วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
Engineering Journal of Research and Development
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage
ปีที่ 34 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2566
Volume 34 Issue 4 October-December 2023
Received 16 July 2023
Revised 8 August 2023
Accepted 16 December 2023

ผลกระทบของรูปร่างแอ่งดินต่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว

EFFECTS OF BASIN GEOMETRY MODEL ON SEISMIC SITE RESPONSE ANALYSIS

นรวีร์ ภานุมาศ[1], นคร ภู่วโรดม[2] และอมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี[3*]
[1]นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[2]ศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[3]อาจารย์, สาขาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนายั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[*]*Corresponding author, E-Mail: amorntep@tu.ac.th*

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเพื่อประเมินระดับความรุนแรงและลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวอาจใช้แบบจำลองแบบ 1 มิติ ที่จำลองให้ชั้นดินเรียงตัวไม่มีขอบเขตทางข้าง ซึ่งเหมาะสมสำหรับตำแหน่งบริเวณกลางแอ่งดินขนาดใหญ่ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงของแอ่ง แต่สำหรับแอ่งดินขนาดเล็ก การแพร่และสะท้อนของคลื่นแผ่นดินไหวภายในแอ่งดินอาจมีผลต่อการตอบสนองของพื้นได้มาก บทความนี้เสนอการศึกษาผลของรูปร่างแอ่งดินคือ ความกว้างของแอ่ง ความชันของขอบแอ่ง ต่อการตอบสนองของพื้นเนื่องจากแผ่นดินไหวโดยใช้แบบจำลองแอ่งดินแบบ 2 มิติ และพิจารณาผลตอบสนองของพื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการเสนอขั้นตอนในการปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลอง 2 มิติให้ได้ผลเท่ากับแบบจำลอง 1 มิติที่เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปให้ได้ผลที่สอดคล้องกันสำหรับแอ่งดินขนาดใหญ่ แล้วทำการเปรียบเทียบความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี ซึ่งผลแสดงว่า สำหรับแอ่งขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วนความกว้างประมาณ 20 เท่าของความลึก การวิเคราะห์โดยแบบจำลอง 1 มิติให้ผลใกล้เคียงกับแบบจำลอง 2 มิติ แต่หากแอ่งมีขนาดเล็กลง เช่น แอ่งที่มีความกว้างประมาณ 5 เท่าของความลึก ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง 2 มิติอาจสูงกว่าผลจากแบบจำลองแบบ 1 มิติประมาณร้อยละ 70 และผลของความชันแสดงความสำคัญของรูปร่างของขอบแอ่ง ตัวอย่างเช่น หากขอบแอ่งมีความชัน 45 องศา ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง 2 มิติอาจสูงกว่าผลจากแบบจำลองแบบ 1 มิติประมาณร้อยละ 90

คำสำคัญ: แผ่นดินไหว; ผลกระทบบริเวณที่ตั้ง; รูปร่างแอ่งดิน; การตอบสนองของพื้นดิน

ABSTRACT

Ground response analysis of seismic waves can utilize a one-dimensional model that represents the soil layers as unbounded layers. This model is suitable for locations within large soil basins where there are no significant changes in the basin geometry. However, for small basins, the propagation and reflection of seismic waves within the basin may significantly affect the response of t he ground. This article presents a study on the effects of the basin geometry, including the width of the basin and the slope of its edges, on the

Norawee Panumas[1,] Nakhorn Poovarodom[2] and Amorntep Jirasakjamroonsri[3*]
[1]Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand.
[2]Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand.
[3*]Lecturer, Department of Sustainable Development Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Thailand.

ground response to seismic waves using a two-dimensional model. The study considers the response at various locations by equivalent linear analysis of the finite element model. The process begins by presenting the steps for adjusting the parameters of the two-dimensional model to match the results of the one-dimensional model, which provides consistent results for large basins. Then, the acceleration response spectra obtained from both methods are compared. The results show that for large basins with a width-to-depth ratio of approximately 20, the analysis using the one-dimensional model produces results that are close to those obtained from the two-dimensional model. However, for smaller basins, such as those with a width-to-depth ratio of approximately 5, the results from the two-dimensional model may be significantly higher than those from the one-dimensional model, by up to approximately 70%. Additionally, the results indicate the importance of the slope of the basin edges in influencing the shape of the basin. For instance, if the edges have a slope of 45 degrees, the results from the two-dimensional model may be significantly higher than those from the one-dimensional model, by up to approximately 90%.

KEYWORDS: earthquake; site effects; basin geometry; ground response

1. บทนำ

การศึกษาผลตอบสนองของดินบริเวณที่ตั้งเป็นส่วนสำคัญสำหรับกระบวนการออกแบบโครงสร้าง เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหว อาคารต่าง ๆ จะมีการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแตกต่างกันออกไป โดยหนึ่งในปัจจัยหลักคือ คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน โดยทั่วไปการขยายคลื่นเกิดจากการอนุรักษ์พลังงานของคลื่นเมื่อแพร่เข้าสู่ตัวกลางชั้นดินที่มีคุณสมบัติต่างกัน โดยเรียงตัวจากชั้นล่างเป็นชั้นดินแข็ง ชั้นบนเป็นชั้นดินอ่อน การแพร่ของคลื่นจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนจะทำให้ระดับการสั่นสะเทือนของคลื่นเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่พื้นที่ที่มีลักษณะเป็นแอ่งดินตะกอนและมีขอบเขตเป็นหินแข็ง สภาพเป็นแอ่งสามารถทำให้เกิดการหักเหและการสะท้อนของคลื่นภายในแอ่งได้

ในปัจจุบันการวิเคราะห์ผลตอบสนองของดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวด้วยแบบจำลอง 1 มิติ ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า เป็นวิธีที่แพร่หลายและใช้กันโดยทั่วไป เนื่องจากมีขั้นตอนไม่ซับซ้อนและใช้พารามิเตอร์ไม่มาก จึงเป็นพื้นฐานในการวิจัยทั่วไป รวมทั้งนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเพื่อสร้างความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1301/1302-61) ของแอ่งกรุงเทพฯ แต่การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ ยังมีข้อจำกัดหากต้องพิจารณาผลของรูปร่างแอ่งดิน เนื่องจากการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์บนพื้นฐานของการจำลองสภาพชั้นดินเป็นเนื้อเดียวกันและเรียงตัวเป็นชั้นที่มีขอบข้างในแนวราบเป็นอนันต์ ซึ่งไม่สามารถสะท้อนรูปร่างจริงของแอ่งดินได้ ถ้าหากต้องการวิเคราะห์ชั้นดินที่มีความซับซ้อนมากขึ้น อย่างเช่น พื้นที่ที่มีลักษณะเป็นแอ่งตะกอนลาดชันหรือแอ่งมีขนาดแคบ การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ จึงมีความจำเป็นที่ต้องนำมาศึกษา เพื่อให้สามารถพิจารณาผลของการสะท้อนและหักเหของคลื่นแผ่นดินไหวภายในแอ่งได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของลักษณะรูปร่างแอ่งดินซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อความรุนแรงของผลตอบสนองแผ่นดินไหว โดยวิเคราะห์ผลตอบสนองของแอ่งดิน 2 มิติ ที่ความกว้างและความชันต่างกันด้วยวิธี ไม่เชิงเส้น แล้วเปรียบเทียบกับผลตอบสนองจากแบบจำลอง 1 มิติ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า ซึ่งเริ่มจากการศึกษาแอ่งขนาดใหญ่ที่ปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลอง 2 มิติ ให้ได้ผลใกล้เคียงกับแบบจำลอง 1 มิติ แล้วใช้แบบจำลอง 2 มิติศึกษาผลกระทบจากขนาดของแอ่งและความชันของขอบแอ่ง ซึ่งทำให้ทราบผลของรูปร่างแอ่งและได้แนวทางที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวของแอ่งดินจริงตามสภาพทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกันต่อไป

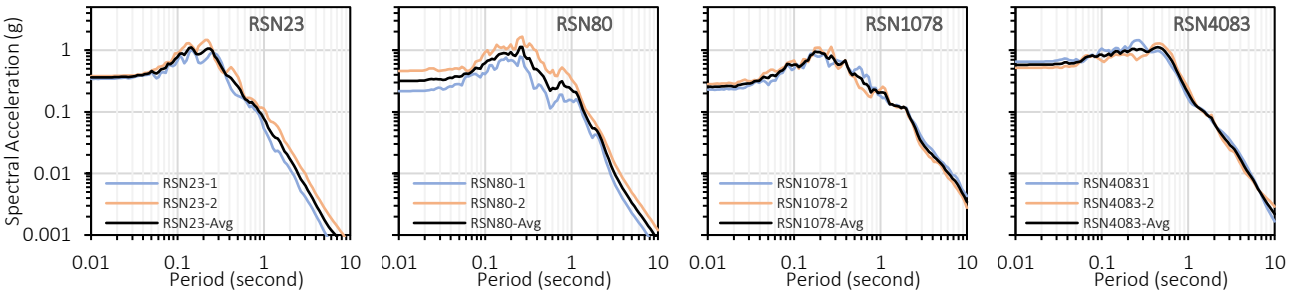
2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่า (Equivalent Linear Analysis) โดยการใช้แบบจำลองชั้นดิน 2 รูปแบบ ประกอบด้วย (1) แบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ มีสมมติฐานให้ชั้นดินเรียงตัวไม่มีขอบเขตทางข้าง โดยชั้นดินแต่ละชั้นมีคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์แบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear Soil Properties) ได้แก่ โมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) และอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) สำหรับการวิเคราะห์จะเป็นกระบวนการคำนวณซ้ำเพื่อให้ได้ค่าโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนความหน่วงที่สอดคล้องกับค่าความเครียดเฉือนประสิทธิผล (Effective Shear Strain) สำหรับชั้นดินแต่ละชั้น โดยใช้โปรแกรม DEEPSOIL [1] และ (2) แบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ ที่พิจารณาผลของขอบเขตทางข้างและรูปร่างของแอ่งให้มีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินเป็นข้อมูลชุดเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ สำหรับโปรแกรมที่ใช้ คือ OpenSees [2] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เพื่อศึกษาผลตอบสนองของแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ ภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยกระบวนการวิเคราะห์จะเป็นการวิเคราะห์ซ้ำในแต่ละเวลาจนกระทั่งคำตอบลู่เข้าสู่เงื่อนไขที่กำหนด

การศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาผลกระทบของรูปร่างแอ่งดิน ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลัก 2 ประการ ได้แก่ ปัจจัยของความกว้างของแอ่งดิน และผลของความชันของแอ่งดิน

2.1 คลื่นแผ่นดินไหว

คลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินในการศึกษานี้ เป็นชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่มาจากการสร้าง Conditional Mean Spectrum (CMS) โดยการเลือกและปรับสเกลให้สอดคล้องกับค่าสเปกตรัมของพื้นที่นอกแอ่งกรุงเทพฯ (High Hazard จังหวัดแพร่) [3] ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที และมีค่าคาบการเกิดซ้ำ 2,475 ปี ประกอบด้วยคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 4 ชุด แต่ละชุดมีองค์ประกอบของคลื่นที่ตั้งฉากกันในแนวราบ 2 ทิศทาง รูปที่ 1 แสดงค่าสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 2 ทิศทางของแต่ละชุดและค่าเฉลี่ย



รูปที่ 1 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับวิเคราะห์ผลตอบสนองที่คาบการสั่นสอดคล้องกับ CMS 0.2 วินาที

2.2 คุณสมบัติของวัสดุ

แบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ ที่ใช้ในการศึกษานี้ มีจำนวนชั้นดิน 1 ชั้น หนา 100 เมตร กำหนดให้ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity, VS) เท่ากับ 300 เมตรต่อวินาที และมีค่าความหนาแน่น (Density) เท่ากับ 1,631 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินที่เลือกใช้ คือ ดินที่มีค่า Plasticity Index (PI) เท่ากับ 30 ซึ่งจะมีค่า Modulus of Reduction Curve และ Damping Curve ตามการศึกษาของ Vucetic and Dobry(1991) [4] ดังรูปที่ 3

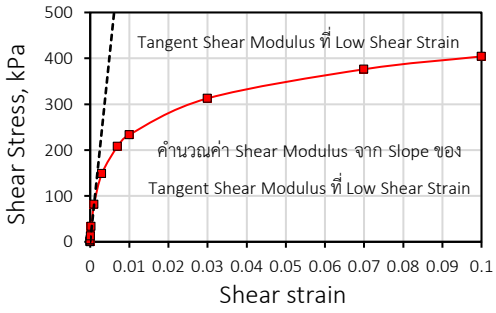
สำหรับแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติ กำหนดให้คุณสมบัติของชั้นดินที่เลือกใช้เหมือนกับกรณีของแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ แต่เนื่องจากแบบจำลอง 2 มิติ สามารถกำหนดขอบเขตด้านข้างได้ โดยการศึกษานี้กำหนดให้ด้านข้างของชั้นดินคือชั้นหิน ที่มีค่า VS เท่ากับ 2,500 เมตรต่อวินาที และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,243 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำหนดให้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) รอบแบบจำลองเป็นการจำกัดการเคลื่อนที่ด้านข้างไม่ให้มีการเคลื่อนตัว ซึ่งการกำหนดแบบดังกล่าวทำให้เกิดผลกระทบต่อบริเวณขอบของแอ่ง เนื่องจากเกิดการสะท้อนกลับและหักเหของคลื่น ดังนั้น เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว การศึกษานี้จึงทำการขยายระยะขอบเขตด้านข้างไกลออกจากขอบเขตของชั้นดินที่ต้องการศึกษาอย่างเพียงพอ

2.2 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ

คุณสมบัติของวัสดุสำหรับแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ ในโปรแกรม OpenSees ดังตารางที่ 1 ประกอบด้วย (1) ค่าความหนาแน่น (Mass Density) (2) ค่าโมดูลัสเฉือนที่ระดับความเครียดต่ำ (Low-Strain Shear Modulus) สามารถหาได้จากการสร้างเส้นสัมผัสบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเฉือน (Shear Stress- Shear Strain Curve) ที่ระดับความเครียดต่ำ ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของชั้นดินและชั้นหิน

Type	Unit Weight (kN/m^3)	Vs (m/s)	G (MPa)	K (MPa)	Mesh Size (m)
Soil(PI=30)	16	300	81.9	54.6	10
Rock	22	2500	Elastic Properties		20



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress และ Shear Strain

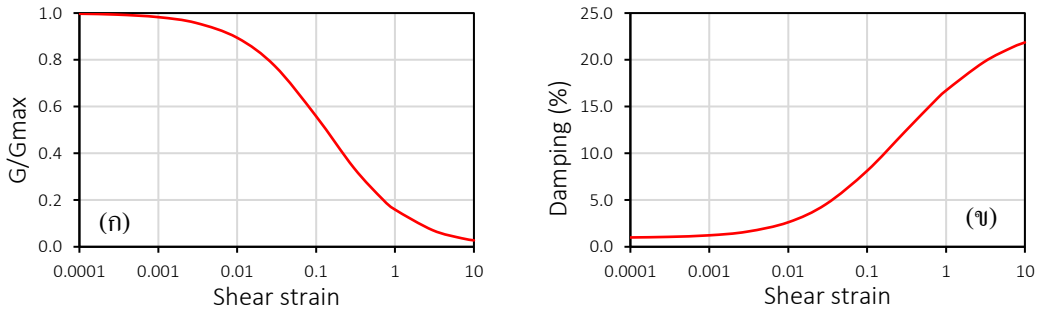
สำหรับการคำนวณค่า Shear Stress สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความหนาแน่นของดิน (Density) ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (VS) ค่าความเครียดเฉือน (Shear Strain) และค่าการลดลงของโมดูลัส (Modulus of Reduction, G/Gmax) ที่ตำแหน่งของ Shear Strain ที่พิจารณา ดังสมการที่ 1

$$Shear\ Stress = Density\ x\ (VS^2)\ x\ Shear\ Strain\ x\ G/Gmax \quad (1)$$

สำหรับค่าการลดลงของโมดูลัสใช้ค่าตามการศึกษาของ Vucetic and Dobry(1991) [4] โดยใช้ค่า Modulus of Reduction Curve ที่ค่า Plasticity Index เท่ากับ 30 ดังรูปที่ 3 สำหรับค่าโมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk Modulus, K) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$K = [2G(1+\nu)] / [3(1-(2\nu)] \quad (2)$$

กำหนดให้ ν คือ อัตราส่วนป๊วซอง สำหรับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ มีค่าเท่ากับ 0 และสามารถใช้ค่าอัตราส่วนป๊วซองตามชนิดของดินเมื่อวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ



รูปที่ 3 (ก) Modulus of Reduction Curve (PI=30), (ข) Damping Curve (PI=30)

สำหรับอัตราส่วนความหน่วงในงานศึกษานี้ ใช้อัตราส่วนความหน่วงแบบ Rayleigh (Rayleigh Damping) ซึ่งสามารถใช้สองความถี่ที่เป็นขีดจำกัดของความถี่ที่สนใจ โดยกำหนดค่า Rayleigh Damping เท่ากับ 5% และเลือกใช้ความถี่ที่ 1 เท่ากับความถี่ธรรมชาติของชั้นดิน ($f = VS/4H$) [5] ส่วนความถี่ที่ 2 ใช้ค่าเท่ากับ 5 เท่าของค่าความถี่ธรรมชาติ

การกำหนดค่าขนาดของ Mesh สำหรับวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ต้องเลือกขนาดให้เหมาะสมเพื่อให้แน่ใจว่ามีขนาดเพียงพอที่จะสามารถครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นของคลื่นเฉือน ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยอัตราส่วนของความเร็วคลื่นเฉือนต่ำสุดและความถี่สูงสุดที่ต้องการวิเคราะห์ผลตอบสนองดังสมการที่ 3 [1]

$$H < VS/(4f_{max}) \quad (3)$$

โดย H คือ ขนาดของ Mesh และ f_{max} คือ ความถี่สูงสุดที่ต้องการวิเคราะห์

2.3 แบบจำลองชั้นดินสำหรับศึกษา

แบบจำลองชั้นดินที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ แบบจำลองชั้นดิน 1 มิติ และแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ โดยแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ คือ แบบจำลองชั้นดินที่มีสมมติฐานให้ชั้นดินเรียงตัวในแนวราบโดยไม่มีขอบเขตทางข้าง ส่วนแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติ คือ แบบจำลองชั้นดินที่พิจารณารูปร่างของแอ่งได้สมบูรณ์มากขึ้น และพิจารณาขอบเขตทางข้างของแบบจำลองชั้นดิน รวมถึงพิจารณาการเรียงตัวของชั้นดินที่มีความซับซ้อนได้มากกว่าแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ

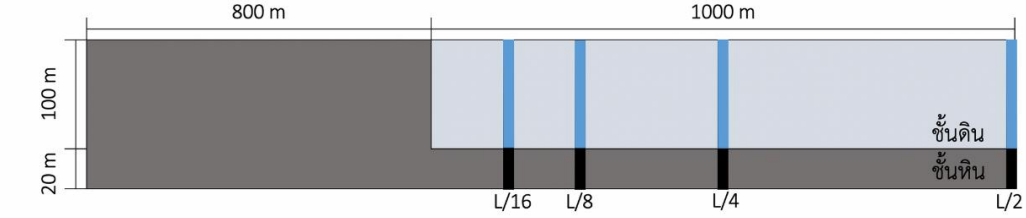
สำหรับแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติ ต้องพิจารณาผลการสะท้อนและหักเหของคลื่นแผ่นดินไหวที่สามารถส่งผลต่อแอ่งดินในบริเวณที่สนใจศึกษาได้ ดังนั้น แนวทางในการลดอิทธิพลดังกล่าวสามารถดำเนินการได้โดยการขยายความกว้างของขอบเขตด้านข้างของแบบจำลอง โดยการศึกษานี้กำหนดให้ความกว้างของขอบเขตด้านข้างคือ 8 เท่าของความลึก

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของแบบจำลองชั้นดิน 2 มิติ ภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวในการศึกษานี้ พิจารณาอิทธิพลอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของแอ่งดิน (L/H Ratio) และอิทธิพลของความชันด้านข้างของแอ่งดินด้วย โดยรายละเอียดแบบจำลองชั้นดินที่ใช้ในการศึกษานี้ทั้งแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดแบบจำลองที่ศึกษา

แบบจำลองที่	ความลึก (H)	ความกว้าง (L)	L/H Ratio	ความชัน (Degree)
1	100	500	5	90
2	100	1,000	10	90
3	100	2,000	20	90
4	100	2,000	20	5
5	100	2,000	20	15
6	100	2,000	20	45

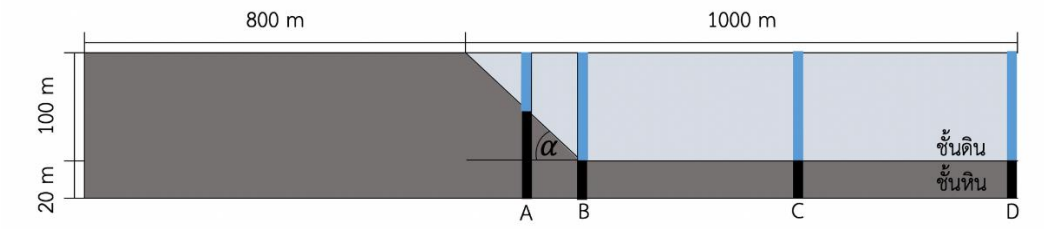
สำหรับการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินจากแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นเทียบเท่าในการศึกษานี้ ประกอบด้วย การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ตำแหน่งแตกต่างกันจำนวน 4 ตำแหน่ง สำหรับแบบจำลองชั้นดินที่ไม่พิจารณาผลของความชัน ได้แก่ L/16, L/8, L/4, และ L/2 ดังรูปที่ 4 ส่วนการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองชั้นที่พิจารณาความชันของแอ่ง ทำการเปรียบเทียบที่ตำแหน่งแตกต่างกันจำนวน 4 ตำแหน่ง ได้แก่ (1) ตำแหน่ง A กึ่งกลางของช่วงที่เป็นความชัน มีความลึก 50 เมตร (2) ตำแหน่ง B คือ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันจากฐานของแอ่งดิน (3) ตำแหน่ง C คือ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างกึ่งกลางของแอ่งดินกับตำแหน่ง B และ (4) ตำแหน่ง D คือ ตำแหน่งกึ่งกลางแอ่งดิน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 แบบจำลองแอ่งดินสำหรับพิจารณผลตอบสนองที่ตำแหน่งต่างกัน

3. ผลการศึกษา

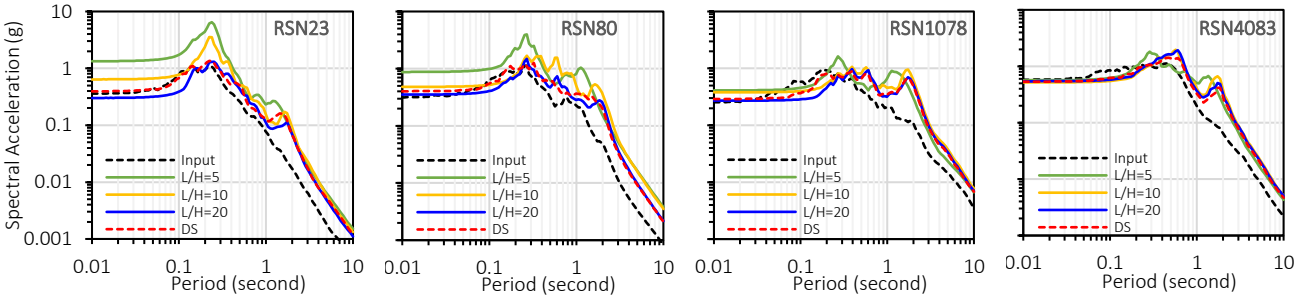
ผลการศึกษาสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ผลตอบสนองของแอ่งดินที่พิจารณาอิทธิพลของความกว้างของแอ่งดินระหว่างแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ และส่วนที่ 2 ผลตอบสนองของแอ่งดินที่พิจารณาอิทธิพลของความชันด้านข้างของแอ่งดิน โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 5 แบบจำลองแอ่งดินสำหรับพิจารณาผลของความชันของขอบแอ่ง

3.1 อิทธิพลของความกว้างของแบบจำลองแอ่งดิน

การศึกษาอิทธิพลของความกว้างแอ่งดินโดยพิจารณาผลตอบสนองที่ผิวดิน บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางแอ่งของแบบจำลองที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของแอ่งดินต่างกัน พบว่า ผลตอบสนองจากการวิเคราะห์แบบจำลอง 2 มิติ มีค่าแตกต่างจากการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ เมื่อแบบจำลองมีอัตราส่วน L/H น้อยหรือมีลักษณะเป็นแอ่งแคบดังรูปที่ 6 เช่น L/H เท่ากับ 5 ผลตอบสนองแตกต่างจากการวิเคราะห์แบบ 1 มิติอย่างชัดเจน โดยมีความแตกต่างโดยเฉลี่ยร้อยละ 45 และเมื่อแอ่งมีขนาดกว้างขึ้น เช่น L/H เท่ากับ 10 ผลตอบสนองจะใกล้เคียง 1 มิติมากขึ้น จนแอ่ง L/H เท่ากับ 20 ซึ่งแอ่งมีลักษณะกว้างและราบ ให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ ดังรูปที่ 7 แสดงตัวอย่างของผลตอบสนองที่ L/H เท่ากับ 20 ของคลื่นชุด RSN4083 ที่สอดคล้องกันดีกับ 1 มิติ โดยมีค่าความแตกต่างของผลตอบสนองระหว่าง 2 แบบจำลองเพียงร้อยละ 8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อแอ่งดินมีอัตราส่วน L/H สูงหรือแอ่งกว้าง ที่ตำแหน่งผิวดินบริเวณกลางแอ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติได้ ในขณะที่แอ่งแคบหากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ จะให้ผลตอบสนองที่ต่ำเกินไป

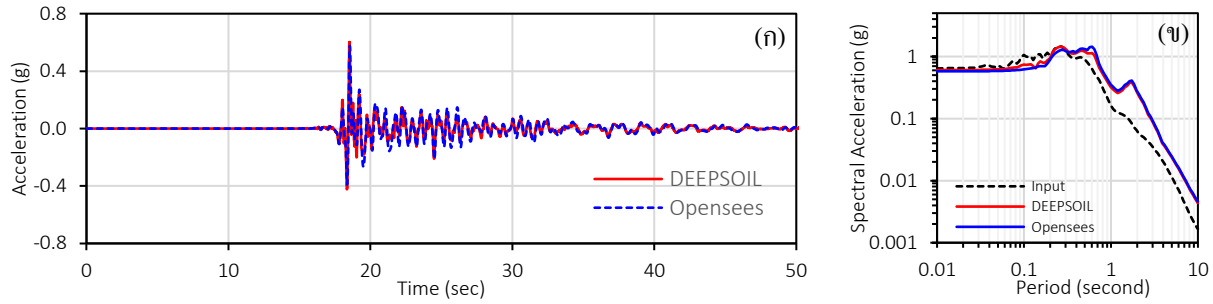


รูปที่ 6 ผลตอบสนองบริเวณกลางแอ่งที่ความกว้างแอ่งดินต่างกัน

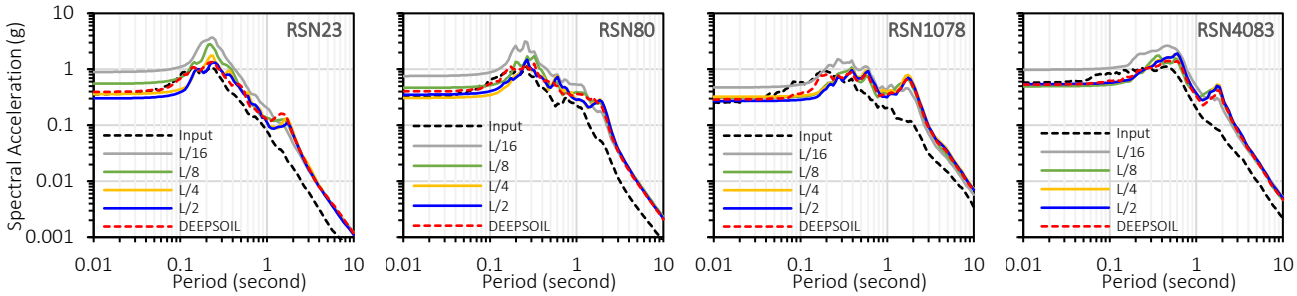
เมื่อพิจารณาที่คาบการสั่นหลักของคลื่นทั้ง 4 ชุด พบว่า แอ่งแคบจะมีผลตอบสนองที่รุนแรงเมื่อคาบการสั่นหลักของคลื่นแผ่นดินไหวอยู่ที่ช่วงคาบสั้น ดังผลตอบสนองของคลื่นชุด RSN23 และ RSN80 ในขณะที่คลื่นชุด RSN1078 และ RSN4083 มีคาบการสั่นหลักที่ช่วงคาบยาวขึ้น แนวโน้มความรุนของผลตอบสนองของแอ่งแคบมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาตำแหน่งที่เข้าใกล้ขอบแอ่งดินมากขึ้น ได้แก่ ตำแหน่ง L/2, L/4, L/8, และ L/16 พบว่า ผลตอบสนองของชั้นดินมีแนวโน้มที่จะแตกต่างกันมากขึ้นระหว่างการวิเคราะห์ผลตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ กล่าวคือ ที่ตำแหน่ง L/16 มีค่าความแตกต่างเฉลี่ยของผลตอบสนองบนผิวดินของคลื่นทั้ง 4 ชุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ ประมาณร้อยละ 46 ซึ่งค่าแตกต่างกันมากที่สุด ในขณะที่ตำแหน่ง L/8 และ L/4 ทั้งสองตำแหน่งมีค่าความแตกต่างเฉลี่ยประมาณร้อยละ 14 และ 15 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาบริเวณกลางแอ่งที่ตำแหน่ง L/2 ผลตอบสนองใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ เนื่องจากเป็นบริเวณที่

แอ่งดินมีความกว้างเพียงพอที่กลางแอ่งไม่ได้รับผลกระทบจากขอบแอ่ง ทำให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงแบบจำลอง 1 มิติ ที่มีขอบเขตด้านข้างในแนวราบไม่จำกัดดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 ผลตอบสนองของแอ่งดินอัตราส่วน L/H = 20 (RSN4083-1) (ก) Acceleration Time History (ข) Spectral Acceleration



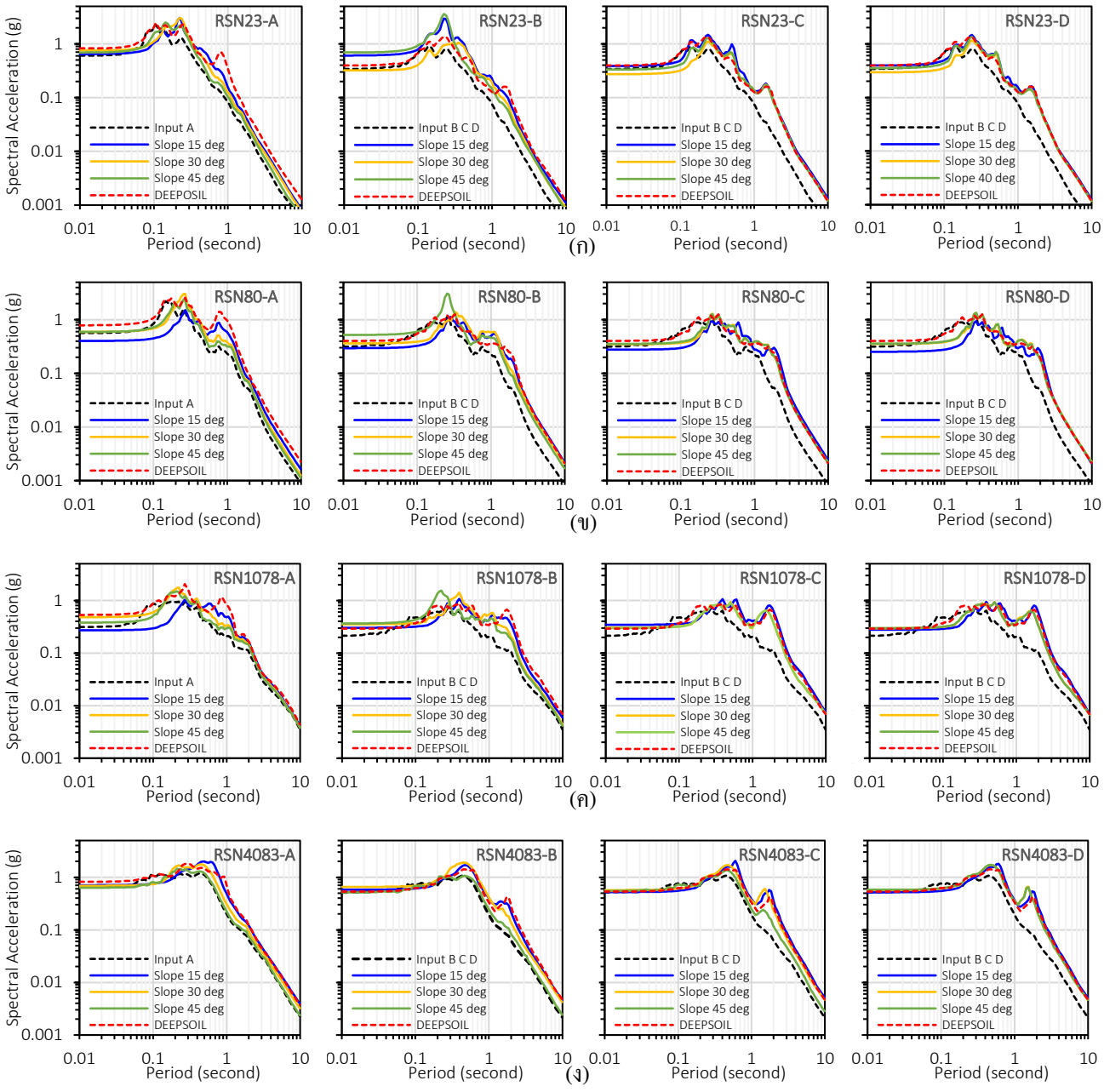
รูปที่ 8 ผลตอบสนองที่ตำแหน่งต่างกันของแบบจำลองแอ่งดิน L/H = 20

3.2 อิทธิพลของความชันด้านข้างของแบบจำลองแอ่งดิน

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของความชันด้านข้างของแบบจำลองแอ่งดินในการศึกษานี้ พิจารณาแบบจำลองชั้นดินที่มีอัตราส่วน L/H เท่ากับ 20 เท่า โดยกำหนดให้มีความชันแตกต่างกัน 3 ระดับ ผลการศึกษาผลตอบสนองของชั้นดินจากแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติ ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ ที่มีความลึกเท่ากัน พบว่า บริเวณที่ผลตอบสนองระหว่าง 2 แบบจำลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกระดับความชัน คือ บริเวณขอบแอ่ง (A) และบริเวณตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความชัน (B) โดยความชัน 45 องศาแตกต่างจากแบบจำลอง 1 มิติมากที่สุด โดยมีความแตกต่างโดยเฉลี่ยของตำแหน่ง A และ B ประมาณร้อยละ 41 และ 35 ตามลำดับ สำหรับตำแหน่ง C และ D ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ห่างจากขอบของแอ่งดินมากขึ้น ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบสนองของชั้นดินระหว่างแบบจำลองชั้นดินทั้ง 2 แบบในทุกระดับความชัน พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากอิทธิพลจากการสะท้อนและหักเหของคลื่นจากขอบแอ่งดินมีน้อยกว่าตำแหน่ง A และ B

รูปที่ 9(ก) ถึงรูปที่ 9(ง) แสดงผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบสนองของพื้นดินที่ตำแหน่ง A-D ภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่แตกต่างกัน 4 ชุด และมีค่าความชันแตกต่างกัน 3 ระดับ ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตำแหน่ง A ที่มีความลึก 50 เมตร ผลตอบสนองของพื้นดินจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ มีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติ อย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงคาบการสั่นสั้นกว่า 0.6 วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองแอ่งดินที่มีความชันเท่ากับ 15 องศา แต่จะมีแนวโน้มของความแตกต่างลดลงเมื่อความชันของขอบแอ่งดินมีค่าสูงขึ้น

ผลการเปรียบเทียบที่ตำแหน่ง B พบว่า เมื่อความชันของแอ่งดินมีค่าเท่ากับ 15 และ 30 องศา ผลตอบสนองของพื้นดินระหว่างแบบจำลองชั้นดินทั้ง 2 รูปแบบ มีค่าที่สอดคล้องกัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อความชันเพิ่มขึ้นเป็น 45 องศา ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชั้นดินแบบ 2 มิติ จะมีความแตกต่างจากแบบจำลองชั้นดินแบบ 1 มิติ อย่างมีนัยสำคัญ หรับตำแหน่ง C และ D ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองของพื้นดินระหว่างแบบจำลองชั้นดินทั้ง 2 รูปแบบ มีความสอดคล้องกันดี ถึงแม้ว่าระดับความชันของแอ่งดินทางด้านข้างแตกต่างกันก็ตาม เนื่องจากอิทธิพลของการสะท้อนและหักเหของคลื่นบริเวณขอบแอ่งส่งผลต่อตำแหน่งดังกล่าวน้อยกว่าตำแหน่ง A และ B



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของแอ่งดินที่มีความชันต่างกัน

4. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของรูปร่างแอ่งดินต่อผลตอบสนองของพื้นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว โดยใช้แบบจำลองแอ่งดิน 2 มิติ ที่มีคุณลักษณะเป็นดินล้อมรอบด้วยชั้นหินแข็ง ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของระบบด้วยวิธีเชิงเส้นเทียบเท่าสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้แบบจำลองแอ่งดินมีความกว้างและความชันต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปร่างแอ่งดินสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมเนื่องจากแผ่นดินไหว จากการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวตัวอย่างพบว่า เมื่อแอ่งดินมีลักษณะเป็นแอ่งแคบ หากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ จะให้ผลการสั่นสะเทือนของพื้นต่ำเกินไป เช่น แอ่ง L/H เท่ากับ 5 ผลตอบสนองจากแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติมีค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ยร้อยละ 45 ซึ่งแตกต่างกันได้มากสุดถึงร้อยละ 70 ในขณะที่แอ่งดินมีความกว้างเพิ่มมากขึ้นบริเวณกลางแอ่งจะมีผลตอบสนองสอดคล้องกับแบบจำลอง 1 มิติดีขึ้น เช่น แอ่ง L/H เท่ากับ 10 มีค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ยร้อยละ 23 และเมื่อแอ่งดินมีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกตั้งแต่ 20 ขึ้นไป มีค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ยระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติและ 2 มิติลดลงเหลือเพียงร้อยละ 13 เนื่องจากแอ่งดินมีความกว้างเพียงพอที่กลางแอ่งไม่ได้รับผลกระทบจากขอบแอ่งทำให้บริเวณกลางแอ่งมีพฤติกรรมใกล้เคียงแบบจำลอง 1 มิติ ถึงแม้ว่าบริเวณกลางแอ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติได้ บริเวณใกล้ขอบแอ่งยังคงได้รับอิทธิพลจากรูปทรงของขอบแอ่งโดยผลตอบสนองจากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติบริเวณขอบแอ่งมีค่าสูงกว่าแบบ 1 มิติ ซึ่งมีค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ยถึงร้อยละ 47 และหากต้องการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีความชัน ผลตอบสนองที่ผิวดินบริเวณกึ่งกลางความชันและบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความชันให้ผลตอบสนองแตกต่างจากแบบจำลอง 1 มิติ อย่างชัดเจน โดยเฉพาะแอ่งที่มีความชันมาก ที่ระดับความชัน 45 องศา ผลตอบสนองจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ กับ 2 มิติ มีค่าความแตกต่างโดยเฉลี่ยกว่าร้อยละ 41 หากวิเคราะห์ที่บริเวณกึ่งกลางความชันด้วยแบบจำลอง 1 มิติ จะให้ผลที่สูงเกินไป และแม้ว่าแอ่งดินจะมีระดับความชันที่แตกต่างกัน เมื่อแอ่งดินมีลักษณะกว้างและราบผลตอบสนองบริเวณกลางแอ่งยังคงมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ ได้เป็นอย่างดี

จากผลการศึกษาที่แสดงผลกระทบของลักษณะรูปร่างแอ่งดินต่อผลตอบสนองแผ่นดินไหว ทำให้ทราบถึงความแตกต่างและข้อจำกัดต่าง ๆ ระหว่างการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 1 มิติ และ 2 มิติ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาโดยเฉพาะกับแอ่งขนาดเล็กจำนวนมากที่มีอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศ และต้องมีคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินเพื่อสร้างแบบจำลองที่คำนึงถึงคุณสมบัติของแอ่งดินได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อสามารถใช้ประเมินพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

[1] Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. DEEPSOIL 6.1 User Manual. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016.

[2] Kartalis-Kaounis, T. *GiD+OpenSees User Manual*. Lab of R/ C and Masonry Structures, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 2020.

[3] กรมโยธาธิการและผังเมือง. *มยผ.1301/1302-61 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว.* กรุงเทพฯ: บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด, 2561.

[4] Vucetic, M. and Dobry, R. Effect of plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. 117,* pp.89-107

[5] Kramer, L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. United States of America: Prentice-Hall, 1996.