว่า และการตรวจวัดคลื่นแรงเฉือน (S-wave) ได้ดีกว่าวิธี Up-hole (Kramer, 1996)

Kramer (1996) เสนอเกี่ยวกับผลกระทบเนื่องจากวัสดุตัวกลางในการส่งผ่านคลื่นว่าการส่งผ่านคลื่นแรงเฉือน (S-wave) คลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านได้ยากขึ้นในระดับความลึกประมาณ 30 – 60 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 29 ข้อมูลการตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยวิธี Down-hole method ของชั้นดินกรุงเทพฯ ทดสอบโดย Teachavorasiskun and Lukkunaprasit (2004) พบว่าที่ระดับความลึกมากกว่า 30 เมตร ข้อมูลมีการกระจายตัวมากกว่าช่วงระดับตื้น

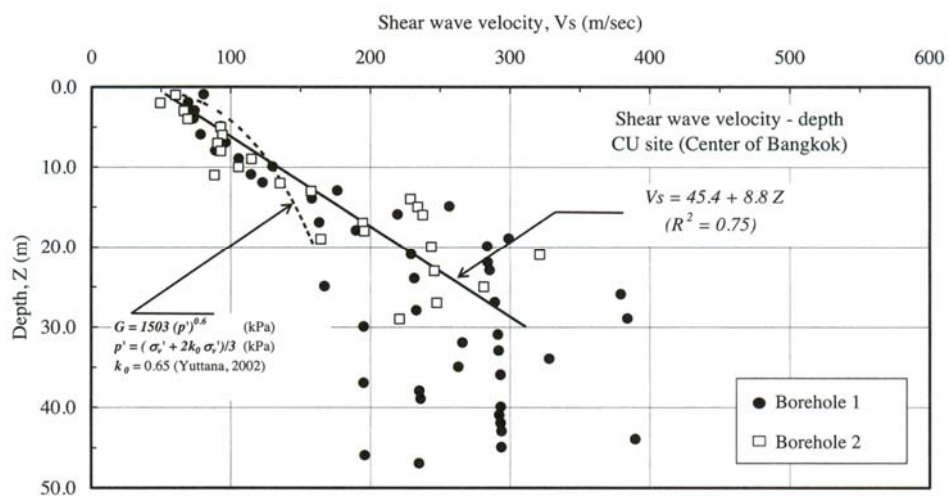
3. Seismic Cone Penetration Test

วิธีนี้จะคล้ายกับการสำรวจแบบ Down-hole โดยมีการพัฒนาโดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความแรงของอนุภาคดินไว้ที่ปลายของเครื่องมือ ทำให้สามารถทดสอบค่า Cone resistance และตรวจวัดความเร็วคลื่นของชั้นดินได้พร้อมๆ กัน โดยไม่จำเป็นต้องขุดหลุมเจาะสำรวจ ตัวอย่างผลการทดสอบด้วยวิธีซึ่งนำเสนอไว้โดย Shibuya et al. (1997) เป็นการสำรวจบริเวณชั้นดินกรุงเทพฯ ดังภาพที่ 30



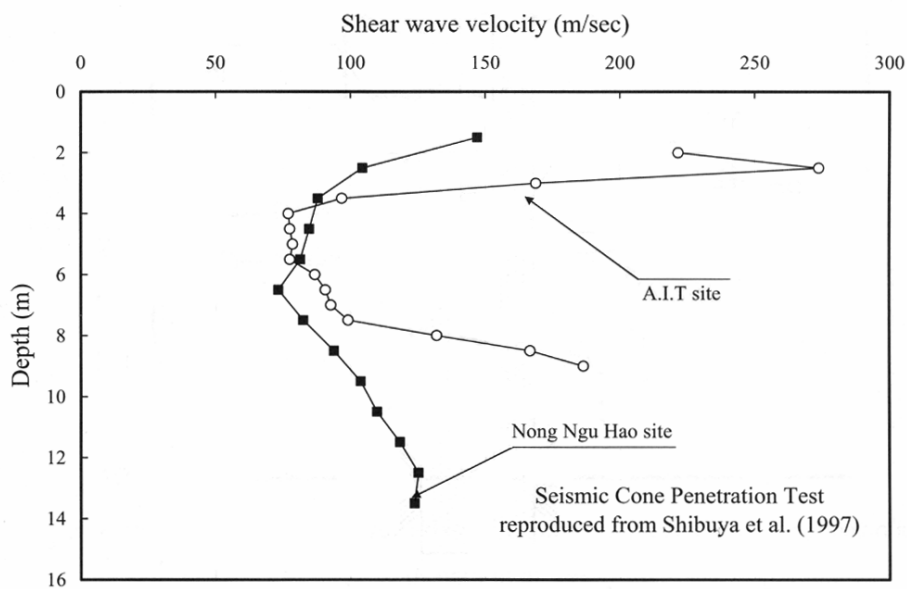
ภาพที่ 28 Seismic Down-hole (Up-hole): (a) Seismic up-hole; (b) Seismic down-hole

ที่มา: Kramer (1996)



ภาพที่ 29 ตัวอย่างการตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนในชั้นดินกรุงเทพโดยวิธี Down-hole

ที่มา: Teachavorasiskun and Lukkunaprasit (2004)

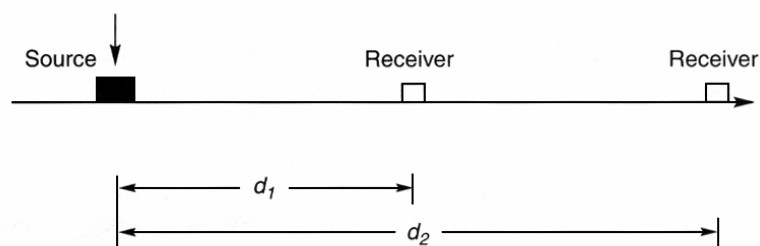


ภาพที่ 30 ตัวอย่างการตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนในชั้นดินกรุงเทพโดย Seismic Cone

ที่มา: สุพจน์ (2549)

4. Spectrum Analysis of Surface Wave test (SASW)

SASW เป็นวิธีการหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนตามความลึกของดินและหินโดยการสร้างแรงสั่นสะเทือนโดยมีความถี่แตกต่างกันจากแหล่งกำเนิดคลื่นบริเวณพื้นที่ที่ต้องการ ซึ่งจะทำได้ความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป แล้วตรวจวัดคลื่น Rayleigh ที่เดินทางในชั้นดินจากตัวรับคลื่นที่ติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งแตกต่างกันอย่างน้อย 2 ตำแหน่งบริเวณผิวดิน ดังภาพที่ 31

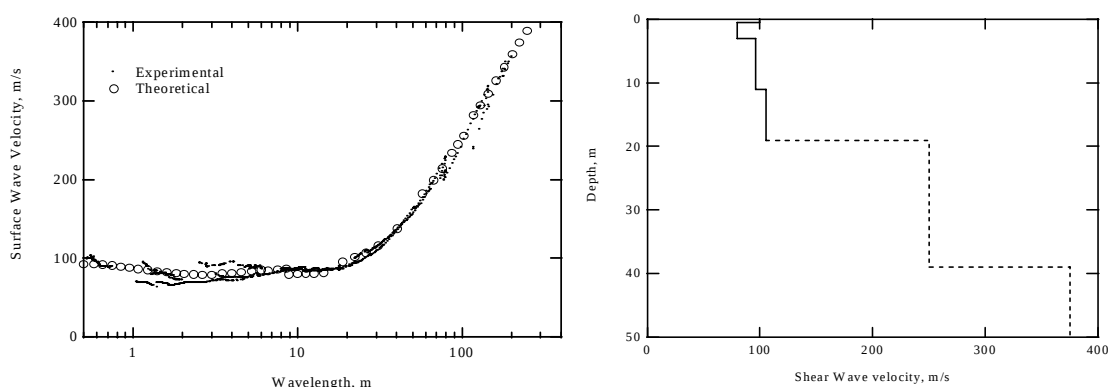


ภาพที่ 31 ลักษณะโดยทั่วไปของการทดสอบโดยวิธี SASW

ที่มา: Kramer (1996)

สุพจน์ (2549) กล่าวว่าความเร็วของ Rayleigh wave ขึ้นอยู่กับความเร็วของ P-wave (V_p) และ S-wave (V_s) ของตัวกลาง สำหรับตัวกลางที่มีความสม่ำเสมอ (Homogeneous) ความเร็วของ Rayleigh wave จะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ แต่ในตัวกลางที่แบ่งออกเป็นชั้นๆ ตามลักษณะทางธรณีวิทยาของโลกโดยทั่วไป ความเร็วของ Rayleigh wave จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และคุณลักษณะของชั้นดิน ดังนั้นถ้าสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Rayleigh wave กับ ความถี่ (หรือความยาวคลื่นของ Rayleigh wave) เรียกโดยทั่วไปว่า Dispersion curve ก็จะสามารถประมาณคุณลักษณะ (V_s) ของชั้นดินในพื้นที่ที่ทำการสำรวจได้ดังภาพที่ 32

SASW มีข้อดีกว่าการทดสอบในสนามวิธีอื่นๆ คือสามารถทดสอบได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องหลุมเจาะสำรวจ สามารถตรวจวัดชั้นดินที่มีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนต่ำได้ และอุปกรณ์ที่ใช้ก็เป็นอุปกรณ์ทั่วไป ไม่ต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางเหมือนวิธีการอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลการทดสอบนั้นค่อนข้างยุ่งยาก และต้องอาศัยประสบการณ์ทั้งการวิเคราะห์ Spectrum ของผลการตรวจวัดในสนาม และการทำ Inversion



ภาพที่ 32 Dispersion Curves and V_s Profile from Kasetsart University's Rugby Field

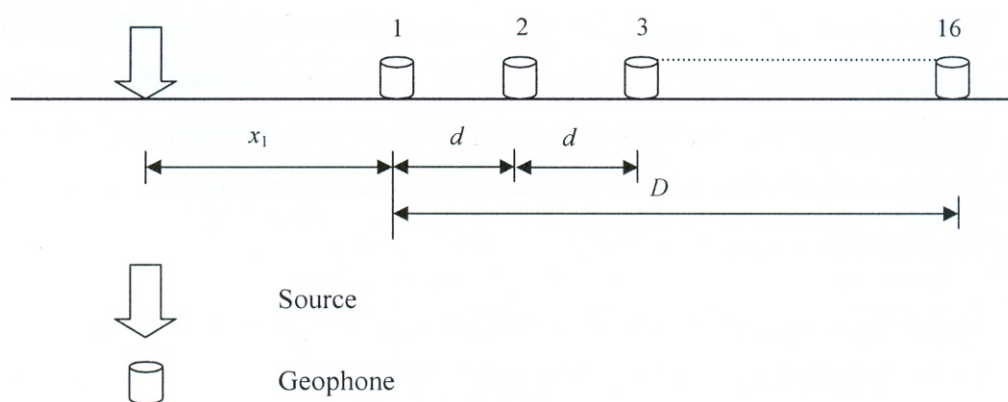
ที่มา: Bay *et al.* (2007)

5. Multichannel Analysis of Surface Wave Method (MASWM)

วิธีการนี้มีหลักการคล้ายกับวิธี SASW ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการทดสอบหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนามด้วยการใช้หลักการความแตกต่างของระยะเวลาในการส่งคลื่น และการสะท้อนกลับของคลื่น โดยใช้ตัวรับสัญญาณที่ติดตั้งไว้บนพื้นดินจับการแผ่กระจายของ Rayleigh wave หากชั้นดินมีความแตกต่างกันไม่เป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด ก็สามารถแปรผลได้จากความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน (Seng *et al.*, 2008)

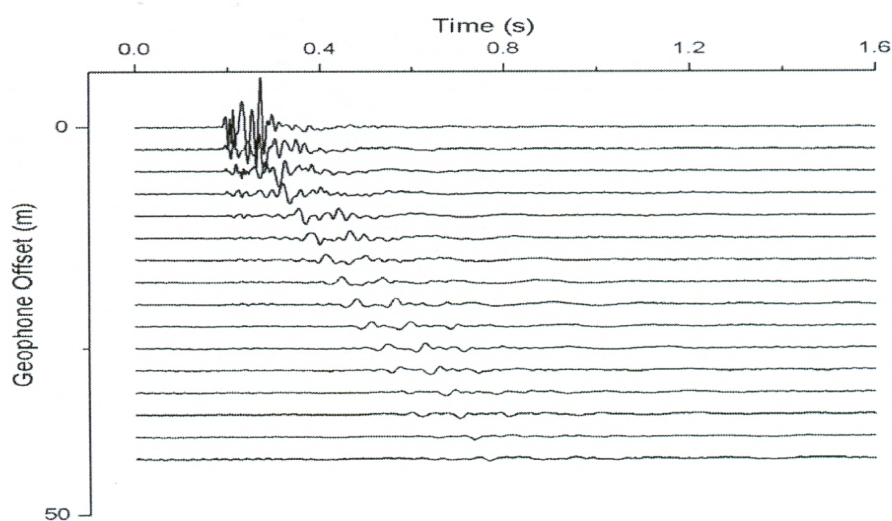
วิธีการทดสอบกระทำได้โดยติดตั้งตัววัดคลื่น เช่น Geophone ลงบนพื้นดิน โดยมีระยะห่างเท่าๆกัน ดังแสดงในภาพที่ 33 โดยที่จำนวนของ Geophone และระยะห่างจะเป็นตัวกำหนดระดับความลึกที่ต้องการทดสอบ หลังจากนั้นให้ทำการสร้างคลื่นโดยการกระแทกวัตถุลงบนพื้นดิน (อาจใช้แผ่นเหล็กช่วยในการกระจายคลื่น) โดยคลื่นที่ Geophone บันทึกได้ในแต่ละตำแหน่งนั้นจะถูกบันทึกไว้ในเครื่องมือที่เชื่อมต่อกับ Geophone ทั้งหมด ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 34 เพื่อนำค่าที่ได้มาแปรผลต่อไป

MASWM เป็นทางเลือกที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ เนื่องจากใช้เวลาน้อยในการทดสอบ รวมทั้งมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีอื่นๆ และยังเป็น การทดสอบแบบไม่ทำลายชั้นดินเช่นเดียวกับวิธี SASW



ภาพที่ 33 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบในสนามด้วยวิธี MASW

ที่มา: Seng (2008)



ภาพที่ 34 ตัวอย่างของคลื่นที่ Geophone แต่ละตัวสามารถบันทึกได้จากวิธี MASW

ที่มา: Seng (2008)

การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1. Resonant column Test

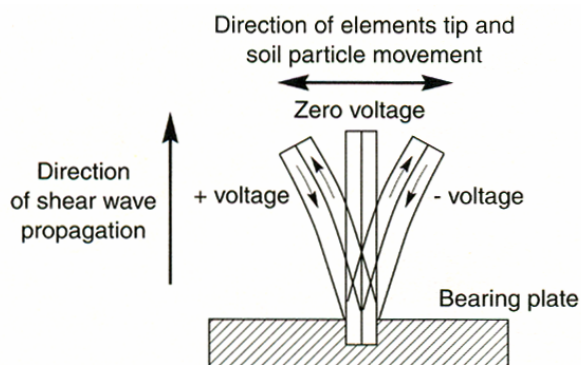
การทดสอบ Resonant column นิยมใช้หาค่าของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินที่ระดับความเครียดต่ำ โดยที่ลักษณะเครื่องมือและอุปกรณ์พื้นฐานของการทดสอบ resonant column นั้นมีรูปแบบเดียวกันกับเครื่องมือทดสอบแบบ Triaxial และ Torsional shear test ทุกประการ โดยมีข้อแตกต่างกันที่วิธีที่ใช้ทำการทดสอบ และการประเมินผล

ในการทดสอบแบบ Triaxial และ Torsional shear test นั้น คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินสามารถคำนวณได้โดยตรงจากผลการทดสอบ (Stress-Strain relationship) แต่การทดสอบแบบ Resonant column จะอาศัยการตอบสนองของแท่งตัวอย่างดินต่อแรงกระทำ ที่ความถี่ต่างๆ กัน แล้วอาศัยทฤษฎีการเคลื่อนตัวของคลื่น ร่วมกับสภาพขอบเขตของการทดสอบในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบ (สุพจน์, 2549)

2. Piezoelectric Bender Element Test

วิธีการนี้นิยมใช้กันมากในการตรวจวัดความเร็วคลื่นแรงเฉือนของตัวอย่างดินขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป Bender element เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Bender element จะมีการเปลี่ยนรูปเกิดการยืดตัวทางด้านบวก และหดตัวทางด้านลบ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Bender element แบบเป็นวัฏจักรแล้ว จะทำให้ Bender element สะบัดตัวตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านดังภาพที่ 35 ซึ่งก่อให้เกิดคลื่นแรงเฉือนเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างดิน

เมื่อทำการตรวจวัดเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Bender element ตัวแรก (จุดกำเนิดคลื่น) และเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลออกจาก Bender element ตัวที่สอง (ตัวรับสัญญาณ) ก็จะสามารรถคำนวณ หาคความเร็วคลื่นแรงเฉือนได้



ภาพที่ 35 ลักษณะการเปลี่ยนรูปของ Piezoelectric Bender Element ตามกระแสไฟฟ้า

ที่มา: Kramer (1996)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือน อัตราส่วนความหน่วงกับความเครียด (Strain dependency of Shear modulus and Damping)

Modulus reduction (G/G_{max}) curve and Damping (ξ) curve

Vucetic, M and Dobry, R. (1991) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของ PI ต่อ Modulus Reduction curve โดยแสดงเอาไว้ในการพล็อตกราฟระหว่าง G/G_{max} กับ cyclic shear strain, γ_c และกราฟระหว่าง Damping ratio, λ กับ Cyclic shear strain, γ_c ซึ่งได้แสดงเอาไว้ในภาพที่ 36 สำหรับเส้นกราฟที่ค่า $PI=0$ นั้น จะมีความสม่ำเสมอ ซึ่ง Seed *et al.* (1970, 1986) ได้นำเสนอเอาไว้สำหรับดินทรายอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated cohesionless soils) นอกจากนั้น เส้นกราฟจะใช้สำหรับดินเหนียวและดินทราย (cohesive and cohesionless soil)

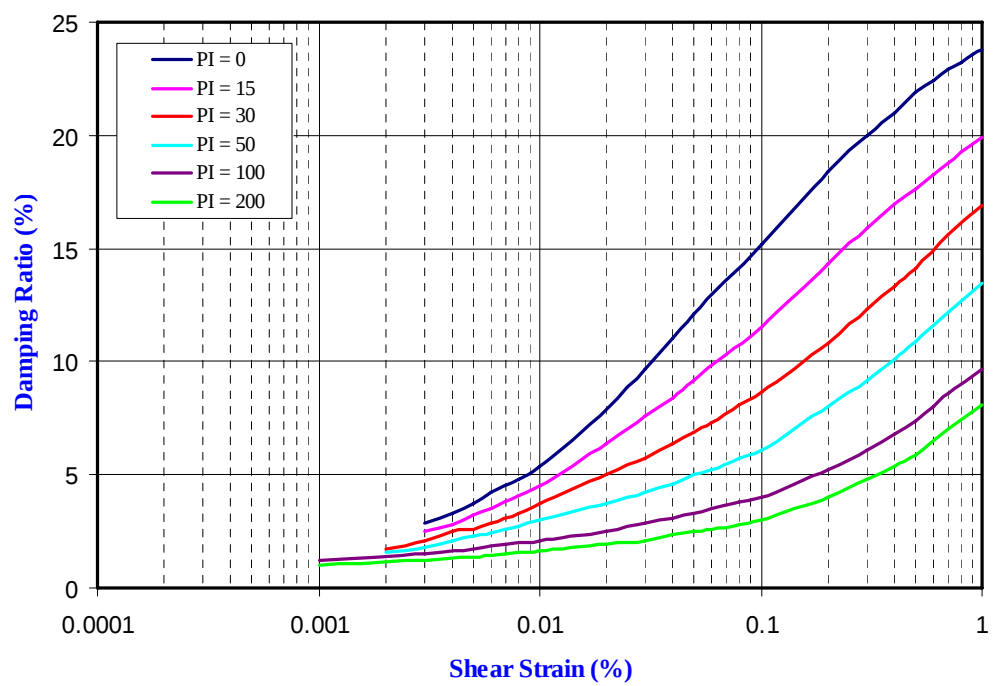
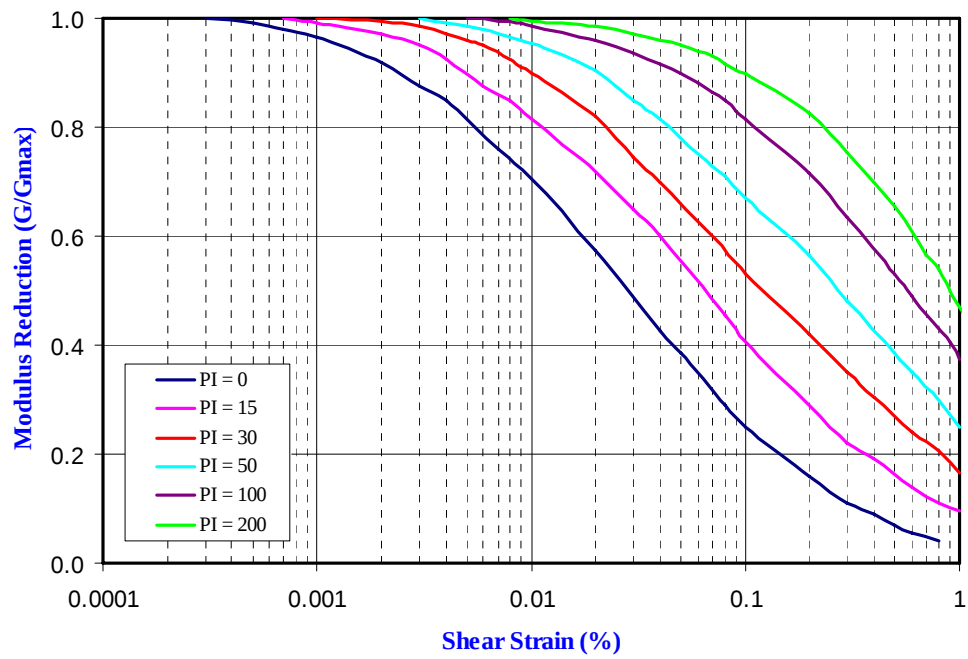
จากการทดสอบโดย Teachavorasinskun *et al.* (2002) เป็นการทดสอบแบบ Stage cyclic triaxial โดยที่การทดสอบดินเหนียวกรุงเทพฯ นี้ เมื่อสิ้นสุดการให้แรงแบบไม่ระบายน้ำในแต่ละขั้นตอนแล้ว แรงดันน้ำจะถูกระบายออกก่อนการเริ่มขั้นตอนการให้แรงในขั้นต่อไป ดังนั้นค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเริ่มต้นของแต่ละขั้นตอน (Load stage) จะมีค่าเท่ากันโดยตลอด

เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ไม่มีความละเอียดเพียงพอ จึงไม่สามารถตรวจวัดค่า โมดูลัสเฉือน ที่ระดับความเครียดต่ำกว่า 10^{-4} (0.001%) ได้ และเมื่อพิจารณากราฟ Modulus reduction curve ตามภาพที่ 37 พบว่าไม่มีผลกระทบเนื่องจากหน่วยแรงประสิทธิผล และความถี่ของการให้แรง โดยเป็นผลการทดสอบจากตัวอย่างดินจากพื้นที่ต่างๆ 3 แห่งในกรุงเทพ (CU: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย MU: มหาวิทยาลัยมหิดล KU: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) พบว่า Modulus reduction curve ทั้งหมดกระจายตัวอยู่ภายใต้กรอบแคบๆ จึงไม่สามารถจำแนกผลกระทบเนื่องจาก หน่วยแรงประสิทธิผล และความถี่ของการให้แรงได้อย่างไร และเนื่องจากการที่ไม่สามารถ ตรวจวัดค่า Shear modulus ที่ระดับความเครียดต่ำจากการทดสอบด้วยเหตุผลข้างต้น การเขียน เส้นกราฟแสดง Modulus reduction curve จำเป็นต้องใช้สมการจากเอกสารอ้างอิงเพื่อประมาณค่า โมดูลัสเฉือนที่ระดับความเครียดต่ำ ทั้งนี้สมการที่นำเสนอโดย Hardin and Black (1968) เป็น สมการที่พบว่าให้ค่าโมดูลัสเฉือน ที่ระดับความเครียดต่ำใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดค่า ความเร็วคลื่นแรงเฉือน

จากภาพที่ 37 พบว่าการกระจายตัวของผลการทดสอบอยู่ในช่วง Modulus reduction curve ของ Vucetic and Dobry (1991) ที่ทำการทดสอบไว้ที่ช่วงของค่า PI ระหว่าง 15% - 50% จึงพอสรุป ได้ว่ากราฟ Modulus reduction curve ดังกล่าวสามารถนำมาใช้สำหรับงานวิจัยของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพได้

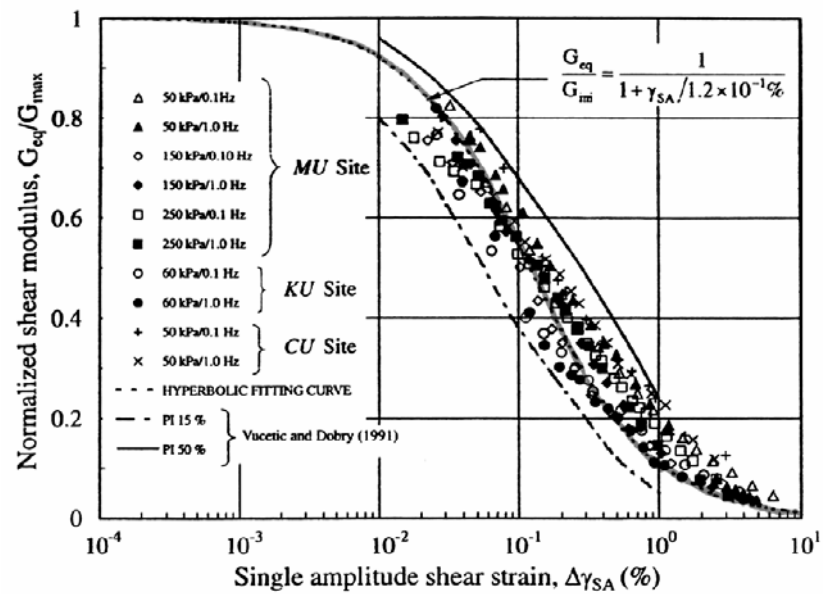
สำหรับค่า Damping ratio นั้น ขนาดของหน่วยแรงประสิทธิผลเริ่มต้นไม่ได้มีผลกระทบต่อ คุณลักษณะการเพิ่มขึ้นของ Damping ratio ตามขนาดของความเครียดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แต่เนื่องจาก Damping ratio เป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของการให้แรง เพราะฉะนั้นความถี่ของการให้แรงจึงส่งผลกระทบต่อค่า Damping ratio ค่อนข้างชัดเจน (Teachavorasinskun *et al.*, 2002) ดังแสดงในภาพที่ 38 ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการตอบสนองคลื่นแผ่นดินไหวของชั้นดินเหนียว อ่อนกรุงเทพฯ จากคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง และความถี่ที่แตกต่างกันได้

Dobry และ Vucetic (1978) ได้ทำการรวบรวมผลกระทบของปัจจัยภายนอกต่างๆ ต่อค่า G_{max} , อัตราส่วนโมดูลัสเฉือน (G/G_{max}) และค่า Damping ratio (λ) เอาไว้ดังแสดงเอาไว้ในตารางที่



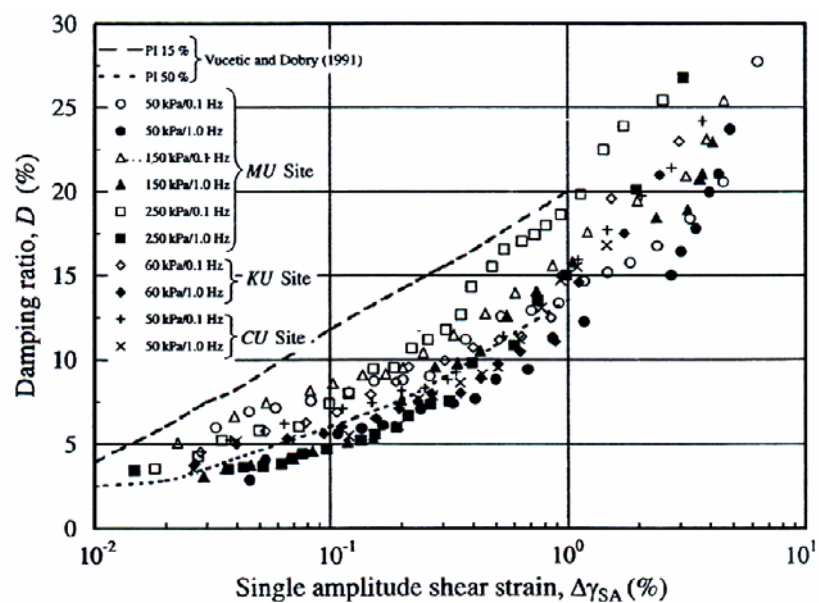
ภาพที่ 36 Shear Modulus Reduction Curve and Damping Curve different PI .

ที่มา: Vucetic *et al.* (1991)



ภาพที่ 37 Modulus Reduction Curve ของดินเหนียวกรุงเทพฯ

ที่มา: Teachavorasinskun *et al.* (2002)



ภาพที่ 37 Damping ratio ของดินเหนียวกรุงเทพฯ

ที่มา: Teachavorasinskun *et al.* (2002)

ตารางที่ 11 ผลกระทบเนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่า G_{max} , G/G_{max} และ λ

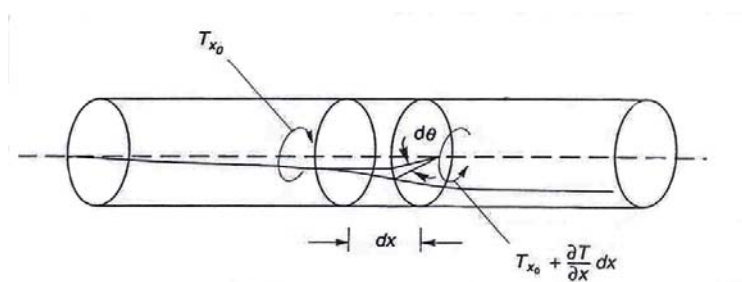
Increasing factor (1)	Gmax (2)	G/Gmax (3)	λ (4)
Confining Pressure, σ'_m	Increases with σ'_m	Stay constant or Increases with σ'_m	Stay constant or Decreases with σ'_m
Void ratio, e	Decreases with e	Increases with e	Decreases with e
Geologic age, t_g	Increases with t_g	May increases with t_g	Decreases with t_g
Cementation, c	Increases with c	May increases with c	May decreases with c
Overconsolidation, OCR	Increases with OCR	Not effected	Not effected
Plastic index, PI	Increases with PI if OCR>1; Stay about constant if OCR=1	Decreases with PI	Increases with PI
Cyclic Strain,	-	Decreases with γ_c	Increases with γ_c
Strain rate, γ^* (frequency of Cyclic loading)	Increases with γ^*	G Increases with γ^* ; G/G_{max} probably not effect if G and G_{max} are measured at the same γ^*	Increases constant or may increases with γ^*
Number of loading cycles, N	Decreases after N cycles of large γ_c but recover later with time	Decreases after N cycles of large γ_c (G_{max} measured before N cycles)	Not significant for moderate γ_c and N

ที่มา: Vucetic and Dobry (1978)

การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ

จากการศึกษาวิจัยของการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ (1-D Response analysis) ที่ผ่านมารีธีนี้เป็นที่นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหว โดยเป็นการนำทฤษฎี Continuum Mechanic มาใช้ในการวิเคราะห์การแผ่กระจายของคลื่นแผ่นดินไหวในชั้นดินในลักษณะ Semi-Infinite Horizontal Soil Layers โดยเป็นการแผ่ขยายของคลื่นในแนวดิ่ง ตามขนาดความหนาของชั้นดิน และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน

การเคลื่อนที่ของคลื่น 1 มิติในวัสดุที่ยาวเป็นอนันต์



ภาพที่ 39 นิยามของตัวแปรต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของคลื่นแรงบิดใน 1 มิติ

ที่มา: Kramer (1996)

การเคลื่อนตัวของคลื่นแรงบิดใน 1 มิติ อนุภาคของตัวกลางจะเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตลอดเวลา ดังภาพที่ 39 โดยสมการสำหรับการอธิบายการเคลื่อนตัวของคลื่นแรงบิดผ่านตัวกลางซึ่งมีความยาวเป็นอนันต์ สามารถสร้างขึ้นจากสมการสมดุลของแรงทางพลศาสตร์ ดังนี้

$$\left[T_{x_0} + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right] - T_{x_0} = \rho \cdot J dx \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (22)$$

โดยที่ J คือ Polar moment of inertia รอบแกนของวัสดุ สมการสมดุลของแรงทางพลศาสตร์สามารถลดรูปเป็นสมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \rho \cdot J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (23)$$

โดยเลือกใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมที่เหมาะสมดังนี้

$$T = G \cdot J \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (24)$$

โดยที่ G คือค่าโมดูลัสแรงเฉือนของวัสดุ เมื่อแทนค่าไปในสมการที่ (24) สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นแรงบิดใน 1 มิติ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = v_s^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (25)$$

โดยที่ $v_s = \sqrt{G/\rho}$ คือค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนของตัวกลาง โดยที่สมการของความเร็วคลื่นแรงเฉือนเป็นฟังก์ชันของค่า Stiffness และความหนาแน่นเท่านั้น โดยความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีค่า Stiffness สูงขึ้น และความหนาแน่นน้อยลง

Equivalent Linear Approximation of Nonlinear response

พฤติกรรมของดินเมื่อถูกแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclically loaded) จะเป็นลักษณะพฤติกรรม nonlinear hysteretic stress-strain ซึ่งสามารถประมาณได้โดยใช้พฤติกรรมแบบ linear equivalent ของคุณสมบัติดินเช่น โมดูลัสเฉือน (Shear modulus, G) ซึ่งโดยทั่วไปจะนำมาจาก Secant shear modulus และ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio, ξ) ซึ่งได้จากกระบวนการสูญเสียพลังงานในรอบแรก of แรงกระทำในระบบ hysteresis loop โดยการวิเคราะห์ในลักษณะ linear equivalent จำเป็นต้องมีคุณสมบัติดินจำพวก โมดูลัสเฉือน และความหน่วง ซึ่งเป็นค่าคงที่ในชั้นดินแต่ละชั้น เพื่อจะนำไปหาค่าความเครียดเฉือนที่เหมาะสมกับชั้นดินดังกล่าวเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวต่อไป

การวิเคราะห์โดยใช้พฤติกรรมแบบ linear equivalent มีขั้นตอนการคำนวณตามภาพที่ 40 ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. ประมวลค่าเริ่มต้นของโมดูลัสเฉือน (G) กับ ความหน่วง (ξ) ของชั้นดินใดๆ โดยใช้ระดับของความเครียดเดียวกัน (นิยมกำหนดที่ระดับความเครียดต่ำเป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการประมวล)
2. นำค่าโมดูลัสเฉือน (G) กับ ความหน่วง (ξ) จากการประมวลค่าเริ่มต้นมาใช้สำหรับคำนวณการตอบสนองของชั้นดินใดๆ ตามการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือนตามเวลา
3. หาค่าความเครียดเฉือนประสิทธิผล (effective shear strain, γ_{eff}) ของชั้นดินใดๆ จากค่าความเครียดสูงสุด (maximum shear strain, γ_{max}) ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือนตามเวลา สำหรับชั้นดินอื่นๆ (j) หาได้จากสมการที่ (26)

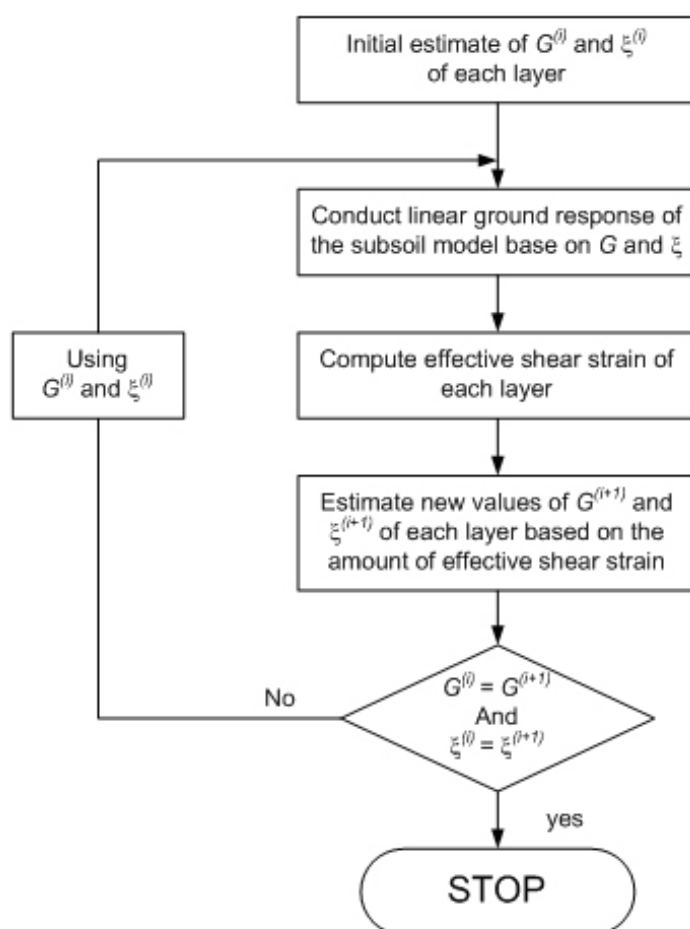
$$\gamma_{eff,j}^i = R_\gamma \gamma_{max}^i \quad (26)$$

โดยที่ i คือ จำนวนรอบในการคำนวณ (iteration number)
 R_γ คือ อัตราส่วนของความเครียดประสิทธิผลกับความเครียดสูงสุด
 โดยขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นดินไหว (earthquake magnitude)

$$R_\gamma = \frac{M-1}{10} \quad (\text{Idriss and Sun, 1992}) \quad (27)$$

4. จากความเครียดประสิทธิผล (γ_{eff}) นำไปประเมินค่า โมดูลัสเฉือน ($G^{(i+1)}$) กับ ความหน่วง ($\xi^{(i+1)}$) สำหรับการคำนวณรอบถัดไป
5. ดำเนินการขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 ใหม่จนกว่าผลต่างระหว่างค่าโมดูลัสเฉือน (G) กับ ความหน่วง (ξ) ในสองรอบการคำนวณหลังสุดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (ควรมีน้อยกว่า 5-10%)

จากขั้นตอนการวิเคราะห์ดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณการตอบสนองของชั้นดินที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในชื่อว่า “SHAKE” และได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน และได้นำมาปรับใช้กับงานวิจัยนี้เพื่อใช้ในการศึกษาการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวในพื้นที่ดินเหนียวกรุงเทพฯ



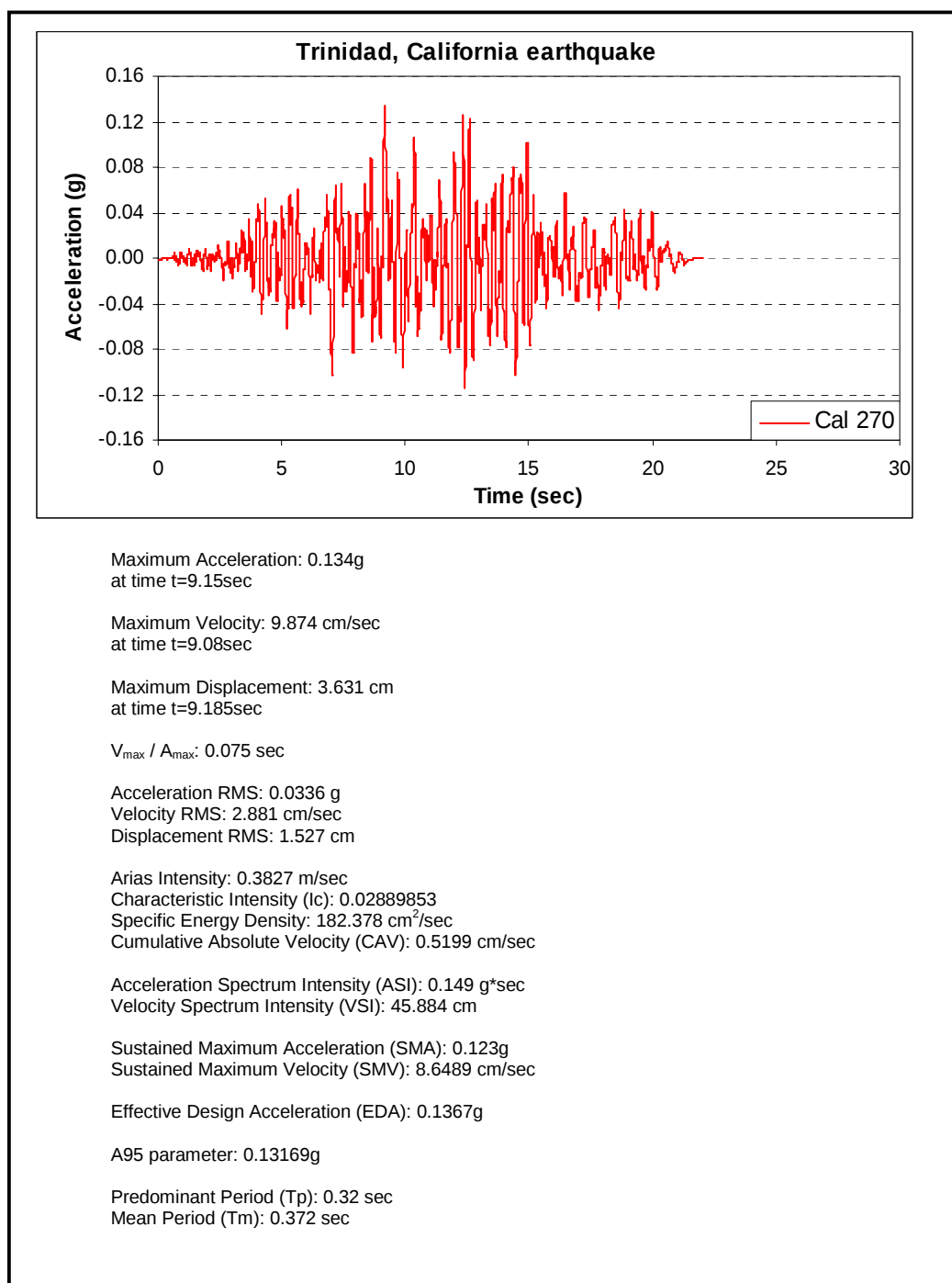
ภาพที่ 40 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธี Linear equivalent

ที่มา: สุพจน์ และ รัตนมณี (2548)

การวิเคราะห์องค์ประกอบและลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว

การศึกษาในหัวข้อนี้จะศึกษาองค์ประกอบและลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว ตามที่เสนอไว้ในหัวข้อ “ตัวแปรคลื่นแผ่นดินไหว” โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ ได้แก่ SeismoSignal software ซึ่งสามารถนำเข้าข้อมูลคลื่นความเร่งกับเวลา (คลื่นแผ่นดินไหว) ได้หลายรูปแบบและสามารถคำนวณค่าตัวแปรของแผ่นดินไหวต่างๆ ได้มากมาย นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์สเปกตรัมตอบสนองรูปแบบต่างๆ เช่น ความเร่ง ความเร็ว และการเคลื่อนตัวของคลื่นแผ่นดินไหวได้ โดยจะขอยกตัวอย่างการวิเคราะห์ดังกล่าวด้วยคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Trinidad,

California earthquake (วันที่ 8 พฤศจิกายน ค.ศ.1980) ลักษณะและตัวแปรของคลื่นแผ่นดินไหว
แสดงไว้ในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ตัวอย่างการวิเคราะห์ตัวแปรและคุณสมบัติของคลื่นแผ่นดินไหวด้วยโปรแกรม

SeismoSignal

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อแผ่นดินไหวใน 1 มิติ

ในอดีตได้มีการนำทฤษฎีการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินใน 1 มิติมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณการแผ่กระจายของคลื่นแผ่นดินไหวโดยพัฒนาเป็นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น โปรแกรม SHAKE ซึ่งพัฒนาโดย Schnabel P.B. *et al.* (1972) ต่อมาได้มีการพัฒนาเพิ่มเติมเป็นเวอร์ชัน SHAKE91 โดย Idriss and Sun (1992) และถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาถึงปัจจุบัน

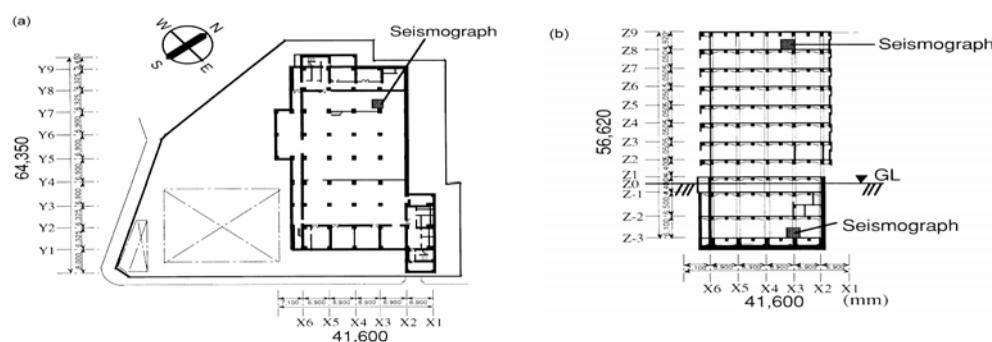
นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวอีกมาก เช่น SHAKE2000 และ PROSHAKE เป็นต้น รวมทั้งโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพี เช่น QUAKE/W ซึ่งสามารถวิเคราะห์ในระบบ 2 มิติได้ เป็นต้น โดยโปรแกรม SHAKE ได้รับความนิยมในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการแผ่กระจายของคลื่นแผ่นดินไหวใน 1 มิติ โดยมีการนำไปวิเคราะห์สำหรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งรุนแรงใน Mexico City (1985) รวมทั้งยังมีงานวิจัยอื่นๆ อีกมากมายที่นำโปรแกรม SHAKE ไปใช้เพื่อการวิเคราะห์ปัญหาและผลกระทบเนื่องจากการแผ่กระจายคลื่นแผ่นดินไหวใน 1 มิติ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Seed *et al.* (1988) ศึกษาการตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ ต่อแรงกระทำแผ่นดินไหวบริเวณ Mexico City โดยใช้เหตุการณ์แผ่นดินไหวในปี 1985 โดยกำหนดตำแหน่งทั่วแอ่งดินเหนียวของ Mexico City สำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งแต่ละแห่งก็มีคุณสมบัติของชั้นดินที่แตกต่างกันออกไป

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าลักษณะของชั้นดินที่ต่างกันจะทำให้การแผ่กระจายคลื่นแผ่นดินไหวแตกต่างกันออกไปด้วย และความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนมีผลต่อการขยายคลื่นแผ่นดินไหว รวมทั้งคาบการสั่นไหวบริเวณผิวดินด้วย นอกจากนั้นแล้วพบว่า การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SHAKE ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จริงอีกด้วย

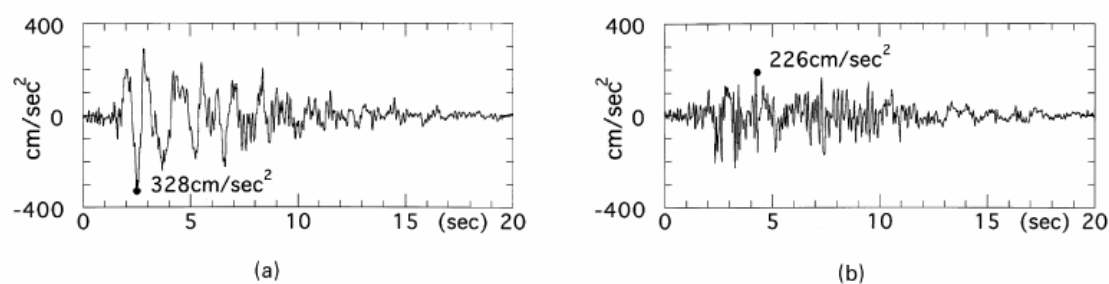
Inaba *et al.* (2000) ศึกษาและวิเคราะห์การแผ่กระจายคลื่นแผ่นดินไหวแบบ 1 มิติ ของชั้นดินในเมืองโกเบ ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้คลื่นจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว Hyogoken Nanbu Earthquake, 1995 ซึ่งได้จากการตรวจวัดด้วย Seismograph ที่ติดตั้งไว้ในตำแหน่งดังภาพที่ 42 โดยลักษณะคลื่นตามภาพที่ 43 และค่า V_s ที่ได้จากการสำรวจดังตารางที่ 12 และในภาพที่ 44 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าลักษณะชั้นดินในเมืองโกเบส่งผลต่อการขยายคลื่นแผ่นดินไหวเช่นกัน

ดังภาพที่ 45 และ 46 ถึงแม้ว่าลักษณะของชั้นดินจะเป็น Sand and Gravel และ Sandy Silt สลับกันตามชั้นดิน แต่ในช่วงผิวดินถึงระดับความลึก 15 เมตร มีลักษณะเป็นดินหลวม มีค่า V_s ในช่วง 100-200 m/s เท่านั้น



ภาพที่ 42 Plan and section view of NTT Kobe Ekimae Building and location of seismograph
(a) Site plan and 3rd basement plan; (b) Section.

ที่มา: Inaba *et al.* (2000)



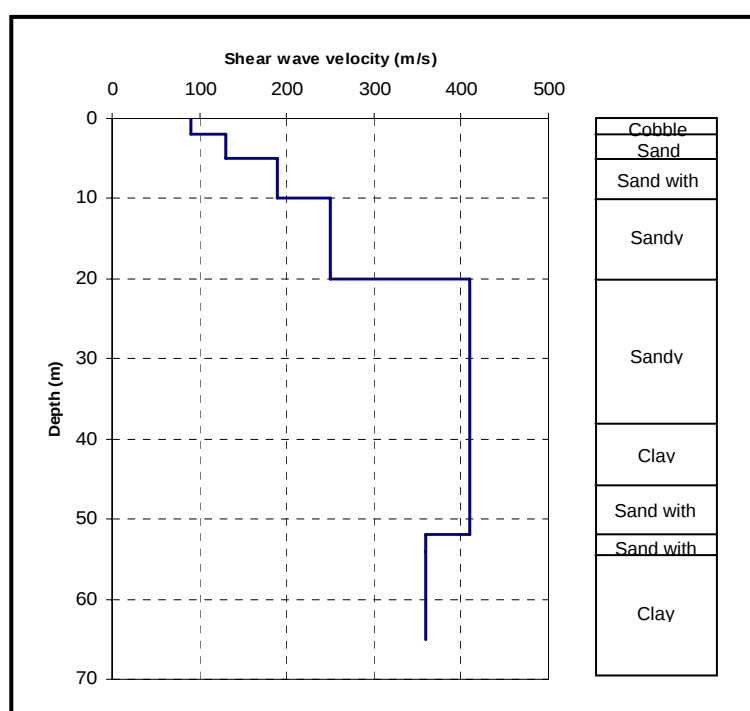
ภาพที่ 43 Acceleration time history at GL-65 m. (a) Building's length-wise side (N309E);
(b) Building's width-wise side (N219E).

ที่มา: Inaba *et al.* (2000)

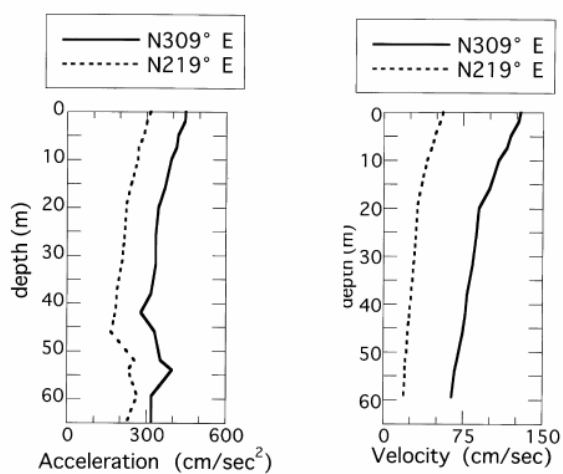
นอกจากนั้นแล้วยังพบว่า ชั้นดินที่มีค่า V_s สูงกว่า 300 m/s (ความลึกมากกว่า 20 เมตร) จะไม่ส่งผลต่อการขยายอัตราเร่งและความเร็วของคลื่นมากนัก แต่จะมีการขยายในชั้นดินที่ระดับต่ำ

กว่าผิวดิน ถึงระดับ GL-20 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่า V_s ต่ำกว่า 200 m/s ดังแสดงในภาพที่ 45 และจากคลื่นแผ่นดินไหวที่ระดับชั้นผิวดิน (GL) และ ระดับความลึก 20 เมตร (GL-20 m.) ดังภาพที่ 46

ภาพที่ 47 แสดง Acceleration Fourier Spectra ของการวิเคราะห์ รวมกันที่ระดับชั้นผิวดิน (GL) และ ระดับความลึก 20 เมตร (GL-20 m.) และรวมที่ระดับความลึก 65 เมตร (GL-65 m.) ไว้ด้วยกัน พบว่าคาบการสั่นไหวมีค่าประมาณ 0.65-1.4 วินาที สำหรับบริเวณ N219E และ 0.85-1.9 วินาที ในบริเวณ N309E ซึ่งภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า รูปแบบของการสั่นไหวของชั้นดินขึ้นอยู่กับลักษณะและความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว

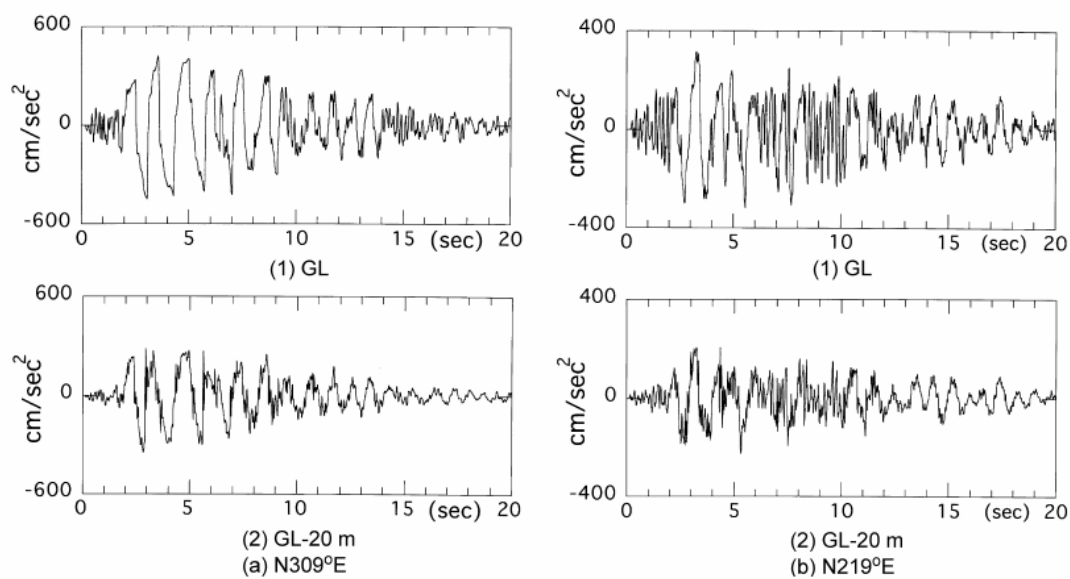


ภาพที่ 44 ลักษณะชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์ของ Inaba *et al.* (2000)



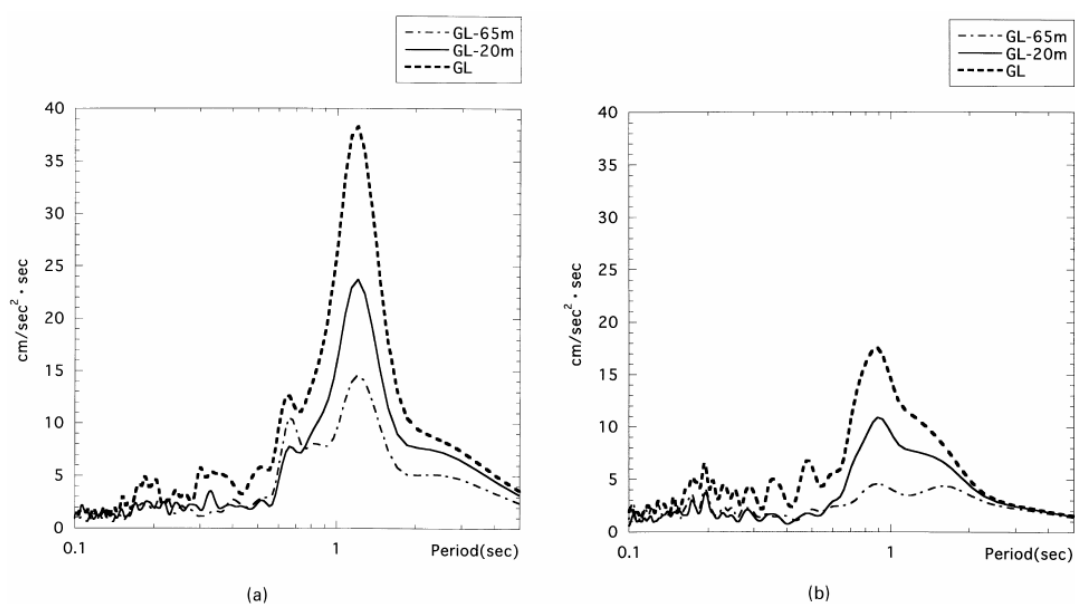
ภาพที่ 45 Distribution of Maximum acceleration and velocity.

ที่มา: Inaba *et al.* (2000)



ภาพที่ 46 Acceleration time history at GL and GL-20 m.

ที่มา: Inaba *et al.* (2000)



ภาพที่ 47 Acceleration Fourier Spectra. (a) N309E ; (b) N219E.

ที่มา: Inaba *et al.* (2000)

ตารางที่ 12 Geological data of soil sediment

Depth (m)	Soil	Density (t/m^3)	V_s (m/s)	Poisson ratio	Damping (%)
GL0-2.0	Cobble stone	1.6	90	0.475	2.0
2.0-5.0	Sand	1.8	130	0.496	2.0
5.0-10.0	Sand with gravel	1.9	190	0.492	2.0
10.0-20.0	Sandy	1.9	250	0.489	2.0
20.0-38.0	Sandy	2.0	410	0.473	2.0
38.0-46.0	Clay	2.0	410	0.473	2.0
46.0-52.0	Sand with gravel	2.0	410	0.473	2.0
52.0-54.0	Sand with gravel	1.9	360	0.474	2.0
54.0-65.0	Clay	1.9	360	0.474	2.0

ที่มา: Inaba *et al.* (2000)

Wanichai *et al.* (2001) ได้วิเคราะห์การแผ่กระจายของคลื่นแผ่นดินไหวแบบ 1 มิติ โดยใช้โปรแกรม SHAKE91 ตามลักษณะชั้นดิน ซึ่งค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) นั้นได้มาจากการประมาณจากการวัดค่าในสนามโดยวิธี Downhole Seismic จำนวน 4 แห่ง และผลจากประมาณโดยสมการจากข้อมูลเจาะสำรวจ จำนวน 9 แห่ง พบว่าค่า V_s ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯมีค่าประมาณ 60-100 m/s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชั้นดินอ่อนของ Mexico city แต่ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนใน Mexico city มีความหนากว่า 30 เมตร ซึ่งมากกว่าบริเวณกรุงเทพมหานครที่มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนประมาณ 12 เมตร และค่า V_s จะเพิ่มขึ้นถึง 200-250 m/s ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกเช่นเดียวกัน และค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามความลึกที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังสมมุติให้ชั้นเสมือนหินอยู่ที่ระดับความลึกต่ำกว่า 80 เมตร โดยมีค่า V_s ประมาณ 900 m/s และในการวิเคราะห์นี้เลือกใช้ Modulus Reduction Curve และ Damping Curve ของชั้นดินเหนียวจากความสัมพันธ์ของ Vucetic and Dobry (1991) ที่ค่าดัชนีความเหนียว (PI) เท่ากับ 50 เนื่องจากค่า PI ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าอยู่ระหว่าง 30-70 ซึ่งเท่ากับมีค่าเฉลี่ยประมาณ 50 และความสัมพันธ์ของชั้นทรายจาก Seed *et al.* (1984)

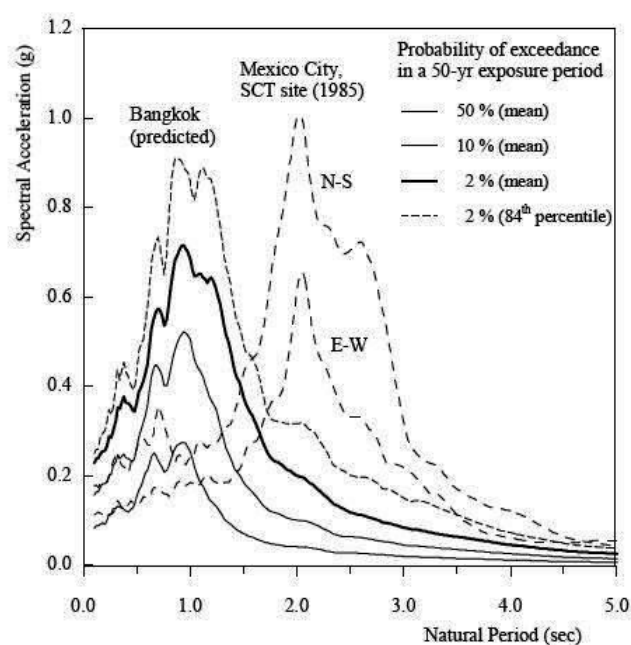
ผลการวิเคราะห์พบว่าชั้นดินบริเวณกรุงเทพมหานครมีการขยายคลื่นแผ่นดินไหวตามขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหว แต่ค่าคาบการสั่นไหวบริเวณผิวดินไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยมีการสั่นไหวบริเวณผิวดินประมาณ 0.5-1.5 วินาที ดังภาพที่ 48 ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างที่มีความสูงไม่มากนักได้

Tuladhar *et al.* (2004) ได้ศึกษา Seismic Microzonation บริเวณแอ่งดินตะกอนภาคกลาง (ภาพที่ 49) โดยวิธี Microtremor Observation แล้วนำข้อมูลจากการสำรวจมาวิเคราะห์เพื่อหาคาบเด่นของการสั่นไหวบริเวณผิวดินด้วยวิธี Horizontal to Vertical (H/V) spectral ratio analysis (Nakamura, 1989) โดยที่ตำแหน่งการสำรวจด้วยวิธี Microtremor Observation จะกำหนดให้มีระยะห่างกันประมาณ 10 กิโลเมตร โดยมีข้อมูลทั้งหมด 145 ตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 50 และภาพที่ 51

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จาก Microtremor Observation จะนำไปใช้เปรียบเทียบ และหาความสัมพันธ์กับการวิเคราะห์จากทฤษฎี Equivalent linear method (Seed and Idriss, 1970) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SHAKE91 (Idriss and Sun, 1992) โดยข้อมูลที่ใช้เป็นการวิเคราะห์

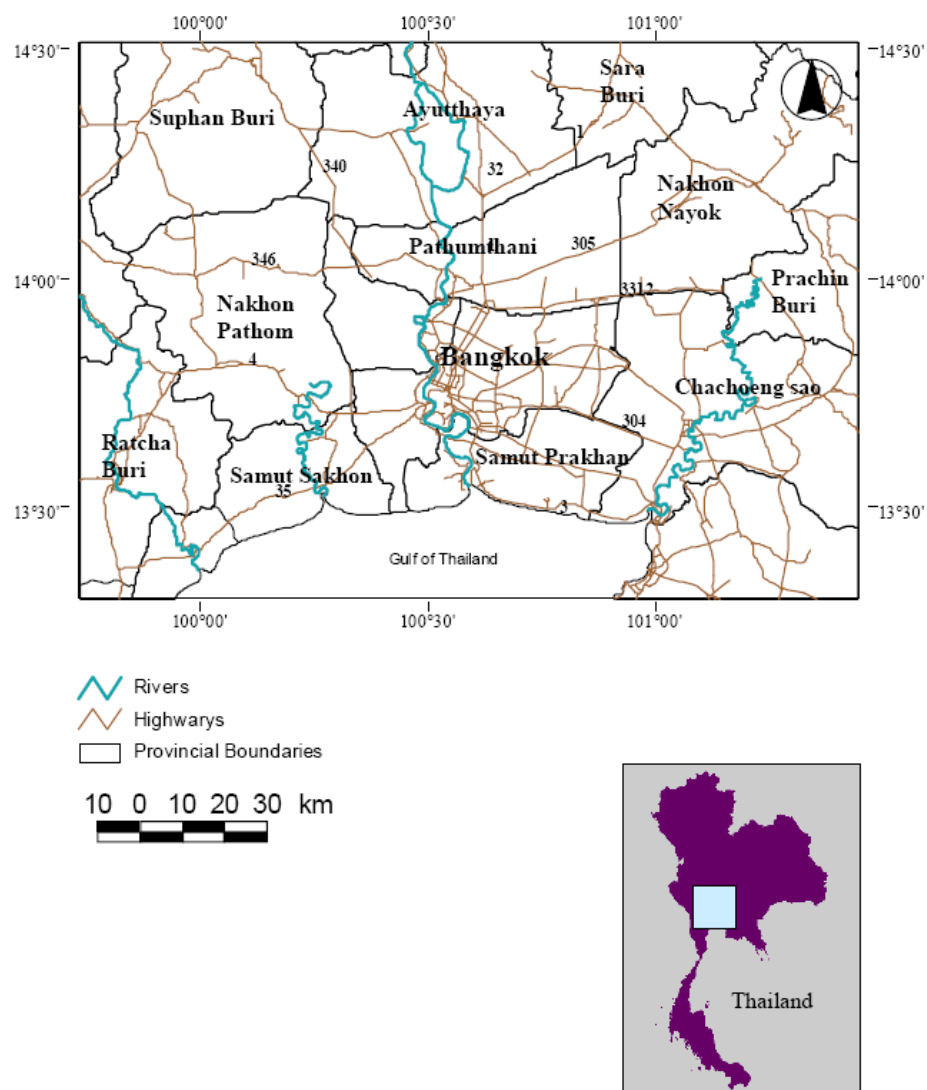
แบบ 1 มิติ ด้วยโปรแกรม SHAKE91 ประกอบด้วย ความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) หรือ โมดูลัสเฉือนสูงสุด (G_{max}) หน่วยน้ำหนักรวม และความหนาของชั้นดินแต่ละประเภท

สำหรับพื้นที่ที่ใช้วิเคราะห์นั้นประกอบไปด้วยข้อมูลการสำรวจจำนวน 9 แห่ง คือ AIT, Thammasart University, Chulalongkorn University, Ladkrabang, Nakhon Pathom, Samut Sakhon, Chaduchat Park, Ban Tamru และ Lumpini Park ตามลักษณะของชั้นดินดังแสดงในภาพที่ 52 โดยผลการวิเคราะห์การหาคาบเด่นของการสั่นไหวจากการวิเคราะห์ Microtremor และการวิเคราะห์การตอบสนองแบบ 1 มิติ แสดงในตารางที่ 13



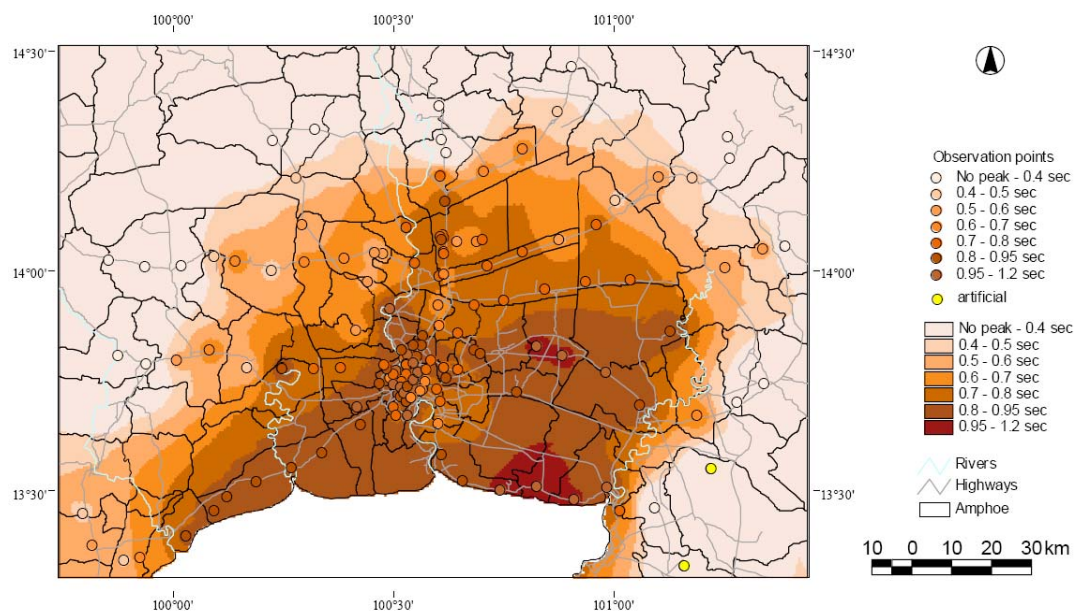
ภาพที่ 48 Elastic response spectra of predicted ground motion in Bangkok

ที่มา: Warnitchai *et al.* 2001



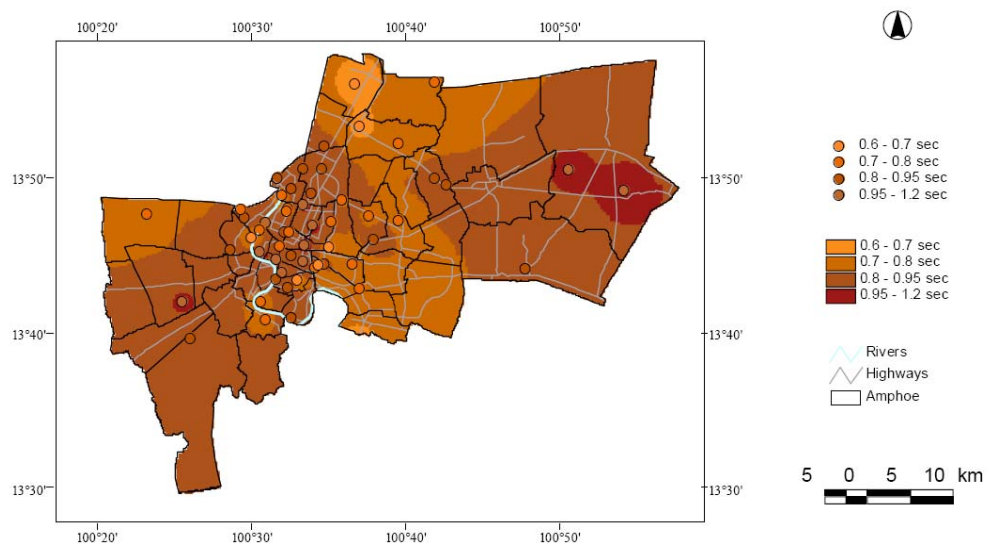
ภาพที่ 49 พื้นที่สำหรับการศึกษาวิจัย Seismic Microzonation Map

ที่มา: Tuladhar (2002)



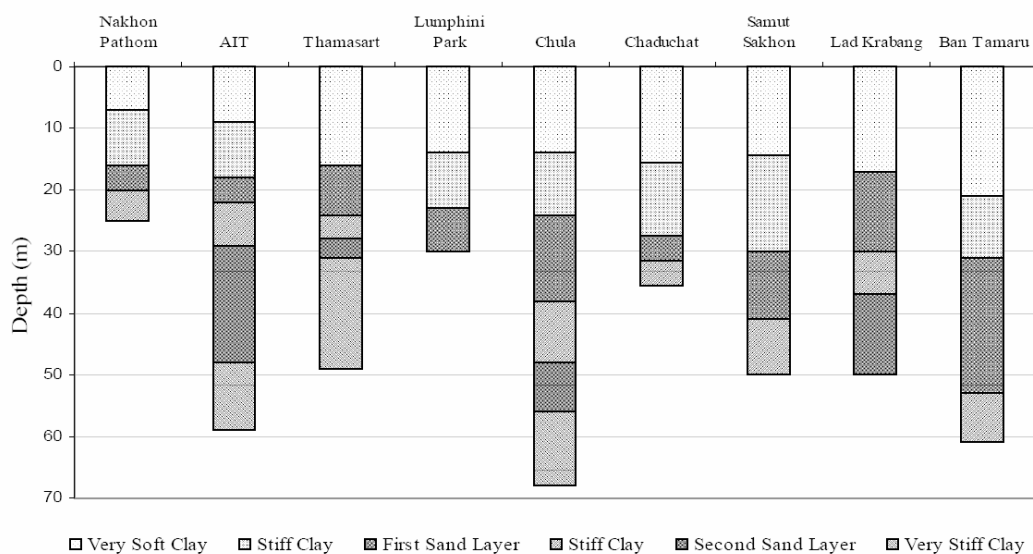
ภาพที่ 50 Variation of the Predominant Period in Greater Bangkok

ที่มา: Tuladhar (2002)



ภาพที่ 51 Variation of the Predominant Period inside Bangkok Metropolitan Area

ที่มา: Tuladhar (2002)



ภาพที่ 52 Soil Profiles at Nine Different Sites in Greater Bangkok

ที่มา: Tuladhar (2002)

จากภาพที่ 53 พบว่าค่า Predominant Period มีสูงขึ้นเมื่อชั้นดินอ่อนมีความหนาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นดินอ่อนเป็นปัจจัยสำคัญของการขยายคลื่นแผ่นดินไหว และจากตารางที่ 13 และภาพที่ 54 แสดงการเปรียบเทียบค่า Predominant Period ระหว่างทั้งสองวิธี พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดี นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ Predominant Period ด้วยโปรแกรม SHAKE91 โดยใช้ขนาดความรุนแรงที่แตกต่างกัน ก็จะส่งผลให้ค่า Predominant Period มีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นตามความรุนแรงของ PGA ดังแสดงในภาพที่ 55 และ 56

Predominant Period ของแอ่งตะกอนดินเหนียวจะมีค่าสูงประมาณ 0.9-1.2 วินาที บริเวณพื้นที่ปากอ่าวไทย เนื่องจากมีชั้นดินอ่อนที่หนามากกว่าบริเวณอื่นๆ ส่วนบริเวณกรุงเทพมหานคร จะมีค่า Predominant Period ประมาณ 0.8-1.0 วินาที โดยเฉลี่ยทั่วบริเวณ และจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ สัมพันธ์กับความหนาของชั้นดินอ่อน ซึ่งจะเหลือประมาณ 0.4 วินาที บริเวณใกล้กับจังหวัดอยุธยา

ตารางที่ 13 Predominant Periods from the Microtremor Analysis and the One Dimensional Site Response Analysis at Low strain Level

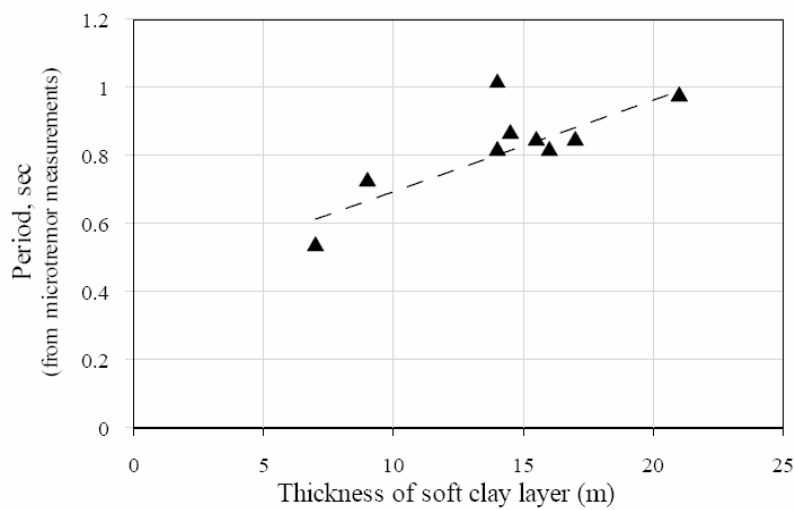
Site	Predominant Period (sec)			Microtremor Measurement
	Interpreted V_s Profile	-10% of V_s	+10% of V_s	
Asian Institute of Technology	0.61	0.67	0.55	0.73
Thammasart University	0.83	0.91	0.74	0.82
Chulalongkorn University	0.77	0.83	0.70	0.82
Ladkrabang	0.87	0.95	0.80	0.85
Nakhon Pathom *	0.50	0.55	0.44	0.54
Samut Sakhon *	0.83	0.91	0.77	0.87
Ban Tamru *	1.11	1.25	1.00	0.98
Lumphini Park *	0.77	0.83	0.70	1.02
Chaduchat Park *	0.83	0.93	0.77	0.85

* shear wave velocity profiles were estimated from the soil profiles and SPT(N) and shear strength (S_u)

ที่มา: Tuladhar (2002)

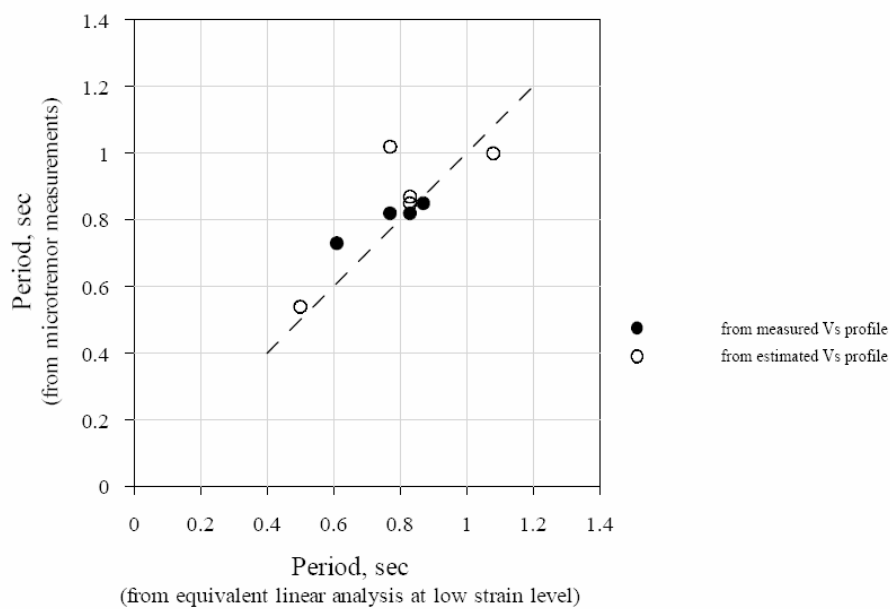
Ovando-Shelley et al. (2007) ศึกษาการตอบสนองของชั้นดินต่อแผ่นดินไหวบริเวณ Mexico City เนื่องจากการสึบนํ้าบาดาล โดยใช้เหตุการณ์แผ่นดินไหวใน Mexico City (19 Sep 1985 and June 1999) 2 เหตุการณ์ เปรียบ เทียบกันระหว่างอดีตและปัจจุบัน รวมทั้งทำนายผลที่อาจเป็นไปได้ในอนาคต เนื่องจากการสึบนํ้าบาดาล ทำให้พื้นที่ที่มีการทรุดตัว และส่งผลให้หน่วยแรงประสิทธิผลสูงขึ้น จึงส่งผลให้คุณสมบัติของดินมีการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์

โดยการทดสอบคุณสมบัติของชั้นดินในปี 2000 พบว่าแตกต่างจากที่สำรวจในอดีตเมื่อปี 1968 ทั้งคุณสมบัติทางพลศาสตร์ เช่น Compressibility, ความเร็วคลื่นแรงเฉือน และ โมดูลัสเฉือนสูงสุด ดังภาพที่ 57 และ ภาพที่ 58 ซึ่งจากการสำรวจดังกล่าวสามารถนำข้อมูลมาสร้างสมการพยากรณ์คุณสมบัติของชั้นดินในอนาคต เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อแรงแผ่นดินไหว เช่น G/G_{max} curve และ Damping curve ในภาพที่ 59



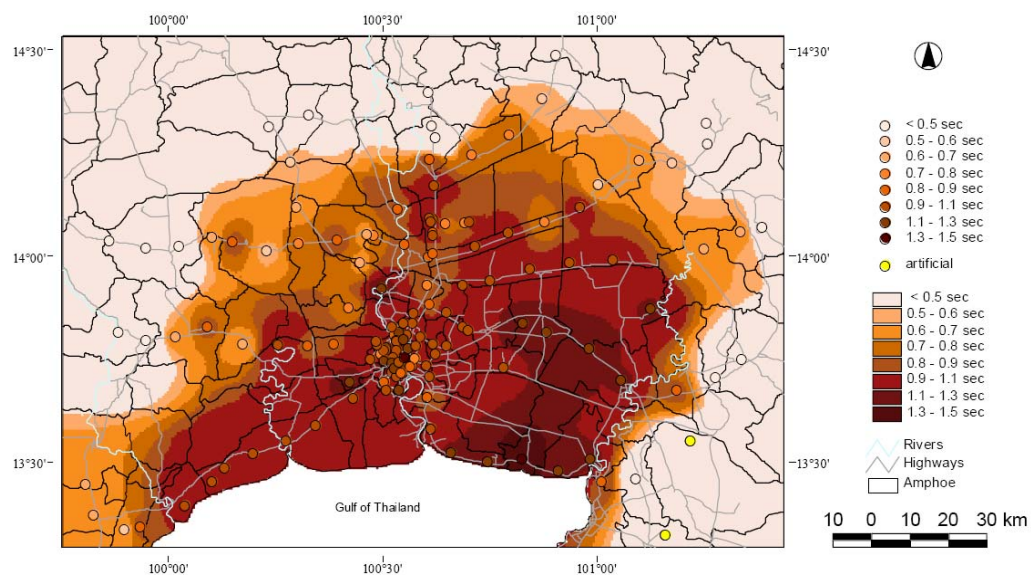
ภาพที่ 53 Variation of Predominant Period with the Thickness of Soft Clay Layer

ที่มา: Tuladhar (2002)



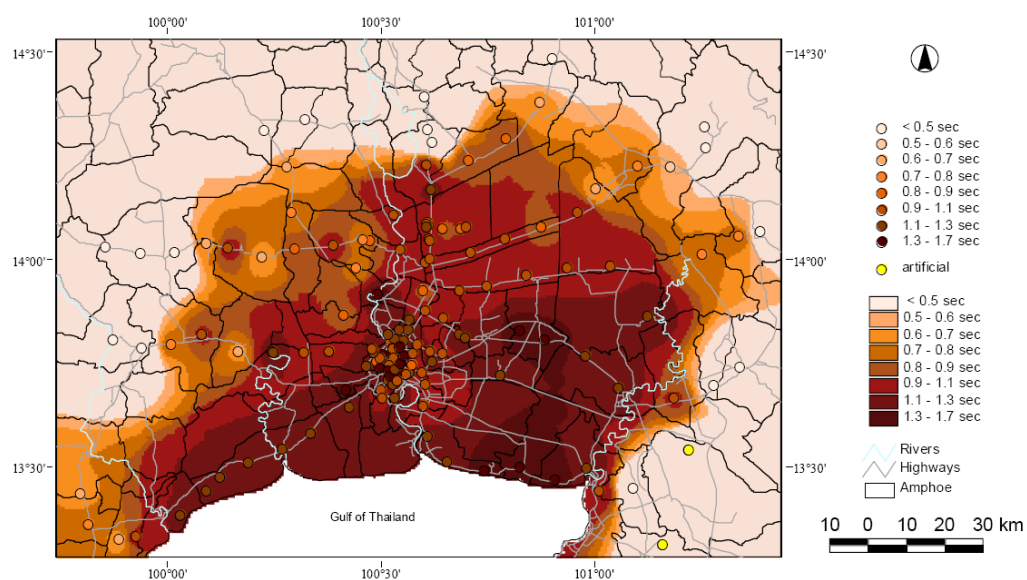
ภาพที่ 54 Comparison between the Predominant Period Obtained from the Microtremor analysis and SHAKE91

ที่มา: Tuladhar (2002)



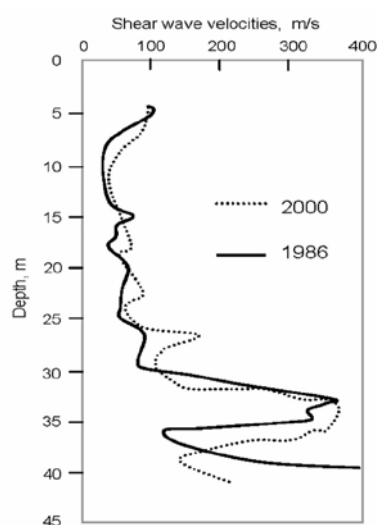
ภาพที่ 55 Variation of the Predominant Period in Greater Bangkok at PGA of 0.14g

ที่มา: Tuladhar (2002)

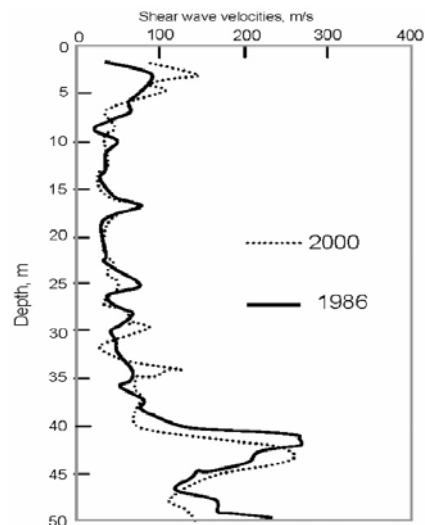


ภาพที่ 56 Variation of the Predominant Period in Greater Bangkok at PGA of 0.22g

ที่มา: Tuladhar (2002)



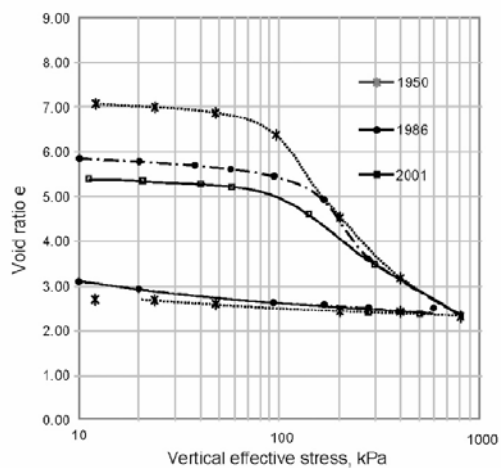
(a) SCT site.



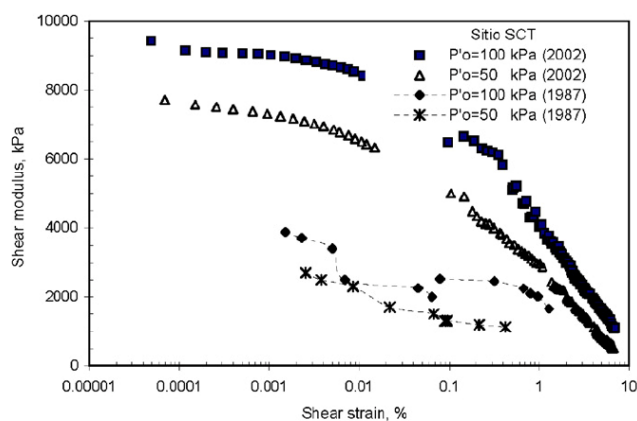
(b) CAO site

ภาพที่ 57 Changes in shear wave velocity, suspension logging tests performed in 1986 and 2000.

ที่มา: Ovando-Shelley *et al.* (2007)



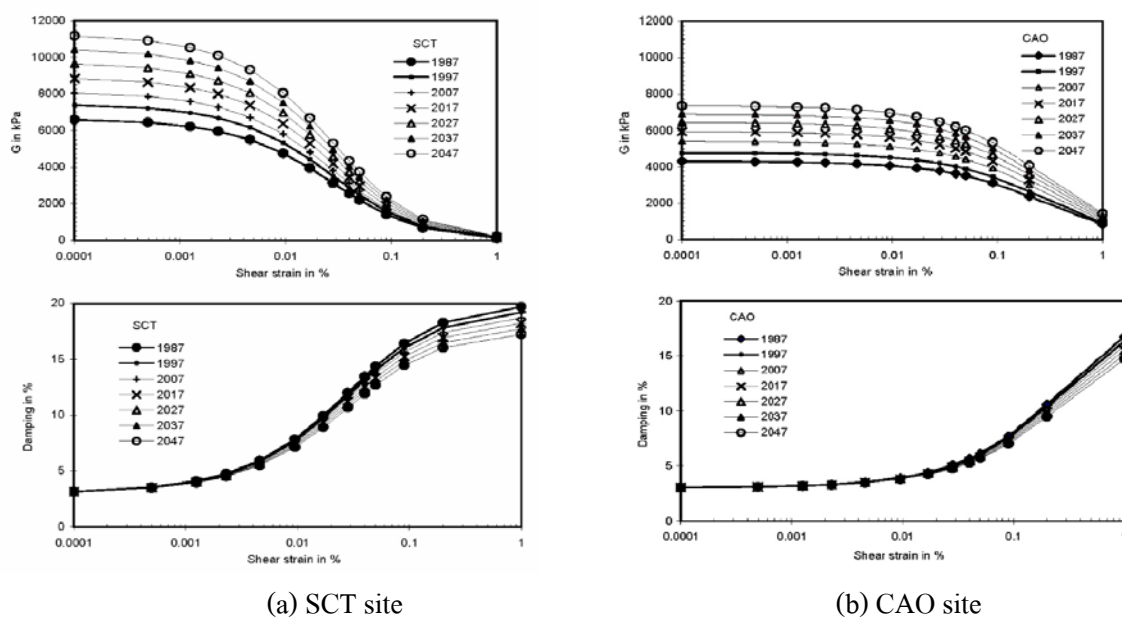
(a) Compressibility curves.



(b) Results of resonant column and cyclic triaxial

ภาพที่ 58 Changes in Compressibility and Shear modulus (Mexico City)

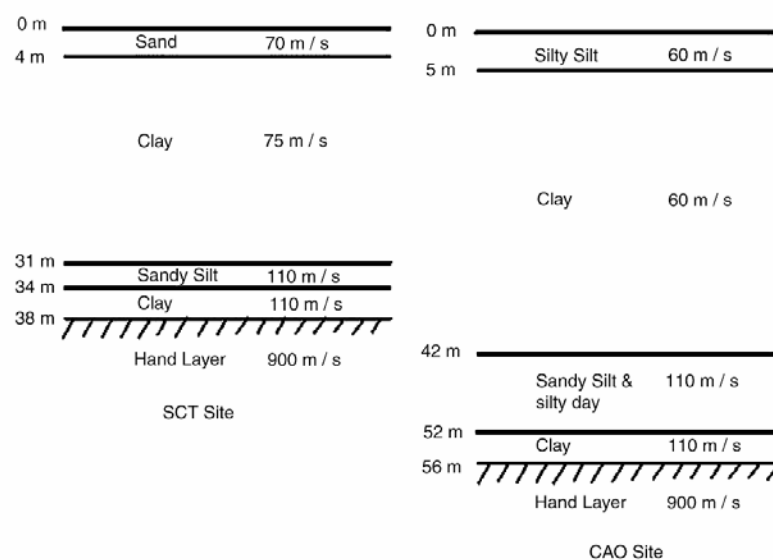
ที่มา: Ovando-Shelley *et al.* (2007)



ภาพที่ 59 Evolution of Dynamic Stiffness and Damping in Clay sample (Mexico City)

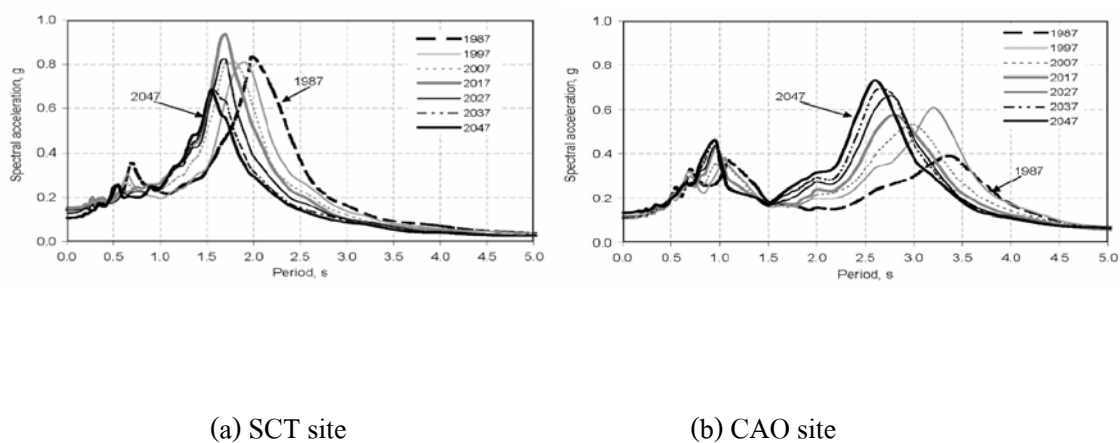
ที่มา: Ovando-Shelley *et al.* (2007)

การวิเคราะห์การตอบสนองการสั่นไหว ตามลักษณะชั้นดินในภาพที่ 60 โดยใช้โปรแกรม SHAKE พบว่าชั้นดินมีคุณสมบัติในการขยายคลื่นแผ่นดินไหว เช่นเดียวกับงานวิจัยในอดีต (Seed and Romo, 1988) นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 61 และ 62 เปรียบเทียบผลของการตอบสนองต่อการสั่นไหวในรูปแบบสเปกตรัมตอบสนองบริเวณ SCT และ CAO site ตามลำดับ โดยใช้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ได้จากการพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงในอนาคต จนถึงปี ค.ศ. 2047 แสดงให้เห็นว่าค่า Predominant Period มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงตามช่วงระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นดินมี Dynamic Stiffness สูงขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นจากการพยากรณ์



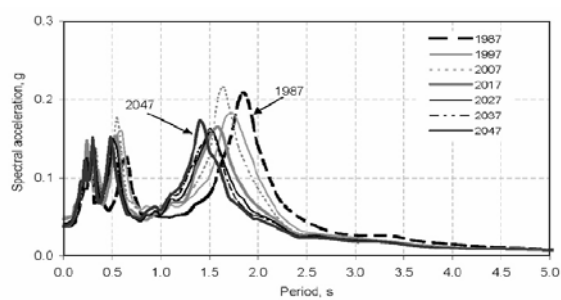
ภาพที่ 60 Simplified soil profiles at SCT and CAO sites

ที่มา: Ovando-Shelley *et al.* (2007)

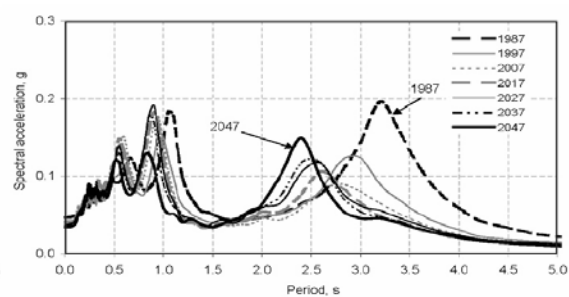


ภาพที่ 61 Evolution of Response Spectra with Acceleration measured at a rock outcrop during the 19 September 1985 event.

ที่มา: Ovando-Shelley *et al.* (2007)



(a) SCT site



(b) CAO site

ภาพที่ 62 Evolution of Response Spectra with Acceleration measured at a rock outcrop during the June 1999 event.

ที่มา: Ovando-Shelley *et al.* (2007)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ ได้แก่

1. SHAKE91 Software สำหรับวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินในระบบ 1 มิติ ต่อแรงกระทำแบบพลศาสตร์
2. SeismoSignal Software สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของข้อมูลอัตราเร่งของพื้นดินกับเวลาจากคลื่นแผ่นดินไหว

วิธีการ

ขั้นตอนในการวิจัยแสดงอยู่ในแผนภูมิภาพที่ 63 ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ส่วนด้วยกัน คือ ขั้นตอนที่ 1 การรวบรวมข้อมูล ดำเนินการรวบรวมข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว คุณสมบัติดินทางพลศาสตร์ ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการวางตัวของชั้นดิน และงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์และคลื่นแผ่นดินไหว ดำเนินการโดยศึกษาถึงคุณลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวหลายชนิด โดยมีระยะห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวกับพื้นที่ศึกษาประมาณ 80-250 กิโลเมตร และศึกษาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์กับคุณสมบัติทางสถิติศาสตร์ โดยการทดสอบวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนามโดย MASWM และดำเนินการเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่ใกล้เคียงเพื่อสร้างสมการสำหรับนำไปใช้แปลผลเพื่อวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพื้นที่ต่อไป สำหรับขั้นตอนสุดท้าย คือการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพื้นที่ ดำเนินการศึกษาถึงปัจจัยที่อาจมีผลกระทบต่อแบบจำลอง ได้แก่ ระดับความลึกของชั้นหินเหนียว ชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกตัวอยู่ระดับลึก และความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งในการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวเชิงพื้นที่ โดยกำหนดตำแหน่งการวิเคราะห์ให้กระจายตัวทั่วพื้นที่ศึกษาตามลักษณะความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

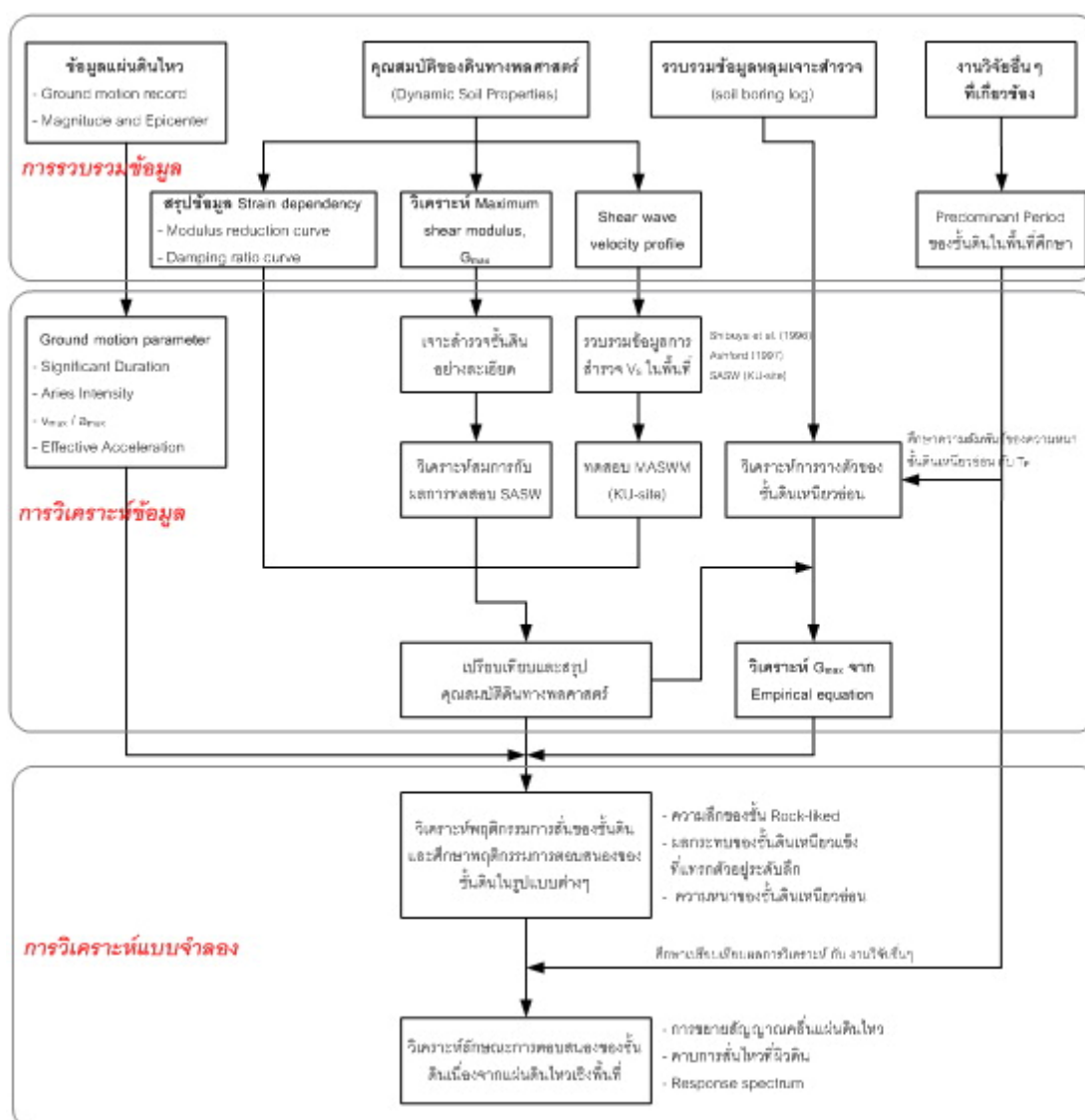
การรวบรวมข้อมูลความเร่งกับเวลาของแผ่นดินไหว

1. รวบรวมข้อมูลคลื่นความเร่งกับเวลาที่บันทึกได้จากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหว จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวทั่วโลก (ตารางที่ 14)
2. ศึกษาข้อมูลแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ได้แก่ กลุ่มรอยเลื่อนในจังหวัดกาญจนบุรี และกลุ่มรอยเลื่อนนครนายก เป็นต้น ซึ่งมีระยะห่างประมาณ 80-250 กิโลเมตร เพื่อนำไปใช้ประเมินการเลือกใช้หรือตัดแปลงคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์
3. ศึกษาองค์ประกอบของคลื่นความเร่งกับเวลา โดยใช้โปรแกรม SeismoSignal เวอร์ชัน 3.2.0-Build100 สำหรับการวิเคราะห์ โดยตัวแปรที่จะศึกษาได้แก่ Effective duration, Bracketed duration, Aries intensity, Peak acceleration, Peak velocity, $V_{\max}/A_{\max}$ และ Effective design acceleration เป็นต้น

ตารางที่ 14 แหล่งข้อมูลอัตราเร่งของพื้นดิน (Ground motions)

ลำดับที่	แหล่งข้อมูล	เว็บไซต์
1	National Strong Motion Program (NSMP), USGS	http://nsmp.wr.usgs.gov
2	COSMOS Virtual Data Center	http://db.cosmos-eq.org
3	European Strong Motion Database	http://www.isesd.cv.ic.ac.uk
4	Pacific Earthquake Engineering Research Center	http://peer.berkeley.edu
5	National Geophysical Data Center (NGDC), USA	http://www.ngdc.noaa.gov
6	National Strong Motion network of Turkey	http://angora.deprem.gov.tr
7	US Natural Center for Engineering Strong Motion	http://www.strongmotioncenter.org
8	Natural Resources, Canada	http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca
9	Natural Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan	http://www.k-net.bosai.go.jp

ที่มา: เกรียงไกร (2551)



ภาพที่ 63 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์ของพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร

1. ศึกษาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือน อัตราส่วนความหน่วงและความเครียดของดินในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยของ Teachavorasinskun *et al.* (2002) Vucetic and Dobry (1991) และ Seed and Idriss (1970)

2. รวบรวมข้อมูลการสำรวจค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนตามความลึก (Shear wave velocity profile) ของชั้นดินกรุงเทพฯ จากงานวิจัยของ Shibuya *et al.* (1996), Ashford (1997), SASW (Bay and Chaiprakaikeow, 2007) รวมทั้งการทดสอบด้วย MASWM โดย Seng *et al.* (2007) ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ดำเนินการทดสอบ MASWM บริเวณสนามรักบี้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ได้จากวิธีดังกล่าวกับวิธี SASW และทดสอบ MASWM บริเวณโรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนดังกล่าวกับผลการวิเคราะห์จากคุณสมบัติชั้นดิน ณ พื้นที่ดังกล่าว

4. ดำเนินการเจาะสำรวจชั้นดิน และเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบคุณสมบัติดินทางสถิติศาสตร์ ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ความชื้นตามธรรมชาติ และหน่วยน้ำหนักรวม ทุกๆ ความลึก 1 เมตร เพื่อหาค่าตัวแปรสำหรับการหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากสมการจากการทดลอง (Empirical equation) ที่เหมาะสมสำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ โดยเน้นการศึกษาชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งปานกลาง (Medium to Stiff Clay) ที่ยังมีความแปรปรวนมากในการเลือกใช้สมการจากการทดลอง (Empirical Equation)

5. สร้างสมการจากการทดลอง (Empirical Equation) ที่เหมาะสม สำหรับการหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนจากผลทดสอบในสนามด้วยวิธี SASW และ/หรือ MASWM กับการเจาะสำรวจชั้นดิน ณ พื้นที่เดียวกัน

6. เปรียบเทียบและสรุปคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์ของชั้นดินกรุงเทพฯ ได้แก่ พฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือน อัตราส่วนความหน่วงและความเครียดของดิน สมการคลื่นแรงเฉือนของชั้นดิน เพื่อนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติดินทางพลศาสตร์จากแหล่งข้อมูลหลุมเจาะสำรวจทั่วพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

สร้างแบบจำลองการตอบสนองของชั้นดินต่อแรงแผ่นดินไหวของพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

1. ศึกษาขอบเขตข้อจำกัดของแบบจำลอง และผลกระทบต่อการตอบสนองของชั้นดินจากรูปร่างของชั้นดินตามลักษณะต่างๆ ได้แก่

1.1 ระดับความลึกของชั้นหินเสมือนที่เหมาะสมกับแบบจำลอง โดยนำข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินที่มีความลึก 60 เมตร มาแปลผลด้วยสมการจากการทดลอง (Empirical equation) ส่วนระดับชั้นดินที่ลึกกว่านั้นนำข้อมูลจากการเจาะสำรวจระดับลึก 600 เมตร (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2547) มาประมาณหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนต่อเนื่องจะถึงระดับ 200 เมตร เพื่อนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคลื่นแผ่นดินไหว, การเปลี่ยนแปลงของความเร่งสูงสุดในชั้นดินระดับความลึกต่างๆ และคาบเด่น (Predominant period) ของการสั่นไหวบริเวณชั้นผิวดินหรือไม่ อย่างไรก็ตามจากคลื่นแผ่นดินไหวหลายลักษณะแตกต่างกัน

1.2 อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกอยู่ในชั้นทรายระดับลึก เนื่องจากลักษณะการวางตัวของชั้นดินบริเวณกรุงเทพฯ โดยทั่วไปจะมีลักษณะการวางตัวของชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย โดยที่ชั้นดินเหนียวแข็งในระดับลึกจะวางตัวบางกว่าชั้นทรายมาก และเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุทั้ง 2 ชนิดทางด้านพลศาสตร์มีความแตกต่างกัน ดำเนินการโดยสร้างชั้นดินจำลองที่มีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนใกล้เคียงกับสภาพชั้นดินจริง และกำหนดให้มีชั้นดินเหนียวแข็งแทรกอยู่กึ่งกลางระหว่างชั้นทราย โดยเพิ่มความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งเทียบเป็นร้อยละของชั้นทราย ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 30 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลต่อการตอบสนองของชั้นดินเมื่อมีหรือไม่มีชั้นดินเหนียวแข็งแทรกอยู่ในระดับลึก

1.3 อิทธิพลของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ของชั้นดินเหนียวอ่อนกับการตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวที่มีลักษณะแตกต่างกัน เช่นคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) การขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) และสเปกตรัมการตอบสนองที่ผิวดิน (Response spectrum) โดยใช้ข้อมูลชั้นดินจากการศึกษาในระดับความลึกของชั้นหินเสมือนที่เหมาะสมกับแบบจำลองมาปรับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนให้มี ความหนาเท่ากับ 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เมตร โดยที่คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนไม่เปลี่ยนแปลง

2. ศึกษาผลกระทบการตอบสนองของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวลักษณะต่างๆ โดยพิจารณาความเป็นไปได้ในการเกิดแผ่นดินไหวในระยะ 80-250 กิโลเมตร รอบพื้นที่ทำการศึกษา ทั้งนี้ได้เลือกคลื่นความเร่งกับเวลาของแผ่นดินไหวที่มีคาบเด่นการสั่นไหว (Predominant period, T_p) ของคลื่นแผ่นดินไหวระหว่าง 0.32-0.78 วินาที และมีค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหว (PGA) ระหว่าง 0.026g - 0.134g

3. วิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อแรงแผ่นดินไหวในลักษณะ 1 มิติ โดยใช้โปรแกรม SHAKE91 โดยใช้แรงแผ่นดินไหวในรูปแบบต่างๆ ที่ศึกษามาแล้วข้างต้น กระทำบริเวณฐานของแบบจำลองชั้นดินในระบบ 1 มิติ

4. สรุปแบบจำลองคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์ และแบบจำลองการตอบสนองของชั้นดิน เพื่อดำเนินการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคลื่นแผ่นดินไหวเชิงพื้นที่ โดยศึกษาถึงลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน และ Acceleration Response spectrum ในพื้นที่ที่มีลักษณะชั้นดินต่างๆ กัน

การศึกษาลักษณะการวางตัวและคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

การศึกษาดำเนินการโดยการวิจัยของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของ นายเชิดพันธุ์ อมรกุล ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำผลการดำเนินการมาปรับใช้กับการศึกษาการตอบสนองของชั้นดินทางพลศาสตร์เชิงพื้นที่ โดยผลการศึกษาการวางตัวของชั้นดินและคุณสมบัติชั้นดินแสดงในรูปแบบของฐานข้อมูลในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยมีข้อมูลหลุมเจาะสำรวจในพื้นที่จำนวน 3,755 หลุมเจาะ กระจายในพื้นที่ประมาณ 1,400 ตารางกิโลเมตร

โดยข้อมูลหลุมเจาะในฐานข้อมูลได้ผ่านการคัดกรองตามวิธีการทางวิศวกรรมปฐพี และคุณสมบัติของชั้นดินได้ถูกเฉลี่ยในพื้นที่ย่อยขนาด 5x5 ตารางกิโลเมตร เพื่อเป็นตัวแทนในพื้นที่ดังกล่าวสำหรับการ Interpolation ในพื้นที่ใหญ่ โดยในงานวิจัยนี้ได้จัดแบ่งพื้นที่การวิเคราะห์ตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน และวิเคราะห์คุณสมบัติดินทางพลศาสตร์เฉลี่ยในพื้นที่ 5x5 ตารางกิโลเมตร

การศึกษาการตอบสนองของพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เชิงพื้นที่

1. กำหนดตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน โดยพิจารณาจากพื้นที่ความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน และความแปรปรวนของข้อมูลคุณสมบัติชั้นดินในพื้นที่ 5x5 ตารางกิโลเมตร ทั้งนี้ได้เลือกพื้นที่วิเคราะห์จำนวน 39 ตำแหน่งตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 6-18 เมตร

2. วิเคราะห์ค่าโมดูลัสเฉือนที่ระดับความเครียดต่ำ (G_{max}) หรือค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) จากสมการที่ได้จากการศึกษาข้างต้น โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติดินเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ข้อมูลดินในพื้นที่ย่อยขนาด 5x5 ตารางกิโลเมตร เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อแรงกระทำแผ่นดินไหว
3. วิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินโดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวหลายรูปแบบ โดยพิจารณาคลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้ห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวตั้งแต่ 80-250 กิโลเมตร ขนาดของแผ่นดินไหวตั้งแต่ 5.4(M) - 7.8(Ms) ค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหว (PGA) ระหว่าง 0.026g-0.134g และมีคาบเด่นของการสั่นไหว (Predominant period) ในระดับ outcrop ตั้งแต่ 0.32-0.78 วินาที
4. ศึกษาและสรุปพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวเชิงพื้นที่ ประกอบด้วย การขยายอัตราเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน (Amplification factor) คาบเด่นของการสั่นไหวบริเวณผิวดิน (Predominant period) และสเปกตรัมการตอบสนองที่ผิวดิน (Response spectrum) โดยเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานศึกษาของ Tuladhar (2002) และ Warnitchai *et al.* (2001)
5. ศึกษาสเปกตรัมการตอบสนองที่ผิวดิน (Response spectrum) ของตำแหน่งการวิเคราะห์ 39 พื้นที่ ตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน จากการตอบสนองของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวที่มีลักษณะแตกต่างกันดังที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

ผลและวิจารณ์

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อแบบจำลองการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินใน 1 มิติ เนื่องจากแรงกระทำแผ่นดินไหว ประกอบด้วยปัจจัยดังนี้ อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งระดับลึก ความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมกับแบบจำลอง และความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และความชื้นในดินตามธรรมชาติ เพื่อนำผลการศึกษาดังกล่าวไปใช้ให้เหมาะสมกับแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวหลายรูปแบบเชิงพื้นที่ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยพิจารณาถึงการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) คาบเด่นของคลื่นการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) และสเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณผิวดิน (Response spectrum) ซึ่งจะกล่าวถึงลักษณะการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

คลื่นความเร่งกับเวลาของแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์

เหตุการณ์แผ่นดินไหวหรือคลื่นความเร่งกับเวลาที่นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์นั้น จะพิจารณาจากระยะจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวรอบพื้นที่ชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ดังที่กล่าวมาแล้วในส่วนของบทวิธีการ โดยสามารถเลือกคลื่นความเร่งกับเวลาของแผ่นดินไหวได้ 7 เหตุการณ์ โดยมีขนาดความรุนแรงอยู่ระหว่าง 5.4(M) - 7.8(Ms) และมีขนาดของความเร่งสูงสุดระหว่าง 0.026g - 0.134g โดยมีรายละเอียดของเหตุการณ์แผ่นดินไหว และองค์ประกอบของแผ่นดินไหวแสดงไว้ในตารางที่ 15 และ 16 ตามลำดับ โดยที่ค่า V_{max}/A_{max} ของคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 7 เหตุการณ์จะมีลักษณะคลื่นอยู่ในชั้นหิน 2 เหตุการณ์ (California, Lytle creek) คลื่นในชั้นดินแข็ง 4 เหตุการณ์ (Chi-chi, Mexico, Lander และ Turkey) และคลื่นที่คาดว่าอยู่ในชั้นดิน 1 เหตุการณ์ (Iran) โดยเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ในตารางที่ 17 (Seed and Idriss, 1982)

ลักษณะของคลื่นความเร่งกับเวลาของเหตุการณ์แผ่นดินไหวทั้ง 7 เหตุการณ์ได้แสดงไว้ตั้งแต่ภาพที่ 64 ถึง 70 ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลื่นแผ่นดินไหวแต่ละชนิดจะมีลักษณะแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น ขนาดของความรุนแรง สภาพทางธรณีของแหล่งกำเนิด ระยะห่างจากศูนย์กลางของสถานีตรวจวัดคลื่น และระยะเวลาของการสั่นไหว เป็นต้น

ตารางที่ 15 ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพฯ

ลำดับ	เหตุการณ์	วันที่	ขนาดความ รุนแรง	ระยะจากศูนย์กลาง (km)	PGA (g)	T_p (sec)
1	Chi Chi earthquake	20/09/1999	7.3 (Ms)	57.1	0.036	0.38
2	Trinidad, California earthquake	08/11/1980	7.2 (Ms)	71.9	0.134	0.32
3	Victoria, Mexico earthquake	09/06/1980	6.4 (Ms)	58.3	0.068	0.32
4	Lytle creek earthquake	12/09/1970	5.4 (M)	107.8	0.026	0.48
5	Lander earthquake	28/06/1992	7.4 (Ms)	175.6	0.066	0.58
6	Tabas, Iran earthquake	16/09/1978	7.4 (Ms)	199.1	0.034	0.78
7	Kocaeli, Turkey earthquake	17/08/1999	7.8 (Ms)	237.1	0.106	0.64

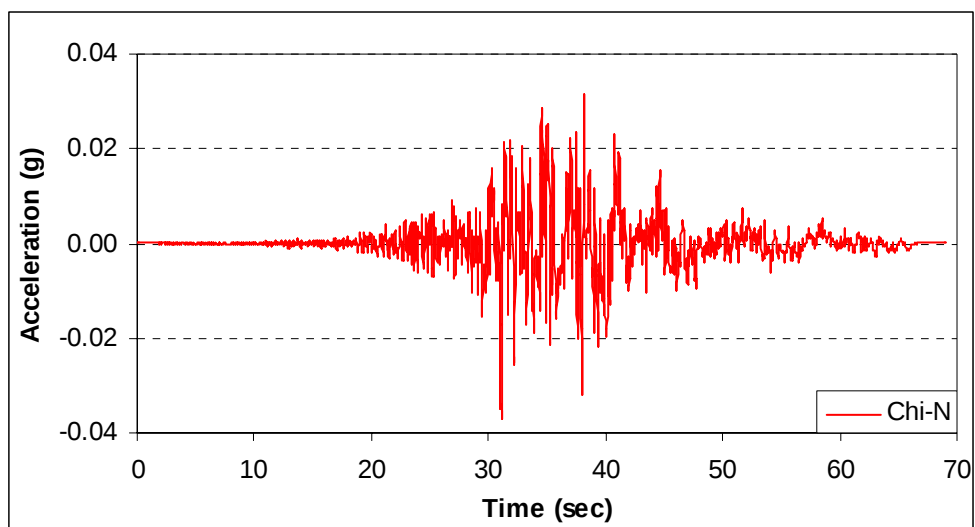
ตารางที่ 16 องค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์

ลำดับ	เหตุการณ์	PGA (g)	PGV (cm/sec)	T_p (sec)	V_{max}/A_{max} (sec)	Arias Intensity, I_a (m/s)
1	Chi Chi earthquake	0.036	6.654	0.38	0.185	0.032
2	Trinidad, California earthquake	0.134	9.874	0.32	0.075	0.383
3	Victoria, Mexico earthquake	0.068	9.002	0.32	0.134	0.079
4	Lytle creek earthquake	0.026	1.541	0.48	0.061	0.008
5	Lander earthquake	0.066	9.476	0.58	0.146	0.124
6	Tabas, Iran earthquake	0.034	10.751	0.78	0.320	0.056
7	Kocaeli, Turkey earthquake	0.106	10.757	0.64	0.103	0.150

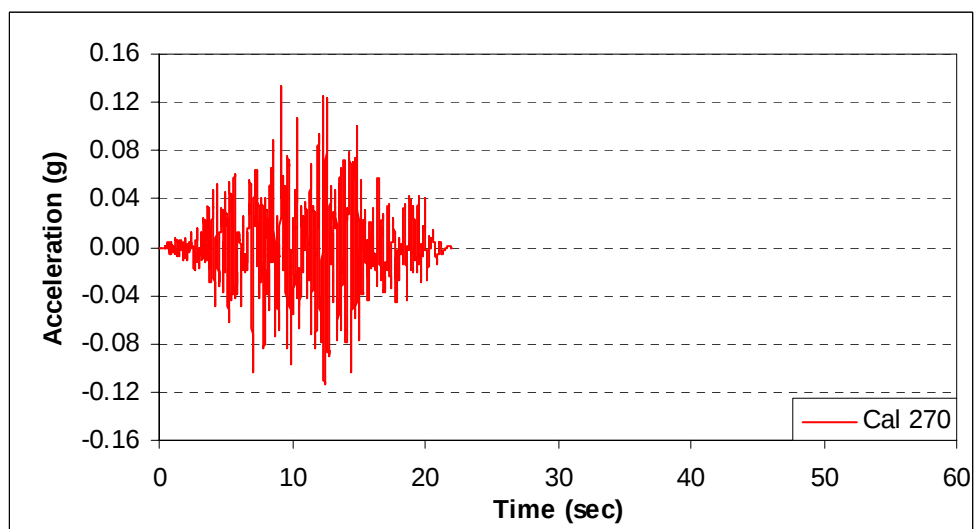
ตารางที่ 17 ค่าของ V_{max}/A_{max} ที่ตรวจวัด ณ สถานที่ที่ห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวไม่เกิน 50 กม.

สภาพดินที่สถานีตรวจวัด	V_{max}/A_{max} (sec)
ชั้นหิน	0.056
ชั้นดินแข็งที่อยู่ลึกกว่า 60 เมตร	0.112
ชั้นดินแข็งที่อยู่ตื้นกว่า 60 เมตร	0.138

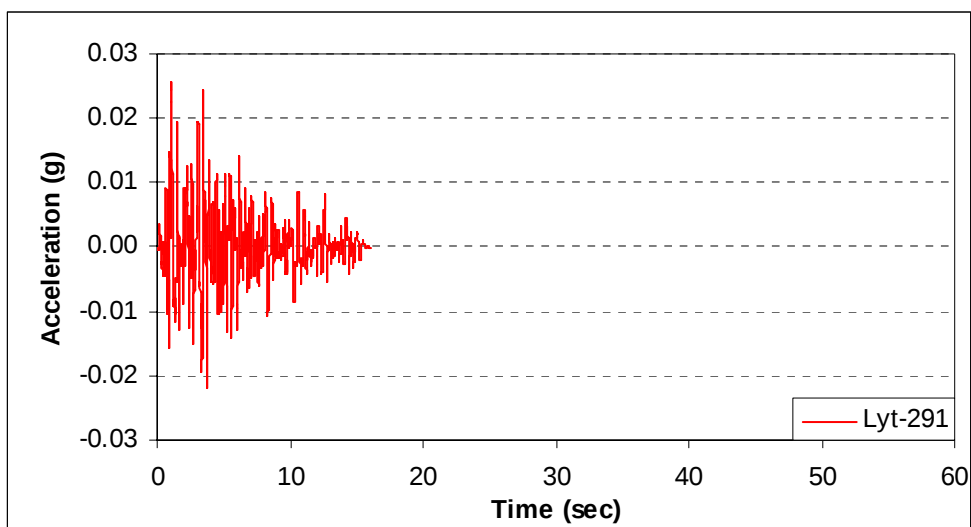
ที่มา: Seed and Idriss (1982)



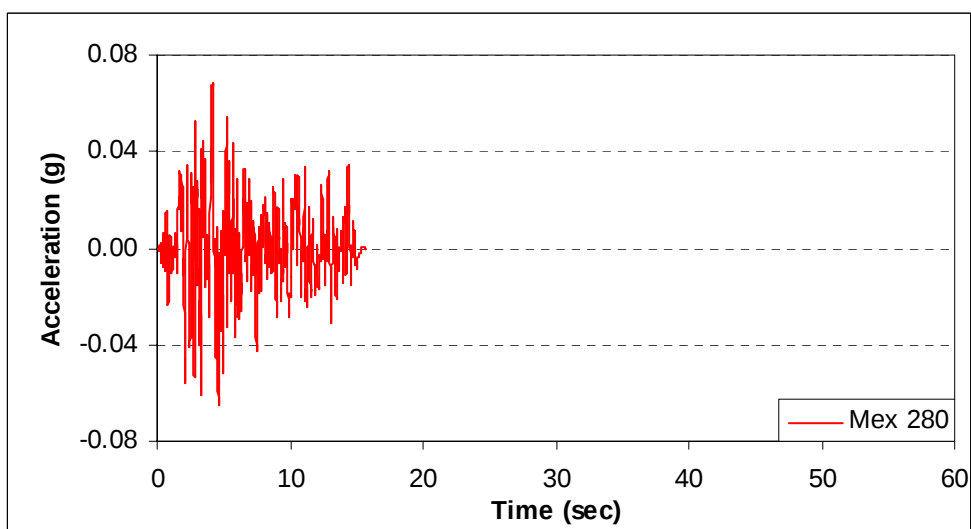
ภาพที่ 64 คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Chi-Chi Earthquake 20 กันยายน ค.ศ.1999



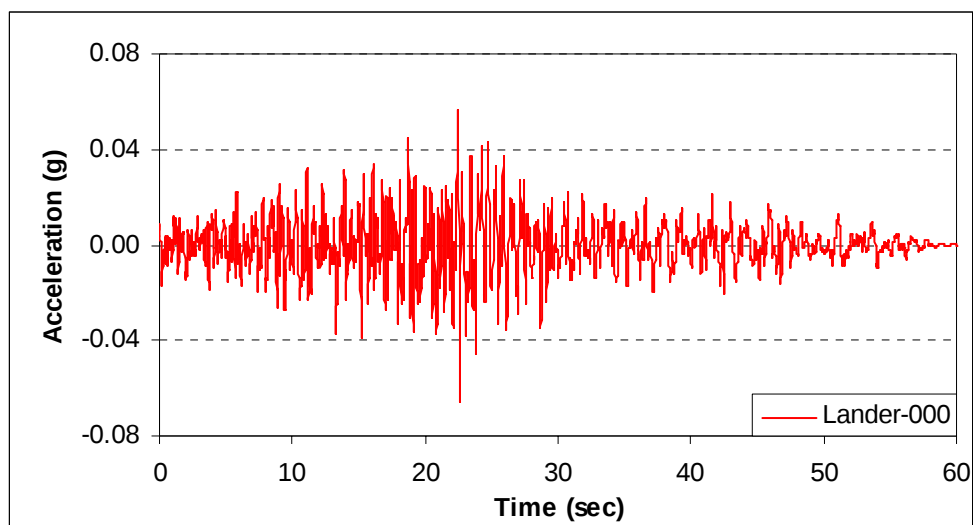
ภาพที่ 65 คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Trinidad, California Earthquake 8 พฤศจิกายน ค.ศ.1980



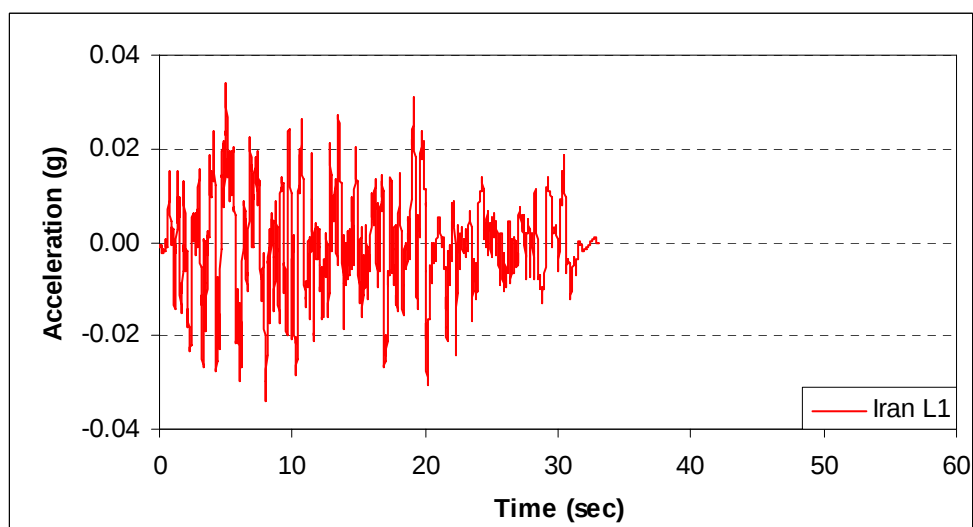
ภาพที่ 66 คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Victoria, Mexico Earthquake 9 มิถุนายน ค.ศ.1980



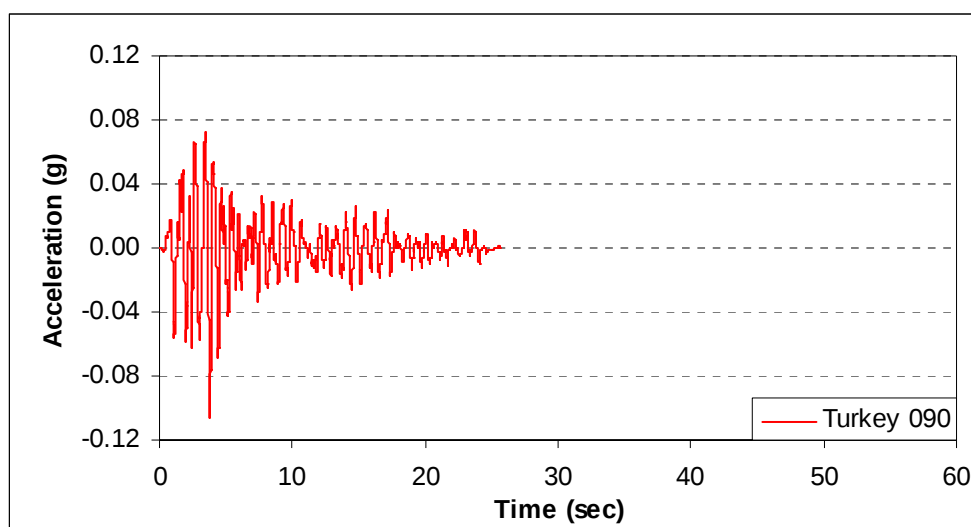
ภาพที่ 67 คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lytle creek Earthquake 12 กันยายน ค.ศ.1970



ภาพที่ 68 คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lander Earthquake 28 มิถุนายน ค.ศ.1992



ภาพที่ 69 คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Tabas, Iran Earthquake 16 กันยายน ค.ศ.1978



ภาพที่ 70 คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Kocaeli, Turkey Earthquake 17 สิงหาคม ค.ศ.1999

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลอง

ความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมกับแบบจำลอง

การศึกษาระดับความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองใน 1 มิติเพื่อใช้เป็นชั้น Outcrop สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว โดยที่ความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นเสมือนหินมีค่าเท่ากับ 760 m/s (Kramer, 1996) จากการศึกษาคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์เบื้องต้น พบว่าระดับความลึกของชั้นเสมือนหินโดยใช้การประมาณค่าจากสมการจากการทดลอง (Empirical equation) โดยกำหนดให้ตัวแปรสำหรับแปลผลด้วยสมการที่เสนอไว้โดย Hardin and Black (1978) มีค่าคงที่แต่ให้เปลี่ยนแปลงฟังก์ชันของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective mean stress, σ'_m) มีระดับความลึกประมาณ 800-1,000 เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับความลึกของชั้นหินจริงที่มีผู้ประเมินว่ามีความลึกประมาณ 1,000-1,500 เมตร (วิชาญ, 2546 และ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2547) โดยการสร้างแบบจำลองตามลักษณะชั้นดินดังกล่าวจะมีความซับซ้อนและขาดข้อมูลที่เพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาระดับความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมน้อยที่สุดที่สามารถใช้เป็นขอบเขตของแบบจำลอง

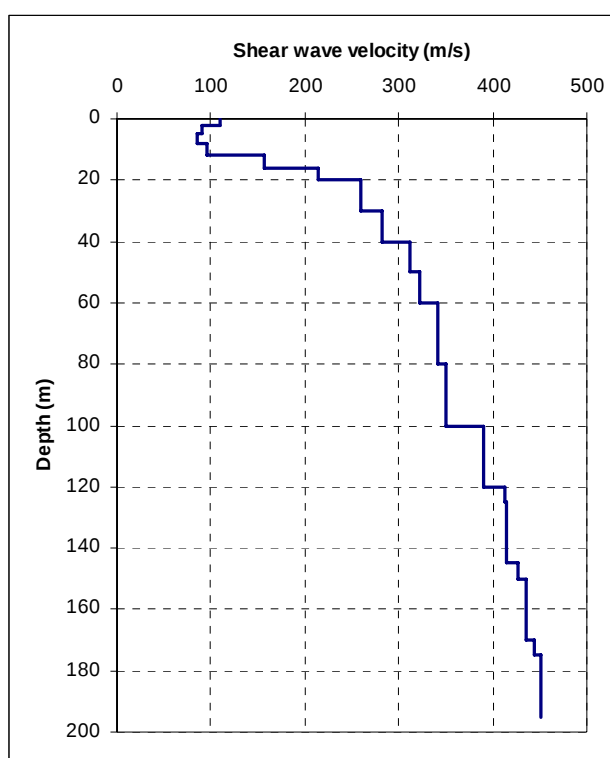
ข้อมูลที่น่ามาสร้างแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์กรณีนี้ ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจความลึก 80 เมตร (บริเวณสถานทูตรัสเซีย รายละเอียดข้อมูลการเจาะสำรวจแสดงไว้ในภาคผนวก ก) และส่วนที่ลึกลงไปได้จากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจระดับลึก 600 เมตร (ดังแสดงในภาพที่ 80 และรายละเอียดในภาคผนวก ข) บริเวณบางขุนเทียน กรุงเทพฯ ตำแหน่ง KE-Station (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2547) โดยนำข้อมูลดังกล่าวมาประเมินหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) ตามระดับความลึกด้วยสมการจากการทดลอง (Empirical equation) ดังที่เสนอไว้โดย Hardin and Black (1978) สำหรับชั้นดินเหนียว และ Seed and Idriss (1970) สำหรับชั้นทราย ผลการวิเคราะห์ทำให้ได้ Shear wave velocity profile โดยทั่วไปของชั้นดิน กรุงเทพฯ ดังภาพที่ 71 และมีข้อกำหนดสำหรับการวิเคราะห์โดยกำหนดระดับความลึกของชั้นเสมือนหินเท่ากับ 60 80 100 120 150 180 และ 200 เมตร เพื่อวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของระดับชั้นเสมือนหินที่มีผลต่อการตอบสนองของชั้นดินจากการกระตุ้นโดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ลำดับที่ 1-4 ดังแสดงข้อมูลและองค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหวในตารางที่ 15 และ 16

ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมตอบสนองบริเวณผิวดินของกรณีที่จำลองระดับชั้นเสมือนหินที่ระดับความลึก 60-120 เมตร มีลักษณะแตกต่างกันไปตามระดับความลึกที่กำหนด แต่เมื่อระดับชั้นเสมือนหินลึกกว่า 120 เมตร (120-200 เมตร) พบว่าสเปกตรัมตอบสนองบริเวณผิวดินมีลักษณะไม่แตกต่างกันมากตามระดับความลึกของชั้นเสมือนหินที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 72-75 ซึ่งลักษณะของสเปกตรัมการตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เป็นไปในทิศทางเดียวกันตามข้อสรุปข้างต้น

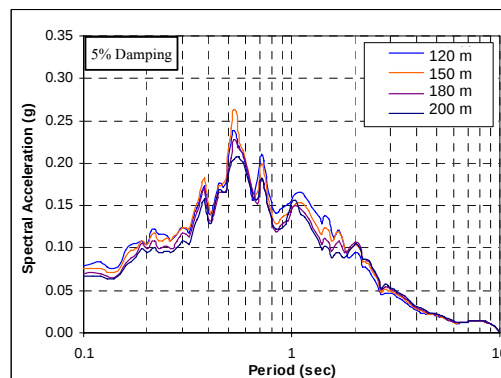
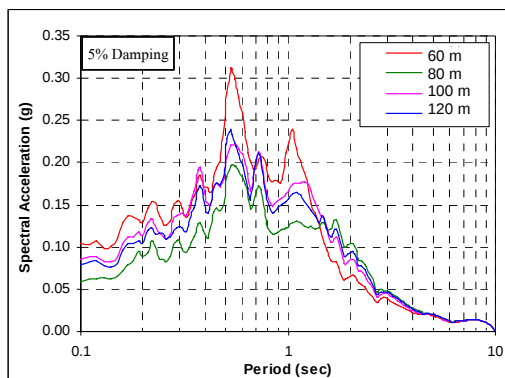
นอกจากนั้นยังพบว่าค่าเฉลี่ยของการขยายอัตราเร่งสูงสุด (Amplification factor) ตามความลึก โดยเฉพาะบริเวณผิวดินของกรณีที่ระดับชั้นเสมือนหินอยู่ที่ระดับความลึก 60-120 เมตร มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อความลึกของชั้นเสมือนหินเปลี่ยนไป โดยกรณีที่มีระดับชั้นเสมือนหิน 60 เมตร จะมีการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินมากที่สุดและค่อยๆ ลดลงตามระดับชั้นเสมือนหินที่เพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึงระดับ 120 เมตร (ภาพที่ 76-79) แต่สำหรับกรณีระดับชั้นเสมือนหินอยู่ที่ระดับความลึก 120-200 เมตร พบว่าการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน และที่ระดับความลึกต่างๆ มีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังภาพที่ 76-79 ซึ่งขนาดและลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความเร่งที่ระดับความลึกต่างๆ จะแตกต่างกันไปตามลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาใช้วิเคราะห์

ดังนั้นจากผลการศึกษาจึงสรุปได้ว่าระดับชั้นเสมือนหินที่เหมาะสมกับแบบจำลองการตอบสนองของชั้นดินต่อแรงแผ่นดินไหวนี้ อยู่ที่ระดับ 120 เมตร ซึ่งจากงานวิจัยในประเทศญี่ปุ่นได้เสนอระดับความลึกของชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์การขยายคลื่นแผ่นดินไหวโดยใช้ความเร็วคลื่นแรงเฉือนเป็นตัวกำหนดและจะเรียกระดับชั้นดังกล่าวว่า “Engineering bedrock” โดยมีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนประมาณ 300-700 m/s (Takewaki, 2005) ซึ่งเป็นระดับของความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองของคาบการสั่นไหวที่ผิวดิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยในหัวข้อนี้ รวมทั้งค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นดินที่ระดับ 120 เมตรมีค่าประมาณ 400 m/s

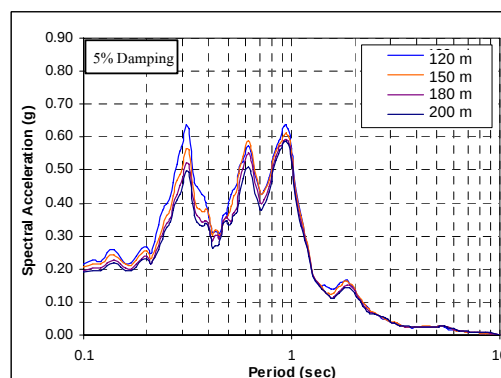
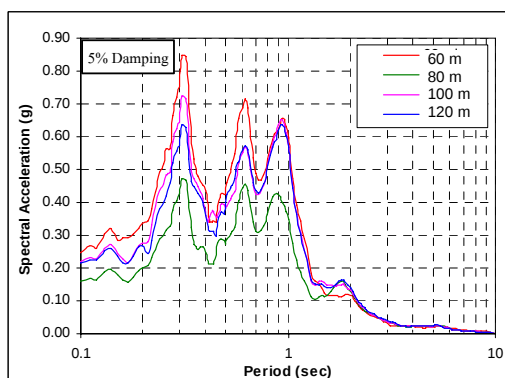
อย่างไรก็ตาม สำหรับการวิเคราะห์ในชั้นดินที่มีความแข็งมากกว่าพื้นที่ดินอ่อน ระดับความลึกของชั้นเสมือนหินสามารถใช้คุณสมบัติของ “Engineering bedrock” เป็นตัวกำหนดระดับสำหรับกระตุ้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหวของแบบจำลองแทนการหาระดับความลึกของชั้นเสมือนหินด้วยวิธีการนี้



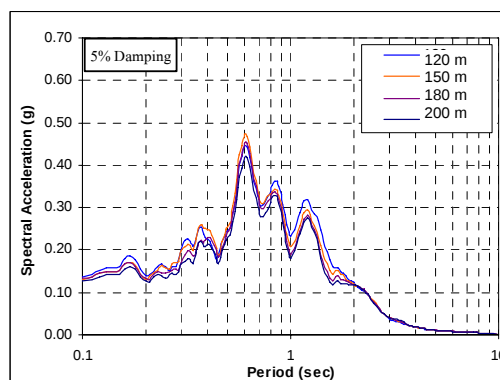
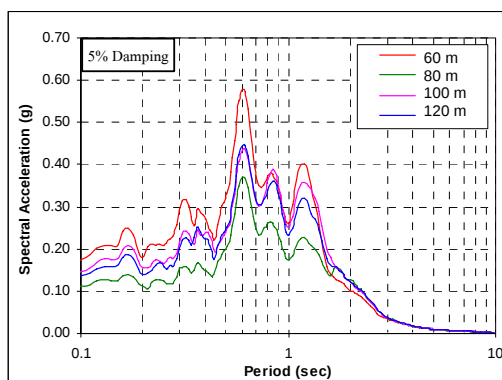
ภาพที่ 71 Shear wave velocity profile ของชั้นดินกรุงเทพฯ สำหรับการวิเคราะห์หาชั้นเสมือนหิน



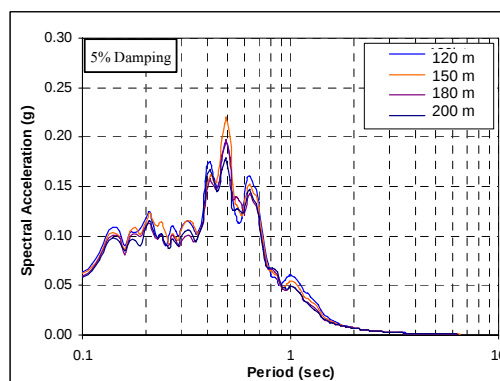
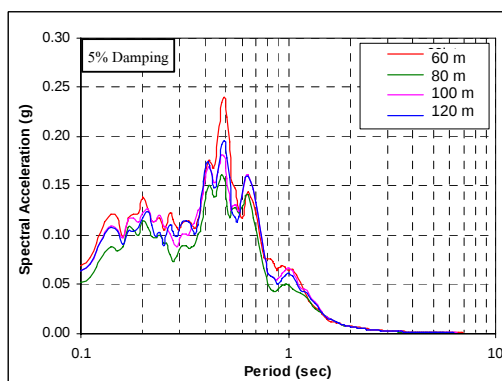
ภาพที่ 72 Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์กรณีระดับความลึกของชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร ของเหตุการณ์ Chi Chi earthquake 20 กันยายน ค.ศ.1999



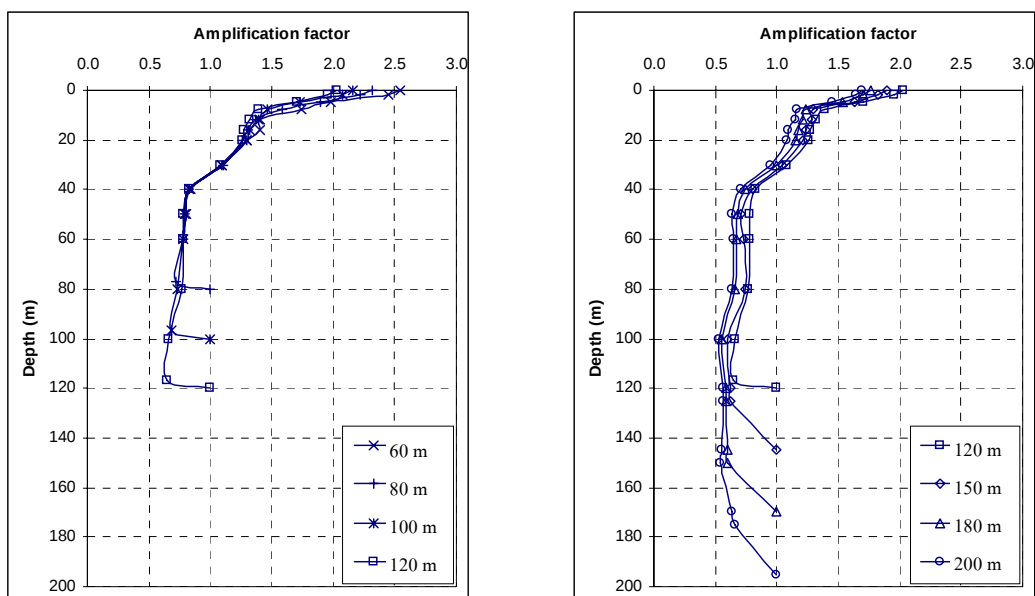
ภาพที่ 73 Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์กรณีระดับความลึกของชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตรของเหตุการณ์ Trinidad, California earthquake 8 พฤศจิกายน ค.ศ.1980



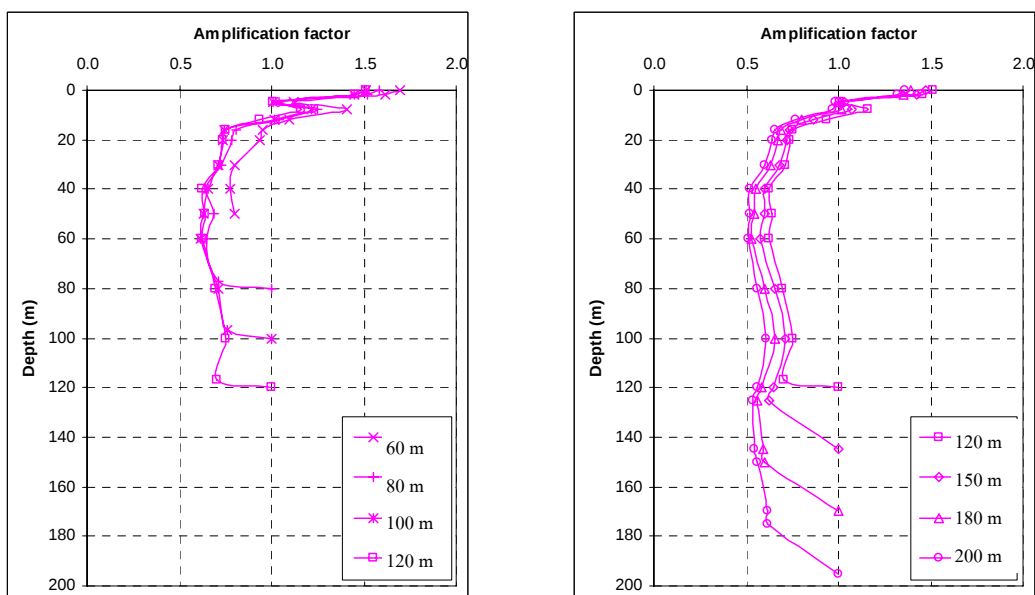
ภาพที่ 74 Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์ห้กรณีระดับความลึกของชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร ของเหตุการณ์ Victoria, Mexico earthquake 9 มิถุนายน ค.ศ.1980



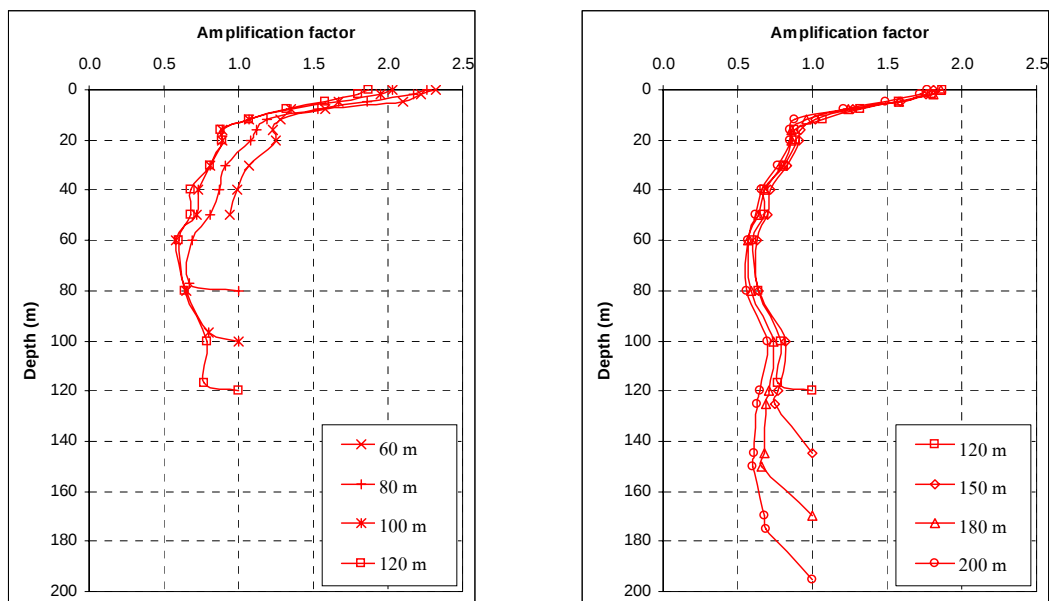
ภาพที่ 75 Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์ห้กรณีระดับความลึกของชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร ของเหตุการณ์ Lytle creek earthquake 12 กันยายน ค.ศ.1970



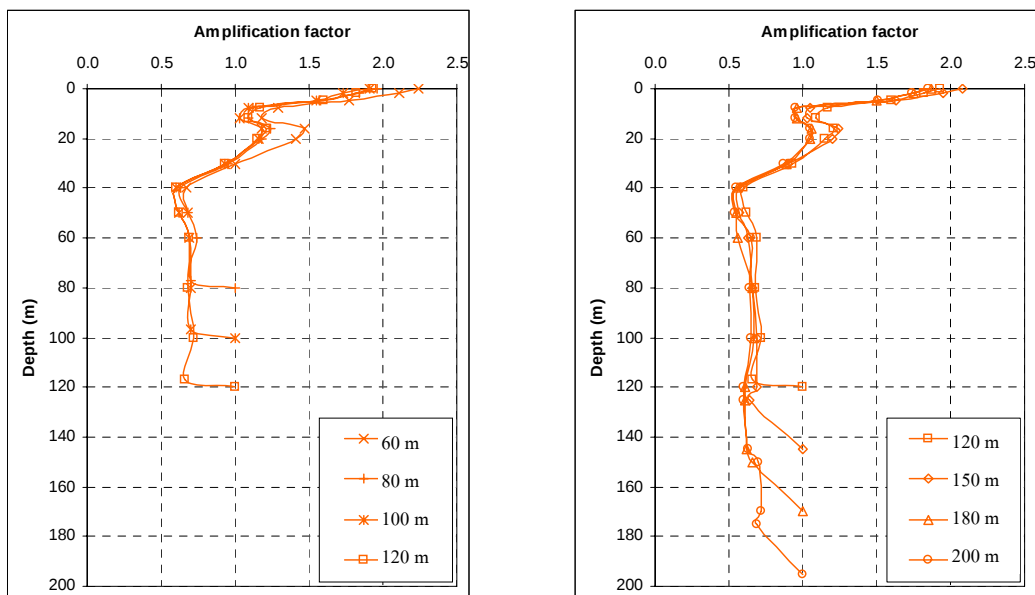
ภาพที่ 76 การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งตามความลึกของเหตุการณ์ Chi chi earthquake 20 กันยายน ค.ศ.1999 กรณีระดับชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร



ภาพที่ 77 การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งตามความลึกของเหตุการณ์ Trinidad, California earthquake 8 พฤศจิกายน ค.ศ.1980 กรณีระดับชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร



ภาพที่ 78 การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งตามความลึกของเหตุการณ์ Victoria, Mexico earthquake 9 มิถุนายน ค.ศ.1980 กรณีระดับชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร



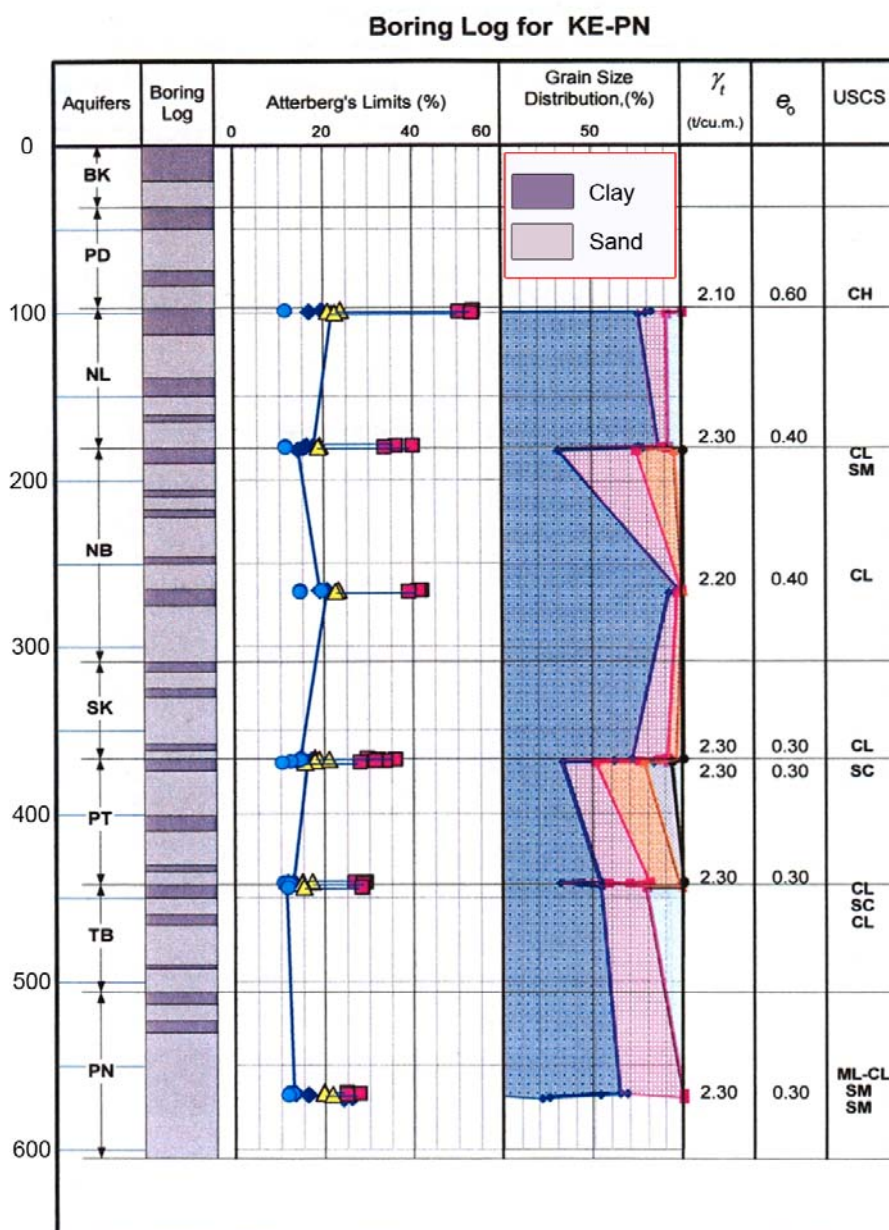
ภาพที่ 79 การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งตามความลึกของเหตุการณ์ Lytle creek earthquake 12 กันยายน ค.ศ.1970 กรณีระดับชั้นเสมือนหิน 60, 80, 100, 120, 150, 180 และ 200 เมตร

อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกอยู่ในระดับลึก

จากการศึกษาข้อมูลหลุมเจาะสำรวจระดับลึก 600 เมตร ของโครงการศึกษาผลกระทบ เนื่องจากการแก้ปัญหาการใช้ น้ำบาดาลเกินปริมาณสมมูลด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (กรม ทรัพยากรน้ำบาดาล, 2547) พบว่าในระดับชั้นความลึกตั้งแต่ 100 เมตรขึ้นไปจะพบชั้นดินเหนียว แข็ง (Stiff to Hard clay) ซึ่งมีความหนาไม่มากนักประมาณ 5-20 เมตร แทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นทราย ดังภาพที่ 80 ดังนั้นการกำหนดลักษณะของแบบจำลองจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงผลกระทบเนื่องจาก ปัจจัยดังกล่าวว่ามีอิทธิพลต่อการตอบสนองของชั้นดินหรือไม่ เพื่อนำไปปรับใช้กับแบบจำลองให้ เหมาะสม

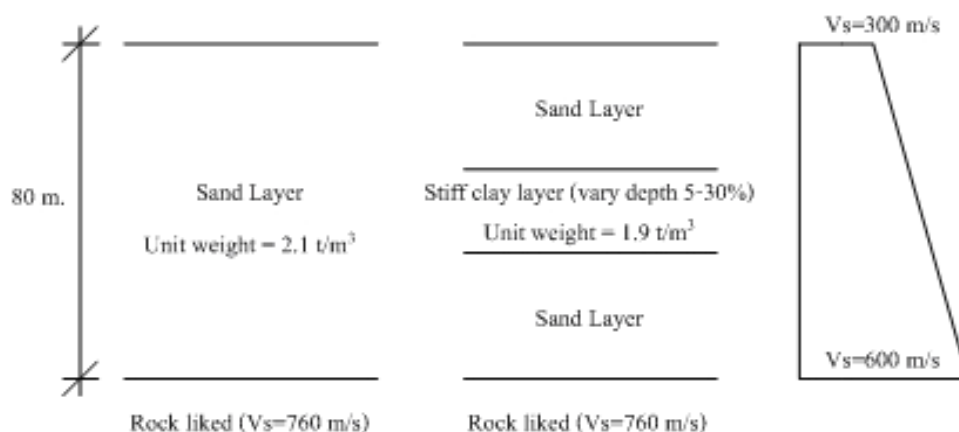
ข้อกำหนดสำหรับการวิเคราะห์ประกอบด้วย การกำหนดความหนาของชั้นทรายระดับลึก ให้มีความหนา 80 เมตรเพื่อเป็นตัวแทนของชั้นทรายในระดับที่ต่ำกว่า 60 เมตรและจำลองชั้นดิน เหนียวแข็งแทรกอยู่กึ่งกลางชั้นทราย โดยให้ความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งเพิ่มขึ้นจาก 5% ถึง 30% ของความหนาชั้นทราย โดยที่สมมติค่า V_s ของชั้นทรายเริ่มต้นเท่ากับ 300 m/s แล้วเพิ่มขึ้น เรื่อยๆ ตามความลึกจนถึง 600 m/s ที่ระดับความลึก 80 เมตร ซึ่งให้คล้ายคลึงกับสภาพชั้นดินจริง และชั้นดินเหนียวที่แทรกอยู่มีค่า V_s ตามชั้นทรายที่กำหนด สำหรับชั้นเสมือนหิน (Rock liked material) ได้ชั้นทรายจำลองสำหรับกระตุ้นด้วยคลื่นแผ่นดินไหวให้มีค่า $V_s = 760$ m/s (Kramer, 1996) ดังแสดงในภาพที่ 81

นอกจากนี้ Modulus reduction curve และ Damping curve ของดินเหนียวแข็งใช้ตาม ความสัมพันธ์ที่เสนอไว้โดย Vucetic and Dorby (1991) และสำหรับชั้นทรายใช้ตามที่เสนอไว้โดย Seed and Idriss (1970) โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์กรณีดังกล่าวจากคลื่นลำดับที่ 5 ในตารางที่ 15 ซึ่งมีองค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหวดังที่แสดงในตารางที่ 16 และภาพที่ 68



ภาพที่ 80 ลักษณะชั้นดินของหลุมเจาะสำรวจระดับลึก 600 เมตร (บางขุนเทียน กรุงเทพฯ, KE Station)

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2547)

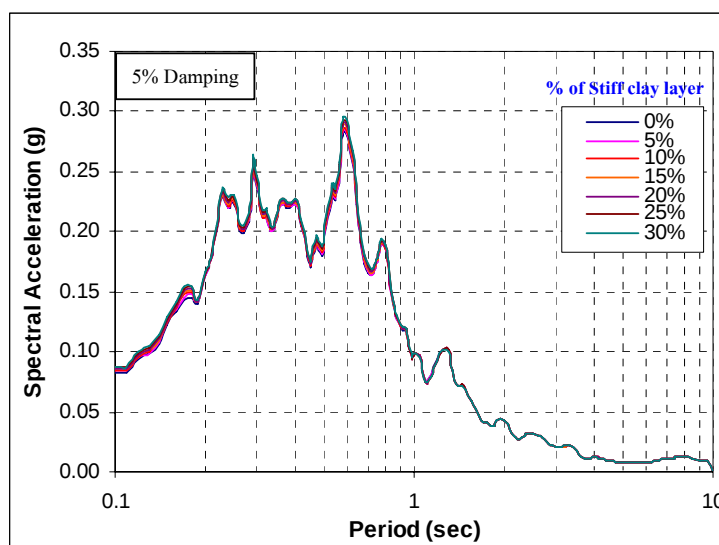


ภาพที่ 81 แบบจำลองชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งแทรกในชั้นทรายระดับลึก

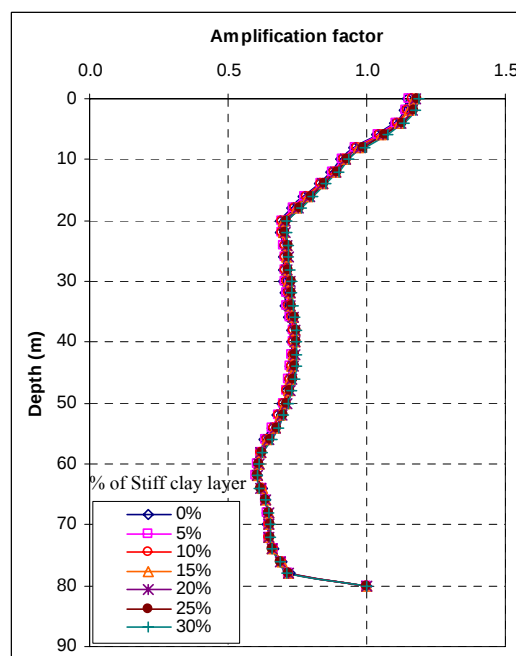
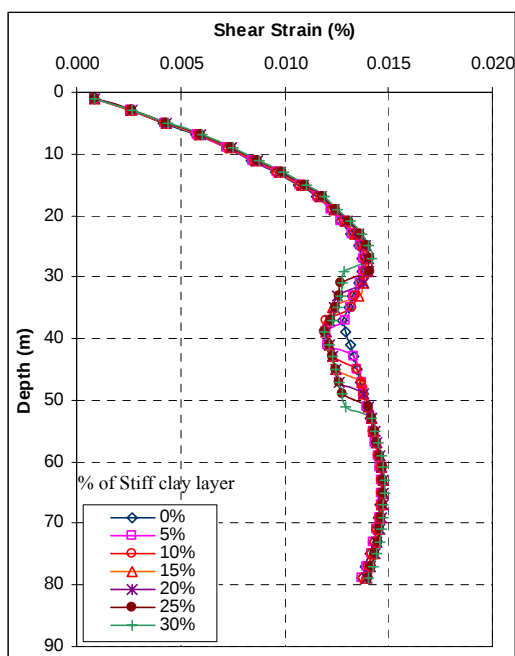
ผลการวิเคราะห์พบว่า การเปลี่ยนแปลงของความหนาชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกตัวอยู่ในชั้นทรายระดับลึกนั้น ไม่มีอิทธิพลต่อการตอบสนองของชั้นดิน เนื่องจากการตอบสนองต่อการสั่นไหวไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 82) ซึ่งเหมือนกันในทุกๆ กรณีของการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นทราย

หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งกับระดับความลึกในภาพที่ 83 พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันเมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของ %-Shear strain ตามความลึก พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลง Strain ต่อแรงกระทำที่แตกต่างกันระหว่างดินเหนียวกับดินทราย

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองในการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพฯ ไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงอิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นทรายระดับลึก



ภาพที่ 82 Acceleration response spectrum จากการวิเคราะห์กรณีชั้นดินเหนียวแข็งแทรกระดับลึก
กระทำโดยคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lander earthquake 28 มิถุนายน ค.ศ.1992



ภาพที่ 83 อิทธิพลความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งระดับลึกต่อการเปลี่ยนแปลงของ Shear strain
และ Amplification factor กระทำโดยคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์ Lander earthquake
28 มิถุนายน ค.ศ.1992

อิทธิพลของความหนาแน่นดินเหนียวอ่อน

จากงานวิจัยในอดีต และการศึกษาของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พบว่าลักษณะของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ บริเวณพื้นที่ศึกษาจะมีความหนาแตกต่างกัน โดยมีความหนาประมาณ 16-20 เมตร บริเวณใกล้กับอ่าวไทย และค่อยๆ ลดลงจนเหลือประมาณ 4-6 เมตรบริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ดังนั้นการศึกษาถึงอิทธิพลเนื่องจากความหนาแน่นดินเหนียวอ่อนต่อการตอบสนองของชั้นดินจะทำให้เข้าใจถึงความปลอดภัยของสิ่งปลูกสร้างในพื้นที่ศึกษา

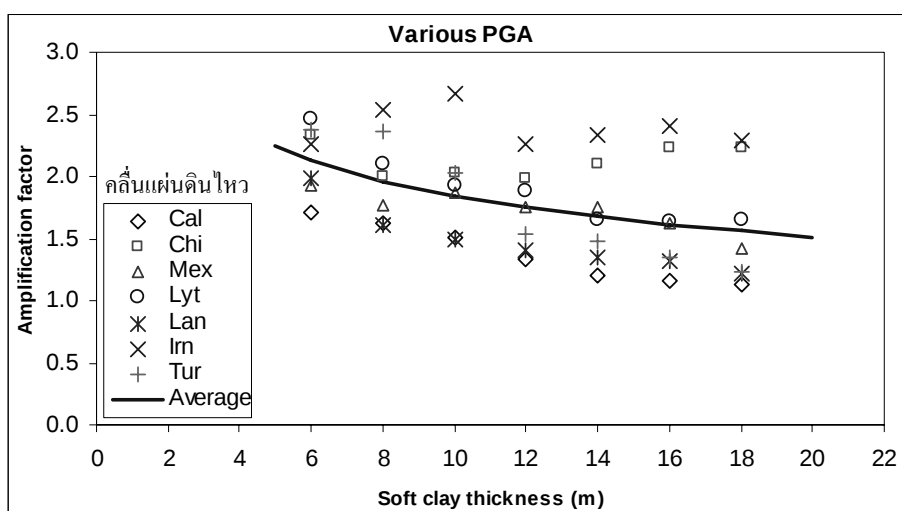
การวิเคราะห์อิทธิพลเนื่องจากความหนาแน่นดินอ่อน ดำเนินการโดยการแปลผลคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์จากหลุมเจาะสำรวจเหมือนกับกรณีการศึกษาระดับความลึกของชั้นเสมือนหิน และใช้ Shear wave velocity profile ดังแสดงในภาพที่ 71 จากนั้นทำการจำลองให้ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเปลี่ยนแปลงไปโดยเพิ่มขึ้นกรณีละ 2 เมตร ตั้งแต่ 6-18 เมตร กำหนดให้คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินเหนียวอ่อนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความหนา คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์จำนวน 7 เหตุการณ์ ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 15 และ 16

จากการศึกษาพบว่า การขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ยของคลื่นแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ แปรผกผันต่อความหนาแน่นดินเหนียวอ่อน โดยมีอัตราลดลงเมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 84 และ 85 โดยที่การขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (26) (สุพจน์ และ รัตณี, 2548)

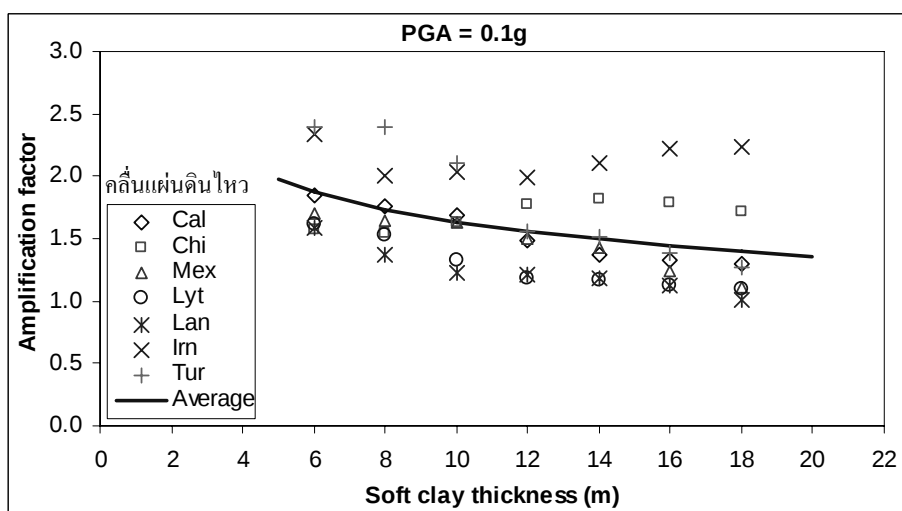
$$Amp. = PGA_{Surface} / PGA_{Outcrop} \quad (26)$$

นอกจากนี้ค่าการสั่นไหวเฉลี่ยเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ แปรผันต่อความหนาแน่นดินเหนียวอ่อน โดยมีอัตราการเพิ่มมากขึ้นตามความหนาแน่นดินเหนียวอ่อนที่หนาเพิ่มขึ้นดังแสดงภาพที่ 87 และ 88 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เสนอไว้โดย Tuladhar (2002) โดยพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ ที่มีชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 12-16 เมตร จากภาพที่ 86 จะได้ค่าการสั่นไหว 0.7-0.9 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับที่ Warnitchai *et al.* (2001) เสนอไว้ว่าพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณกรุงเทพฯ มีค่าการสั่นไหว 0.5-1.0 วินาที และเมื่อพิจารณาถึง Acceleration response spectrum ของชั้นดินที่มีความหนาต่างๆ พบว่าลักษณะของการตอบสนองจะแตกต่างกันตามความ

หนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนา 6-10 เมตร จะมีช่วงคาบของการสั่นไหวแคบ แต่สำหรับชั้นดินที่มีความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 12-18 เมตร จะมีช่วงของคาบการสั่นไหวกว้างมากขึ้น (ตอบสนองต่อความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหวหลายค่า) ดังภาพที่ 89

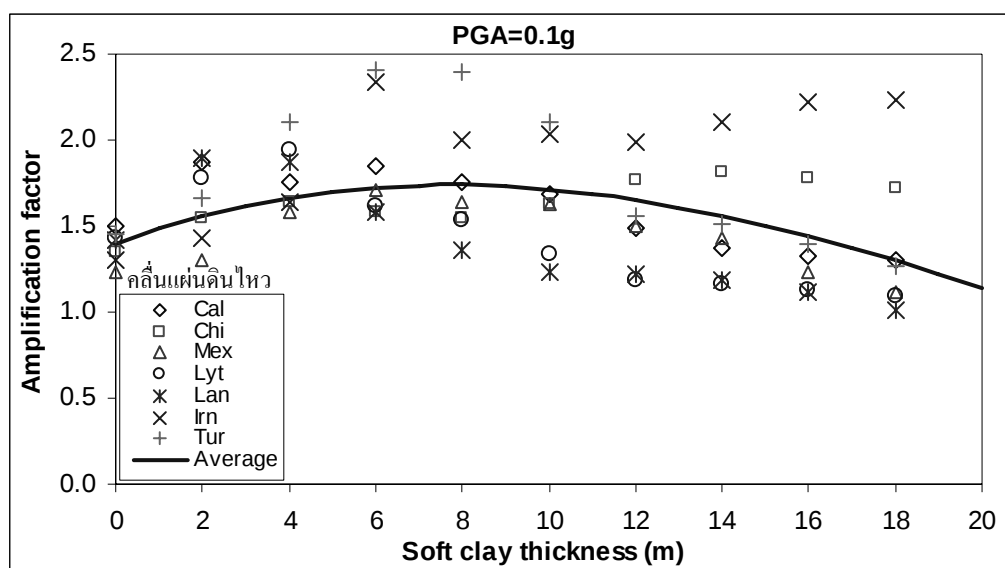


ภาพที่ 84 เปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ยต่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์

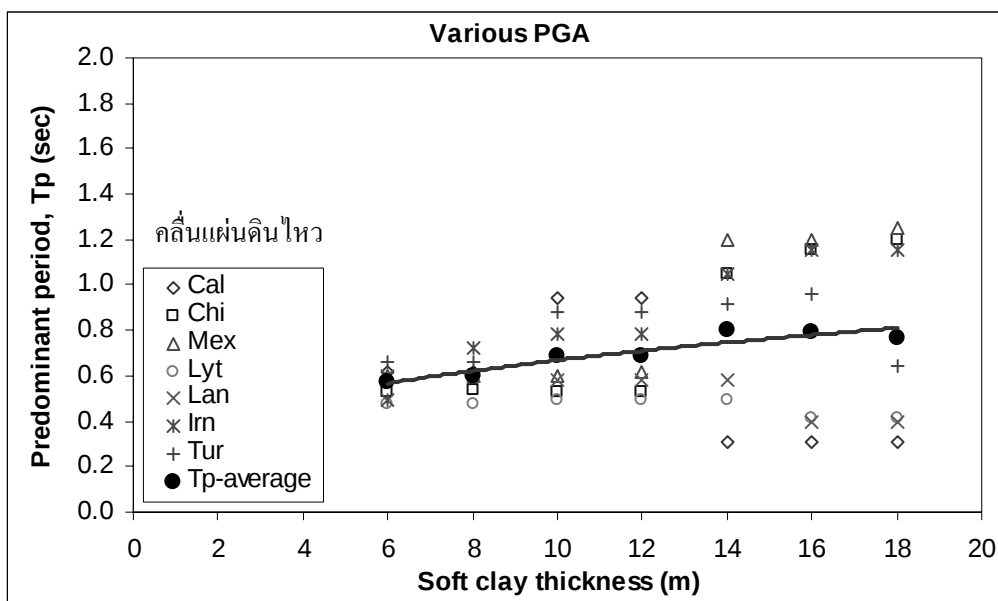


ภาพที่ 85 เปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ยต่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ กรณีปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ เท่ากับ 0.1g

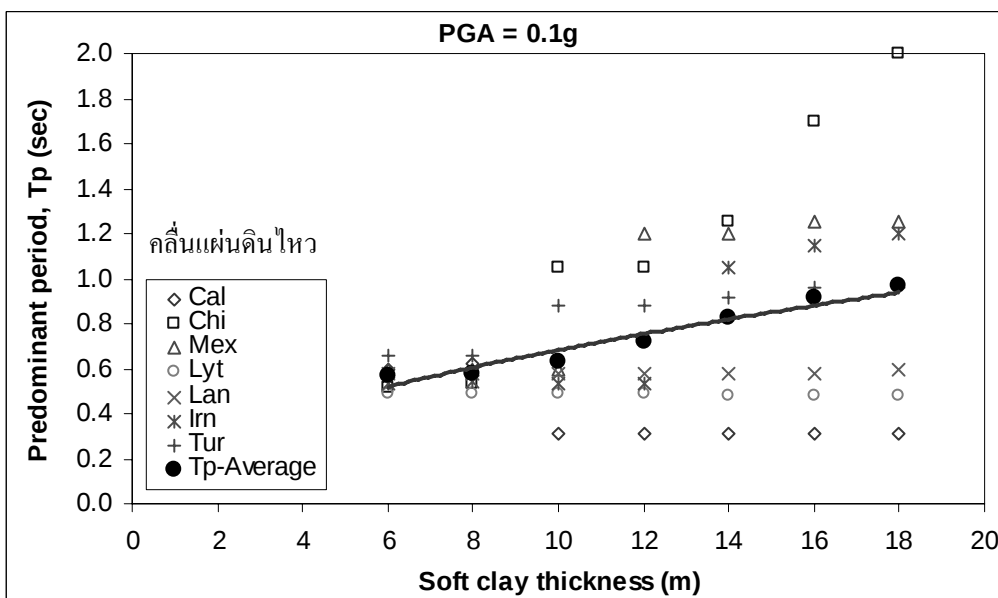
อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจากเส้นแนวโน้มในภาพที่ 84 และ 85 จะพบว่าชั้นดินที่ไม่มีชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) สูงกว่าการขยายความเร่งในชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งทำให้รู้สึกขัดแย้งกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้นำเสนอไว้ว่าชั้นดินเหนียวอ่อนมีคุณสมบัติในการขยายคลื่นแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงดำเนินการเพิ่มเติมการศึกษาในกรณีดังกล่าวโดยวิเคราะห์ชั้นดินเพิ่มเติมในกรณีที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 0-18 เมตร โดยใช้กรณีคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 7 เหตุการณ์ที่ปรับขนาด PGA เท่ากับ 0.10g และจากผลการวิเคราะห์พบว่าเส้นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยมีลักษณะโค้งคว่ำ ซึ่งจะมีช่วงที่มีการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) สูงสุดในช่วงความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 6-10 เมตร ดังภาพที่ 86



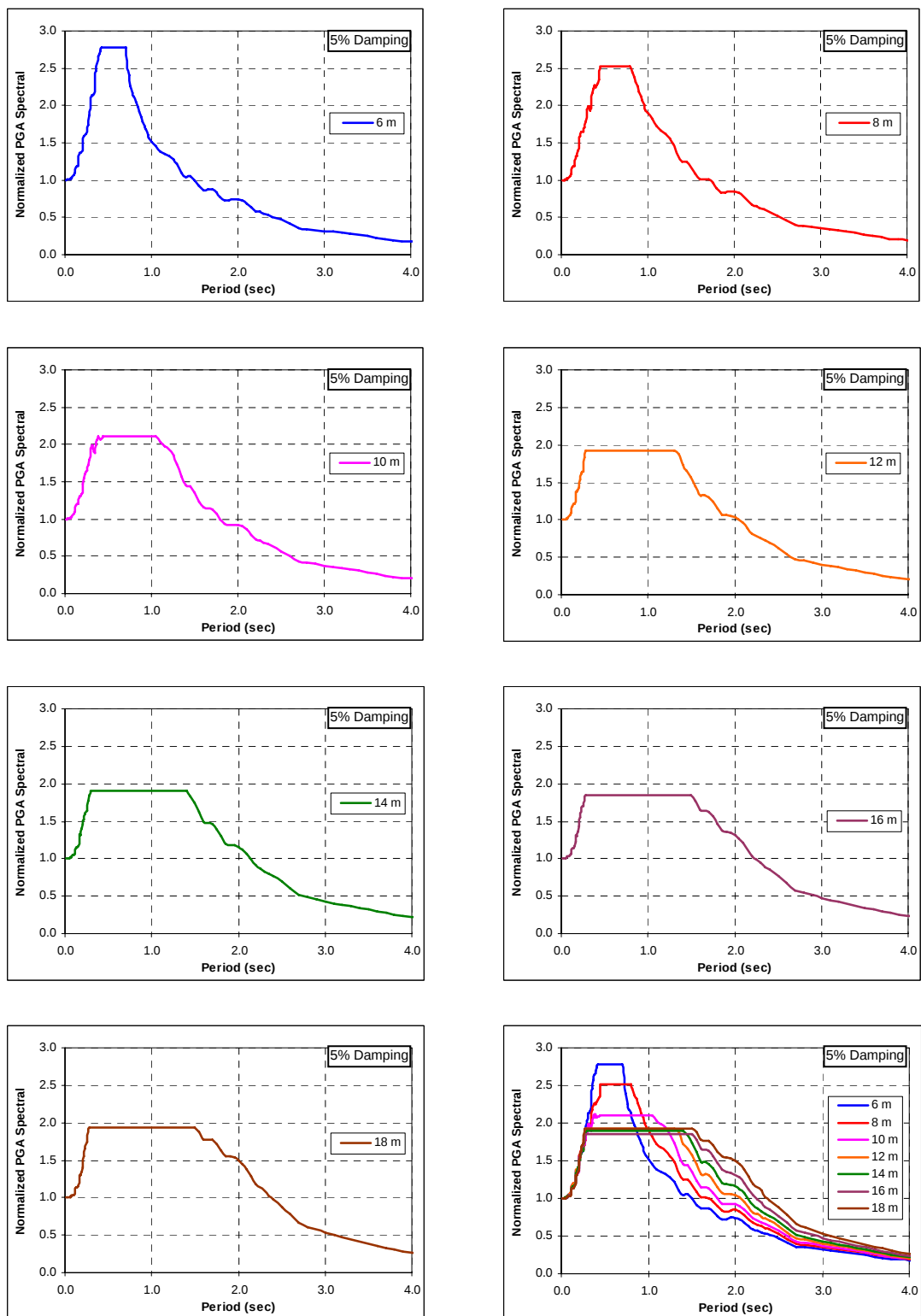
ภาพที่ 86 การเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) ต่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ กรณีปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ เท่ากับ 0.1g



ภาพที่ 87 การเปลี่ยนแปลงของ Predominant period เฉลี่ยของการตอบสนองคลื่นความแรงที่ผิวดิน ตามความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์



ภาพที่ 88 การเปลี่ยนแปลงของ Predominant period เฉลี่ยของการตอบสนองคลื่นความแรงที่ผิวดิน ตามความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน กรณีปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ เท่ากับ 0.1g



ภาพที่ 89 Normalized acceleration response spectrum และกำหนดช่วงคาบการตอบสนองด้วย
Bandwidth ของชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-18 เมตร

คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

การศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นแรงเฉือนกับคุณสมบัติดินในสนาม

การใช้สมการที่ได้จากการทดสอบ (Empirical equation) ที่เสนอไว้โดย Hardin and Black (1968) สำหรับชั้นดินทุกประเภท และของ Seed and Idriss (1970) สำหรับชั้นดินทราย เพื่อใช้หาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน (ค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด, G_{max} หรือ ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน, V_s) ดังสมการที่ได้เสนอไว้ในหัวข้อการตรวจเอกสารนั้น พบว่าสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน และชั้นทราย ไม่มีปัญหาสำหรับการเลือกใช้งานเนื่องจากทุกความสัมพันธ์ให้ผลของค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) ไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จากหลุมเจาะสำรวจบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประกอบด้วย บริเวณอาคารชีววิทยา โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ อาคารศูนย์เรียนรวม 4 และบริเวณกรมป่าไม้ (รายละเอียดข้อมูลหลุมเจาะสำรวจอยู่ในภาคผนวก ก) พบว่าสูงกว่าค่าที่ทดสอบได้ในสนามทั้งวิธี SASW และ MASWM บริเวณสนามอินทรีย์และบริเวณสนามรักบี้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยตำแหน่งของการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 90 และผลการศึกษาเปรียบเทียบแสดงในภาพที่ 91 ทั้งนี้ผลของความแตกต่างอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการเก็บตัวอย่างดินคงสภาพในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางและดินเหนียวแข็งมากไม่สามารถเก็บตัวอย่างได้โดยง่าย จึงยากที่จะนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับหาความสัมพันธ์กับผลการทดสอบในสนาม ซึ่งความสัมพันธ์ที่เสนอไว้ส่วนมากจะเหมาะสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนที่สามารถเก็บตัวอย่างดินคงสภาพเพื่อไปทดสอบในห้องปฏิบัติการได้อย่างถูกต้อง จึงทำให้สมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical equation) ที่เสนอไว้ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้แปลผลคุณสมบัติของดินในชั้นดินเหนียวแข็ง

จากปัญหาในการใช้สมการจากการทดลอง (Empirical equation) สำหรับชั้นดินเหนียวแข็ง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการทดสอบหาความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนามโดยวิธี MASWM บริเวณสนามรักบี้มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และโรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ดังแสดงในภาพที่ 92 และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับคุณสมบัติดินจากการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณสนามรักบี้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ (ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินก่อสร้างอาคารเรียนสูง 9 ชั้น แสดงไว้ในภาคผนวก ก) โดยตัวอย่างจากหลุมเจาะสำรวจบริเวณสนามรักบี้ได้ดำเนินการทดสอบตัวอย่างดินโดยห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ซึ่งข้อมูลผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

และการทดสอบวัดค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในสนามแสดงไว้ในตารางที่ 18 โดยการทดสอบได้เน้นความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ซึ่งได้จากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UC) ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเหมาะสมสำหรับตัวอย่างดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium stiff clay) สำหรับดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ไม่เหมาะสมเนื่องจากไม่สามารถเก็บตัวอย่างดินคงสภาพได้ จึงต้องหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) จากค่า SPT(N) ตามความสัมพันธ์ของ Terzaghi and Peck (1948) โดยค่า V_s ที่ได้จากการทดสอบ MASWM ได้ถูกนำมาหาความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) รวมทั้งค่า SPT(N) ของชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ดังแสดงในภาพที่ 93 โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (29) และ (30) ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่เสนอไว้โดย Ashford *et al.* (1997) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) ในดินเหนียวอ่อน พบว่าสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนจะให้ผลใกล้เคียงกันแต่หากใช้กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแข็งปานกลางขึ้นไปจะได้ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่สูงกว่าผลการทดสอบในสนาม ดังแสดงเปรียบเทียบในภาพที่ 93

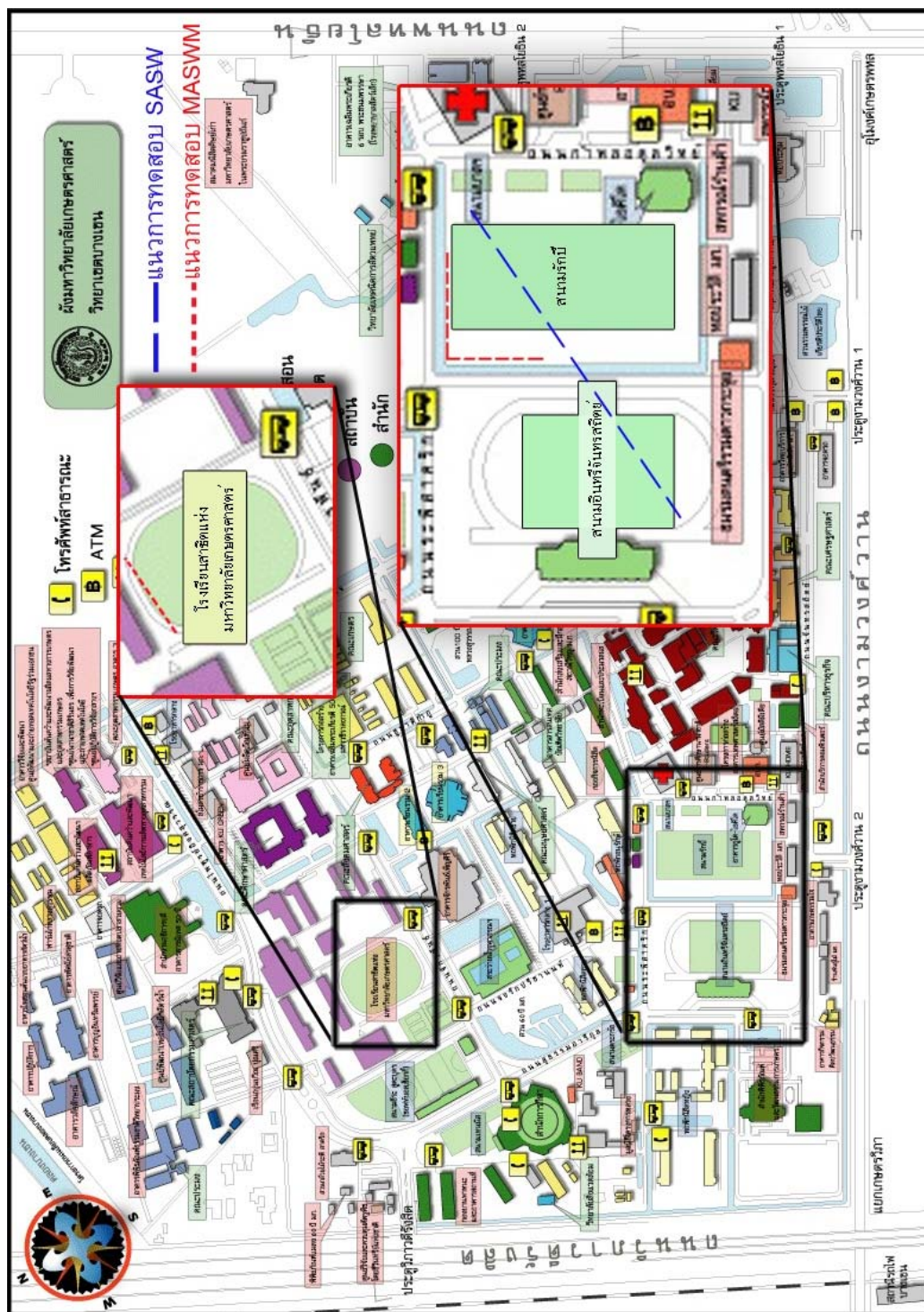
นอกจากนี้แล้วยังนำค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนดังกล่าวมาเพื่อหาความสัมพันธ์กับค่าความชื้นในดินตามธรรมชาติ ($\%w_n$) สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลางดังภาพที่ 94 และสมการที่ (31) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ง่ายเนื่องจากในข้อมูลหลุมเจาะสำรวจโดยทั่วไปจะมีค่าความชื้นในดินตามธรรมชาติ ($\%w_n$) ตามความลึกมากกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) เนื่องจากทดสอบได้ง่ายและมีความถูกต้องมากกว่า อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจไม่ถูกต้องเนื่องจากความเร็วคลื่นแรงเฉือนในตัวอย่างที่เป็นน้ำจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งอาจไม่มีความสัมพันธ์กันโดยตรง แต่อาจศึกษาถึงความสัมพันธ์ของดัชนีความเหนียว (PI) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพแทน ดังนั้นการศึกษาในหัวข้อนี้อาจมีข้อมูลที่เป็นตัวแทนน้อยเกินไปสำหรับการวิเคราะห์เพื่อความสัมพันธ์ในรูปสมการทั่วไป แต่สามารถใช้เป็นแนวทางศึกษาเพิ่มเติมข้อมูลต่อไปในอนาคต

$$V_s = 84.18 \cdot S_u^{0.23} \quad (\text{Soft to Medium clay}) \quad (29)$$

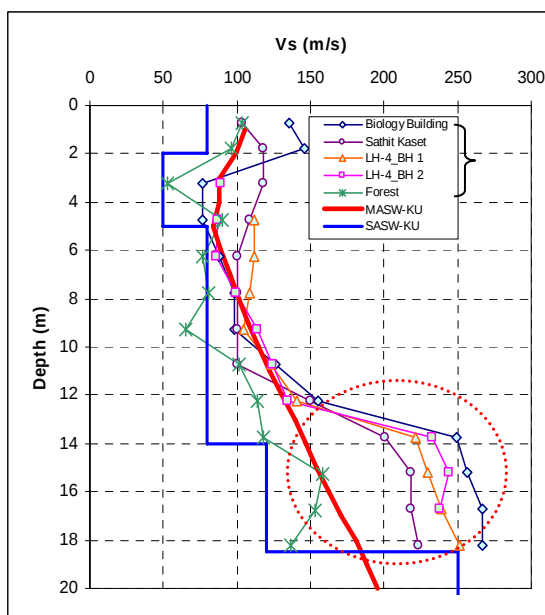
$$V_s = 75.55 \cdot N^{0.23} \quad (\text{Medium to Stiff clay}) \quad (30)$$

$$V_s = 632.32 \cdot w_n^{-0.45} \quad (31)$$

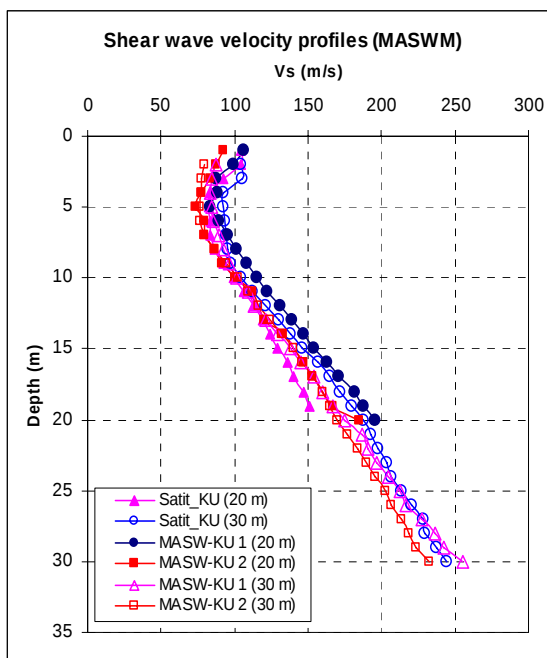
เมื่อ	V_s	คือ	ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (เมตร/วินาที)
	S_u	คือ	กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (ตัน/ตร.ม.)
	N	คือ	ค่า SPT (ครั้ง/ฟุต)
	w_n	คือ	ความชื้นในดินตามธรรมชาติ (%)



ภาพที่ 90 ตำแหน่งการทดสอบ SASW และ MASWM บริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 91 ความแตกต่างของความเร็วคลื่นแรงเฉือนระหว่างผลทดสอบในสนามด้วย SASW และ MASWM กับการคำนวณด้วย Empirical equation จากข้อมูลหลุมเจาะบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

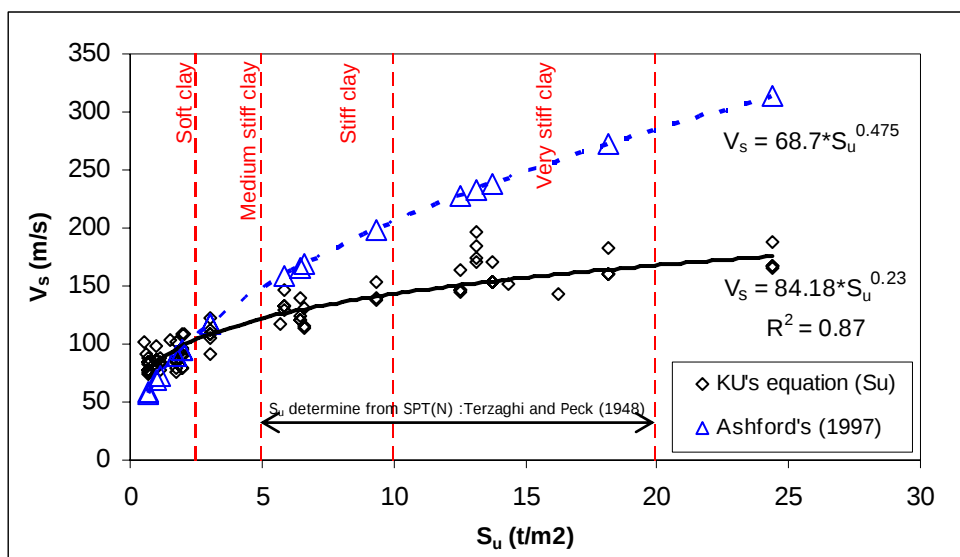


ภาพที่ 92 Shear wave velocity profiles ของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จากการทดสอบ MASWM

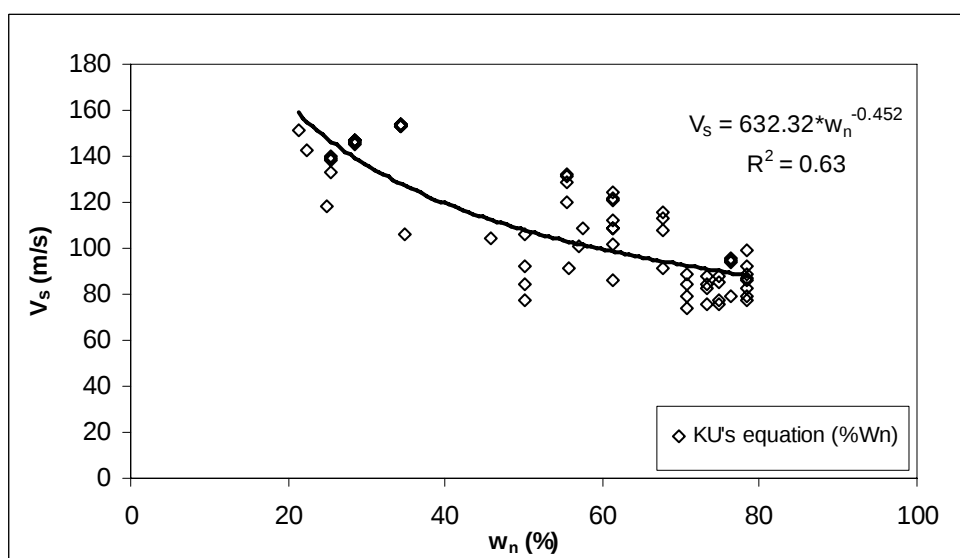
ตารางที่ 18 คุณสมบัติดินจากการเจาะสำรวจบริเวณสนามรักบี้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ
การแปลผลค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดย KU's equation (สมการที่ (29, 30)) และ
Ashford's (1997)

Depth (m)	γ_t (t/m ³)	%w _n	Su (t/m ²)	SPT (N)	PI	Vs (m/s) KU's equation	Vs (m/s) Ashford's equation
1.00	1.74	50.15	3.07		26.07	109	117
2.00	1.719	78.46	0.99		29.87	84	68
3.00	1.525	73.22	1.12		26.14	86	72
4.00	1.561	74.84	0.71		17.49	78	58
5.00	1.573	70.76	0.67		16.58	77	57
6.00	1.548	78.47	1.74		29.39	96	89
7.00	1.543	76.23	1.97		45.81	98	95
8.00	1.579	61.39	1.75		36.18	96	90
9.00	1.576	67.60	1.97		37.63	98	95
10.00	1.625	61.37			26.50		
11.00	1.611	55.39	3.07		29.34	109	117
12.00	1.913	25.50	6.62		24.08	130	169
13.00	1.964	28.38	6.43		57.07	129	166
14.00	2.025	34.25	5.88		42.97	127	159
15.00			9.38*	15		141	199
16.00			12.50*	20		150	228
17.00			13.75*	22		154	239
18.00			18.13*	29		164	272
19.00			24.38*	39		175	313
20.00			13.13*	21		152	233

* Su ที่ได้จากค่า SPT (N) ตามความสัมพันธ์ที่เสนอไว้โดย Terzaghi and Peck (1948)



ภาพที่ 93 ความสัมพันธ์ระหว่าง S_u กับ V_s ของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าจากสมการในการศึกษานี้และสมการที่เสนอโดย Ashford (1997)



ภาพที่ 94 ความสัมพันธ์ระหว่าง w_n (%) กับ V_s ของชั้นดินบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

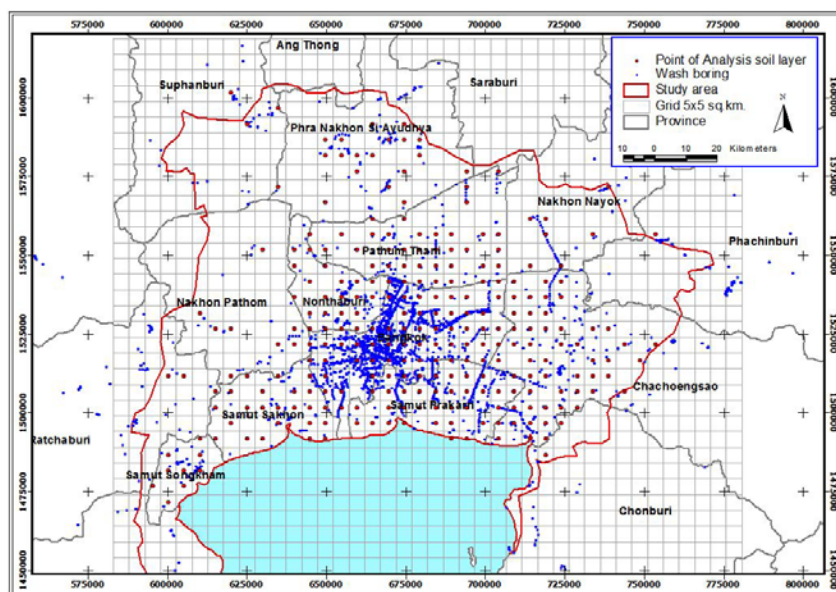
การวิเคราะห์ลักษณะการวางตัวของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

การวิเคราะห์นี้ดำเนินการโดยการศึกษาของศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และงานวิจัยของ เชิดพันธุ์ อมรกุล ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินทั่วพื้นที่ทำการศึกษาจำนวน 3,755 หลุมเจาะ ซึ่งกระจายอยู่ในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยดำเนินการวิเคราะห์ระดับความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนจากการเฉลี่ยคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในพื้นที่ย่อยขนาด 5x5 ตารางกิโลเมตร ดังภาพที่ 95 และจำแนกความแข็งแรงชั้นดินจากกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ซึ่งเมื่อจำแนกพื้นที่ศึกษาตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนได้ผลดังภาพที่ 96 โดยทำการจำแนกความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนทุกๆ 2 เมตร ซึ่งพบว่าความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่ศึกษาหนาตั้งแต่ 4.0-20.0 เมตร โดยบริเวณลุ่มแม่น้ำบางปะกงและบริเวณอ่าวไทยจะมีชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 14.0-20.0 เมตร และค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งถึงบริเวณขอบของพื้นที่แอ่งตะกอนดินเหนียว

การศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลเฉลี่ยคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินของหลุมเจาะสำรวจที่มีอยู่ในพื้นที่ตารางย่อยขนาด 5X5 ตารางกิโลเมตร เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้แปลเป็นค่าคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์โดยใช้สมการจากการทดลอง (Empirical equation) โดยชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งใช้สมการจากการศึกษา (สมการที่ (29, 30)) และชั้นทรายใช้สมการที่ (12) (Seed and Idriss, 1970) เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์แบบจำลองใน 1 มิติเชิงพื้นที่ต่อไป

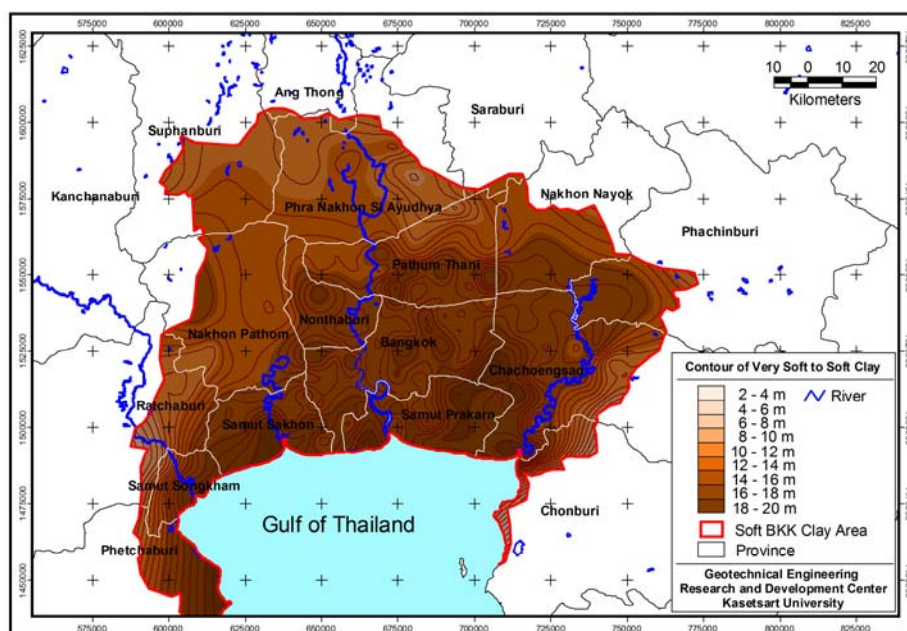
ผลการวิเคราะห์เชิงพื้นที่

การวิเคราะห์เชิงพื้นที่นี้ได้นำข้อมูลชั้นดินจากการเจาะสำรวจในพื้นที่ศึกษา ซึ่งเป็นข้อมูลคุณสมบัติดินเฉลี่ยในพื้นที่ย่อย 5X5 ตารางกิโลเมตร โดยการกำหนดตำแหน่งสำหรับเป็นตัวแทนการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ที่จะพิจารณาให้ตำแหน่งกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นที่จำนวน 39 ตำแหน่ง (ภาพที่ 97) ซึ่งมีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 6-18 เมตร เพื่อให้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้านี้ และใช้คลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ โดยมีรายละเอียดในตารางที่ 15 เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ เนื่องจากแรงแผ่นดินไหว



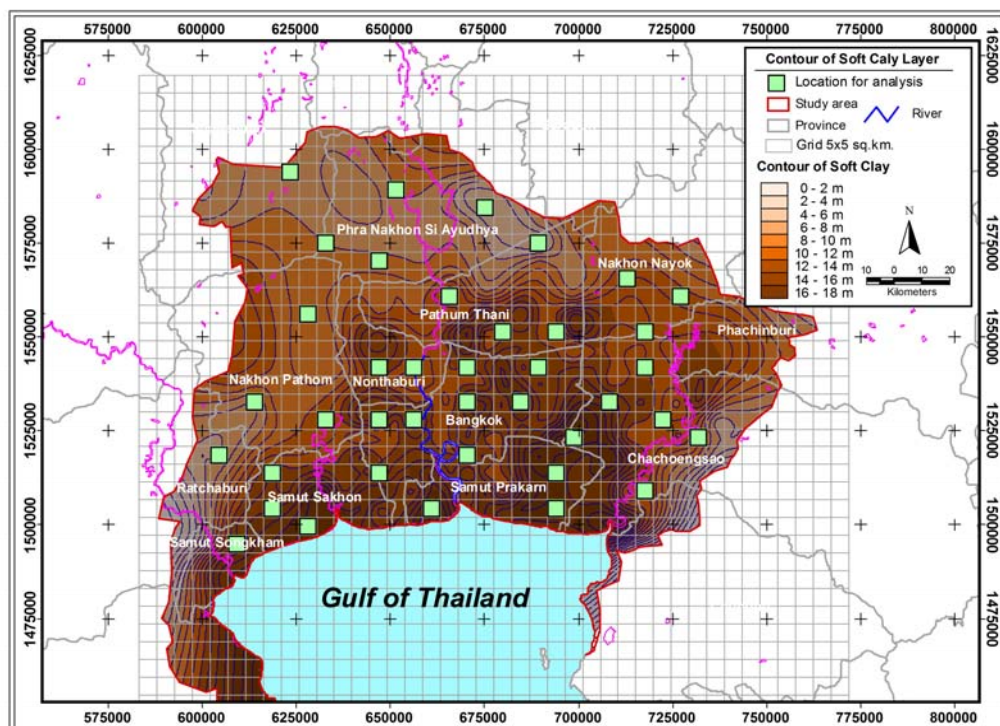
ภาพที่ 95 ตำแหน่งข้อมูลหลุมเจาะและตำแหน่งกริดสำหรับวิเคราะห์ลักษณะการวางตัวของชั้นดิน

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 96 เส้นชั้นความลึกของชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 97 ตำแหน่งตัวแทนสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพื้นที่

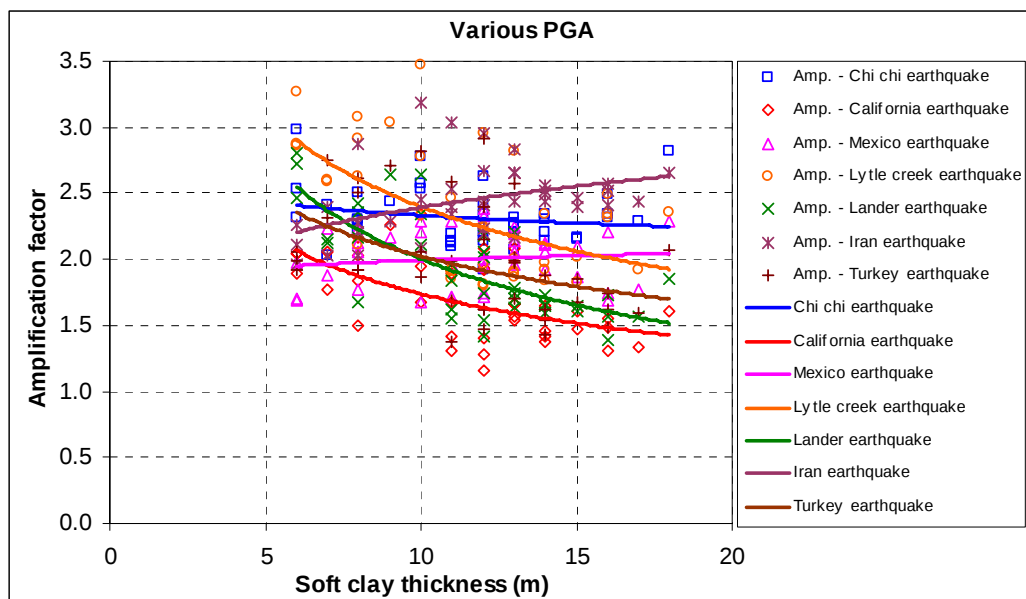
การขยายความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณผิวดิน

จากผลการศึกษาพบว่า การขยายความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณผิวดินของการศึกษาเชิงพื้นที่ของชั้นดินในพื้นที่ศึกษานั้น สอดคล้องกับผลการศึกษาอิทธิพลของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนในแบบจำลองชั้นดิน โดยการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) จะมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งการขยายจะมากขึ้นเมื่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนลดลง แต่จะมีขนาดของการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) แตกต่างกันไปตามลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว (ภาพที่ 98) โดยการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ยของคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 7 เหตุการณ์ พบว่ามีการขยาย 1.8 เท่า บริเวณที่ชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนา 18 เมตร และเพิ่มขึ้นเป็น 2.5 เท่า บริเวณที่ชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนาลดลงเหลือ 6 เมตร ดังภาพที่ 99 และเมื่อนำผลการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) ดังกล่าวของตำแหน่งตัวแทนการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ 39 ตำแหน่ง สามารถแสดงเป็นแผนที่การขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) ได้ดังภาพที่ 102

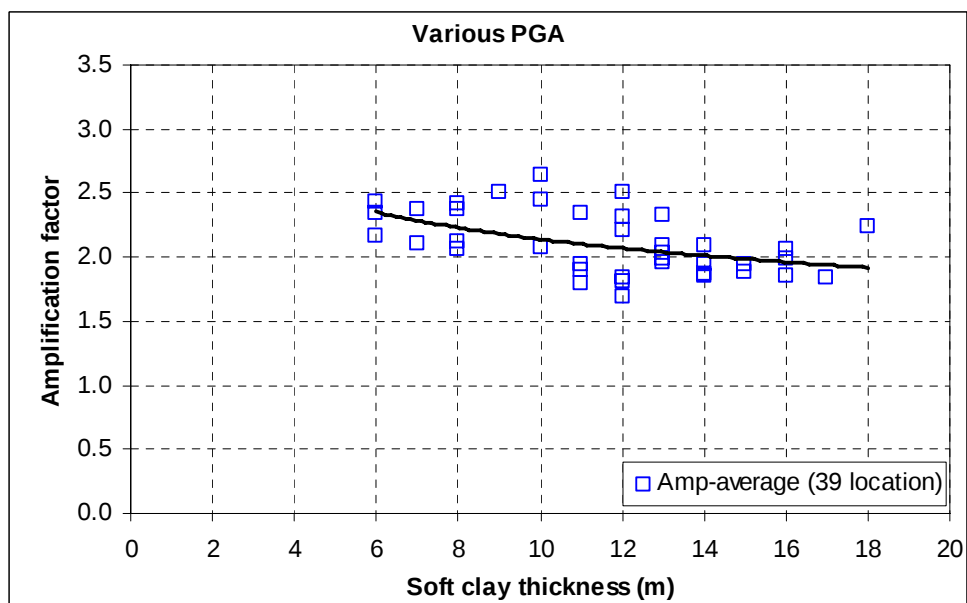
นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) ของคลื่นแผ่นดินไหวที่เป็นลักษณะคลื่นในชั้นดิน (Iran earthquake) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยแตกต่างจากกรณีคลื่นแผ่นดินไหวเหตุการณ์อื่นๆ ซึ่งเป็นคลื่นที่อยู่ในชั้นหินและชั้นดินแข็ง

นอกจากนี้เมื่อมีการปรับขนาดคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 7 เหตุการณ์ให้มีขนาด PGA เท่ากับ 0.10g เนื่องจากพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ที่มีค่าอัตราเร่งที่ผิวดินมีค่าอยู่ระหว่าง 0.05g-0.10g (Warnitchai and Lisantono, 1996) โดยที่ค่าเฉลี่ยของ PGA ของแผ่นดินไหวทั้ง 7 เหตุการณ์มีค่าประมาณ 0.06g และต้องการศึกษาการตอบสนองของชั้นดินตามลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่แตกต่างกันแต่มีความรุนแรงเท่ากันทุกเหตุการณ์ พบว่าเมื่อความรุนแรงของแผ่นดินไหวเพิ่มขึ้นขนาดของการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดินจะลดลง (ภาพที่ 99-100) โดยสามารถเปรียบเทียบได้จากภาพที่ 102 และภาพที่ 103

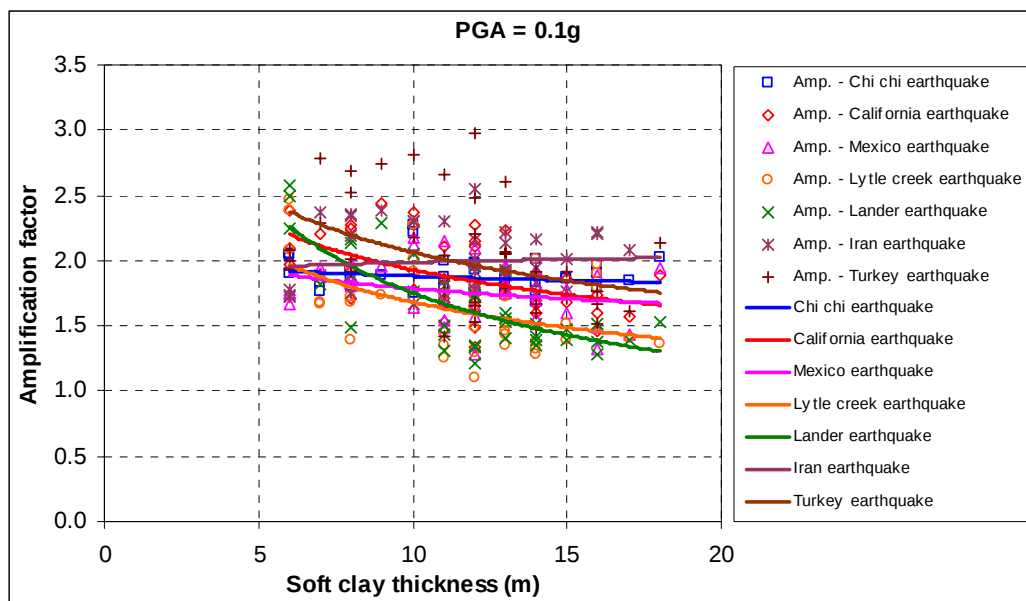
เช่นเดียวกันกับกรณีแรก การเปลี่ยนแปลงการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) ของคลื่นเหตุการณ์ Iran earthquake จะมีการเพิ่มขึ้นตามความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ต่ำกว่ากรณีแรก ส่วนการเปลี่ยนแปลงการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) ของคลื่นแผ่นดินไหวอีก 6 เหตุการณ์ จะลดลงเมื่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มมากขึ้น



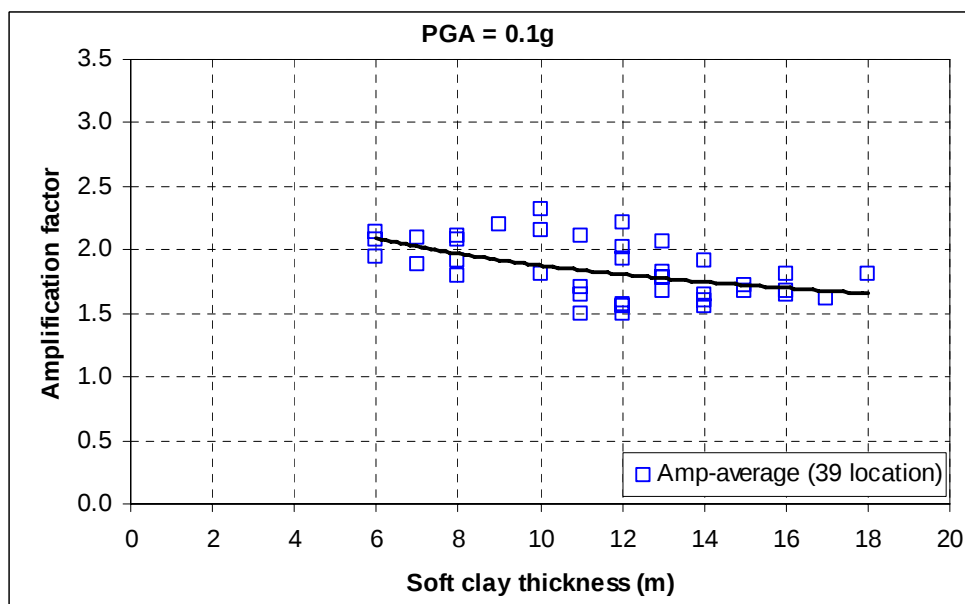
ภาพที่ 98 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน กับความหนาชั้นดิน เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์



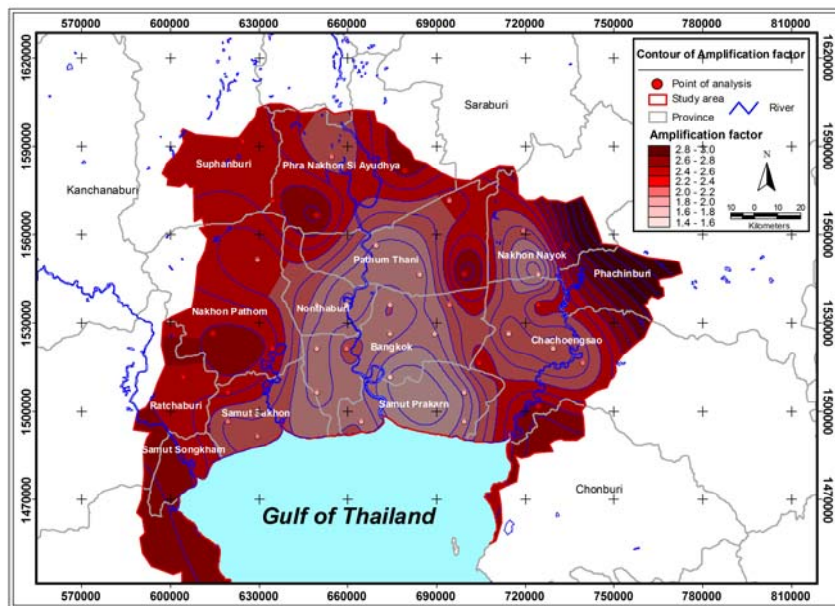
ภาพที่ 99 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายความเร่งที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ย กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา



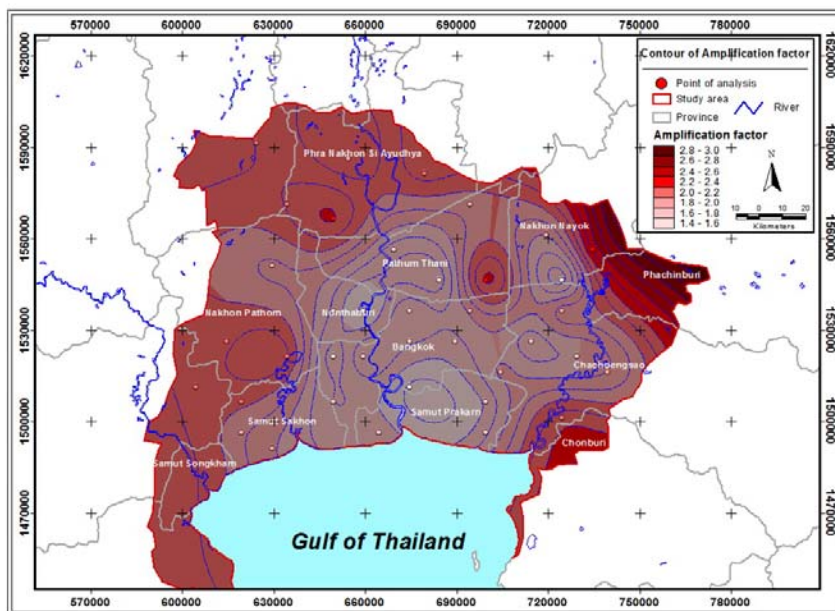
ภาพที่ 100 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงการขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดินกับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ กรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1g



ภาพที่ 101 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายความเร่งที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ย กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา กรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1g



ภาพที่ 102 แผนที่การขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ยจากผลการตอบสนองของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ จากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์



ภาพที่ 103 แผนที่การขยายความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) เฉลี่ยจากผลการตอบสนองของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ จากคลื่นแผ่นดินไหวกรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1g

คาบเด่นของคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณผิวดิน

จากการศึกษาคาบเด่น (Predominant period) ของการสั่นไหวที่ผิวดินจากการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ตามข้อมูลในตารางที่ 15 พบว่าบริเวณพื้นที่ศึกษามีคาบการสั่นไหวส่วนมากที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนที่เพิ่มมากขึ้น (ภาพที่ 104) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.4-0.8 วินาที ของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 6-18 เมตร ดังภาพที่ 105 โดยคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดินจะแปรผันตรงกับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอิทธิพลของชั้นดินเหนียวอ่อนในหัวข้อก่อนหน้านี้ (ภาพที่ 87-88) และจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างคาบการสั่นไหวกับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนได้ดังสมการที่ (31)

สำหรับกรณีการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ที่มีการปรับให้มีขนาด PGA เท่ากับ 0.1g เช่นเดียวกันกับกรณีของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเร่งสูงสุดที่ผิวดิน พบว่าคาบการสั่นไหวที่ผิวดินจะมีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีแรกที่คลื่นแผ่นดินไหวมี PGA อยู่ในช่วงระหว่าง 0.026g-0.134g ซึ่งส่วนมากจะมีค่าน้อยกว่า 0.1g โดยผลการวิเคราะห์แสดงไว้ดังภาพที่ 106 และสำหรับค่าคาบการสั่นไหวเฉลี่ยของกรณีนี้อยู่ในช่วง 0.5-1.0 วินาที (ภาพที่ 107) และมีความสัมพันธ์กับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนดังสมการที่ (32)

$$T_p = 0.192 \cdot H_s^{0.47} \quad (31)$$

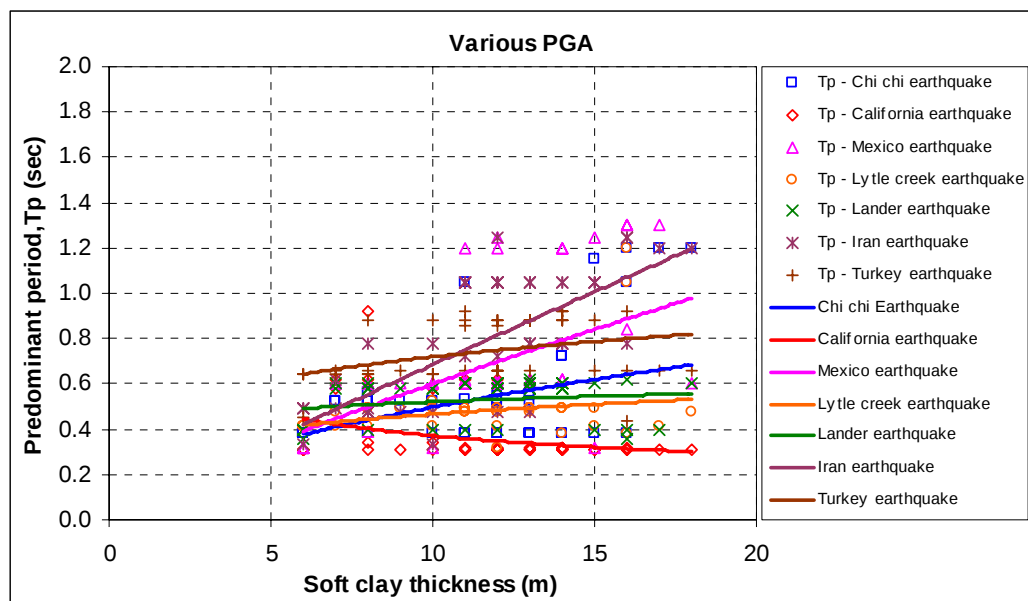
$$T_p = 0.188 \cdot H_s^{0.55} \quad (32)$$

โดย	T_p	คือ	คาบการสั่นไหว (Predominant period) (วินาที)
	H_s	คือ	ความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน (เมตร)

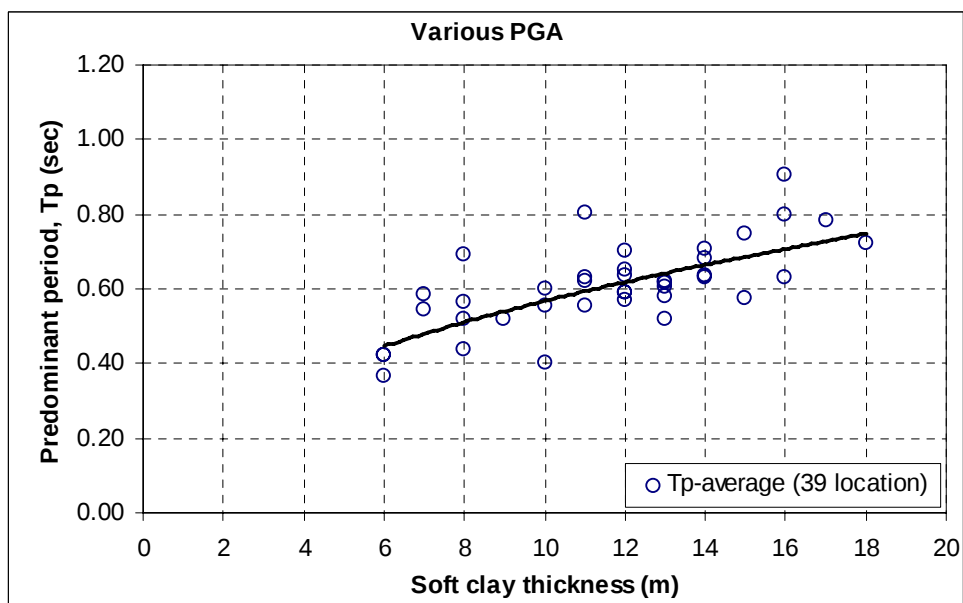
ทั้งนี้จากผลการศึกษาดังกล่าว (ภาพที่ 104 และ 106) ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของคาบการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นไม่เท่ากันเมื่อความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มมากขึ้น โดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของคาบการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) จะแตกต่างกันไปตามลักษณะของคลื่นที่อยู่ในตัวกลางต่างกัน ซึ่งคลื่นที่อยู่ในชั้นดิน (Iran earthquake) จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาจะเป็นลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่อยู่ในชั้นดินแข็ง (Chi-chi,

Mexico, Lander และ Turkey earthquake) และคลื่นแผ่นดินไหวจากชั้นหินจะมีการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด (California, Lytle creek earthquake) อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเห็นว่าเส้นแนวโน้มของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อยู่ในชั้นดินแข็งน่าจะเป็นตัวแทนของการสั่นไหวได้ เนื่องจากในการศึกษาระดับความลึกของชั้นเสมือนหินที่เหมาะสม (120 เมตร) นั่นก็เป็นระดับชั้นดินแข็งอยู่ ซึ่งค่าเฉลี่ยของคาบการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) ของทั้ง 2 กรณีก็อยู่ในช่วงของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อยู่ในชั้นดินแข็งเช่นเดียวกัน

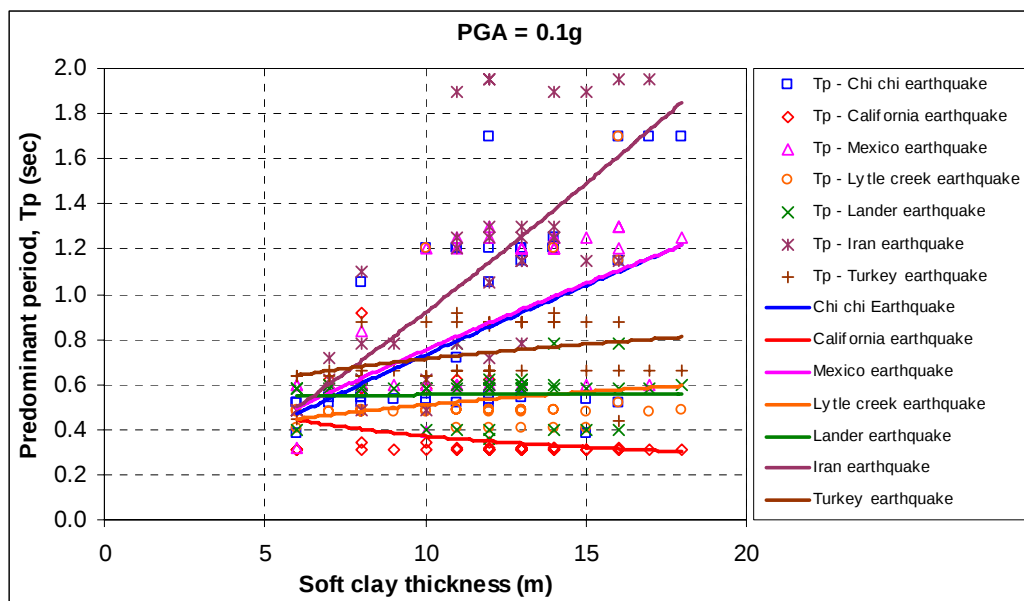
สำหรับแผนที่ของคาบการสั่นไหวที่ผิวดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 2 กรณีที่แสดงในภาพที่ 109 และ 110 พบว่าลักษณะของแผนที่จะคล้ายคลึงกัน โดยที่แผนที่ของคาบการสั่นไหวที่เกิดจากคลื่นแผ่นดินไหวขนาดความรุนแรง (PGA) เท่ากับ 0.10g (ภาพที่ 110) จะมีคาบการสั่นไหวจะสูงมากขึ้นเนื่องจากความรุนแรงของแผ่นดินไหวสูงขึ้น (PGA) กว่ากรณีแรก (ภาพที่ 109) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tuladhar *et al.* (2004) โดยที่ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะมีคาบการสั่นไหวของพื้นที่ศึกษา 0.4-1.2 วินาที นอกจากนี้แล้วงานวิจัยดังกล่าวยังเสนอไว้ว่าคาบการสั่นไหวจะเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของแผ่นดินไหว (PGA) ที่สูงขึ้นอีกด้วยซึ่งงานวิจัยนี้ก็ได้อผลการวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกัน



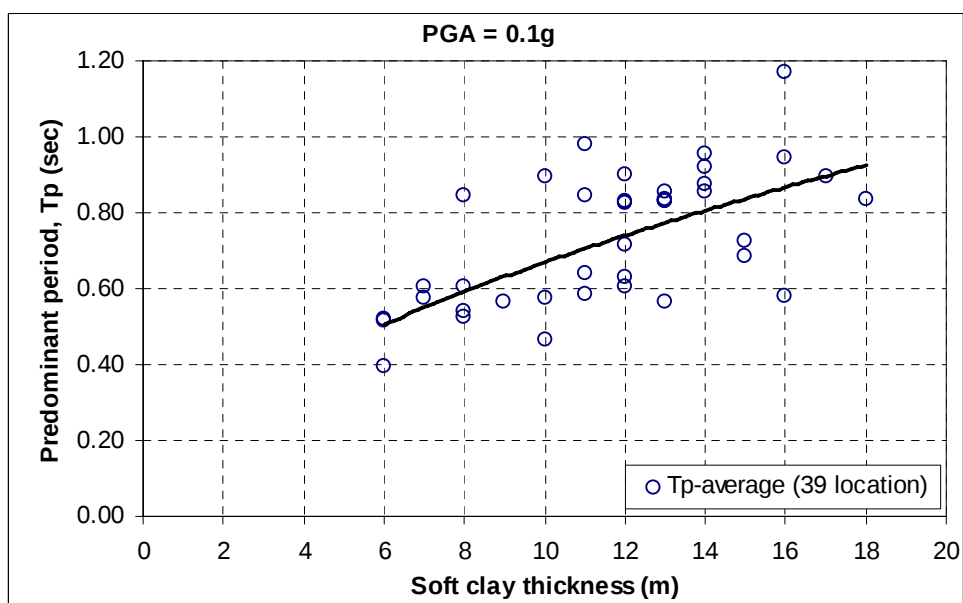
ภาพที่ 104 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน กับความหนาชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์



ภาพที่ 105 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเด่นของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดินเฉลี่ย กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา

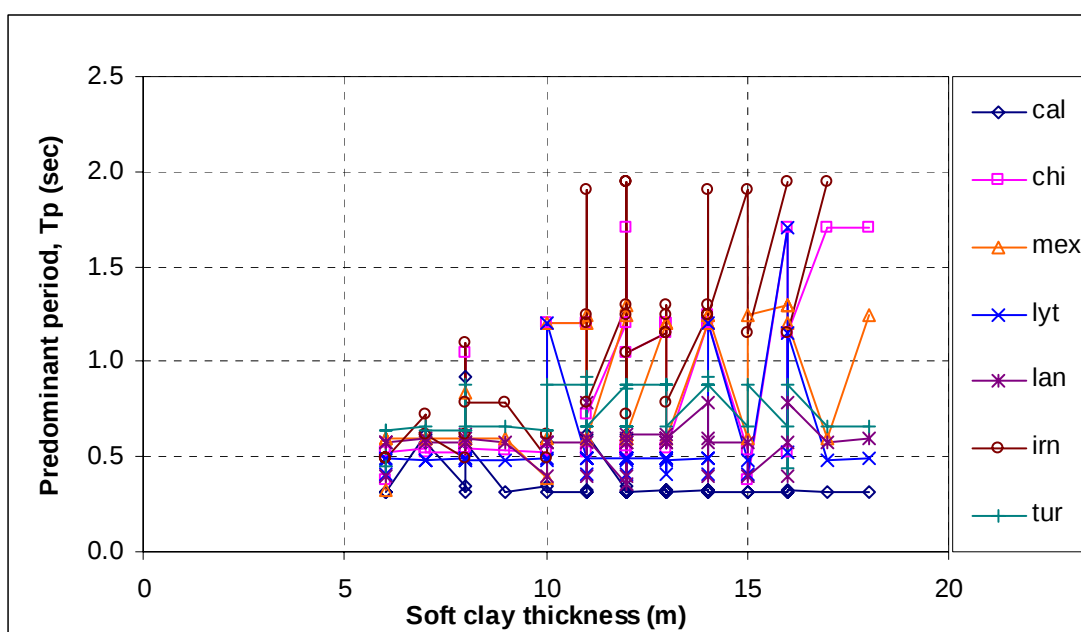


ภาพที่ 106 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน กับความหนาชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ กรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1g

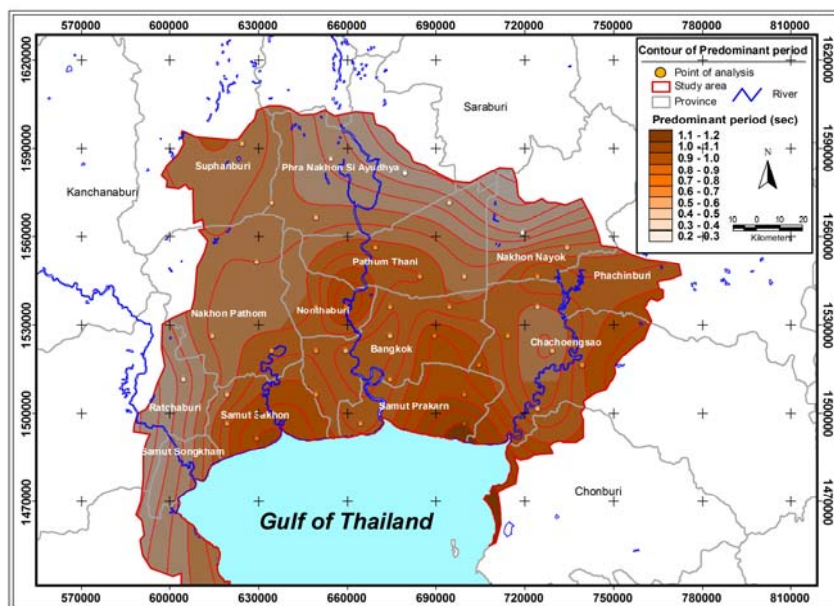


ภาพที่ 107 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเด่นของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดินเฉลี่ย กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนบริเวณพื้นที่ศึกษา กรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ เท่ากับ 0.1g

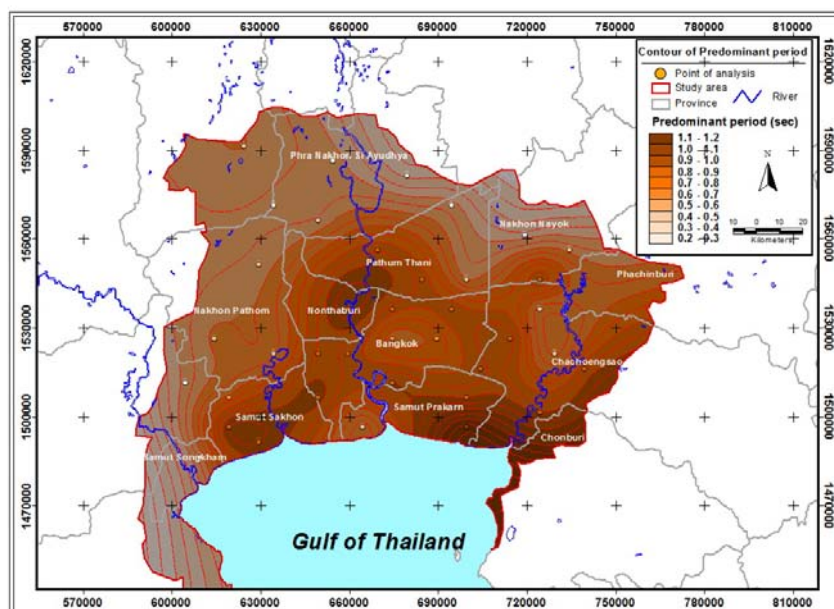
นอกจากนั้นแล้วหากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของคาบการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) ในแต่ละตำแหน่งแล้วพบว่าในช่วงที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6.0-10.0 เมตร จะมีการเปลี่ยนแปลงของคาบการสั่นไหวที่ผิวดินน้อยและค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มสูงขึ้นกว่า 10 เมตร ลักษณะของคาบการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) จะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มสูงขึ้นตามความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน โดยจะแตกต่างกันตามลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยที่คลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดจากสถานีที่อยู่ในชั้นดินจะมีการเพิ่มขึ้นของคาบการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) สูงกว่าคาบการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) ที่เกิดจากคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดจากสถานีในชั้นดินแข็งและชั้นหิน ดังแสดงในภาพที่ 108



ภาพที่ 108 ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์ที่ปรับให้มีขนาด PGA เท่ากับ 0.10g



ภาพที่ 109 แผนที่คาบเด่นของการสั่นไหวบริเวณผิวดิน (Predominant period) เฉลี่ย จากการตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์



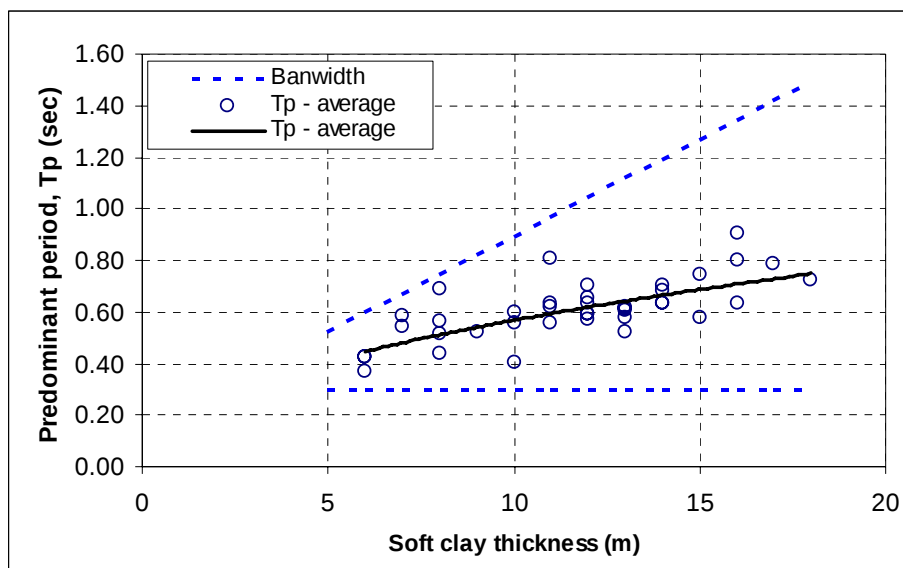
ภาพที่ 110 แผนที่คาบเด่นของการสั่นไหวบริเวณผิวดิน (Predominant period) เฉลี่ย จากการตอบสนองต่อคลื่นไหวกรณีการปรับขนาด PGA ของคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์เท่ากับ 0.1g

สเปกตรัมการตอบสนองสำหรับการออกแบบ

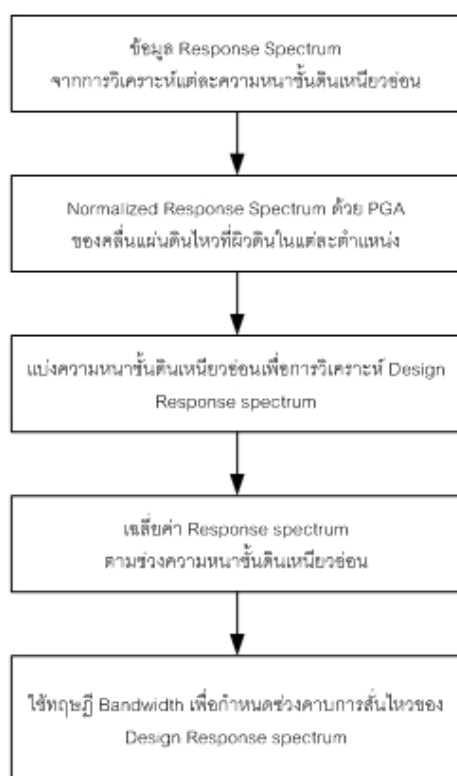
จากผลการวิเคราะห์โดยคลื่นแผ่นดินไหวหลายรูปแบบ สามารถนำมาสรุปได้สเปกตรัมการตอบสนองเพื่อการออกแบบทางวิศวกรรมตามพื้นที่ โดยมีช่วงความหนาแน่นดินเหนียวอ่อนแตกต่างกัน ซึ่งได้จากการเฉลี่ยกราฟสเปกตรัมการตอบสนองในแต่ละความหนาแน่นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และใช้ Bandwidth (ภาพที่ 5) เพื่อกำหนดช่วงของชุดความถี่ตอบสนอง (ช่วงของคาบการตอบสนอง) ดังภาพที่ 112 ซึ่งพบว่าช่วงความกว้างของคาบการสั่นไหวจากการใช้ Bandwidth จะเพิ่มมากขึ้นตามความหนาแน่นของดินเหนียวอ่อนเพิ่มมากขึ้น แต่ขนาดของการขยายอัตราเร่งจะลดลงดังภาพที่ 111 ซึ่งจะเห็นได้จากสเปกตรัมการตอบสนองที่เสนอให้ใช้สำหรับการออกแบบ (Design response spectrum) ทั้ง 4 ลักษณะดังภาพที่ 113 ถึง 116 (ข้อมูลสำหรับสร้าง Design response spectrum แสดงไว้ในภาคผนวก ก)

เมื่อวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหว 7 เหตุการณ์โดยปรับให้มีขนาด PGA เท่ากับ 0.1g พบว่าสเปกตรัมการตอบสนองสำหรับการออกแบบ (Design response spectrum) ไม่แตกต่างจากกรณีแรกมากนักโดยจะมีขนาดความกว้างของช่วงคาบการสั่นไหวสูงกว่าเล็กน้อยในกรณีชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 13-15 เมตร และ 16-18 เมตร นอกจากนี้ขนาดของการขยายคลื่นแผ่นดินไหวจะลดลงเพียงเล็กน้อยกรณีชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 16-18 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 117

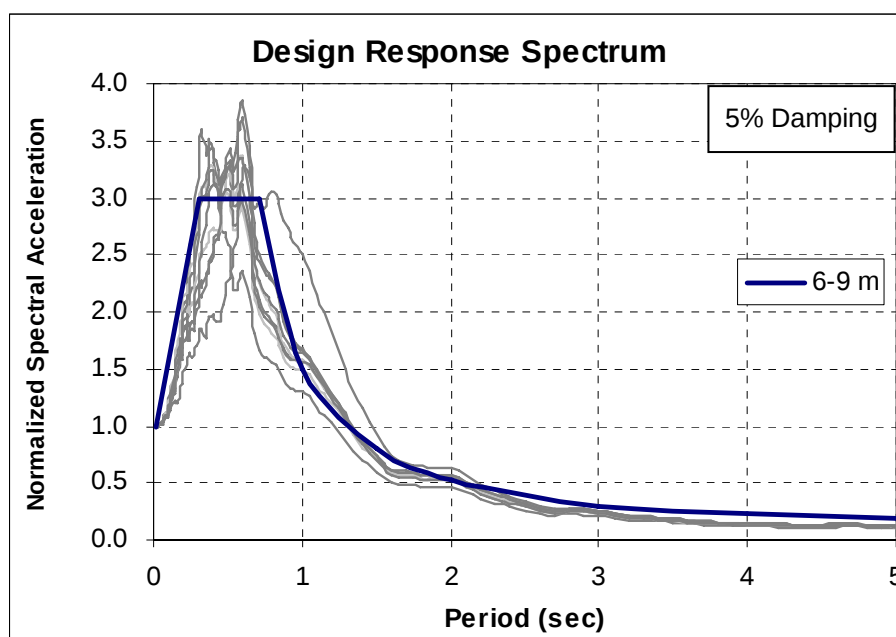
ผลการศึกษาโดยสรุปในภาพที่ 115 แสดง Design response spectrum ทุกช่วงความหนาแน่นของชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่ศึกษามีช่วงคาบการสั่นไหวระหว่าง 0.3-0.7 วินาที 0.3-1.0 วินาที 0.3-1.3 วินาที และ 0.3-1.5 วินาที และขนาดของการขยายคลื่นแผ่นดินไหวเท่ากับ 3.0, 2.75, 2.5 และ 2.5 สำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-9 เมตร 10-12 เมตร 13-15 เมตร และ 16-18 เมตร ตามลำดับ สุดท้ายผลการศึกษาสรุปได้ว่าชั้นดินที่มีความหนาตามลำดับดังกล่าวจะมีโอกาสเกิดการสั่นพ้องกับอาคารสูง 3-7, 3-10, 3-13, 3-15 ชั้นตามลำดับ



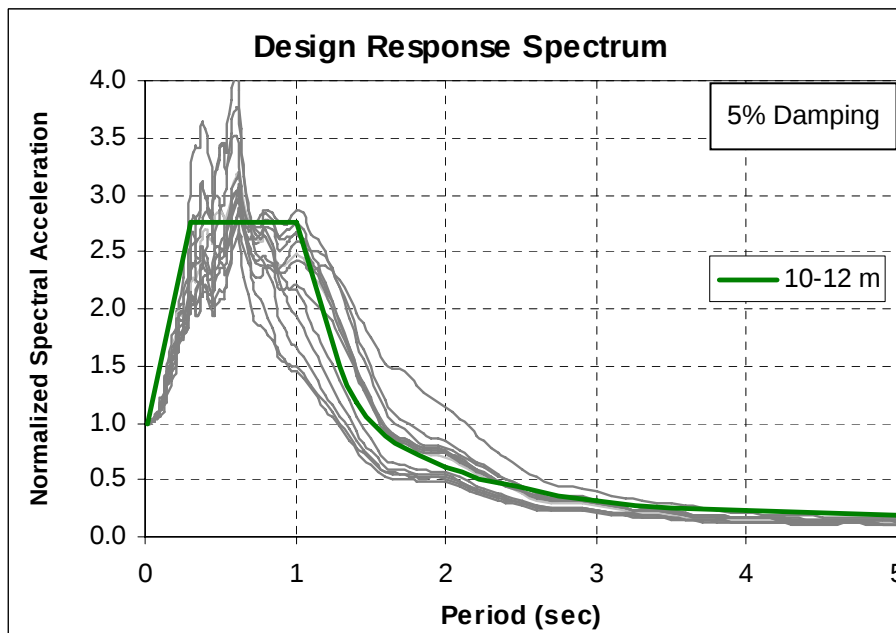
ภาพที่ 111 ความสัมพันธ์ของการสั่นไหวจากทฤษฎี Bandwidth กับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน



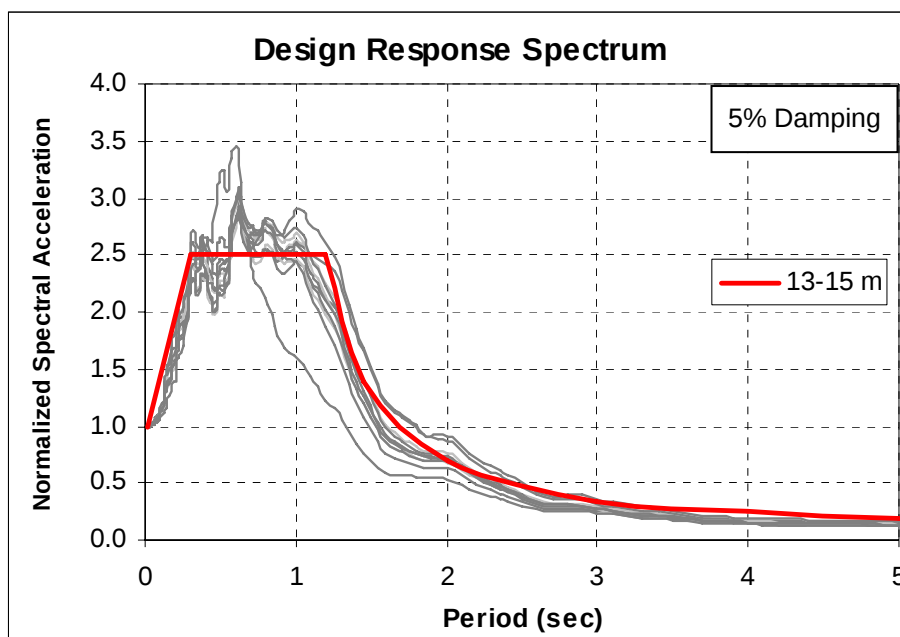
ภาพที่ 112 แผนภาพแสดงลำดับการวิเคราะห์ Design response spectrum



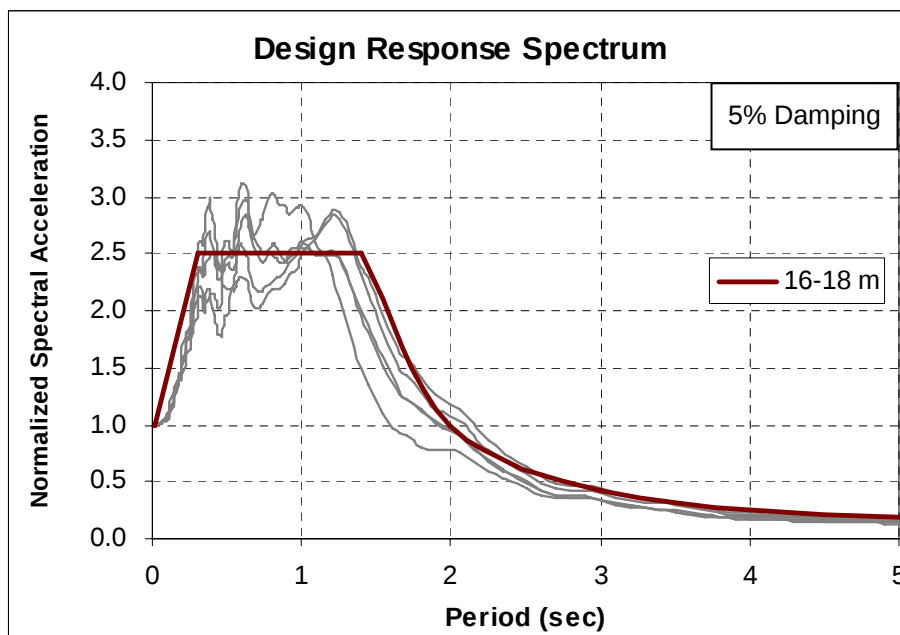
ภาพที่ 113 Design response spectrum ที่เสนอสำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 6-9 เมตร



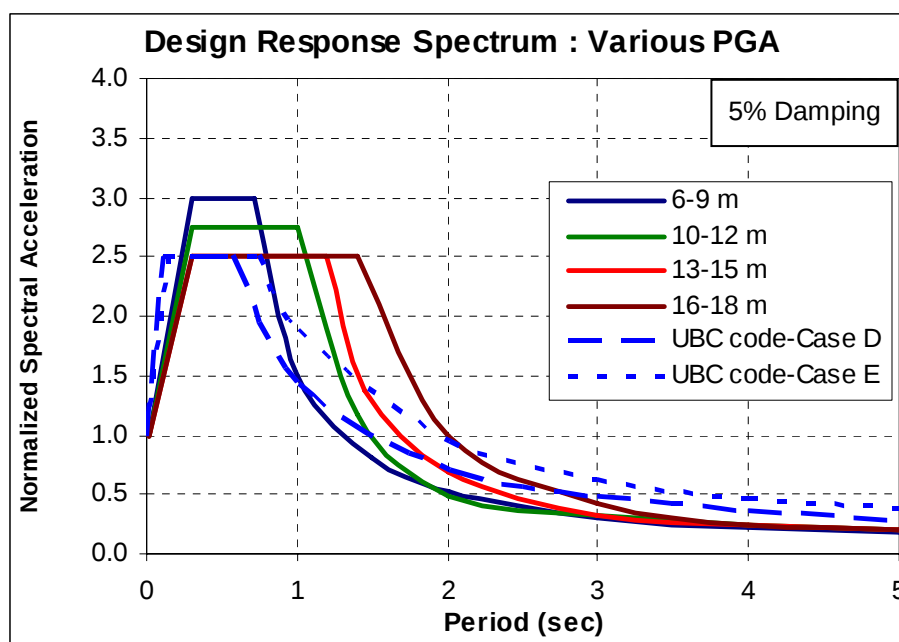
ภาพที่ 114 Design response spectrum ที่เสนอสำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 10-12 เมตร



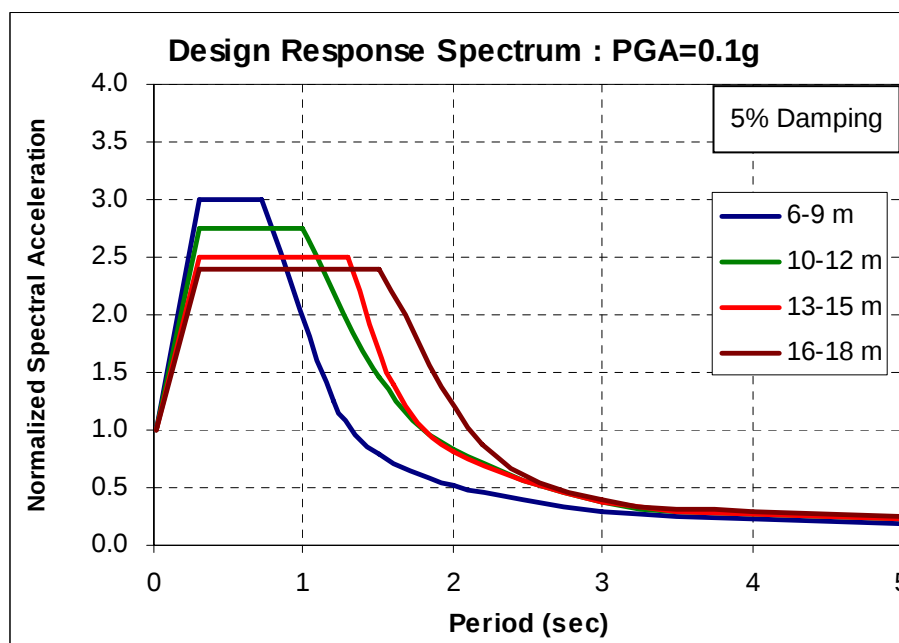
ภาพที่ 115 Design response spectrum ที่เสนอสำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 13-15 เมตร



ภาพที่ 116 Design response spectrum ที่เสนอสำหรับพื้นที่ชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 16-18 เมตร



(ก)



(ข)

ภาพที่ 117 Design response spectrum จากผลการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวในพื้นที่ศึกษา (ก) กรณีคลื่นแผ่นดินไหวมี PGA แตกต่างกัน
(ข) กรณีคลื่นแผ่นดินไหวมี PGA เท่ากับ 0.1g

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ความสัมพันธ์ของโมดูลัสเฉือนและความหน่วง กับความเครียด สำหรับวิเคราะห์ในแบบจำลอง ใช้ของ Vucetic and Dorby (1991) สำหรับดินเหนียว และที่เสนอไว้โดย Seed and Idriss (1970) สำหรับดินทราย โดยแสดงภาพสรุปคุณสมบัติดินและลักษณะของแบบจำลอง แสดงไว้ในภาพที่ 118

Soil type	Soil properties	G_{max} or V_s equation	G and ξ curve
 Very soft to soft clay	$\gamma_t \sim 1.5-1.6 \text{ t/m}^2$ $S_u \sim 1.0-2.5 \text{ t/m}^2$ $V_s \sim 60-100 \text{ m/s}$	$V_s = 84.18 * S_u^{0.23}$ (This Research)	Vucetic and Dorby (1991) PI=50
 Medium to stiff clay	$\gamma_t \sim 1.6-1.7 \text{ t/m}^2$ $S_u \sim 2.5-5.0 \text{ t/m}^2$ $V_s \sim 120-150 \text{ m/s}$	$V_s = 84.18 * S_u^{0.23}$ $V_s = 75.55 * N^{0.23}$ (This Research)	Vucetic and Dorby (1991) PI=30
 1 st Sand	$\gamma_t \sim 1.9-2.0 \text{ t/m}^2$ SPT $\sim 10-30 \text{ (N/ft)}$ $V_s \sim 200-250 \text{ m/s}$	$G_{max} = 1000 * k_{2max} * \sigma'_m^{0.5}$ Seed and Idriss (1997)	Seed and Idriss (1997)
 Very stiff clay	$\gamma_t \sim 1.7-1.8 \text{ t/m}^2$ $S_u \sim 5.0-10.0 \text{ t/m}^2$ $V_s \sim 250-300 \text{ m/s}$	$G_{max} = 3230 * \frac{(2.97-e)^2}{1+e} OCR^k \sigma'_m^{0.5}$ Hardin and Black (1968)	Vucetic and Dorby (1991) PI=15
 2 nd Sand	$\gamma_t \sim 2.0-2.1 \text{ t/m}^2$ SPT $\sim 30-50 \text{ (N/ft)}$ $V_s \sim 300-350 \text{ m/s}$	$G_{max} = 1000 * k_{2max} * \sigma'_m^{0.5}$ Seed and Idriss (1997)	Seed and Idriss (1997)
 Hard clay	$\gamma_t \sim 1.9-2.0 \text{ t/m}^2$ $S_u > 10 \text{ t/m}^2$ $V_s \sim 350 \text{ m/s}$	$G_{max} = 3230 * \frac{(2.97-e)^2}{1+e} OCR^k \sigma'_m^{0.5}$ Hardin and Black (1968)	Vucetic and Dorby (1991) PI=15
 3 rd Sand	$\gamma_t \sim 2.1 \text{ t/m}^2$ SPT $> 50 \text{ (N/ft)}$ $V_s \sim 350-400 \text{ m/s}$	$G_{max} = 1000 * k_{2max} * \sigma'_m^{0.5}$ Seed and Idriss (1997)	Seed and Idriss (1997)

ภาพที่ 118 ลักษณะของชั้นดินทั่วไปสำหรับใช้วิเคราะห์ในแบบจำลอง

2. จากการศึกษาอิทธิพลของระดับชั้นเสมือนหินที่เหมาะสม พบว่าระดับความลึกของชั้นเสมือนหินสำหรับใช้เป็นชั้นหินโผล่ (Outcrop) ของคลื่นแผ่นดินไหวนั้นอยู่ที่ระดับ 120 เมตร ซึ่งเป็นระดับที่มีค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนประมาณ 400 m/s ซึ่งเป็นตรงกับความเร็วคลื่นแรงเฉือน

ของ “Engineering Bedrock” และเนื่องจากที่รับความลึกตั้งแต่ 120 เมตรลงไปมีการเปลี่ยนแปลงของการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) และสเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน (Response acceleration spectrum) ไม่แตกต่างกันมาก

3. อิทธิพลของชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นทรายระดับลึก (ใต้ชั้นทรายชั้นที่ 3 ลงไป) จากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการตอบสนองของชั้นดินใน 1 มิติ เนื่องจากผลการวิจัยพบว่าไม่มีความแตกต่างกันของการเปลี่ยนแปลงการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) และสเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน (Response acceleration spectrum) แต่สำหรับการเปลี่ยนแปลงของ %-Shear strain แตกต่างกันเล็กน้อยตามความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งที่แทรกตัวอยู่ และคุณสมบัติดินทางพลศาสตร์ที่แตกต่างกันของวัสดุระหว่างดินเหนียวกับดินทราย

4. ผลการศึกษาค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุดหรือความเร็วคลื่นแรงเฉือนสำหรับชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง พบว่าสมการที่ใช้สำหรับหาค่าดังกล่าวจะให้ผลที่สูงกว่าค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนที่ทดสอบในสนามจากวิธี SASW และ MSAM

5. สมการสำหรับใช้ประมาณค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลางจากกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) สำหรับดินเหนียวแข็งจากค่า SPT (N) และดินทั่วไปจากความชื้นตามธรรมชาติ (w_n) ที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ

$$V_s = 84.18 \cdot S_u^{0.23} \quad (\text{Soft to Medium clay})$$

$$V_s = 75.55 \cdot N^{0.23} \quad (\text{Medium to Stiff clay})$$

$$V_s = 632.32 \cdot w_n^{-0.45}$$

6. จากการศึกษาอิทธิพลของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อน พบว่าความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนมีอิทธิพลต่อการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว โดยที่การเปลี่ยนแปลงของการขยายอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดิน (Amplification factor) คาบเด่นของการสั่นไหว (Predominant

period) และสเปกตรัมตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน (Response acceleration spectrum) จะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน

7. การขยายความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน (Amplification factor) เนื่องจากอิทธิพลของความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนในงานวิจัยนี้พบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการขยายความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน (Amplification factor) มีลักษณะเป็นรูปโค้งคว่ำ โดยมีการขยายสูงสุดเมื่อชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนา 6-10 เมตร

8. การขยายความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน (Amplification factor) ในพื้นที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.8-2.5 เท่า โดยแปรผกผันกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนลดลง นอกจากนี้การศึกษากรณีความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มี PGA เท่ากับ 0.1g พบว่าการขยายความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวที่ผิวดิน (Amplification factor) ในพื้นที่ศึกษาจะลดลงตามความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เพิ่มมากขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.6-2.2 เท่า

9. คาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) บริเวณพื้นที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.5-1.0 วินาที โดยแปรผันตรงกับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ 6-18 เมตร นอกจากนี้การศึกษากรณีความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มี PGA เท่ากับ 0.1g พบว่าคาบเด่นของการสั่นไหวที่ผิวดิน (Predominant period) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความรุนแรงของแผ่นดินไหว (PGA) อีกด้วย โดยมีความสัมพันธ์กับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนดังนี้

$$T_p = 0.192 \cdot H_s^{0.47} \quad \text{กรณีคลื่นแผ่นดินไหวทั่วไป}$$

$$T_p = 0.188 \cdot H_s^{0.55} \quad \text{กรณีคลื่นแผ่นดินไหวที่มี PGA=0.1g}$$

10. สเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบจากการศึกษาพบว่าช่วงความกว้างของการสั่นไหวที่ได้ทฤษฎี Bandwidth จะเพิ่มมากขึ้นตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เพิ่มมากขึ้น แต่ขนาดของการขยายอัตราเร่งจะลดลงตามความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน

11. สเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบที่เสนอไว้ในงานวิจัยนี้จะมีช่วงของคาบการสั่นไหวกว้างกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมตอบสนองสำหรับการออกแบบที่ได้จาก UBC code (1997) กรณีชนิดดินประเภท D และ E เมื่อชั้นดินเหนียวอ่อนมีความหนาตั้งแต่ 10 เมตรขึ้นไป

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาความสัมพันธ์ของสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical equation) จากการทดสอบ MASWM ควรเพิ่มเติมตำแหน่งการทดสอบให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษามากขึ้น เพื่อให้สมการที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถเป็นตัวแทนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้

2. ควรศึกษาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน (V_s) กับดัชนีความเหนียว (PI) แทนความสัมพันธ์ของความถี่ตามธรรมชาติ (w_n)

3. ควรเพิ่มเติมตำแหน่งสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินในพื้นที่ศึกษาให้ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ เพื่อให้สามารถสร้างแผนที่การตอบสนองของชั้นดินได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น

4. สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินนั้น อาจพิจารณาในรูปแบบของ Synthetic Ground Motion เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการตอบสนองของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวที่มีระยะห่างและขนาดความรุนแรงตามที่ต้องการ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. 2551. แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย. แหล่งที่มา:

<http://www.dmr.go.th>, 8 สิงหาคม 2551.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. 2547. โครงการศึกษาผลกระทบจากการแก้ปัญหาการใช้ น้ำบาดาลเกิน
ปริมาณสมดุลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและ
สิ่งแวดล้อม. 103/2551

ปณุต สุวรรณวิวัฒนา. 2545. ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ โดยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ GRASS.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เป็นหนึ่งใน วานิชชัย และคณะ. 2544. **Seismic hazard in Bangkok due to Long-Distance
Earthquakes**. การสัมมนาเรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวครั้งที่ 4.
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

เป็นหนึ่งใน วานิชชัย และคณะ. 2548. เอกสารสรุปผลงานวิจัย โครงการลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหว
ในประเทศไทย (ระยะที่ 1). สำนักกองทุนสนับสนุนงานวิจัย. RDG4530032

วิชาญ ภูพัฒน์, สิริลักษณ์ จันทรางศุ, ชัย มุกตพันธ์, อรุณ ชัยเสรี, นิพนธ์ วัฒนันท์, ศรีสุข
จันทรางศุ, เรื่องวิทย์ โชติวิทยานิพนธ์, ธิติ ปวีณธนา, สุรินทร์ กาญจโนภาส และวิจิต
อัจฉรา สรรพกิจจานง. 2520. ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง.
สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ

สุพจน์ เตชวรสินสกุล และ รัตนมณี นันทสาร. 2548. การศึกษาการเพิ่มความรุนแรงของ
แผ่นดินไหวเนื่องมาจากสภาพดิน (Site Amplification) ในบริเวณกรุงเทพมหานครและ
จังหวัดเชียงราย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.).
RDG4530032

สุพจน์ เตชวรสินสกุล. 2549. พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

สุรจักร สัมพันธ์รักษ์. 2548. วิศวกรรมปฐพี. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

องอาจ นวลปลอด. 2548. การศึกษาพฤติกรรมของเข็มพีตในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯโดยกลศาสตร์มวลต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Ashford S.A., Jakrapiyanum W., and Lukkunaprasit P. 1997. **Amplification of Earthquake Ground motions in Bangkok.** CU\CE\EVR 1997.002

Bay, J.A. and Chaiprakaikeow, S. 2007. **Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) Testing of Kasetsart University.** Summary Report

Das, B.M. 1992. **Principle of Soil Dynamics.** Southern Illinois University at Carbondale. PWS-KENT Publishing Company, BOSTON

Hardin, B.O. and Black, W.L. 1968. Vibration modulus of normally consolidated clay. **Journal of Soil Mechanic and Foundation Division., ASCE.** 98(6): 603-624.

Idriss, I.M. and J.I. Sun. 1992. **User manual for SHAKE91.** Center for Geotechnical Modeling, Dept. of Civil & Environ. Eng. University of California. Davis, California.

Inaba, T., H. Dohi, K. Okuta, T. Sato and H. Akagi. 2000. Nonlinear response of surface and NTT building due to soil-structure interaction during the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) earthquake. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering.** 289-300

Izuru Takewaki. 2005. Frequency-domain analysis of earthquake input energy to structure–pile systems. **Engineering Structures** 27. 549–563.

Kramer, S.L. 1996. **Geotechnical Earthquake Engineering**. Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster / A Viacom Company, New Jersey.

Nutalaya, P. 1981. **Investigation of Land Subsidence cause by deep well Pumping in the Bangkok area**. Comprehensive Report 1978-1981 Submitted to Office of the National Environmental Board. Division of Geotechnical and Transportation Engineering. Asian Institute Technology.

Nutalaya, P. and J.L. Rau. 1981. Bangkok : The Sinking Metropolis. **Episodes.4:** pp.3-8

Ovando-Shelley, E. , A. Ossa and M.P. Romo. 2006. The sinking of Mexico City: Its effect on soil properties and seismic response. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. 333-343

Richard, T. Conrad and Steven R. Winkel. 1998. **Design Guide to the 1997 Uniform Building Code**. International Conference of Building Officials. Edition: 4, illustrated. Wiley-Interscience.

Seed, H.B. and I.M. Idriss. 1982. **Ground motion and Soil Liquefaction During Earthquakes**. Earthquake Engineering Research Institute. Berkeley, California. 133 pp.

Seed, H.B. , Robert T. Wong, I.M. Idriss and K. Tokimatsu. 1986. Moduli and damping factor for dynamic analyses of cohesionless soils. **Journal of Geotechnical Engineering. ASCE**. Vol. 112. No.11: 1017-1032

Seed, H.B., M.P. Romo, J.I. Sun, A. Jaime and J. Lysmer. 1988. The Mexico Earthquake of September 19, 1985 Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions. **Earthquake Spectra**. Vol.4. No.4: p. 687-729

- Seng, S., T. Boonyatee and H. Tanaka. 2007. Application of Multichannel Analysis of Surface Wave to shallow site investigation for Bangkok subsurface. **Proceeding of The 13th National Convention on Civil Engineering**. GTE-017
- Seng, S. 2008. **Application of Multichannel Analysis of Surface Wave to shallow site investigation for Subsoil in Thailand**. M.Eng. Chulalongkorn University. Bangkok.
- Shibuya, S. and S.B. Tamrakar. 2003. Engineering properties of Bangkok clay.
Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils.
Tan et al. (eds.)© 2003 Swets & Zeitlinger. Lisse. ISBN 90 5809 537 1
- Shibuya, S., S.B. Tamrakar and W. Manakul. 2003. Geotechnical hazard in Bangkok – Present and future. **Lowland Technology International**. Vol.5. No.1: 1-13
- Tuladhar, R. 2002. **Seismic microzonation of greater Bangkok area using microtremor Observations**. M.Eng. Asian Institute of Technology. Bangkok.
- Vucetic, M. and R. Dobry. 1991. Effect of plasticity on cyclic response. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**. Vol. 117. No.1: 89-107
- Teachavorasinskun, S., P. Thongchim and P. Lukkunaprasit. 2002. Shear modulus and damping of soft Bangkok clay. **Canadian Geotechnical Journal**. 39. no.5: 1201-1208
- Teachavorasinskun, S. and P. Lukkunaprasit. 2004. A simple correlation for shear wave velocity of soft Bangkok clays. **Geotechnique**. Vol.54. No. 5: 323-326
- Terzaghi, K. and R.B. Peck. 1948. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons, New York.

Warnitchai, P. and A. Lisantono. 1996. Probabilistic Seismic Risk Mapping for Thailand.

Proceeding of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering,
Acapulco, Mexico.

Warnitchai, P. ,C. Sangaranyakul and S.A. Ashford. (2001). Seismic hazard in Bangkok due to distant earthquakes. **Urban Safety Engineering**

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลหุ้ลุมเจาะสำรวจและการแปลผล

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลหลุมเจาะบริเวณสถานทูตรัสเซีย

Project:		สถานทูตรัสเซีย		Location:							
Borehole	BH-2		Work	Depth		80	GWL:	0.5	Data:		
No:			No.	(m):							
Sample	Depth		w_n	Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT		USCS
No.	(m)		%	LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value		
S-0	0.00	1.50	37.88	43.20	26.66	16.54	1.68	0.96			ML-OL
ST-1	1.50	- 2.00	30.58	57.20	22.37	34.83	1.92	0.96			CH
ST-2	3.00	- 3.50	55.59	41.54	20.00	21.54	1.71	0.42			CL
ST-3	4.50	- 5.00	46.91	33.25	18.45	14.80	1.75	0.19			CL
ST-4	6.00	- 6.50	66.26	46.51	22.31	24.20	1.66	0.39			CL
ST-5	7.50	- 8.00	71.45	46.18	20.81	25.37	1.65	0.26			CL
ST-6	9.00	- 9.50	63.10	46.26	22.15	24.11	1.67	0.59			CL
ST-7	10.50	- 11.00	57.35	47.81	20.17	27.64	1.70	0.64			CL
ST-8	12.00	- 12.50	52.76	70.88	24.96	45.92	1.72	0.93			CH
ST-9	13.50	- 14.00	23.36	45.02	14.38	30.64	2.05	0.91			CL
ST-10	15.00	- 15.50	23.90	51.78	18.63	33.15	2.08	3.01	41		CH
SS-11	16.50	- 16.95	33.71	50.99	18.93	32.06	2.17		43		CH
SS-12	18.00	- 18.45	29.06	67.27	27.80	39.47	2.16		41		CH
SS-13	19.50	- 19.95	23.08	49.18	16.57	32.61	2.08	3.56	48		CL
SS-14	21.00	- 21.45	17.47	43.97	15.69	28.28	2.18		53		CL
SS-15	22.50	- 22.95	20.36	35.41	13.64	21.77	2.20		63		CL
SS-16	24.00	- 24.45	22.92		NP		2.28		112		SM
SS-17	25.50	- 25.95	24.64		NP		2.21		77		SM
SS-18	27.00	- 27.45	28.35		NP		2.23		88		SM
SS-19	28.50	- 28.95	20.80		NP		2.25		97		SM
SS-20	30.00	- 30.45	17.71		NP		2.25		99		SM
SS-21	31.50	- 31.95	13.40		NP		2.19		67		SM
SS-22	33.00	- 33.45	13.54		NP		2.17		53		SM
SS-23	34.50	- 34.95	11.41		NP		2.18		58		SM
SS-24	36.00	- 36.45	20.23	41.40	13.71	27.69	2.10	3.66	54		CL
SS-25	37.50	- 37.95	20.29	47.23	15.33	31.90	2.07		16		CL

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Project:		สถานทูตรัสเซีย		Location:							
Borehole	BH-2		Work	Depth		80	GWL:	0.5	Data:		
No:			No.	(m):							
Sample	Depth		w_n	Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS	
No.	m.		%	LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value		
SS-26	39.00	- 39.45	16.33	29.65	12.99	16.66	2.07		16	CL	
SS-27	40.50	- 40.95	17.21	26.42	15.04	11.38	2.21		72	CL	
SS-28	42.00	- 42.45	19.70		NP		2.24		150	ML-OL	
SS-29	43.00	- 43.45	20.42		NP		2.28		111	SM	
SS-30	45.00	- 45.45	15.45		NP		2.35		150	SM	
SS-31	46.50	- 46.95	20.38		NP		2.26		105	SM	
SS-32	48.00	- 48.45	22.06		NP		2.30		126	SM	
SS-33	49.50	- 49.95	16.18	51.25	20.20	31.05	2.00	3.73	92	CH	
SS-34	51.00	- 51.45	16.37	50.57	20.48	30.09	2.00		92	CH	
SS-35	52.50	- 52.95	13.37	45.71	19.28	26.43	2.24		127	CL	
SS-36	54.00	- 54.45	15.06	36.38	18.08	18.30	2.35		150	SC	
SS-37	55.50	- 55.95	13.37				2.24		150	ML-OL	
SS-38	57.00	- 57.45	21.77				2.35		150	SM	
SS-39	58.50	- 58.95	21.52				2.35		150	SM	
SS-40	60.00	- 60.45	20.89				2.35		150	SM	
SS-41	61.50	- 61.95	21.34				2.35		150	SM	
SS-42	63.00	- 63.45	22.54				2.35		150	SM	
SS-43	64.50	- 64.95	18.85				2.35		150	SM	
SS-44	66.00	- 66.45	20.34				2.35		150	SM	
SS-45	67.50	- 67.95	19.52				2.35		150	SM	
SS-46	69.00	- 69.45	18.24				2.35		150	SM	
SS-47	70.50	- 70.95	19.65				2.35		150	SM	
SS-48	72.00	- 72.45	16.80				2.35		150	SM	
SS-49	73.50	- 73.95	19.49				2.35		150	SM	
SS-50	75.00	- 75.45	19.00				2.35		150	SP-SM	
SS-51	76.50	- 76.95	15.97				2.35		150	SM	

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Project:		สถานทูตรัสเซีย				Location:					
Borehole		BH-2		Work		Depth		80	GWL:	0.5	Data:
No:				No.		(m):					
Sample		Depth		w_n	Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS
No.		m.		%	LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value	
SS-52	78.00	-	78.45	14.23				2.35		150	SM
SS-53	79.55	-	80.00	18.33				2.35		150	SM

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Project:		สถานทูตรัสเซีย		Location:					
Borehole	BH-2		Work	Depth	80	GWL:	0.5	Data:	
No:			No.	(m):					
Sample	Depth		N _{corr}	ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ_t
No.	(m)				t/m ²				t/m ³
S-0	0.00	1.50			0.96	0.52	2.70	1.02	1.68
ST-1	1.50	- 2.00			0.96	0.64	2.70	0.83	1.92
ST-2	3.00	- 3.50			0.42	0.55	2.70	1.50	1.71
ST-3	4.50	- 5.00			0.19	0.50	2.70	1.27	1.75
ST-4	6.00	- 6.50			0.39	0.57	2.70	1.79	1.66
ST-5	7.50	- 8.00			0.26	0.58	2.70	1.93	1.65
ST-6	9.00	- 9.50			0.59	0.57	2.70	1.70	1.67
ST-7	10.50	- 11.00			0.64	0.59	2.70	1.55	1.70
ST-8	12.00	- 12.50			0.93	0.69	2.70	1.42	1.72
ST-9	13.50	- 14.00			0.91	0.61	2.70	0.63	2.05
ST-10	15.00	- 15.50	28		3.01	0.63	2.70	0.65	2.08
SS-11	16.50	- 16.95	29		17.40	0.62	2.70	0.91	2.17
SS-12	18.00	- 18.45	28		16.80	0.68	2.70	0.78	2.16
SS-13	19.50	- 19.95	31.5		3.56	0.63	2.70	0.62	2.08
SS-14	21.00	- 21.45	34		20.40	0.60	2.70	0.47	2.18
SS-15	22.50	- 22.95	39		23.40	0.55	2.70	0.55	2.20
SS-16	24.00	- 24.45	63.5	43.87		0.31	2.67	0.61	2.28
SS-17	25.50	- 25.95	46	39.66		0.36	2.67	0.66	2.21
SS-18	27.00	- 27.45	51.5	41.02		0.34	2.67	0.76	2.23
SS-19	28.50	- 28.95	56	42.11		0.33	2.67	0.56	2.25
SS-20	30.00	- 30.45	57	42.35		0.33	2.67	0.47	2.19
SS-21	31.50	- 31.95	41	38.39		0.38	2.67	0.36	2.17
SS-22	33.00	- 33.45	34	36.58		0.40	2.67	0.36	2.18
SS-23	34.50	- 34.95	36.5	37.23		0.39	2.67	0.30	2.10
SS-24	36.00	- 36.45	34.5		3.66	0.59	2.70	0.55	2.07
SS-25	37.50	- 37.95	15.5		9.30	0.62	2.70	0.55	2.07

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Project:		สถานทูตรัสเซีย		Location:						
Borehole	BH-2		Work	Depth		80	GWL:	0.5	Data:	
No:			No.	(m):						
Sample	Depth		N _{corr}	ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ_t	σ'_m
No.	(m)				t/m ²				t/m ³	t/m ²
SS-26	39.00	- 39.45	15.5		9.30	0.52	2.70	0.44	2.07	27.318
SS-27	40.50	- 40.95	43.5		26.10	0.48	2.70	0.46	2.21	27.510
SS-28	42.00	- 42.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.53	2.24	22.166
SS-29	43.00	- 43.45	63	43.76		0.31	2.67	0.55	2.28	24.393
SS-30	45.00	- 45.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.41	2.35	24.172
SS-31	46.50	- 46.95	60	43.06		0.32	2.67	0.54	2.26	27.162
SS-32	48.00	- 48.45	70.5	45.47		0.29	2.67	0.59	2.30	27.184
SS-33	49.50	- 49.95	53.5		3.73	0.62	2.70	0.44	2.00	39.704
SS-34	51.00	- 51.45	53.5		32.10	0.61	2.70	0.44	2.00	40.576
SS-35	52.50	- 52.95	71		42.60	0.59	2.70	0.36	2.24	40.986
SS-36	54.00	- 54.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.40	2.35	29.577
SS-37	55.50	- 55.95	82.5	48.07		0.26	2.67	0.36	2.24	30.515
SS-38	57.00	- 57.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.58	2.35	31.535
SS-39	58.50	- 58.95	82.5	48.07		0.26	2.67	0.57	2.35	32.556
SS-40	60.00	- 60.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.56	2.35	33.577
SS-41	61.50	- 61.95	82.5	48.07		0.26	2.67	0.57	2.35	34.597
SS-42	63.00	- 63.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.60	2.35	35.618
SS-43	64.50	- 64.95	82.5	48.07		0.26	2.67	0.50	2.35	36.638
SS-44	66.00	- 66.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.54	2.35	37.659
SS-45	67.50	- 67.95	82.5	48.07		0.26	2.67	0.52	2.35	38.679
SS-46	69.00	- 69.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.49	2.35	39.700
SS-47	70.50	- 70.95	82.5	48.07		0.26	2.67	0.52	2.35	40.721
SS-48	72.00	- 72.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.45	2.35	41.741
SS-49	73.50	- 73.95	82.5	48.07		0.26	2.67	0.52	2.35	42.762
SS-50	75.00	- 75.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.51	2.35	43.782
SS-51	76.50	- 76.95	82.5	48.07		0.26	2.67	0.43	2.35	44.803

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Project:		สถานที่ตั้ง		Location:						
Borehole				Work	Depth					
No:	BH-2			No.	(m):	80	GWL:	0.5	Data:	
Sample	Depth	N _{corr}		ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ_t	σ'_m
No.	(m)				t/m ²				t/m ³	t/m ²
SS-52	78.00 - 78.45	82.5	48.07		0.26	2.67	0.38	2.35	45.823	
SS-53	79.55 - 80.00	82.5	48.07		0.26	2.67	0.49	2.35	46.878	

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Project:		สถานทูตรัสเซีย		Location:			
Borehole		Work	Depth				
No:	BH-2	No.	(m):	80	GWL: 0.5	Data:	
Sample	Depth	K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand
No.	(m)				Sand	Clay	m/s
S-0	0.00 - 1.50		1.00	0.16		19,296	94
ST-1	1.50 - 2.00		1.00	0.27		31,391	89
ST-2	3.00 - 3.50		1.00	0.19		12,800	65
ST-3	4.50 - 5.00		1.00	0.14		21,706	74
ST-4	6.00 - 6.50		1.00	0.21		9,623	58
ST-5	7.50 - 8.00		1.00	0.21		7,890	51
ST-6	9.00 - 9.50		1.00	0.21		13,581	69
ST-7	10.50 - 11.00		1.00	0.23		19,663	78
ST-8	12.00 - 12.50		1.00	0.33		27,059	85
ST-9	13.50 - 14.00		1.00	0.25		96,531	134
ST-10	15.00 - 15.50		1.00	0.26		102,104	155
SS-11	16.50 - 16.95		1.00	0.25		73,377	197
SS-12	18.00 - 18.45		1.00	0.30		95,805	199
SS-13	19.50 - 19.95		1.00	0.26		124,864	171
SS-14	21.00 - 21.45		1.00	0.23		161,526	255
SS-15	22.50 - 22.95		1.00	0.19		147,387	270
SS-16	24.00 - 24.45	50.0				120,510	229
SS-17	25.50 - 25.95	46.7				120,729	232
SS-18	27.00 - 27.45	41.0				108,769	216
SS-19	28.50 - 28.95	54.8				149,074	257
SS-20	30.00 - 30.45	62.7				175,638	283
SS-21	31.50 - 31.95	73.9				219,442	320
SS-22	33.00 - 33.45	73.5				227,615	325
SS-23	34.50 - 34.95	77.9				245,576	349
SS-24	36.00 - 36.45		1.00	0.23		200,380	208
SS-25	37.50 - 37.95		1.00	0.25		206,914	237

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Project:	สถานทูตรัสเซีย				Location:				
Borehole	BH-2		Work		Depth	80	GWL: 0.5	Data:	
No:			No.		(m):				
Sample	Depth		K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand	V _s -clay
No.	(m)					Sand	Clay	m/s	m/s
SS-26	39.00	- 39.45		1.00	0.16	235,237			282
SS-27	40.50	- 40.95		1.00	0.12	227,896			375
SS-28	42.00	- 42.45	57.5			185,483		287	
SS-29	43.00	- 43.45	55.7			188,485		287	
SS-30	45.00	- 45.45	68.8			231,688		314	
SS-31	46.50	- 46.95	55.8			199,247		296	
SS-32	48.00	- 48.45	51.9			185,250		283	
SS-33	49.50	- 49.95		1.00	0.25	285,308			240
SS-34	51.00	- 51.45		1.00	0.24	286,236			342
SS-35	52.50	- 52.95		1.00	0.22	324,618			364
SS-36	54.00	- 54.45	69.8			260,077		333	
SS-37	55.50	- 55.95	73.9			279,886		356	
SS-38	57.00	- 57.45	52.5			202,030		292	
SS-39	58.50	- 58.95	53.1			207,506		296	
SS-40	60.00	- 60.45	54.6			216,611		303	
SS-41	61.50	- 61.95	53.5			215,593		302	
SS-42	63.00	- 63.45	50.8			207,763		296	
SS-43	64.50	- 64.95	59.7			247,571		324	
SS-44	66.00	- 66.45	55.9			235,024		315	
SS-45	67.50	- 67.95	58.0			246,975		323	
SS-46	69.00	- 69.45	61.3			264,667		335	
SS-47	70.50	- 70.95	57.6			251,957		327	
SS-48	72.00	- 72.45	65.2			288,507		350	
SS-49	73.50	- 73.95	58.0			260,026		332	
SS-50	75.00	- 75.45	59.3			268,856		337	
SS-51	76.50	- 76.95	67.4			309,114		363	

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Project:		สถานทุตรัสเจีย			Location:			
Borehole	BH-2	Work		Depth	80	GWL:	0.5	Data:
No:		No.		(m):				
Sample	Depth	K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand	V _s -clay
No.	(m)				Sand	Clay	m/s	m/s
SS-52	78.00 - 78.45	71.9			333,464		378	
SS-53	79.55 - 80.00	61.1			286,477		348	

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลหลุมเจาะบริเวณกรมป่าไม้ (บางเขน)

Project:	อาคารเอนกประสงค์ 10 ชั้น					Location:	กรมป่าไม้ (บางเขน)				
Borehole	BH-2			Work	Depth			48.45	GWL:	0.3	Data:
No:				No.	(m):						
Sample	Depth		w_n	Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS	
No.	(m)		%	LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value		
S-0	0.00	1.50	37.88	43.2	26.66	16.54	1.68	0.49		ML-OL	
ST-1	1.50	- 2.00	43.25	51.2	29.63	21.57	1.78	0.49		MH-OH	
ST-2	3.00	- 3.50	73.22	38.4	22.63	15.77	1.56	0.02		CL	
ST-3	4.50	- 5.00	55.3	38.7	23.81	14.89	1.71	0.07		CL	
ST-4	6.00	- 6.50	65.8	53.1	28.08	25.02	1.57	0.44		CH	
ST-5	7.50	- 8.00	65.8	53.1	28.08	25.02	1.57	0.44		CH	
ST-6	9.00	- 9.50	74.17	52	28.65	23.35	1.57	0.30		CH	
ST-7	10.50	- 11.00	59.81	51.35	26.85	24.5	1.57	0.35		CH	
ST-8	12.00	- 12.50	56.01	58.8	30.83	27.97	1.59	0.24		MH-OH	
ST-9	13.50	- 14.00	54.54	47.6	22.23	25.37	1.67	0.65		CL	
ST-10	15.00	- 15.50	41.19	42.65	19.86	22.79	1.77	0.63		CL	
ST-11	16.50	- 17.00	45.01	44.3	18.95	25.35	1.70	0.41		CL	
SS-1	18.00	- 18.45	46.02	42	25.58	16.42	2.14		7	CL	
SS-2	19.50	- 19.95	22.11		NP		1.80		70	SM	
SS-3	21.00	- 21.45	26.76		NP		1.80		62	SM	
SS-4	22.50	- 22.95			-				48		
SS-5	24.00	- 24.45	22.77		NP		1.91		49	SM	
SS-6	25.50	- 25.95	18.43		NP		1.91		70	SM	
SS-7	27.00	- 27.45	14.73		NP		2.07		75	SM	
SS-8	28.50	- 28.95	16.7		NP		2.04		66	SP-SM	
SS-9	30.00	- 30.45			-				52		
SS-10	31.50	- 31.95	21.76		NP		1.72		70	SM	
SS-11	33.00	- 33.45	22.02		NP		1.96		65	SM	
SS-12	34.50	- 34.95	24.27		NP		1.73		60	SM	
SS-13	36.00	- 36.45	25.13		NP		1.69		42	SM	
SS-14	37.50	- 37.95			-				40		

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Project:	อาคารเอนกประสงค์ 10 ชั้น					Location:	กรมป่าไม้ (บางเขน)			
Borehole	BH-2		Work		Depth	48.45	GWL:	0.3	Data:	
No:			No.		(m):					
Sample	Depth		w_n	Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS
No.	m.		%	LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value	
SS-16	40.50	-	40.95	28.53			NP	1.65	28	SM
SS-17	42.00	-	42.45	21.85			NP	1.73	68	SM
SS-18	43.00	-	43.45	30.94			NP	1.77	64	SM
SS-19	45.00	-	45.45	20			NP	1.68	85	SP-SM
SS-20	46.50	-	46.95				-		88	
SS-21	48.00	-	48.45	30.08			NP	1.85	112	SM

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Project:	อาคารเอนกประสงค์ 10 ชั้น					Location:	กรมป่าไม้ (บางเขน)				
Borehole	BH-2			Work		Depth	48.45	GWL:	0.3	Data:	
No:				No.		(m):					
Sample	Depth			N _{corr}	ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ_t	σ'_m
No.	(m)										
S-0	0.00		1.50			0.49	0.52	2.70	1.02	1.68	0.894
ST-1	1.50	-	2.00			0.49	0.55	2.70	1.17	1.78	1.198
ST-2	3.00	-	3.50			0.02	0.51	2.70	1.98	1.56	1.718
ST-3	4.50	-	5.00			0.07	0.50	2.70	1.49	1.71	2.420
ST-4	6.00	-	6.50			0.44	0.58	2.70	1.78	1.57	3.053
ST-5	7.50	-	8.00			0.44	0.58	2.70	1.78	1.57	3.817
ST-6	9.00	-	9.50			0.30	0.56	2.70	2.00	1.57	4.381
ST-7	10.50	-	11.00			0.35	0.57	2.70	1.61	1.57	5.025
ST-8	12.00	-	12.50			0.24	0.60	2.70	1.51	1.59	5.786
ST-9	13.50	-	14.00			0.65	0.58	2.70	1.47	1.67	6.412
ST-10	15.00	-	15.50			0.63	0.56	2.70	1.11	1.77	7.120
ST-11	16.50	-	17.00			0.41	0.58	2.70	1.22	1.70	7.995
SS-1	18.00	-	18.45	7		4.20	0.51	2.70	1.24	2.14	8.649
SS-2	19.50	-	19.95	42.5	38.77		0.37	2.67	0.59	1.80	8.145
SS-3	21.00	-	21.45	38.5	37.75		0.39	2.67	0.71	1.80	8.986
SS-4	22.50	-	22.95	31.5	35.91		0.41	2.67		2.10	10.250
SS-5	24.00	-	24.45	32	36.05		0.41	2.67	0.61	1.91	11.059
SS-6	25.50	-	25.95	42.5	38.77		0.37	2.67	0.49	1.91	11.395
SS-7	27.00	-	27.45	45	39.41		0.37	2.67	0.39	2.07	12.209
SS-8	28.50	-	28.95	40.5	38.26		0.38	2.67	0.45	2.04	13.345
SS-9	30.00	-	30.45	33.5	36.44		0.41	2.67		2.10	14.724
SS-10	31.50	-	31.95	42.5	38.77		0.37	2.67	0.58	1.72	14.829
SS-11	33.00	-	33.45	40	38.14		0.38	2.67	0.59	1.96	15.824
SS-12	34.50	-	34.95	37.5	37.49		0.39	2.67	0.65	1.73	16.635
SS-13	36.00	-	36.45	28.5	35.11		0.42	2.67	0.67	1.69	17.897
SS-14	37.50	-	37.95	27.5	34.84		0.43	2.67		2.10	18.994

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Project:	อาคารเอนกประสงค์ 10 ชั้น				Location:	กรมป่าไม้ (บางเขน)				
Borehole No:	BH-2		Work No.	Depth (m):		48.45	GWL:	0.3	Data:	
Sample No.	Depth (m)		N_{corr}	ϕ	S_u t/m ²	K_0	G_s	e	γ_t t/m ³	σ'_m t/m ²
SS-16	40.50	- 40.95	21.5	33.20		0.45	2.67	0.76	1.65	20.917
SS-17	42.00	- 42.45	41.5	38.52		0.38	2.67	0.58	1.73	19.906
SS-18	43.00	- 43.45	39.5	38.01		0.38	2.67	0.83	1.77	20.519
SS-19	45.00	- 45.45	50	40.65		0.35	2.67	0.53	1.68	20.461
SS-20	46.50	- 46.95	51.5	41.02		0.34	2.67		2.10	21.272
SS-21	48.00	- 48.45	63.5	43.87		0.31	2.67	0.80	1.85	21.031

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Project:	อาคารเอนกประสงค์ 10 ชั้น				Location:	กรมป่าไม้ (บางเขน)			
Borehole	BH-2			Work	Depth	48.45	GWL:	0.3	Data:
No:				No.	(m):				
Sample	Depth		K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand	V _s -clay
No.	(m)					Sand	Clay	m/s	m/s
S-0	0.00	1.50		1.00	0.16	17982			81
ST-1	1.50	- 2.00		1.00	0.19	16645			71
ST-2	3.00	- 3.50		1.00	0.15	4418			33
ST-3	4.50	- 5.00		1.00	0.14	13823			56
ST-4	6.00	- 6.50		1.00	0.21	9112			59
ST-5	7.50	- 8.00		1.00	0.21	10187			62
ST-6	9.00	- 9.50		1.00	0.20	6640			50
ST-7	10.50	- 11.00		1.00	0.21	15995			70
ST-8	12.00	- 12.50		1.00	0.23	20664			72
ST-9	13.50	- 14.00		1.00	0.21	23320			84
ST-10	15.00	- 15.50		1.00	0.20	44250			104
ST-11	16.50	- 17.00		1.00	0.21	39888			96
SS-1	18.00	- 18.45		1.00	0.16	39723			144
SS-2	19.50	- 19.95	51.7			101185		236	
SS-3	21.00	- 21.45	43.2			88742		219	
SS-4	22.50	- 22.95							
SS-5	24.00	- 24.45	50.3			114655		244	
SS-6	25.50	- 25.95	60.8			140630		271	
SS-7	27.00	- 27.45	70.6			169126		287	
SS-8	28.50	- 28.95	65.4			163801		283	
SS-9	30.00	- 30.45							
SS-10	31.50	- 31.95	52.5			138599		283	
SS-11	33.00	- 33.45	51.9			141582		268	
SS-12	34.50	- 34.95	47.3			132307		275	
SS-13	36.00	- 36.45	45.8			132779		278	
SS-14	37.50	- 37.95							

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Project:	อาคารเอนกประสงค์ 10 ชั้น				Location:	กรมป่าไม้ (บางเขน)			
Borehole	BH-2		Work		Depth	48.45	GWL: 0.3	Data:	
No:			No.		(m):				
Sample	Depth		K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand	V _s -clay
No.	(m)					Sand	Clay	m/s	m/s
SS-16	40.50	- 40.95	40.8			127736		272	
SS-17	42.00	- 42.45	52.3			159958		303	
SS-18	43.00	- 43.45	37.8			117205		249	
SS-19	45.00	- 45.45	56.7			175857		323	
SS-20	46.50	- 46.95							
SS-21	48.00	- 48.45	38.8			121980		250	

ตารางผนวกที่ ก3 ข้อมูลหลุมเจาะบริเวณอาคารศูนย์เรียนรู้ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Project:	อาคารศูนย์เรียนรู้ (สร.4)				Location:		มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์				
Borehole	BH-1			Work	Depth			30.45	GWL:	0.5	Data:
No:				No.	(m):						
Sample	Depth		w_n	Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS	
No.	(m)		%	LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value		
S-0	0.00	1.50						1.50	1.50		
ST-1	1.50	- 2.00						1.50	1.50		
ST-2	3.00	- 3.50						1.50	1.50		
ST-3	4.50	- 5.00	61.9					1.52	1.69		CH
ST-4	6.00	- 6.50	49.1	67.8	31.6	36.2		1.62	2.16		CH
ST-5	7.50	- 8.00						1.62	2.15		CH
ST-6	9.00	- 9.50	56	67.5	31.5	36		1.62	2.14		CH
ST-7	10.50	- 11.00	50					1.69	2.60		CH
ST-8	12.00	- 12.50	45.2	64.8	30.9	33.9		1.70	2.74		CH
SS-1	13.50	- 13.95	22.6	48.1	23.7	24.4		1.80		10	CL
SS-2	15.00	- 15.45	18.7					1.83		21	CL
SS-3	16.50	- 16.95	20.3	36.3	21.4	14.9		1.86		25	CL
SS-4	18.00	- 18.45	14.2		NP					52	CL
SS-5	19.50	- 19.95	13.3		NP					75	SM
SS-6	21.00	- 21.45	13.7		NP					75	SM
SS-7	22.50	- 22.95	13		NP					75	SM
SS-8	24.00	- 24.45	12.8		NP					20	SM
SS-9	25.50	- 25.95	9.4		NP					28	SM
SS-10	27.00	- 27.45	11.3		NP					23	SM
SS-11	28.50	- 28.95	12.8		NP					35	SM
SS-12	30.00	- 30.45	13.2		NP					32	SM

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Project:	อาคารศูนย์เรียนรู้ (สร.4)					Location:	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์			
Borehole	BH-1			Work	Depth	30.45	GWL:	0.5	Data:	
No:				No.	(m):					
Sample	Depth		N _{corr}	ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ_t	σ'_m
No.	(m)				t/m ²				t/m ³	t/m ²
S-0	0.00	1.50			1.50		2.70		1.50	
ST-1	1.50	- 2.00			1.50		2.70		1.50	
ST-2	3.00	- 3.50			1.50		2.70		1.50	
ST-3	4.50	- 5.00			1.69		2.70	1.67	1.52	
ST-4	6.00	- 6.50			2.16	0.65	2.70	1.33	1.62	2.891
ST-5	7.50	- 8.00			2.15		2.70		1.62	
ST-6	9.00	- 9.50			2.14	0.65	2.70	1.51	1.62	4.316
ST-7	10.50	- 11.00			2.60		2.70	1.35	1.69	
ST-8	12.00	- 12.50			2.74	0.64	2.70	1.22	1.70	5.842
SS-1	13.50	- 13.95	10		6.00	0.57	2.70	0.61	1.80	6.328
SS-2	15.00	- 15.45	18		10.80		2.70	0.50	1.83	
SS-3	16.50	- 16.95	20		12.00	0.50	2.70	0.55	1.86	7.633
SS-4	18.00	- 18.45	33.5		20.10		2.70	0.38	1.86	
SS-5	19.50	- 19.95	45	39.41		0.37	2.67	0.36	2.10	8.271
SS-6	21.00	- 21.45	45	39.41		0.37	2.67	0.37	2.10	9.223
SS-7	22.50	- 22.95	45	39.41		0.37	2.67	0.35	2.10	10.175
SS-8	24.00	- 24.45	17.5	32.08		0.47	2.67	0.34	2.10	12.459
SS-9	25.50	- 25.95	21.5	33.20		0.45	2.67	0.25	2.10	13.296
SS-10	27.00	- 27.45	19	32.51		0.46	2.67	0.30	2.10	14.497
SS-11	28.50	- 28.95	25	34.16		0.44	2.67	0.34	2.10	15.165
SS-12	30.00	- 30.45	23.5	33.75		0.44	2.67	0.35	2.10	16.300

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Project:		อาคารศูนย์เรียนรู้ (สร.4)			Location:		มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์				
Borehole		BH-1		Work		Depth		30.45	GWL:	0.5	Data:
No:				No.		(m):					
Sample	Depth		K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand	V _s -clay		
No.	(m)					Sand	Clay			m/s	m/s
S-0	0.00	1.50		1.00							
ST-1	1.50	- 2.00		1.00							
ST-2	3.00	- 3.50		1.00							
ST-3	4.50	- 5.00		1.00							
ST-4	6.00	- 6.50		1.00	0.28		20,067				
ST-5	7.50	- 8.00		1.00							
ST-6	9.00	- 9.50		1.00	0.28		17,856		93		
ST-7	10.50	- 11.00		1.00							
ST-8	12.00	- 12.50		1.00	0.26		33,820		117		
SS-1	13.50	- 13.95		1.00	0.21		88,224		185		
SS-2	15.00	- 15.45		1.00							
SS-3	16.50	- 16.95		1.00	0.15		106,143		263		
SS-4	18.00	- 18.45		1.00							
SS-5	19.50	- 19.95	74.101			146,032		266			
SS-6	21.00	- 21.45	73.172			152,271		271			
SS-7	22.50	- 22.95	74.773			163,434		282			
SS-8	24.00	- 24.45	75.208			181,905		297			
SS-9	25.50	- 25.95	80.289			200,610		322			
SS-10	27.00	- 27.45	78.061			203,664		318			
SS-11	28.50	- 28.95	75.208			200,692		312			
SS-12	30.00	- 30.45	74.328			205,631		315			

ตารางผนวกที่ ก4 ข้อมูลหลุมเจาะบริเวณอาคารศูนย์เรียนรู้ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Project:	อาคารศูนย์เรียนรู้ (สร.4)					Location:	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์				
Borehole	BH-2			Work	Depth			30.45	GWL:	0.5	Data:
No:				No.	(m):						
Sample	Depth		w_n	Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS	
No.	(m)		%	LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value		
S-0	0.00	1.50						1.50	1.50		
ST-1	1.50	- 2.00						1.50	1.50		CH
ST-2	3.00	- 3.50	53.1	65.9	31.3	34.6		1.64	2.29		CH
ST-3	4.50	- 5.00						1.50	2.00		CH
ST-4	6.00	- 6.50	61.6	69.8	32.6	37.2		1.52	1.72		CH
ST-5	7.50	- 8.00						1.60	2.00		CH
ST-6	9.00	- 9.50	52.2	63.9	29.6	34.3		1.65	2.38		CH
ST-7	10.50	- 11.00	50.3					1.67	2.41		CH
ST-8	12.00	- 12.50	47.1	62.3	28.9	33.4		1.73	3.04		CH
SS-1	13.50	- 13.95	19.8	48.5	23.6	24.9		1.83		16	CL
SS-2	15.00	- 15.45	18.5	47.8	23.4	24.4		1.87		27	CL
SS-3	16.50	- 16.95	20.3	32.9	20.1	12.8				49	SC
SS-4	18.00	- 18.45	14.14		NP					75	SM
SS-5	19.50	- 19.95	13.6		NP					50	SM
SS-6	21.00	- 21.45	13.2		NP					45	SM
SS-7	22.50	- 22.95	9.8		NP					75	SM
SS-8	24.00	- 24.45	9.5		NP					75	SM
SS-9	25.50	- 25.95	13.1		NP					50	SM
SS-10	27.00	- 27.45	12.6		NP					31	SM
SS-11	28.50	- 28.95	12.8	36.2	21	15.2				23	CL
SS-12	30.00	- 30.45	13.2		NP					23	CL

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Project:	อาคารศูนย์เรียนรู้ (ตร.4)					Location:	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์				
Borehole	BH-2			Work		Depth	30.45	GWL:	0.5	Data:	
No:				No.		(m):					
Sample	Depth		N _{corr}	ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ _t	σ' _m	
No.	(m)				t/m ²				t/m ³	t/m ²	
S-0	0.00	1.50			1.50		2.70				
ST-1	1.50	- 2.00			1.50		2.70				
ST-2	3.00	- 3.50			2.29	0.64	2.70	1.43	1.721		
ST-3	4.50	- 5.00			2.00		2.70				
ST-4	6.00	- 6.50			1.72	0.66	2.70	1.66	2.932		
ST-5	7.50	- 8.00			2.00		2.70				
ST-6	9.00	- 9.50			2.38	0.64	2.70	1.41	4.306		
ST-7	10.50	- 11.00			2.41		2.70	1.36			
ST-8	12.00	- 12.50			3.04	0.63	2.70	1.27	5.869		
SS-1	13.50	- 13.95	15.5		9.30	0.57	2.70	0.53	6.423	15.5	
SS-2	15.00	- 15.45	21		12.60	0.57	2.70	0.50	7.334	21	
SS-3	16.50	- 16.95	32		19.20	0.49	2.70	0.55	7.639	32	
SS-4	18.00	- 18.45	45	39.41		0.37	2.67	0.38	7.630	45	
SS-5	19.50	- 19.95	32.5	36.18		0.41	2.67	0.36	9.023	32.5	
SS-6	21.00	- 21.45	30	35.51		0.42	2.67	0.35	10.128	30	
SS-7	22.50	- 22.95	45	39.41		0.37	2.67	0.26	10.485	45	
SS-8	24.00	- 24.45	45	39.41		0.37	2.67	0.25	11.437	45	
SS-9	25.50	- 25.95	32.5	36.18		0.41	2.67	0.35	13.026	32.5	
SS-10	27.00	- 27.45	23	33.61		0.45	2.67	0.34	14.593	23	
SS-11	28.50	- 28.95	19		11.40	0.51	2.70	0.35	16.625	19	
SS-12	30.00	- 30.45	19		11.40		2.70	0.36		19	

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Project:		อาคารศูนย์เรียนรู้ (สร.4)			Location:		มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์				
Borehole		BH-2		Work		Depth		30.45	GWL:	0.5	Data:
No:				No.		(m):					
Sample	Depth		K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand	V _s -clay		
No.	(m)					Sand	Clay			m/s	m/s
S-0	0.00	1.50		1.00							
ST-1	1.50	- 2.00		1.00							
ST-2	3.00	- 3.50		1.00	0.27		12,919		87		
ST-3	4.50	- 5.00		1.00							
ST-4	6.00	- 6.50		1.00	0.28		11,157				
ST-5	7.50	- 8.00		1.00							
ST-6	9.00	- 9.50		1.00	0.27		21,298		100		
ST-7	10.50	- 11.00		1.00							
ST-8	12.00	- 12.50		1.00	0.26		31,222		116		
SS-1	13.50	- 13.95		1.00	0.21		99,324		208		
SS-2	15.00	- 15.45		1.00	0.21		111,766		228		
SS-3	16.50	- 16.95		1.00	0.13		106,185		312		
SS-4	18.00	- 18.45	72.111			136,491		256			
SS-5	19.50	- 19.95	73.408			151,098		270			
SS-6	21.00	- 21.45	74.328			162,085		280			
SS-7	22.50	- 22.95	79.978			177,458		301			
SS-8	24.00	- 24.45	80.220			185,897		309			
SS-9	25.50	- 25.95	74.552			184,373		299			
SS-10	27.00	- 27.45	75.631			197,973		311			
SS-11	28.50	- 28.95		1.00	0.15		211,581		289		
SS-12	30.00	- 30.45		1.00							

รายนวทที่ ก5 ข้อมูลหลุมเจาะบริเวณอาคารจอดรถ 50 ปี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Project:			อาคารจอดรถ 50 ปี			Location:		มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์			
Borehole		BH-1		Work		Depth		30.45	GWL:	0.3	Data:
No:				No.		(m):					
Sample	Depth		w_n	Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS	
No.	(m)			%	LL	PL					PI
S-0	0.00	1.50						1.50	1.50		
ST-1	1.50	- 2.00						1.50	1.50		CH
ST-2	3.00	- 3.50						1.64	2.29		CH
ST-3	4.50	- 5.00	67.3	65.8	32.9	32.9	1.51	1.51			CH
ST-4	6.00	- 6.50						1.52	1.72		CH
ST-5	7.50	- 8.00	67.9	65.9	33	32.9	1.50	1.48			CH
ST-6	9.00	- 9.50	65.2					1.52	1.60		CH
ST-7	10.50	- 11.00	63.1					1.57	1.90		CH
ST-8	12.00	- 12.50	59.3	60.1	30.3	29.8	1.73	2.42			CH
SS-1	13.50	- 13.95	18.9	39.3	22.9	16.4				16	CL
SS-2	15.00	- 15.45	17.6							27	CL
SS-3	16.50	- 16.95	17.3	38.9	22.8	16.1				49	SC
SS-4	18.00	- 18.45	13.1		NP					75	SM
SS-5	19.50	- 19.95	12.5		NP					50	SM
SS-6	21.00	- 21.45	12.2		NP					45	SM
SS-7	22.50	- 22.95			NP					75	SM
SS-8	24.00	- 24.45	12.6		NP					75	SM
SS-9	25.50	- 25.95	13.1		NP					50	SM
SS-10	27.00	- 27.45			NP					31	SM
SS-11	28.50	- 28.95	11.6		NP					23	CL
SS-12	30.00	- 30.45	12.1		NP					23	CL

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

Project:		อาคารจอดรถ 50 ปี				Location:		มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์					
Borehole		BH-1		Work		Depth		30.45		GWL: 0.3		Data:	
No:				No.		(m):							
Sample	Depth		N _{corr}		ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ_t	σ'_m		
No.	(m)					t/m ²				t/m ³	t/m ²		
S-0	0.00	1.50				1.50		2.70		1.50			
ST-1	1.50	- 2.00				1.50		2.70		1.50			
ST-2	3.00	- 3.50				2.29		2.70		1.64			
ST-3	4.50	- 5.00				1.51	0.63	2.70	1.82	1.51	2.279		
ST-4	6.00	- 6.50				1.72		2.70		1.52			
ST-5	7.50	- 8.00				1.48	0.63	2.70	1.83	1.50	3.432		
ST-6	9.00	- 9.50				1.60		2.70	1.76	1.52			
ST-7	10.50	- 11.00				1.90		2.70	1.70	1.57			
ST-8	12.00	- 12.50				2.42	0.61	2.70	1.60	1.73	5.384		
SS-1	13.50	- 13.95	15.5	31.52			0.48	2.67	0.50	2.10	5.785		
SS-2	15.00	- 15.45	21	33.06			0.45	2.67	0.47	2.10	6.700		
SS-3	16.50	- 16.95	32	36.05			0.41	2.67	0.46	2.10	7.402		
SS-4	18.00	- 18.45	45	39.41			0.37	2.67	0.35	2.10	7.977		
SS-5	19.50	- 19.95	32.5	36.18			0.41	2.67	0.33	2.10	9.388		
SS-6	21.00	- 21.45	30	35.51			0.42	2.67	0.33	2.10	10.496		
SS-7	22.50	- 22.95	45	39.41			0.37	2.67		2.10	10.832		
SS-8	24.00	- 24.45	45	39.41			0.37	2.67	0.34	2.10	11.784		
SS-9	25.50	- 25.95	32.5	36.18			0.41	2.67	0.35	2.10	13.391		
SS-10	27.00	- 27.45	23	33.61			0.45	2.67		2.10	14.972		
SS-11	28.50	- 28.95	19	32.51			0.46	2.67	0.31	2.10	16.288		
SS-12	30.00	- 30.45	19	32.51			0.46	2.67	0.32	2.10	17.347		

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

Project:		อาคารจอดรถ 50 ปี		Location:		มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	
Borehole		Work	Depth			Data:	
No:	BH-1	No.	(m):	30.45	GWL: 0.3		
Sample	Depth	K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand
No.	(m)				Sand	Clay	m/s
S-0	0.00 - 1.50		1.00				
ST-1	1.50 - 2.00		1.00				
ST-2	3.00 - 3.50		1.00				
ST-3	4.50 - 5.00		1.00	0.26		7,243	71
ST-4	6.00 - 6.50		1.00				
ST-5	7.50 - 8.00		1.00	0.26		8,591	74
ST-6	9.00 - 9.50		1.00				
ST-7	10.50 - 11.00		1.00				
ST-8	12.00 - 12.50		1.00	0.24		16,983	95
SS-1	13.50 - 13.95	59.558			98,159		216
SS-2	15.00 - 15.45	63.013			111,768		230
SS-3	16.50 - 16.95	63.821			118,978		238
SS-4	18.00 - 18.45	74.552			144,283		264
SS-5	19.50 - 19.95	75.839			159,226		279
SS-6	21.00 - 21.45	76.442			169,700		288
SS-7	22.50 - 22.95						
SS-8	24.00 - 24.45	75.631			177,903		294
SS-9	25.50 - 25.95	74.552			186,937		301
SS-10	27.00 - 27.45						
SS-11	28.50 - 28.95	77.555			214,476		325
SS-12	30.00 - 30.45	76.636			218,715		327

ตารางผนวกที่ ก6 ข้อมูลหลุมเจาะบริเวณอาคารชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Project:		อาคารชีววิทยา			Location:		มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์				
Borehole		BH-1		Work		Depth		24.75	GWL:	0.3	Data:
No:				No.		(m):					
Sample	Depth		w_n		Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS
No.	(m)		%		LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value	
S-0	0.00	1.50	24.3	43.2	26.66	16.54	1.68	0.00			ML-OL
ST-1	1.50	- 2.00	24.3	47.6	23.9	23.7					CL
ST-2	3.00	- 3.50	61	60.8	30.6	30.2	1.54	1.91			CH
ST-3	4.50	- 5.00	63.1				1.53	1.85			CH
ST-4	6.00	- 6.50	58.8				1.57	2.46			CH
ST-5	7.50	- 8.00	56.9	58.6	29.3	29.3	1.68	2.67			CH
ST-6	9.00	- 9.50	53.8				1.71	2.92			CH
ST-7	10.50	- 11.00	50				1.76	3.21			CH
ST-8	12.00	- 12.50	40.1	57.1	28.3	28.8	1.84	4.99			CH
SS-1	13.50	- 13.95	19.6	48.9	24.4	24.5	1.67			17	CL
SS-2	15.00	- 15.45	18.1	47.8	24	23.8	1.77			25	CL
SS-3	16.50	- 16.95	17.5	33.9	20.9	13	1.70			17	SC
SS-4	18.00	- 18.45	18.3		NP		2.14			32	SC
SS-5	19.50	- 19.95	18.8		NP		1.80			28	SM
SS-6	21.00	- 21.45	16.6		NP		1.80			50	SM
SS-7	22.50	- 22.95	15.5		-					36	SM
SS-8	24.00	- 24.45	14.8		NP		1.91			58	SM
SS-9	25.50	- 25.95	13.7		NP		1.91			60	SM
SS-10	27.00	- 27.45	13.1		NP		2.07			53	SM

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

Project:		อาคารชีววิทยา		Location:		มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์			
Borehole	BH-1		Work	Depth	27.45	GWL:	0.3	Data:	
No:			No.	(m):					
Sample	Depth		N _{corr}	ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ_t
No.	(m)				t/m ²				t/m ³
S-0	0.00	1.50				0.52	2.70	0.66	1.68
ST-1	1.50	- 2.00				0.57	2.70	0.66	1.68
ST-2	3.00	- 3.50			1.91	0.61	2.70	1.65	1.54
ST-3	4.50	- 5.00			1.85		2.70	1.70	1.53
ST-4	6.00	- 6.50			2.46		2.70	1.59	1.57
ST-5	7.50	- 8.00			2.67	0.61	2.70	1.54	1.68
ST-6	9.00	- 9.50			2.92		2.70	1.45	1.71
ST-7	10.50	- 11.00			3.21		2.70	1.35	1.76
ST-8	12.00	- 12.50			4.99	0.60	2.70	1.08	1.84
SS-1	13.50	- 13.95	16		9.60	0.57	2.70	0.53	1.67
SS-2	15.00	- 15.45	20		12.00	0.57	2.70	0.49	1.77
SS-3	16.50	- 16.95	16		9.60	0.49	2.70	0.47	1.70
SS-4	18.00	- 18.45	23.5		14.10		2.70		2.14
SS-5	19.50	- 19.95	21.5	33.20		0.45	2.67	0.49	1.80
SS-6	21.00	- 21.45	32.5	36.18		0.41	2.67	0.50	1.80
SS-7	22.50	- 22.95	25.5	34.30		0.44	2.67	0.44	2.10
SS-8	24.00	- 24.45	36.5	37.23		0.39	2.67	0.41	1.91
SS-9	25.50	- 25.95	37.5	37.49		0.39	2.67	0.40	1.91
SS-10	27.00	- 27.45	34	36.58		0.40	2.67	0.37	2.07

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

Project:		อาคารชีววิทยา		Location:		มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์				
Borehole	BH-1			Work	Depth	27.45	GWL: 0.3	Data:		
No:				No.	(m):					
Sample	Depth		K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand	V _s -clay	
No.	(m)						Sand	Clay	m/s	m/s
S-0	0.00	1.50		1.00	0.16	30,998			68	
ST-1	1.50	- 2.00		1.00	0.20	35,609				
ST-2	3.00	- 3.50		1.00	0.24	9,089			81	
ST-3	4.50	- 5.00		1.00						
ST-4	6.00	- 6.50		1.00						
ST-5	7.50	- 8.00		1.00	0.24	16,274			98	
ST-6	9.00	- 9.50		1.00						
ST-7	10.50	- 11.00		1.00						
ST-8	12.00	- 12.50		1.00	0.23	44,042			141	
SS-1	13.50	- 13.95		1.00	0.21	104,206			222	
SS-2	15.00	- 15.45		1.00	0.20	116,725			235	
SS-3	16.50	- 16.95		1.00	0.13	120,663			275	
SS-4	18.00	- 18.45		1.00						
SS-5	19.50	- 19.95	61.141			128,677		267		
SS-6	21.00	- 21.45	59.820			127,912		266		
SS-7	22.50	- 22.95	65.707			149,699		267		
SS-8	24.00	- 24.45	68.640			158,660		288		
SS-9	25.50	- 25.95	70.457			168,248		297		
SS-10	27.00	- 27.45	73.172			182,756		299		

ตารางผนวกที่ ก7 ข้อมูลหลุมเจาะอาคารเรียน 9 ชั้น ร.ร.สาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Project:	อาคารเรียน 9 ชั้น				Location:			สาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์				
Borehole	BH-1				Work	Depth			48.45	GWL:	0.3	Data:
No:					No.	(m):						
Sample	Depth		w_n		Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS	
No.	(m)		%		LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value		
S-0	0.00	1.50	37.88	43.2	26.66	16.54		1.68	1.51		CH	
ST-1	1.50	- 2.00	34.8	60	26	34		1.75	1.51		CH	
ST-2	3.00	- 3.50	45.9					1.56	1.00		CH	
ST-3	4.50	- 5.00										
ST-4	6.00	- 6.50	55.8	35	16	19		1.45	0.63		CL	
ST-5	7.50	- 8.00										
ST-6	9.00	- 9.50										
ST-7	10.50	- 11.00	56.9					1.62	0.56		CH	
ST-8	12.00	- 12.50	57.6					1.66	2.04		CH	
ST-9	13.50	- 14.00	24.9	54	24	30		2.03	5.72		CH	
SS-1	15.00	- 15.45	22.3	46	22	24				26	CL	
SS-2	16.50	- 16.95	21.3					2.01		23	CL	
SS-3	18.00	- 18.45	18.7		NP					48	SM	
SS-4	19.50	- 19.95	20.9		NP					96	SM	
SS-5	21.00	- 21.45	20.5		NP					111	SM	
SS-6	22.50	- 22.95			-					54		
SS-7	24.00	- 24.45	20.6		NP					100	SP-SM	
SS-8	25.50	- 25.95	15.1		NP					105	SP-SM	
SS-9	27.00	- 27.45	16		NP					117	SP-SM	
SS-10	28.50	- 28.95	15.2		NP					138	SP-SM	
SS-11	30.00	- 30.45			-					85		
SS-12	31.50	- 31.95			-					66		
SS-13	33.00	- 33.45	12.9		NP					75	SP-SM	
SS-14	34.50	- 34.95	26.5		NP			2.07		41	CL	
SS-15	36.00	- 36.45	27.1	44	21	23				58	CL	
SS-16	37.50	- 37.95	27.5		NP			2.13		66	CL	

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Project:	อาคารเรียน 9 ชั้น				Location:	สาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์					
Borehole	BH-1				Work	Depth		48.45	GWL:	0.3	Data:
No:					No.	(m):					
Sample	Depth		w_n		Atterberg's Limit, %			γ_t	S_u	SPT	USCS
No.	m.		%		LL	PL	PI	t/m ³	t/m ²	N-value	
SS-18	40.50	-	40.95	17.4	NP					85	SP-SM
SS-19	42.00	-	42.45	16.8	NP					118	SP-SM
SS-20	43.00	-	43.45	15.4	NP					100	SP-SM
SS-21	45.00	-	45.45		-					150	

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Project:		อาคารเรียน 9 ชั้น		Location:		สถิติแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์			
Borehole	BH-1		Work	Depth	48.45	GWL:	0.3	Data:	
No:			No.	(m):					
Sample	Depth		N _{corr}	ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ_t
No.	(m)				t/m ²				t/m ³
S-0	0.00	1.50			1.51	0.52	2.70	1.02	1.68
ST-1	1.50	- 2.00			1.51	0.64	2.70	0.94	1.75
ST-2	3.00	- 3.50			1.00		2.70	1.24	1.56
ST-3	4.50	- 5.00					2.70		1.56
ST-4	6.00	- 6.50			0.63	0.53	2.70	1.51	1.45
ST-5	7.50	- 8.00					2.70		1.45
ST-6	9.00	- 9.50					2.70		1.45
ST-7	10.50	- 11.00			0.56		2.70	1.54	1.62
ST-8	12.00	- 12.50			2.04		2.70	1.56	1.66
ST-9	13.50	- 14.00			5.72	0.61	2.70	0.67	2.03
SS-1	15.00	- 15.45	20.5		12.30	0.57	2.70	0.60	2.03
SS-2	16.50	- 16.95	19		11.40		2.70	0.58	2.01
SS-3	18.00	- 18.45	31.5		18.90		2.70	0.50	2.01
SS-4	19.50	- 19.95	55.5	41.99		0.33	2.67	0.56	2.10
SS-5	21.00	- 21.45	63	43.76		0.31	2.67	0.55	2.10
SS-6	22.50	- 22.95	34.5	36.71		0.40	2.67		2.10
SS-7	24.00	- 24.45	57.5	42.46		0.32	2.67	0.55	2.10
SS-8	25.50	- 25.95	60	43.06		0.32	2.67	0.40	2.10
SS-9	27.00	- 27.45	66	44.45		0.30	2.67	0.43	2.10
SS-10	28.50	- 28.95	76.5	46.79		0.27	2.67	0.41	2.10
SS-11	30.00	- 30.45	50	40.65		0.35	2.67		2.10
SS-12	31.50	- 31.95	40.5	38.26		0.38	2.67		2.10
SS-13	33.00	- 33.45	45	39.41		0.37	2.67	0.34	2.10
SS-14	34.50	- 34.95	28		16.80		2.70	0.72	2.07
SS-15	36.00	- 36.45	36.5		21.90	0.56	2.70	0.73	2.07
SS-16	37.50	- 37.95	40.5		24.30		2.70	0.74	2.13

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Project:	อาคารเรียน 9 ชั้น				Location:	สาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์				
Borehole	BH-1				Depth	48.45	GWL:	0.3	Data:	
No:					(m):					
Sample	Depth	N _{corr}		ϕ	S _u	K ₀	G _s	e	γ_t	σ'_m
No.	(m)				t/m ²				t/m ³	t/m ²
SS-16	40.50 - 40.95	50		40.65		0.35	2.67	0.46	2.10	21.550
SS-17	42.00 - 42.45	66.5		44.56		0.30	2.67	0.45	2.10	21.152
SS-18	43.00 - 43.45	57.5		42.46		0.32	2.67	0.41	2.10	22.460
SS-19	45.00 - 45.45	82.5		48.07		0.26	2.67		2.10	21.693

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Project:	อาคารเรียน 9 ชั้น				Location:	สาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์			
Borehole	BH-1			Work	Depth	48.45	GWL: 0.3	Data:	
No:				No.	(m):				
Sample	Depth		K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand	V _s -clay
No.	(m)					Sand	Clay	m/s	m/s
S-0	0.00	1.50		1.00	0.16		17,982		103
ST-1	1.50	- 2.00		1.00	0.26		24,452		93
ST-2	3.00	- 3.50		1.00					
ST-3	4.50	- 5.00		1.00					
ST-4	6.00	- 6.50		1.00	0.17		14,492		
ST-5	7.50	- 8.00		1.00					
ST-6	9.00	- 9.50		1.00					
ST-7	10.50	- 11.00		1.00					
ST-8	12.00	- 12.50		1.00					
ST-9	13.50	- 14.00		1.00	0.24		82,002		164
SS-1	15.00	- 15.45		1.00	0.21		96,380		209
SS-2	16.50	- 16.95		1.00					
SS-3	18.00	- 18.45		1.00					
SS-4	19.50	- 19.95	54.530			107,855		226	
SS-5	21.00	- 21.45	55.498			114,049		232	
SS-6	22.50	- 22.95							
SS-7	24.00	- 24.45	55.254			125,527		244	
SS-8	25.50	- 25.95	69.685			163,958		280	
SS-9	27.00	- 27.45	67.315			162,536		278	
SS-10	28.50	- 28.95	69.425			170,340		285	
SS-11	30.00	- 30.45							
SS-12	31.50	- 31.95							
SS-13	33.00	- 33.45	74.992			213,360		322	
SS-14	34.50	- 34.95		1.00					
SS-15	36.00	- 36.45		1.00	0.20		141,973		265
SS-16	37.50	- 37.95		1.00					

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Project:	อาคารเรียน 9 ชั้น				Location:	สาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์			
Borehole	BH-1		Work		Depth	48.45	GWL:	0.3	Data:
No:			No.		(m):				
Sample	Depth		K _{2max}	OCR	k	G _{max} (kPa)		V _s -sand	V _s -clay
No.	(m)					Sand	Clay	m/s	m/s
SS-16	40.50	- 40.95	63.551			202,155		310	
SS-17	42.00	- 42.45	65.168			205,376		312	
SS-18	43.00	- 43.45	68.903			223,760		327	
SS-19	45.00	- 45.45							

ภาคผนวก ข

ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจระดับลึก 600 เมตร

ตารางผนวกที่ ข1 คุณสมบัติทางกายภาพและการจำแนกชนิดดินของหลุมเจาะสถานี KE

Sample No.	Depth (m)			W.C. w _n , %	Atterberg's Limits			PI	G _s	USCS
	Begin	to	Mid		LL, %	PL, %	SL, %			
1	98.50	99.00	98.75	19.55	53.22	23.57	11.36	29.65	2.787	CH
2	99.00	99.50	99.25	16.76	50.36	20.76		29.60	2.782	CH
3	99.50	100.00	99.75	21.68	53.19	22.45		30.74	2.782	CH
4	179.00	179.50	179.25	17.63	39.91	19.00	11.45	20.91	2.664	CL
5	179.50	180.00	179.75	26.26	35.95	18.85	11.52	17.10	2.636	CL
6	180.00	180.50	180.25	15.63	33.59	18.50	11.52	15.09	2.694	CL
7	181.50	182.00	181.75	14.24					2.639	SM
8	265.50	267.00	265.75	19.03	41.78	23.08	14.52	18.70	2.676	CL
9	266.00	266.50	266.25	20.68	40.98	22.94	14.54	18.04	2.692	CL
10	266.50	267.00	266.75	20.64	38.69	22.29	14.56	16.40	2.660	CL
11	366.50	367.00	366.75	14.38	29.36	17.59	12.45	11.77	2.626	CL
12	367.00	367.50	367.25	14.77	31.91	18.77	12.39	13.14	2.609	CL
13	367.50	368.00	367.75	17.06	35.69	20.89	10.48	14.80	2.648	CL
14	368.00	368.50	368.00	15.51	33.52	17.70	10.74	15.82	2.569	CL
15	368.00	368.50	368.50	14.04	31.42	17.60	11.25	13.82	2.656	CL
16	368.50	369.00	368.75	15.96	27.89	15.50	12.01	12.39		SC
17	440.00	440.50	440.25	12.85	28.90	17.13	11.58	11.77	2.648	CL
18	440.50	441.00	440.75	11.80	26.51	14.86	12.13	11.65	2.665	SC
19	441.00	441.50	441.25	12.04	28.29	14.77	12.65	13.52	2.643	SC
20	443.50	444.00	443.75	11.52	28.01	16.17	11.55	12.84	2.671	CL
21	566.00	566.50	566.25	12.93	24.75	19.44	15.54	5.31	2.714	ML-CL
22	566.50	567.00	566.75	13.31	27.54	19.46	16.59	8.08	2.696	CL
23	567.00	567.50	567.25	15.99	24.54	21.84	19.40	3.06	2.673	ML-CL
24	568.50	569.00	568.75	25.86		Non Plastic			2.656	SM
25	569.50	570.00	569.75	23.99		Non Plastic				SM

ตารางผนวกที่ ข2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินจากหลุมเจาะสำรวจระดับลึก

Station	Depth (m)		C_v (cm ² /s)	P'_m (ksc)	γ_t (t/m ³)	C_c	C_s	C_r	e_0
	From	To							
KE	99.00	99.50	5.72E-05	27.00	2.147	0.1975	0.0389	0.0240	0.6051
KE	179.50	180.00	1.67E-04	33.50	2.255	0.1694	0.0451	0.0437	0.3673
KE	266.00	266.50	1.15E-04	50.00	2.166	0.2159	0.0586	0.0511	0.4132
KE	366.50	367.00	9.66E-05	62.00	2.262	0.1893	0.0413	0.0432	0.3284
KE	367.00	367.50	1.41E-04	55.85	2.272	0.1628	0.0413	0.0483	0.3032
KE	440.00	440.50	6.08E-04	72.25	2.325	0.1285			0.2779
KE	566.50	567.00	8.71E-05	104.00	2.267	0.2225	0.0387	0.0440	0.3422

ภาคผนวก ค

ข้อมูลสำหรับสร้างสเปกตรัมตอบสนองในพื้นที่ศึกษา

ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลสำหรับการสร้างสเปกตรัมตอบสนองที่แนะนำสำหรับการออกแบบตามพื้นที่ความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนแตกต่างกัน

Period	Zone 1	Period	Zone 2	Period	Zone 3	Period	Zone 4
(sec)	6-9 m	(sec)	10-12 m	(sec)	13-15 m	(sec)	16-18 m
0.01	1.000	0.01	1.000	0.01	1.000	0.01	1.000
0.30	3.000	0.30	2.750	0.30	2.500	0.30	2.500
0.72	3.000	1.00	2.750	1.20	2.500	1.40	2.500
1.00	1.500	1.40	1.179	1.45	1.379	2.00	1.000
1.50	0.800	2.00	0.481	2.00	0.688	3.00	0.417
2.00	0.525	3.00	0.321	3.00	0.333	4.00	0.250
3.00	0.300	4.00	0.241	4.00	0.250	5.00	0.200
4.00	0.225	5.00	0.193	5.00	0.200	6.00	0.167
5.00	0.180	6.00	0.160	6.00	0.167	7.00	0.143
6.00	0.150	7.00	0.138	7.00	0.143	8.00	0.125
7.00	0.129	8.00	0.120	8.00	0.125	9.00	0.111
8.00	0.113	9.00	0.107	9.00	0.111	10.00	0.100
9.00	0.100	10.00	0.096	10.00	0.100		
10.00	0.090						

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายอำนาจ ขานูวิริยะกุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 8 มกราคม 2528
สถานที่เกิด	ราชบุรี
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (กำแพงแสน)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนเรียนดีระดับปริญญาตรี (2546) ทุนเรียนดีระดับปริญญาโท (2550)