



246385



สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
THE THAILAND RESEARCH FUND

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

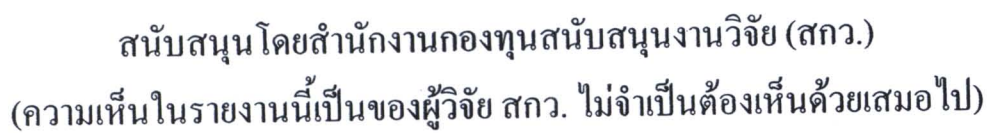
อัตราการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวในพื้นที่เสี่ยงภัย

โดย

รศ. ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล

ผศ.ดร. อาณัติ เรืองรัมย์

พฤษภาคม 2553



สรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

1. บทนำ

ประเทศไทยมีโอกาที่จะได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวระดับปานกลางโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ทางภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทย แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในอดีตได้ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารในภาคเหนืออยู่เป็นระยะ และเป็นที่น่าทึ่งกันว่าบางส่วนของพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันตกเป็นดินอ่อน ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวที่เข้ามาบริเวณดังกล่าวได้ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาผลตอบสนองแผ่นดินไหวของบริเวณจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย กาญจนบุรี รวมทั้งกรุงเทพมหานคร โดยพัฒนาสมการที่เหมาะสมในการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของดินเพื่อการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน และศึกษาอัตราการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหว

2. การประเมินความเร็วคลื่นเฉือนของดิน

ปกติการเจาะสำรวจดินจะได้ค่าการตอกทดลองมาตรฐาน (standard penetration test - N value) หรือค่ากำลังเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength) แต่สำหรับดินในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาค่าความเร็วคลื่นเฉือน (shear wave velocity) มากเพียงพอ ค่าความเร็วคลื่นเฉือนมีความสำคัญมากในการจำแนกชั้นดินเพื่อการวิเคราะห์หรือออกแบบโครงสร้างรับแรงด้านข้างจากแผ่นดินไหว หรือแรงด้านข้างอื่นๆ ฉะนั้นในการศึกษานี้ได้ทำการสำรวจดินและทดสอบให้ได้ค่าการตอกทดลองมาตรฐานหรือค่ากำลังเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ พร้อมกันนี้ก็ทดสอบในสนามเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยใช้การทดสอบที่เรียกว่า การทดสอบดาวนโฮล (seismic down hole test) ซึ่งใช้หลักการของการแพร่กระจายคลื่น (wave propagation) ในการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนและค่าโมดูลัสเฉือนของดินแต่ละชั้น โดยเลือกบริเวณที่สำรวจดินจำนวน 6 หลุม ให้มีคุณสมบัติของดินมีความหลากหลายเพื่อที่จะได้ครอบคลุมช่วงการใช้งานได้มากที่สุดจากการศึกษา และผู้วิจัยได้เสนอสมการในการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของดิน โดยความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับค่า N ของดินทรายบริเวณภาคเหนือมีค่าต่ำกว่าความเร็วคลื่นเฉือนจากสมการของ Sykora และ Stokoe (1983) Dickenson (1994) Ohsaki และ Iwasaki (1973) และ Imai และ Tonouchi (1982) ประมาณ 13 % ในช่วงค่า N ต่ำกว่า 14 ครั้ง/ฟุต แต่มากกว่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากสมการของ Sykora และ Stokoe (1983) Dickenson (1994) และ Imai และ Tonouchi (1982) ประมาณ 6 % ในช่วงค่า N เกินกว่า 14 ครั้ง/ฟุต

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลดินบริเวณจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย กาญจนบุรี และกรุงเทพมหานคร จำนวนทั้งหมด 33 จุดเป็นฐานข้อมูลจากการคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับ 30 เมตร (V_s)₃₀) และพิจารณาประเภทของชั้นดิน พบว่าโดยส่วนใหญ่ในจังหวัดเชียงใหม่

เจียงราย และกาญจนบุรี เป็นชั้นดินประเภท D (ตามข้อกำหนดของ NEHRP) โดยมีบางส่วนที่เป็นประเภท C ส่วนชั้นดินในกรุงเทพมหานครเป็นชั้นดินประเภท E ซึ่งเป็นชั้นดินอ่อน

3. การวิเคราะห์ผลตอบสนองแผ่นดินไหวของดิน

ในการศึกษานี้ได้ใช้คลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 10 คลื่นที่ตรวจวัดได้ในสถานที่ตั้งบนชั้นหิน โดยเลือกคลื่นแผ่นดินไหวที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางในช่วงประมาณ 20 ถึง 230 กิโลเมตร ซึ่งครอบคลุมระยะทางจากศูนย์กลางแผ่นดินไหวบริเวณรอยเลื่อนมีพลังทางภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทยไปยังพื้นที่ที่เป็นดินอ่อน เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับ 30 เมตร $(V_s)_{30}$ และค่าอัตราขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหว พบว่าที่ $(V_s)_{30}$ ต่ำกว่า 200 m/s ส่วนใหญ่จะมีอัตราขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวประมาณ 2.0 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงผลของชั้นดินอ่อนที่มีต่อการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหว จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองแผ่นดินไหวของดินโดยชั้นข้อมูลดินจากการทดสอบ พบว่าอัตราขยายความเร่งตอบสนองสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่าอัตราขยายความเร่งตอบสนองสูงสุดที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302) สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที และคาบการสั่น 1.0 วินาที

4. การจัดทำระบบฐานข้อมูลแผนที่สารสนเทศภูมิศาสตร์

เพื่อให้ผลการศึกษาวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้ในพื้นที่ในชั้นต้น คณะผู้วิจัยได้จัดทำแผนที่แสดงอัตราขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวในพื้นที่ที่ทำการศึกษา โดยจัดทำในรูปแบบของแผนที่สารสนเทศภูมิศาสตร์ ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถกำหนดจังหวัดที่ต้องการทราบค่าข้อมูลต่างๆ ซึ่งฐานข้อมูลจะทำการแปรผลข้อมูลต่างๆ ที่ต้องการ อาทิเช่น สภาพของชั้นดิน ค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน และอัตราขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวภายใต้การกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวตามรูปแบบที่ใช้ในการศึกษาวิจัย อนึ่งผู้ที่สนใจที่จะดำเนินการต่อ สามารถทำการเพิ่มเติม/ปรับปรุงข้อมูลภายในฐานข้อมูลที่น่าเสนอได้

รหัสโครงการ : RDG5030027

ชื่อโครงการ : อัตราการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวในพื้นที่เสี่ยง

ชื่อนักวิจัย : สุพจน์ เตชวรสินสกุล¹, อาณัติ เรืองรัมย์¹

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Email address : tsupot@chula.ac.th

ระยะเวลาโครงการ :

1 มิถุนายน 2550 – 31 พฤษภาคม 2552 (ขยายเวลา 30 พฤศจิกายน 2552)

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการขยายตัวของแผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย กาญจนบุรี และกรุงเทพมหานคร โดยผู้วิจัยจะได้พัฒนาสมการที่เหมาะสมในการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของดินเพื่อการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน และศึกษาสเปกตรัมผลตอบสนองของชั้นดินต่อการเกิดแผ่นดินไหวเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างอาคาร ในเบื้องต้นได้ทำการทดสอบดินในภาคสนามเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยใช้การทดสอบดาวโนไฮลในการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนและค่าโมดูลัสเฉือนของดินแต่ละชั้น โดยเลือกบริเวณที่สำรวจดินจำนวน 6 หลุม นอกจากนี้ยังรวบรวมข้อมูลทฤษฎีที่มีผู้ทดสอบหาค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือนในประเทศไทย คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นแรงเฉือนโดยวิธีสะท้อนกลับ พบว่าการวิเคราะห์นี้ สามารถวิเคราะห์ผลการทำสอบ Down-hole seismic test ได้เป็นอย่างดี โดยสามารถประมาณผลกระทบของน้ำหนักกดทับต่อค่าความเร็วคลื่นแรงเฉือน และ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินได้เป็นอย่างดี

จากผลการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นแรงเฉือนด้วยวิธีสะท้อนกลับ คณะผู้วิจัยได้นำเสนอสมการในการเพื่อใช้ในการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของดินประเภทต่างๆ จากนั้นได้ศึกษาผลตอบสนองแผ่นดินไหวของชั้นดินในต่างๆ จำนวน 33 จุด พบว่าอัตราการขยายของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าถึง 2.0 ในบริเวณที่ความเร็วคลื่นเฉือนในระยะ 30 เมตรมีค่าต่ำกว่า 200 เมตรต่อวินาที

นอกจากนี้ เพื่อประโยชน์ในการใช้งาน คณะผู้วิจัยได้ทำการจัดทำฐานข้อมูลเพื่อรวบรวมข้อมูล และผลการวิเคราะห์ต่างๆ ในรูปแบบของแผนที่สารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกพื้นที่ที่ต้องการข้อมูล และ แสดงผลข้อมูลที่ต้องการทราบได้อย่างง่ายดาย นอกจากนี้ ผู้ใช้งานยังสามารถทำการเพิ่มเติม และ/หรือ ปรับปรุงข้อมูลบนฐานข้อมูลนี้ได้ โดยทำตามวิธีการที่กำหนดไว้ในรายงานฉบับนี้

คำหลัก : ความเร็วคลื่นแรงเฉือน อัตราการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหว แผนที่สารสนเทศภูมิศาสตร์

Project Code : RDG5030027

Project Title : อัตราการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวในพื้นที่เสี่ยง

Investigators : Supot teachavorasinskun¹, Anat Ruangrassamee¹

¹ Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Email address : tsupot@chula.ac.th

Project Duration :

1 June 2007 – 31 May 2009 (Extended to 30 November 2009)

This research aimed to examine the probable seismic amplification factors due to various typical earthquakes in Chiang-Mai, Chiang-Rai, Kanchanaburi, and Bangkok areas. The formulation for predicting shear wave velocity was developed and the acceleration response spectra in the area were investigated. The seismic downhole tests were conducted at 6 sites to develop the relationship for predicting shear wave velocity in the areas. Furthermore, more than 30 existing secondary information on the shear wave velocity profiles in the studied areas were also analyzed. The new technique for down-hole seismic test interpretation (so-called refraction method) were developed and used in the study. It was found that the proposed technique can properly interpret the influence of overburden effective stress and variation of underground water table. Based on those information, a simple empirical equation for estimating shear wave velocity was proposed. Soil response analysis was done for 33 sites to obtain the acceleration response spectra at the ground and the amplification factors. It is found that the amplification factors are as large as 2.0 at locations where $(V_s)_{30}$ is less than 200 m/s.

The database was created based on the Geographic Information System (GIS) to gather information and analytical results obtained from the study. The user can easily select the interested location to find out information; i.e. the subsoil profile, estimation of shear wave velocity and probable seismic amplification factor. Moreover, the database can be added/modified by following the instruction given in this report.

Keywords : Shear wave propagation velocity, Seismic amplification factor, GIS

สารบัญ

หน้า

สรุปสำหรับผู้บริหาร

บทคัดย่อ

Abstract

สารบัญรูป.....	ข
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
บทที่ 2 การประเมินความเร็วคลื่นเฉือนของดิน.....	3
2.1 การเจาะทดสอบคุณสมบัติของดิน.....	3
2.2 การทดสอบวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนเพื่อการประมาณความเร่งของชั้นดินในการ ออกแบบ.....	4
2.3 ผลการทดสอบความไวโซลของหลุมทดสอบต่างๆ	13
2.4 การจำแนกประเภทของดิน	39
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือน ค่าการตอกทดลองมาตรฐาน และ S_u	43
บทที่ 3 การวิเคราะห์ผลตอบสนองแผ่นดินไหวของดิน.....	46
3.1 หลักการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของดิน	46
3.2 คลื่นแผ่นดินไหวที่พิจารณา.....	49
3.3 คุณสมบัติของดินที่พิจารณา.....	53
บทที่ 4 ฐานข้อมูลผลตอบสนองของชั้นดิน.....	54
4.1 ผลตอบสนองของชั้นดินจังหวัดเชียงใหม่.....	54
4.2 ผลตอบสนองของชั้นดินจังหวัดเชียงราย.....	85
4.3 ผลตอบสนองของชั้นดินจังหวัดกาญจนบุรี.....	103
4.4 ผลตอบสนองของชั้นดินจังหวัดกรุงเทพมหานคร.....	126
4.5 ผลของความเร่งคลื่นเฉือนต่ออัตราขยายตัวของแผ่นดินไหว.....	153
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	155
เอกสารอ้างอิง.....	156

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความเสียหายของโรงพยาบาลพาน เนื่องจากแผ่นดินไหวขนาด 5.1 วันที่ 11 กันยายน 2537(จาก Lukkunaprasit, 1995).....	1
1.2 ความเสียหายของโรงเรียนใน อ.เมือง จ.เชียงราย เนื่องจากแผ่นดินไหวขนาด 6.3 ในวันที่ 16 พฤษภาคม 2550 บริเวณพรมแดนไทย ลาว	2
2.1 หลักการคำนวณค่าความเร็วการเดินทางของคลื่น.....	4
2.2 การจัดตำแหน่งการวางท่อนไม้.....	8
2.3 กระสอบทรายทับบนท่อนไม้.....	8
2.4 การติดตั้งตำแหน่งทรिकเกอร์ที่บริเวณด้านคั่น.....	8
2.5 จีไอโฟน.....	9
2.6 การต่อแบตเตอรี่กับเครื่องสุบลม.....	9
2.7 การต่อช่องรับสัญญาณ.....	9
2.8 หน้าจอคอมพิวเตอร์เมื่อทำการตั้งค่าข้อมูล.....	9
2.9 การวางตำแหน่งของเครื่องจีไอโฟน.....	10
2.10 การยึดจับเชือกด้วยตัวยึดบริเวณปากหลุม.....	10
2.11 ทิศทางการตอกไม้.....	10
2.12 การเลือกตำแหน่งของเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง.....	11
2.13 ระยะทางและเวลาที่คลื่นเดินทางจากตัวแหล่งกำเนิดถึงเครื่องรับสัญญาณ หาความเร็วคลื่นในแต่ละชั้นจากสูตร.....	12
2.14 การทดสอบควาน์โซลบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	13
2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึกจากการทดสอบควาน์โซลทั้ง 3 ครั้ง บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	19
2.16 การทดสอบควาน์โซลบริเวณกรมอุตุนิยมวิทยา บางนา.....	20
2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึก บริเวณกรมอุตุนิยมวิทยา บางนา.....	23
2.18 การทดสอบควาน์โซลบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย.....	24
2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึก บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย.....	27
2.20 การทดสอบควาน์โซลบริเวณสำนักงานทางหลวงชนบทเชียงราย.....	28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึก บริเวณสำนักงานทางหลวงชนบทเชียงราย.....	30
2.22 การทดสอบควาน์โซลบริเวณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.....	31
2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึก บริเวณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.....	34
2.24 การทดสอบควาน์โซลบริเวณวัดเจดีย์หลวงวรวิหาร อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่.....	35
2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึกบริเวณวัดเจดีย์หลวงวรวิหาร.....	38
2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vs กับ Su ของดินเหนียวบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล.....	44
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vs กับ N ของดินเหนียวบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล.....	44
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง Vs กับ N ของดินทรายบริเวณภาคเหนือ.....	45
3.1 การคำนวณแบบวนซ้ำในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ของดิน (Kramer, 1996)...	46
3.2 อัตราส่วนโมดูลัสของดินทราย (Seed และ Idriss, 1970).....	47
3.3 อัตราส่วนความหน่วงของดินทราย (Seed และ Idriss, 1970).....	48
3.4 อัตราส่วนโมดูลัสและอัตราส่วนความหน่วงของดินเหนียว (Vucetic และ Dobry, 1991)....	48
3.5 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว San Fernando จากสถานีวัด Castaic Old Ridge Route.....	50
3.6 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว Kern County จากสถานีวัด Taft Lincoln School.....	50
3.7 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว Loma Preita จากสถานีวัด Diamond Heights.....	50
3.8 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว Kern County จากสถานีวัด Santa Barbara.....	51
3.9 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว Borah Peak จากสถานีวัด INEEL 99999 ANL.....	51
3.10 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว Hector Mine จากสถานีวัด Anza - Tripp Flats Training.....	51
3.11 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว San Fernando จากสถานีวัด Isabella Dam..	52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว Landers จากสถานีวัด San Gabriel E Grand Av.....	52
3.13 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว Hector Mine จากสถานีวัด Pacoima Kagel Canyon.....	52
3.14 ประวัติเวลาและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว San Fernando จากสถานีวัด Cholame-Shandon Array #2.....	53
4.1 ตำแหน่งหลุมเจาะที่พิจารณาในจังหวัดเชียงใหม่.....	55
4.2 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM01.....	61
4.3 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM01	62
4.4 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM02	63
4.5 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM02	64
4.6 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM03	65
4.7 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM03	66
4.8 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM04	67
4.9 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM04.....	68
4.10 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM05.....	69
4.11 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM05.....	70
4.12 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM06	71
4.13 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM06.....	72
4.14 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM07.....	73
4.15 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM07.....	74
4.16 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM08.....	75
4.17 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM08.....	76
4.18 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM09.....	77
4.19 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM09.....	78
4.20 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM10	79
4.21 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CM10.....	80
4.22 อัตราการขยายความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในจังหวัดเชียงใหม่.....	84

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ตำแหน่งหลุมเจาะที่พิจารณาในจังหวัดเชียงราย.....	85
4.24 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR01.....	89
4.25 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR01.....	90
4.26 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR02.....	91
4.27 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR02.....	92
4.28 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR03.....	93
4.29 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR03.....	94
4.30 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR04.....	95
4.31 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR04.....	96
4.32 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR05.....	97
4.33 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR05.....	98
4.34 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR06.....	99
4.35 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน CR06.....	100
4.36 อัตราการขยายความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในจังหวัดเชียงราย.....	102
4.37 ตำแหน่งหลุมเจาะที่พิจารณาในจังหวัดกาญจนบุรี.....	103
4.38 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN01.....	107
4.39 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN01.....	108
4.40 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN02.....	109
4.41 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN02.....	110
4.42 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN03.....	111
4.43 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN03.....	112
4.44 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN04.....	113
4.45 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN04.....	114
4.46 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN05.....	115
4.47 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN05.....	116
4.48 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN06.....	117
4.49 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN06.....	118
4.50 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN07.....	119

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.51 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN07.....	120
4.52 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN08.....	121
4.53 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน KN08.....	122
4.54 อัตราการขยายความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในจังหวัดกาญจนบุรี.....	125
4.55 ตำแหน่งหลุมเจาะที่พิจารณาในกรุงเทพมหานคร.....	126
4.56 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK01.....	132
4.57 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK01.....	133
4.58 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK02.....	134
4.59 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK02.....	135
4.60 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK03.....	136
4.61 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK03.....	137
4.62 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK04.....	138
4.63 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK04.....	139
4.64 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK05.....	140
4.65 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK05.....	141
4.66 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK06.....	42
4.67 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK06.....	143
4.68 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK07.....	144
4.69 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK07.....	145
4.70 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK08.....	146
4.71 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK08.....	147
4.72 ประวัติเวลาของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK09.....	148
4.73 สเปกตรัมของความเร่งที่ผิวดินที่ผ่านชั้นดิน BK09.....	149
4.74 อัตราการขยายความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวในกรุงเทพมหานคร.....	152
4.75 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับ 30 เมตร (Vs30) และค่าอัตราการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหว.....	154

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อุปกรณ์การทดสอบ.....	6
2.2 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	14
2.3 ค่าเวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณในแต่ละความลึกในการทดสอบครั้งที่ 1 ของหลุมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	15
2.4 ค่าเวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณในแต่ละความลึกในการทดสอบครั้งที่ 2 ของหลุมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	16
2.5 ค่าเวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณในแต่ละความลึกในการทดสอบครั้งที่ 3 ของหลุมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	17
2.6 การหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) บริเวณหลุมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	18
2.7 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบกรมอุตุนิยมวิทยา บางนา.....	21
2.8 เวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นเฉือน ในแต่ละความลึกของหลุมกรมอุตุนิยมวิทยา บางนา.....	22
2.9 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย.....	25
2.10 เวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นเฉือน ในแต่ละความลึกของหลุมสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย.....	26
2.11 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบสำนักงานทางหลวงชนบทเชียงราย.....	29
2.12 เวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นเฉือน ในแต่ละความลึกของหลุมสำนักงานทางหลวงชนบทเชียงราย.....	29
2.13 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.....	32
2.14 เวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นเฉือน ในแต่ละความลึกของหลุมมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.....	33
2.15 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบวัดเจดีย์หลวงวรวิหาร.....	36
2.16 เวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นเฉือน ในแต่ละความลึกของหลุมวัดเจดีย์หลวงวรวิหาร.....	37
2.17 การจำแนกประเภทของดินตาม NEHRP (BSSC, 1997).....	39
2.18 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยทุกๆ 5 เมตร (V_{si}).....	40
2.19 ค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยทุกๆ 5 เมตร (S_{ui}).....	40
2.20 จำนวนครั้งในการดักทดลองมาตรฐานทุกๆ 5 เมตร (N_p).....	41

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.21 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก ($\bar{V}_s$).....	41
2.22 ค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก ($\bar{S}_u$).....	42
2.23 จำนวนครั้งในการตอกทดลองมาตรฐานเฉลี่ย 30 เมตรแรก ($\bar{N}$).....	42
2.24 สรุปลักษณะของดินแต่ละสถานี.....	43
3.1 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	49
4.1 หลุมเจาะที่พิจารณาบริเวณอำเภอต่างๆ ในจังหวัดเชียงใหม่.....	54
4.2 ข้อมูลหลุมเจาะ CM01.....	56
4.3 ข้อมูลหลุมเจาะ CM02.....	56
4.4 ข้อมูลหลุมเจาะ CM03.....	57
4.5 ข้อมูลหลุมเจาะ CM04.....	57
4.6 ข้อมูลหลุมเจาะ CM05.....	58
4.7 ข้อมูลหลุมเจาะ CM06.....	58
4.8 ข้อมูลหลุมเจาะ CM07.....	59
4.9 ข้อมูลหลุมเจาะ CM08.....	59
4.10 ข้อมูลหลุมเจาะ CM09.....	59
4.11 ข้อมูลหลุมเจาะ CM10.....	60
4.12 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM01.....	81
4.13 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM02.....	81
4.14 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM03.....	81
4.15 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM04.....	81
4.16 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM05.....	82
4.17 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM06.....	82
4.18 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM07.....	82
4.19 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM08.....	82
4.20 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM09.....	83
4.21 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CM10.....	83
4.22 หลุมเจาะที่พิจารณาบริเวณอำเภอต่างๆ ในจังหวัดเชียงราย.....	85
4.23 ข้อมูลหลุมเจาะ CR01.....	86

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.24 ข้อมูลหลุมเจาะ CR02.....	86
4.25 ข้อมูลหลุมเจาะ CR03.....	87
4.26 ข้อมูลหลุมเจาะ CR04.....	87
4.27 ข้อมูลหลุมเจาะ CR05.....	88
4.28 ข้อมูลหลุมเจาะ CR06.....	88
4.29 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CR01.....	101
4.30 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CR02.....	101
4.31 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CR03.....	101
4.32 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CR04.....	101
4.33 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CR05	102
4.34 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน CR06.....	102
4.35 หลุมเจาะที่พิจารณาบริเวณอำเภอต่างๆ ในจังหวัดกาญจนบุรี.....	103
4.36 ข้อมูลหลุมเจาะ KN01.....	104
4.37 ข้อมูลหลุมเจาะ KN02.....	104
4.38 ข้อมูลหลุมเจาะ KN03.....	105
4.39 ข้อมูลหลุมเจาะ KN04.....	105
4.40 ข้อมูลหลุมเจาะ KN05.....	105
4.41 ข้อมูลหลุมเจาะ KN06.....	106
4.42 ข้อมูลหลุมเจาะ KN07.....	106
4.43 ข้อมูลหลุมเจาะ KN08.....	106
4.44 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน KN01	123
4.45 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน KN02	123
4.46 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน KN03	123
4.47 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน KN04	123
4.48 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน KN05	124
4.49 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน KN06	124
4.50 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน KN07	124
4.51 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน KN08	124

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.52 หลุมเจาะที่พิจารณาในกรุงเทพมหานคร.....	126
4.53 ข้อมูลหลุมเจาะ BK01.....	127
4.54 ข้อมูลหลุมเจาะ BK02.....	127
4.55 ข้อมูลหลุมเจาะ BK03.....	128
4.56 ข้อมูลหลุมเจาะ BK04.....	128
4.57 ข้อมูลหลุมเจาะ BK05.....	129
4.58 ข้อมูลหลุมเจาะ BK06.....	129
4.59 ข้อมูลหลุมเจาะ BK07.....	130
4.60 ข้อมูลหลุมเจาะ BK08.....	130
4.61 ข้อมูลหลุมเจาะ BK09.....	131
4.62 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน BK01	150
4.63 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน BK02	150
4.64 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน BK03	150
4.65 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน BK04	150
4.66 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน BK05	151
4.67 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน BK06	151
4.68 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน BK07	151
4.69 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน BK08	151
4.70 อัตราการขยายสเปกตรัมความเร่งที่ผ่านชั้นดิน BK09	152
4.71 ความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับ 30 เมตร (V_{s30}) ประเภทชั้นดินและค่าอัตราขยายตัวของคลื่น แผ่นดินไหวที่บริเวณต่างๆที่ศึกษา.....	153