



INFLUENCE OF SHEAR WAVE VELOCITY MODEL OF SUBSOILS ON SEISMIC SITE EFFECTS

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

อิทธิพลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินต่อคลื่นแผ่นดินไหวบริเวณที่ตั้ง

INFLUENCE OF SHEAR WAVE VELOCITY MODEL OF SUBSOILS ON SEISMIC SITE EFFECTS

อมรเทพ จิรศักดิ์จํารูญศรี¹ และนคร ภู่วโรดม²

¹นักศึกษาปริญญาเอก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

²รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการจำลองคุณสมบัติของชั้นดินต่อลักษณะการขยายกำลังของคลื่นแผ่นดินไหว โดยการจำลองชั้นดินที่มีพารามิเตอร์หลักคือความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน เนื่องจากเป็นค่าที่มีผลต่อพฤติกรรมด้านการขยายคลื่น คาบการสั่นหลัก และระยะเวลาของการสั่นสะเทือนของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหว แบบจำลองของชั้นดินสร้างจากข้อมูลการสำรวจความเร็วคลื่นเฉือนที่เคยมีการศึกษาในพื้นที่ กทม. และจากงานวิจัยก่อนหน้า ผลการศึกษาแสดงในรูปของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวตัวอย่าง และวิจารณ์ผลในด้านการขยายคลื่นและคาบการสั่นหลัก โดยพบว่ากำลังขยายสูงสุดคือประมาณ 6 เท่าเกิดขึ้นที่คาบการสั่นประมาณ 1.0 วินาทีในแบบจำลองของชั้นดินด้วยระดับความลึกชั้นหินประมาณ 160 ถึง 300 เมตร ส่วนแบบจำลองที่ชั้นหินมีความลึกมากประมาณ 400 ถึง 700 เมตร มีผลของกำลังขยายสูงในช่วงคาบยาวประมาณ 2 ถึง 3 วินาทีอยู่ด้วย และมีการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์กับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวซึ่งพบความสอดคล้องดีของผลเมื่อใช้แบบจำลองระดับความลึกชั้นหินประมาณ 400 เมตร ที่สถานีตรวจวัด

คำสำคัญ : คุณสมบัติของชั้นดิน, การวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดิน, การขยายกำลัง, ความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึก

ABSTRACT

This research aims to study the effects of subsoil models on modification of ground motions induced from seismic waves. The parameter for examination is shear wave velocity profile with depth at the site since it is the most influential parameter which governs characteristics of amplification, dominant period and duration of shaking. The models of subsoil were constructed based on recent investigations of shear wave velocity in Bangkok and previous researches. The acceleration response spectral resulted from a set of earthquake waves were presented and examined for their characteristics of amplification and dominant period. The amplification factor of about 6 was found around the period of 1.0 second for the model of 160 to 300 m depth of bedrock. For deeper bedrock model, 400 to 700 m, amplifications in long period ranges of 2 to 3 second were significantly observed. Comparison of results from the analysis and the observed record was made and their good agreement was achieved when using the model of 400 m depth bedrock at the seismometer station.

KEYWORD: Soil properties, Ground response analysis, Amplification, Shear wave velocity profile

1. บทนำ

ในปัจจุบันความเสียหายของแผ่นดินไหวในประเทศไทยได้รับความสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่นและอาจมีการขยายขนาดคลื่นแผ่นดินไหวได้เนื่องจากพฤติกรรมของชั้นดินอ่อนหนา ทำให้ได้มีการกำหนดเป็นกฎหมายและมาตรฐานสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว [1, 2] อย่างไรก็ตาม ข้อมูลด้านคุณสมบัติของชั้นดินที่มีผลต่อการขยายขนาดหรือเปลี่ยนแปลงคาบการสั่นของคลื่นแผ่นดินไหวได้มีการศึกษาไว้อย่างจำกัด และอิทธิพลของข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินเหล่านั้นต่อลักษณะการขยายคลื่นแผ่นดินไหวในเขตกทม. ยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างสมบูรณ์

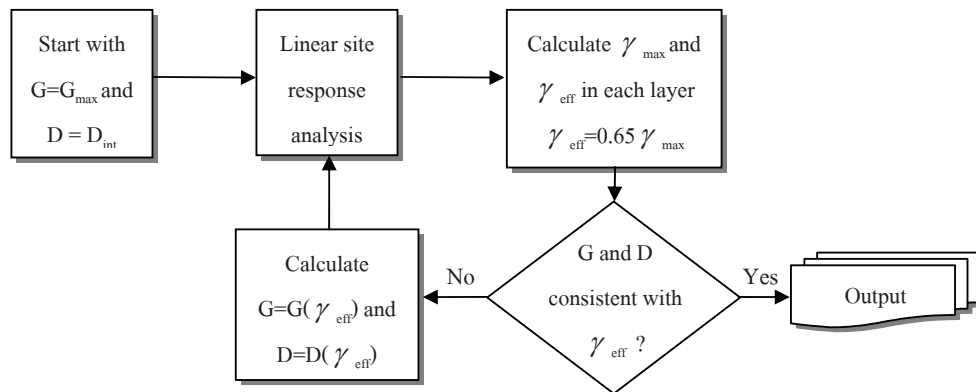
งานวิจัยด้านกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวในกทม. เริ่มต้นโดย Ashford และคณะ (1997) [5] ที่จำลองชั้นดินสำหรับ กทม. ให้มีความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกรูปแบบต่าง ๆ โดยที่ประเมินความเร็วคลื่นเฉือนได้ลึกประมาณ 80 เมตรจากผิวดินและสมมติให้ชั้นดินคล้ายหินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนเท่ากับ 900 เมตรต่อวินาทีอยู่ที่ระดับต่าง ๆ ซึ่งจำแนกเป็น 3 แบบคือ ที่ระดับ 80 เมตร 160 เมตร และ 300 เมตร และจากการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวสมมติที่ระดับความรุนแรง 0.02g ถึง 0.10g พบว่าเกิดการขยายคลื่นที่พื้นดินประมาณ 3 ถึง 7 เท่าตัว โดยผลตอบสนองสูงสุดเกิดที่คาบการสั่นประมาณ 1 วินาที และผลของระดับชั้นที่มีคุณสมบัติคล้ายหินมีผลเล็กน้อยต่อความเร่งสูงสุดที่พื้นผิว แต่มีผลทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมในช่วงคาบการสั่นมากกว่า 1.5 วินาทีสูงขึ้น จากนั้น Arai และ Yamazaki (2002) [4] ได้สำรวจค่าความเร็วคลื่นเฉือนถึงระดับชั้นหินใต้ กทม. โดยการสำรวจแบบ Microtremor และวิเคราะห์ด้วยวิธี Frequency-Wave Number ($f-k$ method) ใน 4 ตำแหน่งสำรวจ และประเมินระดับชั้นหินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 2000 เมตรต่อวินาที ที่ระดับความลึกประมาณ 400 ถึง 670 เมตร Poovarodom และ Plalinyot (2012, 2013) [9, 10] ทำการสำรวจแบบ Microtremor และวิเคราะห์ด้วยวิธี Spatial Autocorrelation (SPAC method) จำนวน 75 ตำแหน่งสำรวจและใช้แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่ผิวดินซึ่งพบการขยายคลื่นแผ่นดินไหวประมาณ 4 ถึง 6 เท่า ในช่วงคาบการสั่นในช่วง 0.6 ถึง 2.5 วินาที

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการจำลองคุณสมบัติด้านความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินเพื่อประเมินลักษณะของการสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหวที่ผิวดิน โดยใช้ข้อมูลการสำรวจจากงานวิจัยในอดีตเพื่อสร้างแบบจำลองชั้นดินลักษณะต่าง ๆ และวิจารณ์ผลที่ทำให้เกิดความแตกต่าง โดยผลที่ได้เพื่อสร้างความเข้าใจเพิ่มเติมและบ่งชี้ถึงประเด็นที่ควรมีการศึกษาเพื่อการพัฒนาการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของ Transfer function ของแต่ละแบบจำลอง และกำลังขยายคลื่นจากความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม รวมถึงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลจากการตรวจวัดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวจริง

2. การวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบเชิงเส้นเทียบเท่า ด้วยแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินใช้เพื่อประเมินขนาดและลักษณะของแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสภาพของชั้นดินบริเวณที่ตั้ง ขั้นตอนหลักคือการจำลองสภาพของชั้นดินให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันและเรียงตัวเป็นชั้นที่ไม่มีขอบเขตทางข้าง มีคุณสมบัติ viscoelastic และมีการแปรในแนวดิ่งจากชั้นล่างสู่ผิวดินของคลื่นเฉือน ซึ่งวิธีวิเคราะห์ที่รวมพฤติกรรมไร้เชิงเส้นของโมดูลัสเฉือนและความหน่วงของชั้นดินด้วยคือการใช้คุณสมบัติแบบเชิงเส้นเทียบเท่าและการคำนวณซ้ำเพื่อให้ได้ค่าโมดูลัสเฉือนและความหน่วงที่สอดคล้องกับค่าความเครียดเฉือนประสิทธิผลในแต่ละชั้นดิน ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้หลักการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบเชิงเส้นเทียบเท่า ด้วยแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ โดยโปรแกรม SHAKE 91 (Idriss and Sun, 1992 [7]) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจาก การนำค่าโมดูลัสเฉือนสูงสุด (G_{max}) ที่ประเมินจากค่า V_s ที่ระดับความลึกใด ๆ ด้วยความสัมพันธ์ $G_{max} = \rho V_s^2$ (ρ คือความหนาแน่นของชั้นดิน) และ ความหน่วงเริ่มต้น (D_{im}) มาสร้างแบบจำลองของแต่ละชั้นดิน จากนั้นป้อนคลื่นแผ่นดินไหวที่ชั้นหินด้านล่างสุดเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยวิธีแบบเชิงเส้น แล้วคำนวณค่าความเครียดเฉือนประสิทธิผล โดยใช้ค่าที่ 65% ของความเครียดเฉือนสูงสุด และประเมินค่า G และ D ด้วยความสัมพันธ์แบบไร้เชิงเส้นที่ระดับความเครียดเฉือนประสิทธิผลนั้น จากนั้นตรวจสอบว่าค่า G และ D ที่ตำแหน่ง ค่าความเครียดเฉือนประสิทธิผลนี้เข้าสู่ค่าตอบหรือมีความแตกต่างจากค่าที่ใช้ใน

รอบก่อนหน้าอย่างน้อยเพียงพหรือไม่ หากยังไม่สอดคล้องกัน ต้องทำการคำนวณซ้ำใหม่ ดังแผนผังการวิเคราะห์ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่า

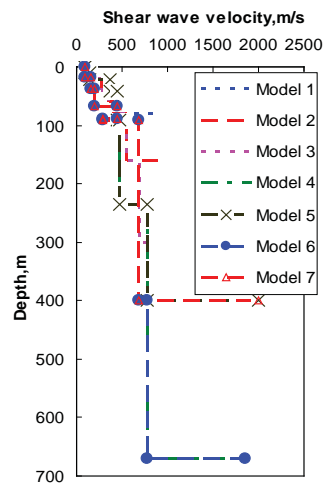
3. แบบจำลองชั้นดินและคลื่นแผ่นดินไหวศึกษา

แบบจำลองชั้นดินที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 7 รูปแบบ ที่จำลองด้วย V_s ตามความลึกของชั้นดินที่แตกต่างกัน โดยที่แบบจำลองที่ 1 ถึง 3 อ้างอิงจากงานวิจัยของ Ashford และคณะ (1997) [5] โดยกำหนดค่า V_s ของชั้นที่มีคุณสมบัติคล้ายหินเท่ากับ 900 เมตรต่อวินาทีที่ระดับลึก 80 160 และ 300 เมตรตามลำดับ (มีค่า V_s เฉลี่ยลึก 30 เมตรเท่ากับ 125 เมตรต่อวินาที) แบบจำลองที่ 4 ถึง 7 เป็นการจำลองถึงระดับความลึกมากตามข้อมูลของวิธี Microtremor โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัด 2 ตำแหน่งคือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (มีค่า V_s เฉลี่ยลึก 30 เมตรเท่ากับ 144 เมตรต่อวินาที) และวัดตำหุ จ.สมุทรปราการ (มีค่า V_s เฉลี่ยลึก 30 เมตรเท่ากับ 116 เมตรต่อวินาที) ซึ่งแบ่งค่า V_s ออกเป็น ช่วงของชั้นดินตื้น ถึงระดับ 90 เมตร ช่วง 90 ถึง 400 เมตร และช่วงลึกตั้งแต่ 400 เมตรถึงชั้นหิน เพื่อศึกษาถึงลักษณะการขยายคลื่นเนื่องจากผลจากการจำลองความเร็วคลื่นเฉือนแบบต่างๆ แบบจำลองที่ 4 ใช้ข้อมูล V_s ช่วง 0 ถึง 90 เมตรจากวิธี SPAC และตั้งแต่ 90 เมตรถึงชั้นหินใช้ข้อมูลจากวิธี $f-k$ ที่ตำแหน่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งพบชั้นหิน มีค่า V_s ประมาณ 2000 เมตรต่อวินาทีที่ระดับความลึก 670 เมตร แบบจำลองที่ 5 ใช้ข้อมูล V_s ช่วง 0 ถึง 90 เมตรจากวิธี SPAC ช่วง 90 ถึง 400 เมตร จากวิธี $f-k$ ที่ตำแหน่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และตั้งแต่ 400 เมตรเป็นชั้นหินตามข้อมูลที่ตำแหน่ง วัดตำหุ จ.สมุทรปราการจากวิธี $f-k$ ซึ่งพบชั้นหิน มีค่า V_s ประมาณ 2000 เมตรต่อวินาทีที่ระดับความลึก 400 เมตร แบบจำลองที่ 6 ใช้ข้อมูล V_s ช่วง 0 ถึง 90 เมตรจากวิธี SPAC ช่วง 90 ถึง 400 เมตร จากวิธี $f-k$ ที่ตำแหน่งวัดตำหุ จ.สมุทรปราการ และตั้งแต่ 400 เมตรถึงชั้นหินใช้ข้อมูลที่ตำแหน่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจากวิธี $f-k$ ซึ่งพบชั้นหิน มีค่า V_s ประมาณ 2000 เมตรต่อวินาทีที่ระดับความลึก 670 เมตร แบบจำลองที่ 7 ใช้ข้อมูล V_s ช่วง 0 ถึง 90 เมตรจากวิธี SPAC และตั้งแต่ 90 เมตรถึงชั้นหินใช้ข้อมูลจากวิธี $f-k$ ที่ตำแหน่ง วัดตำหุ จ.สมุทรปราการ ซึ่งพบชั้นหิน มีค่า V_s ประมาณ 2000 เมตรต่อวินาทีที่ระดับความลึก 400 เมตร

วัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองที่ 4 ถึง 7 คือ เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าความเร็วคลื่นเฉือนในชั้นลึกต่าง ๆ โดยเลือกตำแหน่งตัวอย่าง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แทนย่านศูนย์กลางธุรกิจของ กทม. และจังหวัดสมุทรปราการแทนบริเวณที่มีชั้นดินอ่อนหนาที่สุดในแอ่งดินอ่อนกทม. การสร้างแบบจำลองต่าง ๆ เป็นการใช้อัตราความเร็วคลื่นเฉือนสลับในตำแหน่ง เพื่อศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองต่อการขยายคลื่น ซึ่งแบบจำลองที่ 4 แทนตำแหน่งศูนย์กลางของ กทม. ตั้งแต่ 0 เมตรถึงชั้นหิน แบบจำลองที่ 5 มีช่วง 0 ถึง 400 เมตร แทนตำแหน่งศูนย์กลางของ กทม. จากนั้นจนถึงชั้นหินเป็นข้อมูลจากตำแหน่งดินอ่อนหนาที่สุด แบบจำลอง

ที่ 6 ช่วง 0 ถึง 400 เมตร แทนตำแหน่งดินอ่อนหนาที่สุด จากนั้นจนถึงชั้นหินเป็นข้อมูลจากตำแหน่งศูนย์กลางของ กทม. แบบจำลองที่ 7 แทนตำแหน่งดินอ่อนหนาที่สุด ตั้งแต่ 0 เมตรถึงชั้นหิน รูปที่ 2 แสดงค่า V_s ตามระดับความลึกของแบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษานี้ ส่วนค่าคุณสมบัติด้านอื่นของชั้นดิน ได้แก่ หน่วงน้ำหนัก อ้างอิงจาก [3] อัตราส่วนปัวซอง พฤติกรรมไร้เชิงเส้นของค่าโมดูลัสเฉือนและความหน่วงกับค่าความเครียดเฉือนอ้างอิงจาก [11]

คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ใช้จำนวน 7 คลื่น ซึ่งเป็นชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาในขั้นตอนการกำหนดมาตรฐาน มยผ. 1302 โดยกำหนดจากแนวคิดที่เลือกคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาด ระยะทาง และกลไกของแหล่งกำเนิด เทียบเคียงกับแผ่นดินไหวที่คาดว่าจะเกิดขึ้นที่ระดับชั้นหินใต้ กทม. และแผ่นดินไหวเหล่านี้ได้ถูกปรับลักษณะองค์ประกอบความถี่และขนาดด้วยกระบวนการ Spectral Matching ตารางที่ 1 แสดงคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้เป็นคลื่นตั้งต้นทั้ง 7 คลื่น



รูปที่ 2 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน

ตารางที่ 1 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์

No.	Earthquake	Date	Dist. (km)	M	PGA (g)
1	Borrego Mountain	9/4/68	211	6.5	0.048
2	Denali Alaska	3/11/02	286	7.9	0.062
3	Hector Mine California	16/10/99	144	7.1	0.047
4	Kern County	21/7/52	107	7.7	0.068
5	Kocaeli Turkey	17/8/99	136	7.4	0.062
6	Landers California	28/6/92	117	7.3	0.057
7	Tangshan	28/7/76	140	7.8	0.058

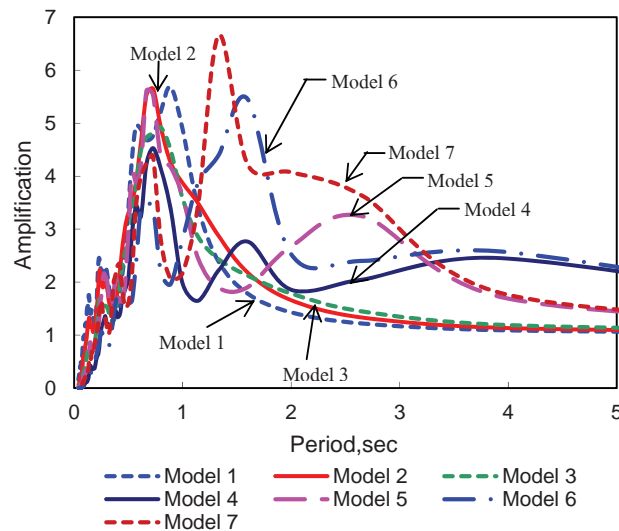
4. ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าแบบ 1 มิติ

ผลการวิเคราะห์นำเสนอในรูปแบบของ Transfer function ของชั้นดิน ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม และอัตราขยายคลื่น โดยมีผลดังนี้

4.1 Transfer function

Transfer function มีนิยามคืออัตราส่วนของแอมพลิจูดของผลตอบสนองที่ผิวดินต่อแอมพลิจูดของคลื่นแบบฮาร์โมนิกที่ป้อน

เข้าไปที่ชั้นหินโผล่ (Rock outcrop) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของผลตอบสนองต่อคลื่นที่มีคาบของการสั่นต่าง ๆ เป็นลักษณะเฉพาะของชั้นดินและไม่ขึ้นอยู่กับรูปแบบแผ่นดินไหว ผลของการวิเคราะห์ทั้ง 7 แบบจำลองแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 Transfer function ของชั้นดิน 7 รูปแบบ

ลักษณะของ Transfer function แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ (1) สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่ 1, 2 และ 3 ที่มีระดับของชั้นดินตั้งแต่ 80 ถึง 300 เมตร Transfer function มีลักษณะที่มียอดแหลม (Peak) ในช่วงคาบ ที่คาบประมาณ 0.7 ถึง 0.9 วินาที ซึ่งมีค่ากำลังขยายสูงสุดประมาณ 5 ถึง 6 เท่าตัว และกำลังขยายมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่คาบตั้งแต่ประมาณ 1.5 วินาทีขึ้นไป กลุ่มที่ (2) สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่ 4 และ 5 ที่ใช้ข้อมูลช่วง 400 เมตรแรกของศูนย์กลาง กทม. และระดับชั้นดินด้านล่างต่างกัน และกลุ่มที่ (3) สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่ 6 และ 7 ที่ใช้ข้อมูลช่วง 400 เมตรแรกของบริเวณดินอ่อนหนาที่สุด และระดับชั้นดินด้านล่างต่างกัน พบว่ามีลักษณะที่มียอดแหลมที่ชัดเจน 2 ถึง 3 ตำแหน่ง ที่คาบประมาณ 0.7, 1.6 และ 2.5 วินาที ซึ่งในช่วงคาบสั้นไม่เกิน 1 วินาที ผลในแต่ละกลุ่มมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างในช่วงคาบยาวเป็นต้นไป ซึ่งลักษณะ Transfer function ในช่วงคาบสั้นเป็นผลหลักมาจากอิทธิพลของความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงต้น ซึ่งแบบจำลองในแต่ละกลุ่มเหมือนกัน ส่วนในช่วงคาบยาวเป็นผลจากความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงลึก โดยที่แบบจำลองที่ 4 และ 6 ที่มีระดับของชั้นหินลึกมากกว่าให้ผลกำลังขยายมากกว่าแบบจำลองที่ 5 และ 7 ในช่วงคาบยาวมากกว่า 3 วินาที แนวโน้มของผลคือ แบบจำลองทั้ง 2 กลุ่มนี้มีกำลังขยายน้อยกว่ากลุ่มที่ (1) ในช่วงคาบสั้นแต่มีกำลังขยายในช่วงคาบยาวมากกว่า Transfer function ของชั้นดินเพียง 1 ชั้นสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยหลักการแพร่ของคลื่นในดิน (Kramer 1996 [8]) ซึ่งเป็นพื้นฐานของการพัฒนาเป็นโปรแกรมช่วยคำนวณสำหรับแบบจำลองของชั้นดินหลายชั้นที่มีความยุ่งยากในกระบวนการวิเคราะห์มากขึ้น หลักพื้นฐานของการวิเคราะห์ Transfer function สรุปเป็นความสัมพันธ์ที่สำคัญได้คือ ก) คาบการสั่นหลัก (T_p) สามารถประเมินได้ดังนี้

$$T_p \approx \frac{4H}{V_s} \quad (1)$$

โดยที่ H คือความหนาของชั้นดิน และ V_s คือความเร็วคลื่นเฉือนสำหรับชั้นดินนั้น

ข) กำลังขยายคลื่น สำหรับค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดของคลื่นที่ชั้น A ต่อค่าของชั้นดิน B ที่ติดกันอยู่ด้านล่างสามารถประเมินได้ดังนี้ (Dobry 2000 [6])

$$\left[\frac{a_A}{a_B} \right]_{\max} \approx \frac{1}{(1/I) + (\pi/2)\beta_s} \quad (2)$$

โดยที่ I = Impedance ratio คืออัตราส่วนของค่าน้ำหนักและความเร็วคลื่นเฉือนของ 2 ชั้นเทียบกัน ($I = \gamma_B V_{SB} / \gamma_A V_{SA}$)
 γ คือ หน่วยน้ำหนักของชั้นดินที่พิจารณา

β_s คือ อัตราส่วนความหน่วงของชั้นดินที่พิจารณา

โดยทั่วไปค่า I มีค่ามากกว่า 1.0 และสำหรับชั้นดินที่มีความแตกต่างของ V_s ระหว่างชั้นมากจะทำให้เกิดการขยายคลื่นได้สูงตามสมการที่ (2) เนื่องจากแบบจำลองที่ศึกษาประกอบด้วยชั้นดินจำนวนมาก (ประมาณ 10 ชั้น) ที่มีค่า I และอัตราส่วนความหน่วงที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการอธิบายภาพรวมของ Transfer function ของชั้นดินรวม จึงพิจารณากาลังขยายที่ขอบเขตของชั้นดินที่มีค่า I สูงเนื่องจากความแตกต่างของค่าความเร็วคลื่นเฉือนอย่างมากเท่านั้น โดยประมาณว่าหน่วยน้ำหนักและอัตราส่วนความหน่วงมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละชั้นดิน

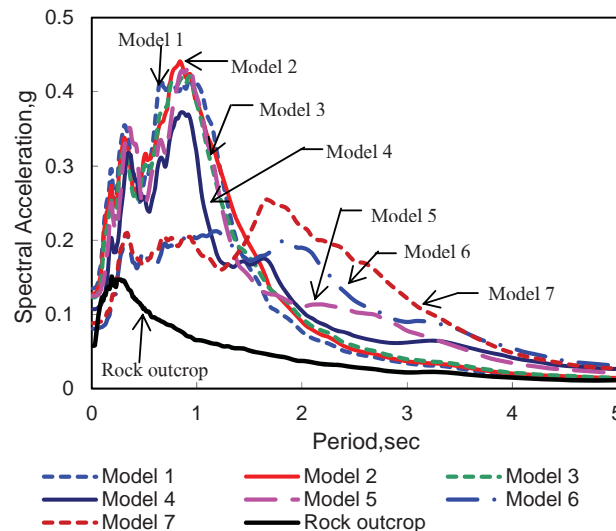
เมื่อพิจารณาผลของ Transfer function ของแต่ละแบบจำลองที่มีลักษณะแตกต่างกันดังหัวข้อที่ 4.1 สามารถอธิบายพฤติกรรมในแบบจำลองชั้นดินที่ซับซ้อนด้วยสมการที่ (1) และ (2) ได้คือ ในแบบจำลองที่ 1 ถึง 3 พบว่ามีค่า I ที่สูงสุดจากค่า V_s เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าตัวที่บริเวณความลึกประมาณ 14 เมตร และเมื่อประมาณค่า T_p ด้วยสมการที่ (1) สำหรับข้อมูลถึงชั้นนี้พบว่ามีความถี่ประมาณ 0.7 ถึง 0.8 วินาทีซึ่งใกล้เคียงกับยอดแหลมใน Transfer function ที่แทนถึงการขยายคลื่นหลักที่คาบการสั่นนี้ ส่วนค่า I ในช่วงอื่น ๆ มีค่าน้อย เนื่องจากค่า V_s เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ในระดับความลึกอื่น ๆ รวมทั้งแบบจำลองมีความลึกเพียง 300 เมตร ทำให้คาบการสั่นที่พิจารณาได้ไม่สูงมากตามลักษณะของการประมาณค่า T_p ตามสมการที่ (1) แบบจำลองที่ 4 และ 5 มีค่า I สูงที่ระดับ 20 และ 240 เมตร และเมื่อประมาณค่า T_p จากข้อมูลถึงชั้นนี้พบว่ามีความถี่ประมาณ 0.7 และ 2.6 วินาที แบบจำลองที่ 6 และ 7 มีค่า I สูงที่ระดับ 17, 70 และ 90 เมตร และเมื่อประมาณค่า T_p จากข้อมูลถึงชั้นนี้พบว่ามีความถี่ประมาณ 0.7, 1.8 และ 2.0 วินาที ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าคาบที่ประมาณได้ตามสมการที่ (1) และข้อมูล V_s ในการศึกษาแล้วพบว่า แบบจำลองที่มีความลึกมากกว่าสามารถแสดงพฤติกรรมการขยายคลื่นได้ในช่วงคาบที่ยาวขึ้น

นอกจากนี้แล้วสามารถสังเกตได้ว่า ค่ากาลังขยายสูงสุดมีค่ามากตามค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ย สำหรับในทุกแบบจำลองพบว่ามีความถี่สูงสุดในช่วงไม่เกิน 1.5 วินาที ซึ่งความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงต้นมีอิทธิพลสูงต่อผลในช่วงคาบสั้นนี้ ดังนั้นจึงพบว่าแบบจำลองที่ 5 และ 7 มีกาลังขยายสูงสุดเนื่องจากค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยถึงความลึก 30 เมตรที่น้อยที่สุด

4.2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นผิวดิน

ผลค่าเฉลี่ยของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ผิวดิน (S_A) จาก 7 คลื่นแผ่นดินไหวที่ป้อนเข้าแบบจำลองชั้นดินต่าง ๆ สำหรับอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.05 แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งรวมผลที่ชั้นหินโผล่ (Rock outcrop) ไว้ในรูปด้วย จากผลพบว่า ค่า S_A จากชั้นดินรูปแบบที่ 1 ถึง 3 มีค่าสูงสุดที่คาบการสั่นประมาณ 1 วินาที และมีค่า S_A สูงที่คาบประมาณ 0.3 วินาทีด้วย ซึ่งผล S_A ที่เกิดขึ้นสูงในช่วงคาบสั้นนี้เป็นผลจากลักษณะของ Transfer function ของชั้นดินกลุ่มนี้ประกอบกับลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ป้อนดังสังเกตได้จากค่า S_A ที่ชั้นหินโผล่ ผล S_A ของแบบจำลองชั้นดินลึกรูปแบบที่ 4 และ 5 มีลักษณะใกล้เคียงกันและคล้ายกับ รูปแบบที่ 1 ถึง 3 ในช่วงคาบสั้น โดยมีค่า S_A สูงสุดในช่วงคาบการสั่นประมาณ 1 วินาที แต่มีค่า S_A สูงกว่าในช่วงคาบการสั่นยาวกว่า 2 วินาที แบบจำลองชั้นดินลึกรูปแบบที่ 6 และ 7 มีลักษณะของ S_A ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงคาบตั้งแต่ประมาณ 0.3 ถึง 2.5 วินาที โดยมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองที่ 1 ถึง 5 ในช่วงคาบสั้นแต่มีค่ามากกว่าในช่วงคาบยาวกว่า 2 วินาทีขึ้นไป ผลที่ได้แสดงถึงอิทธิพลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนต่อ S_A อย่างชัดเจน กล่าวคือ แบบจำลองที่ 1 ถึง 3 ให้ผล S_A สูงที่คาบการสั่นสั้นและไม่แสดงผลในช่วงคาบการสั่นยาวเนื่องจากความลึกของชั้นดินในแบบจำลองแบบจำลองที่ 4 และ 5 มีผลคล้ายกับแบบจำลองที่ 1 ถึง 3 ในช่วงคาบการสั่นสั้น ทั้งนี้เป็นผลจากแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนถึงระดับความลึกประมาณ 300 เมตร แต่มีค่า S_A ในช่วงคาบยาวเนื่องจากผลของความเร็วคลื่นเฉือนที่ลึกขึ้นแบบจำลองที่ 6 และ 7 ค่า S_A ในช่วงคาบสั้นมีค่า

ต่ำกว่าเป็นผลจากแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนที่มีค่า T_p ยาวกว่าคาบการสั่นหลักของคลื่นตัวอย่างที่ใช้ ส่วนค่า S_A ในช่วงคาบยาวเป็นผลของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนในช่วงลึก

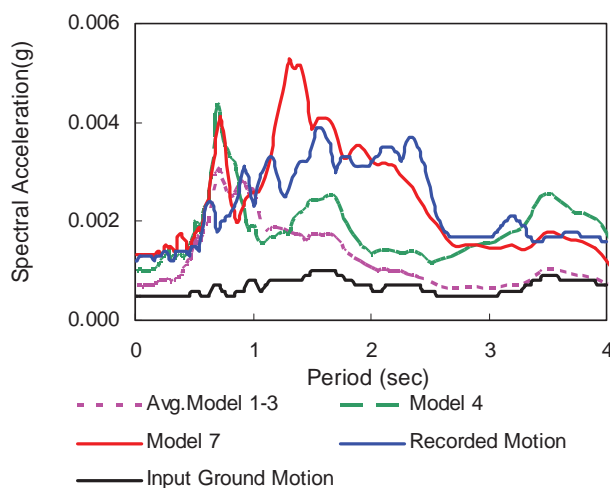


รูปที่ 4 ความเร่งผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ชั้นผิวดิน

4.3 การเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ผิวดินกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.8 ริคเตอร์ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2554 ที่มีจุดศูนย์กลางในประเทศพม่าใกล้ อ.แม่สาย จ.เชียงราย ที่มีข้อมูลการตรวจวัดคลื่นการสั่นสะเทือนได้ที่สถานีตรวจวัดต่าง ๆ ในประเทศ ทำให้สามารถนำมาทำการศึกษาเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกับแบบจำลองที่ได้ใช้ในการศึกษา ข้อมูลสำคัญที่เลือกมาใช้คือ (1) ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่สถานีภท. (ที่กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา) มีระยะทางห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวประมาณ 787 กม. เพื่อใช้เป็นค่าตรวจสอบกับผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดิน (2) ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่สถานีสถานีจังหวัดสุรินทร์ (ที่อ่างเก็บน้ำอำป้อม) มีระยะทางประมาณ 773 กม. ซึ่งถือว่าทั้ง 2 สถานีอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน แต่สถานีสุรินทร์ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็ง ในการวิเคราะห์จึงทำการสมมุติให้สภาพของที่ตั้งสถานีสุรินทร์เป็นชั้นหินโพล (Rock outcrop) ที่ใช้เป็นตัวแทนของชั้นหินเสมือนของใต้ชั้นดินอ่อนในเขตภท.และได้รับผลของแผ่นดินไหวที่เดินทางมาด้วยระยะประมาณเท่ากัน ดังนั้น จึงจำลองชั้นดินในเขตภท. ด้วยความเร็วคลื่นเฉือนที่เปลี่ยนตามความลึกแบบต่าง ๆ และนำคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ที่สถานีจังหวัดสุรินทร์มาใช้ป้อนเสมือนเป็นคลื่นที่ชั้นหินใต้ภท.

ผลการวิเคราะห์ค่า S_A ที่ผิวดินสำหรับค่าเฉลี่ยของแบบจำลองที่ 1 ถึง 3 แบบจำลองที่ 4 และ 7 ร่วมกับผลการตรวจวัดแสดงในรูปที่ 5 จากข้อมูลที่ตรวจวัดได้แสดงถึงดินอ่อนใน ภท. ขยายขนาดความรุนแรงจากแผ่นดินไหวได้ถึง 5 เท่า โดยมีช่วงของค่าคาบที่มีการขยายคลื่นสูงมากเป็นช่วงกว้างประมาณ 0.6 ถึง 2.7 วินาที และจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดินต้นแบบที่ 1 ถึง 3 แสดงเพียงการขยายคลื่นในช่วงคาบสั้นกว่า 1 วินาที แบบจำลองที่ 4 สำหรับชั้นหินลึก 670 เมตรให้ผลในช่วงคาบการสั่นยาวกว่า 1 วินาทีเพิ่มขึ้นแต่ยังต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ ส่วนแบบจำลองที่ 7 สำหรับชั้นหินลึก 400 เมตรให้ผล S_A ในช่วงคาบการสั่นยาวได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมากที่สุด แต่ให้ผล S_A สูงกว่าที่คาบประมาณ 1.5 วินาที



รูปที่ 5 S_A จากเหตุการณ์ 24 มี.ค. 54 ที่ชั้นผิวดินที่ได้จากการวิเคราะห์และการตรวจวัด

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาอิทธิพลของการจำลองคุณสมบัติของชั้นดินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกแบบต่าง ๆ ต่อลักษณะของการขยายกำลังของคลื่นเนื่องจากแผ่นดินไหว มีข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

- (1) ลักษณะของ Transfer function ของชั้นดินมีผลจากแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนคือ แบบจำลองที่ลึกมากให้ผลการขยายคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาวสูงกว่าแบบจำลองตื้น และค่ากำลังขยายสูงสุดมีค่ามากสำหรับชั้นดินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำ ผลสำหรับชั้นดินที่ศึกษาในเขต กทม.พบว่ามีการขยายคลื่นประมาณ 5 ถึง 6 เท่าที่คาบการสั่นประมาณ 1 ถึง 1.5 วินาที
- (2) ผลความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (S_A) จากคลื่นแผ่นดินไหวตัวอย่าง มีลักษณะสอดคล้องกับผลของ Transfer function ของแต่ละแบบจำลอง และมีผลจากองค์ประกอบความถี่ของคลื่นตัวอย่างที่ใช้ศึกษา ผลที่ได้แสดงว่า S_A มีค่าสูงในช่วงคาบการสั่นสั้นสำหรับแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนตื้น และความเร็วคลื่นเฉือนสูง และพบว่า S_A มีค่าน้อยในช่วงคาบการสั่นสั้นแต่มีค่าสูงในช่วงคาบการสั่นยาวสำหรับแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนต่ำและมีความลึกมาก
- (3) ผลการเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จากบริเวณเขต บางนา กทม. เนื่องจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวจริงพบว่าแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนตื้นไม่สามารถทำนายการขยายคลื่นในช่วงคาบการสั่นยาวได้ดี โดยมีกำลังขยายสูงเฉพาะในช่วงคาบการสั่นสั้น และได้แสดงไว้ว่าแบบจำลองที่มีความลึกถึงประมาณ 400 เมตรให้ผลในช่วงคาบการสั่นยาวสอดคล้องกับผลจากการตรวจวัดจริงมากกว่า
- (4) แบบจำลองที่ถูกต้องของความเร็วคลื่นเฉือนถึงระดับชั้นหินมีความสำคัญมากต่อการวิเคราะห์การตอบสนองของพื้นดินจากแผ่นดินไหว ข้อมูลเหล่านี้ควรได้รับการศึกษาให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นเพื่อการประเมินพฤติกรรมของการขยายคลื่นของชั้นดินในพื้นที่กทม. อย่างถูกต้อง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของ

แผ่นดินไหว พ.ศ. 2550

- [2] กรมโยธาธิการและผังเมือง, “มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302)”, 2552.
- [3] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, “ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง”, 2548.
- [4] H. Arai and F. Yamazaki, “Exploration of S-wave velocity structures using microtremor arrays in Bangkok, Thailand”, Earthquake Disaster Mitigation Research Center, Japan, 2002.
- [5] S. A. Ashford, W. Jakrapyanun and P. Lukkanaprasit, “Amplification of Earthquake Ground Motions in Bangkok”, Final Report on Reserch Sponsored by the Royal Thai Government, Public Works Department, Ministry of Interior, Thailand, 1997.
- [6] M. Dobry, et al., “New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions”, Earthquake spectra, Vol. 16, No.1, 2000.
- [7] I. M. Idriss and J. I. Sun, “User manual for SHAKE91”, Center for Geotechnical Modeling. Dept. of Civil & Environ. Eng. University of California. Davis, California, 1992.
- [8] S. L. Kramer, “Geotechnical Earthquake Engineering”, New Jersey. Prentice–Hall, Inc. Simon & Schuster / A Viacom Company, 1996.
- [9] N. Poovarodom and N. Plalinyot, “Evaluation of Site Effects in the Greater Bangkok by Microtremor Observations”, Proc. of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, paper No. 4115, Lisbon, Portugal, 2012
- [10] N. Poovarodom and N. Plalinyot, “Site Characterization in the Greater Bangkok Area by Microtremor Observations”, Journal of Earthquake Engineering, 17 (Febuary): 209–226, 2013.
- [11] S. Shibuya, S.B. Tamrakar and W. Manakul, “Geotechnical hazards in Bangkok–present and future”, Lowland Technology International, 5(1), 1–13, 2003.