

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ PC Pentium 4 ฮาร์ดดิสก์ 80 จิกะไบต์
2. โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ทางวิศวกรรมปฐพี
3. โปรแกรม Spread Sheet และ Word สำหรับแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และจัดทำรูปเล่ม
4. โปรแกรมช่วยในการประเมินผลและนำเสนอข้อมูล เช่น Visio, Snag it และ Photoshop

วิธีการดำเนินการวิจัย

กระบวนการในการดำเนินการวิจัยสามารถที่จะสรุปได้ออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ฐานรากดิน
2. ศึกษาและทดสอบโปรแกรม Finite Element
3. รวบรวมและกำหนดคุณสมบัติของดินและฐานรากที่จะใช้ในการวิเคราะห์
4. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับทฤษฎีของฐานรากดิน

ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ฐานรากดิน

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการพิจารณาค่าลงแบกทานของดินด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทาง Continuum Mechanics แล้วนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎีทาง Solid Mechanics ที่เป็นที่ยอมรับ อันได้แก่ สมการหาค่าค่าลงแบกทานของดินต่างๆ รูปร่างของระนาบการวิบัติ

ทฤษฎีทาง Solid Mechanics เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาค่าค่าลงแบกทานของดินโดยอาศัยเงื่อนไขการวิบัติของดินเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา สำหรับวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยจะมีหลากหลายวิธี แต่ละวิธีจะมีสมมุติฐานและวิธีในการหาผลเฉลยที่แตกต่างกัน ความยาก

ง่ายในการแก้ปัญหาก็แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการใช้งานจึงเกิดสมการทั่วไปสำหรับหาค่ากำลังแบกทานของดินขึ้น โดยสมการที่ได้รับความนิยมใช้กันในปัจจุบัน เช่น สมการของ Terzaghi, Meyerhof, Hansen เป็นต้น สมการเหล่านี้มีรูปแบบการใช้งานที่ไม่ซับซ้อนและมีข้อสมมุติฐานของปัญหาที่แตกต่างกัน ดังนั้น ก่อนนำค่าที่ได้จากสมการไปใช้งานต้องใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสมลดค่ากำลังแบกทานของดินที่คำนวณได้จากสมการเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน สำหรับทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษาเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย Limit Equilibrium Analysis และ General Equation of Bearing Capacity of Soil ตามที่ได้นำเสนอในเนื้อหาส่วนการตรวจสอบเอกสาร ซึ่งเนื้อหาดังกล่าวจะประกอบไปด้วยวิธีการในการวิเคราะห์ สมมุติฐานการวิเคราะห์ รูปร่างการวิบัติของมวลดิน และสมการค่ากำลังแบกทานของดิน

ส่วนทฤษฎีทาง Continuum Mechanics ซึ่งในที่นี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีข้อแตกต่างจากทฤษฎีทาง Solid Mechanics นั่นคือ สามารถที่จะทราบพฤติกรรมของระบบที่พิจารณาได้อย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่สถานะที่ระบบอยู่ในสมดุล ระบบเริ่มมีน้ำหนักมากระทำจนกระทั่งระบบเกิดการวิบัติ สำหรับปัญหาของฐานรากตื้น การใช้วิธี FEM สามารถใช้วิเคราะห์หาค่ากำลังแบกทานของดิน และกระบวนการขยายของ Plastic Zone ที่เกิดขึ้นว่ามีการขยายตัวอย่างไร รูปร่างการวิบัติที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีของปัญหาเป็นเช่นใด มีความแตกต่างกับทฤษฎีหรือสมมุติฐานในอดีตอย่างไร ซึ่งก็จะทำให้สามารถเห็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในมวลดินได้อย่างต่อเนื่อง ไม่เหมือนทฤษฎีในอดีตที่จะทราบเฉพาะสถานะอิลาสติกซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงและสถานะพลาสติกที่เรากำหนดขึ้นเพื่อหาค่ากำลังแบกทานของดิน

ศึกษาและทดสอบโปรแกรม Finite Element

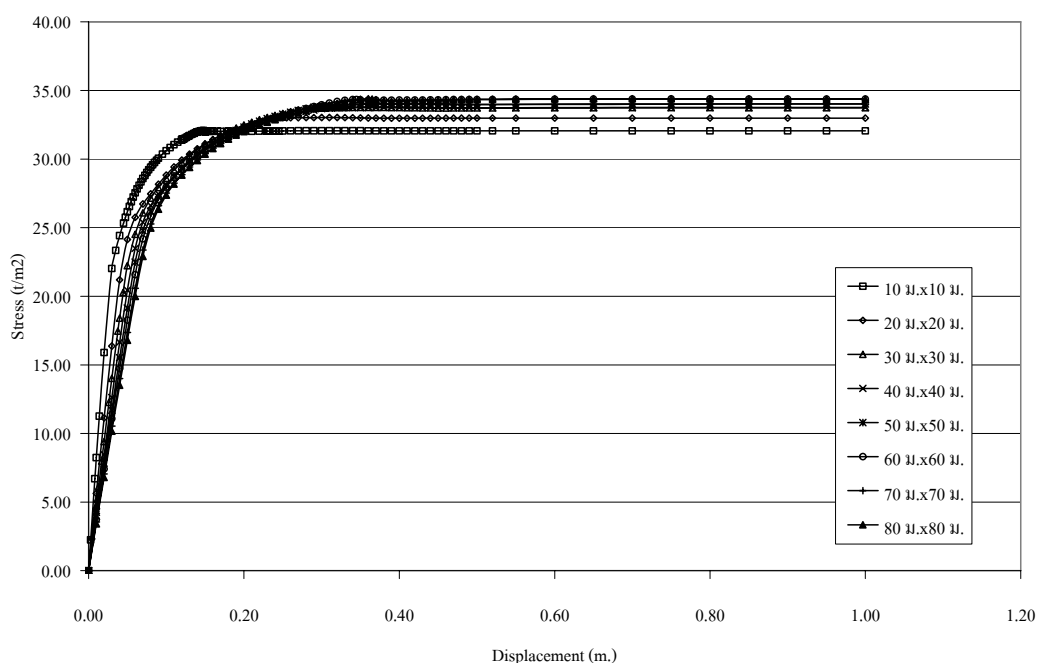
ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยได้ทำการศึกษาหลักการใช้งานโปรแกรม ข้อมูลที่ต้องใช้ในโปรแกรม และผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม นอกจากนั้นต้องทำการทดสอบโปรแกรมเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพ รายละเอียดของการศึกษาและทดสอบโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สรุปได้ดังนี้

การทำงานของโปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. Pre-Processing Phase

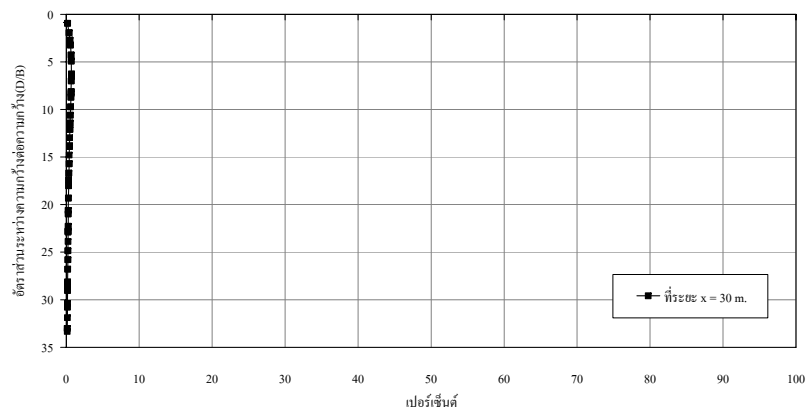
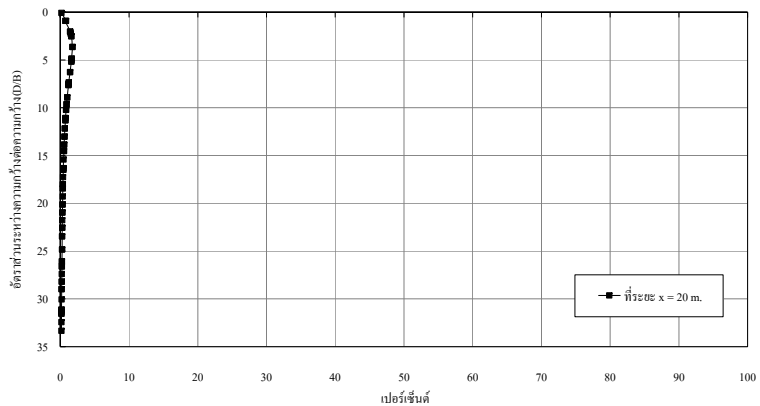
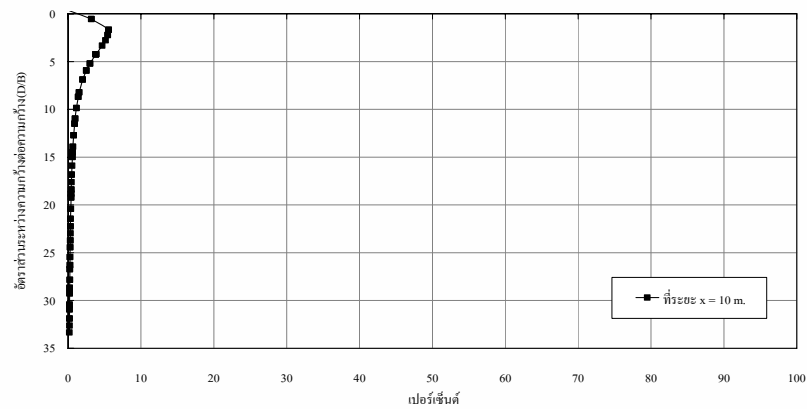
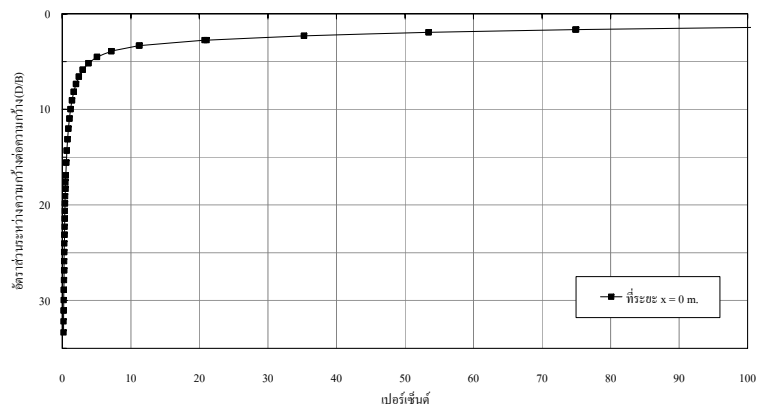
1.1 การกำหนดขนาดของปัญหา(Boundary Size)

ในการกำหนดขนาดของปัญหาได้ทำการทดสอบโดยพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาดของปัญหาที่ใช้ต่างกันดังภาพที่ 52 ซึ่งจะเห็นว่ากราฟเริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อขนาดของปัญหามากกว่า 30 เมตรเป็นต้นไป

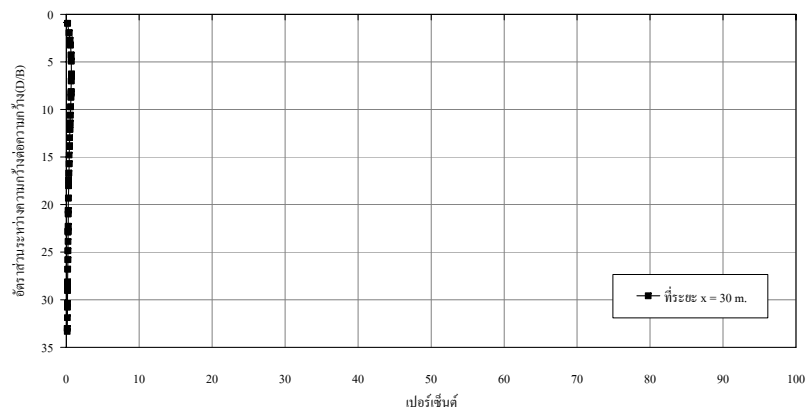
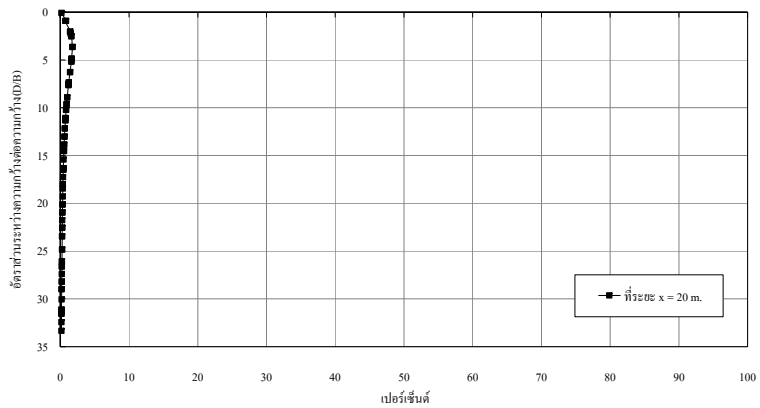
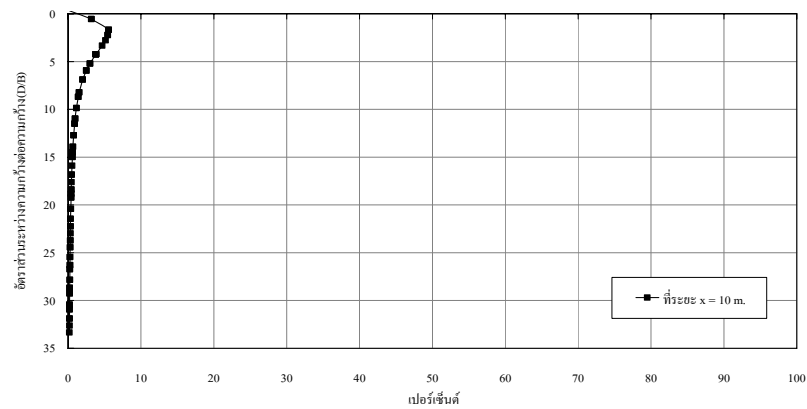
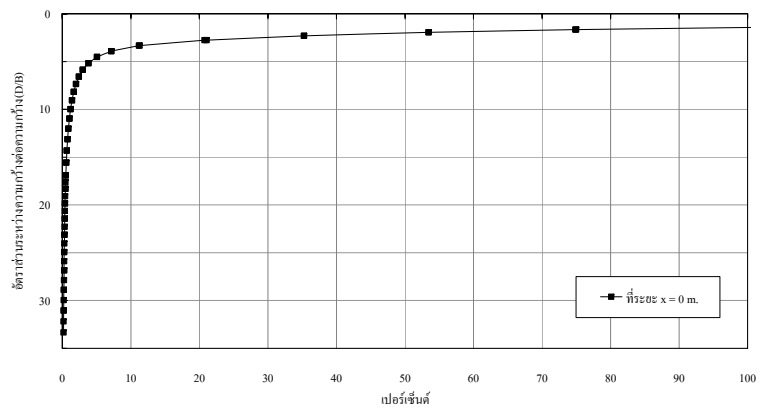


ภาพที่ 52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการทรุดตัวที่ขนาดของปัญหาต่างๆ

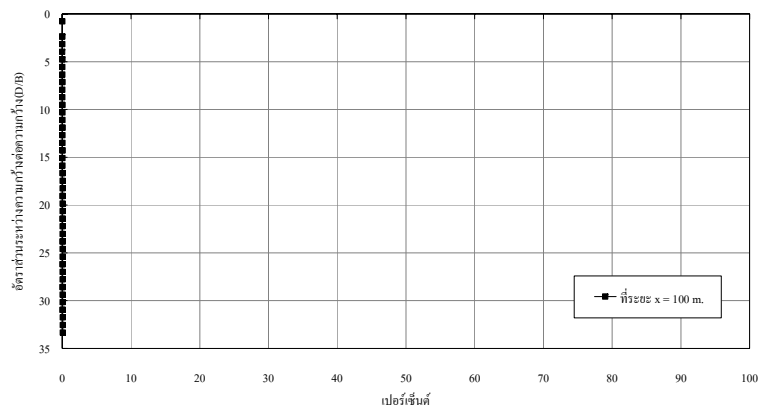
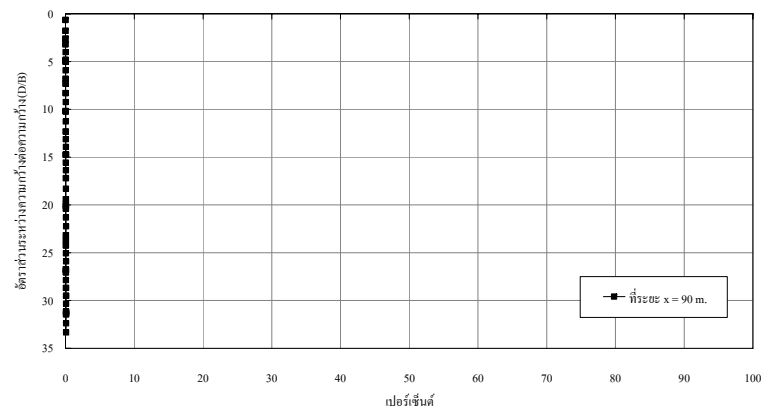
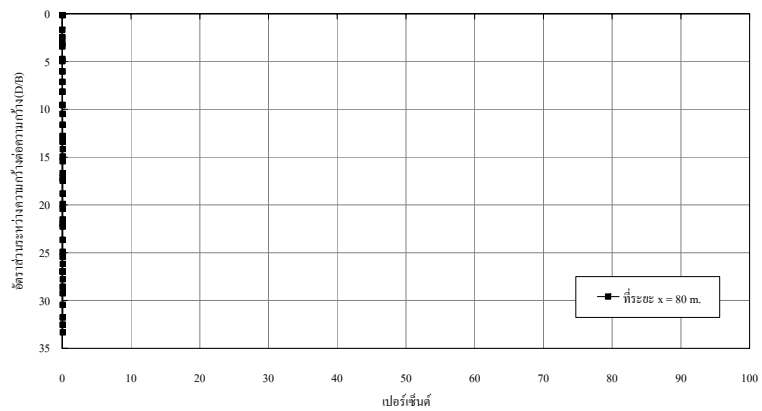
และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของหน่วยแรงแนวดิ่งที่ระยะ X ต่างๆเปรียบเทียบกรณีที่ไม่มีน้ำหนักภายนอกกระทำกับกรณีที่มือน้ำหนักภายนอกกระทำตามที่แสดงในภาพที่ 53 จะเห็นว่าที่ระยะ $x = 30$ ม. เป็นต้นไป อิทธิพลของความเค้นแนวดิ่งมีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซนต์ ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ที่ $D/B = 2.1$



ภาพที่ 53 อิทธิพลของค่าความถี่แนวตั้งของขอบเขตปัญหาที่ระยะ $X = 0$ ม., 10 ม., 20 ม., 30 ม., 40 ม., 50 ม., 60 ม., 70 ม., 80 ม., 90 ม. และ 100 ม.



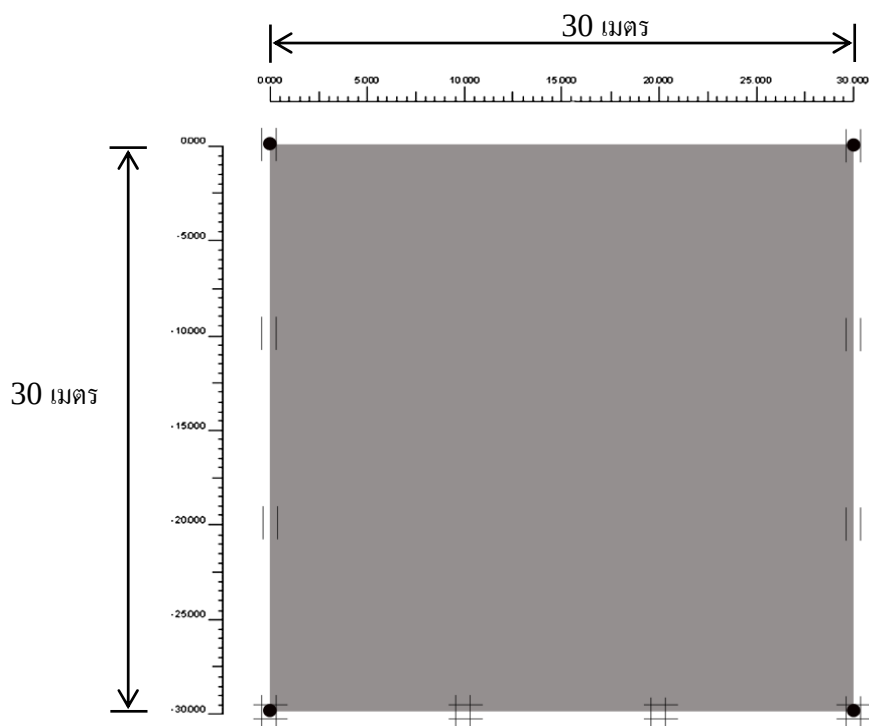
ภาพที่ 53 (ต่อ)



ภาพที่ 53 (ต่อ)

หากพิจารณาตามทฤษฎีอิลาสติก Stress Bulb ของหน่วยแรงใต้ฐานรากแบบเกร็งที่อิทธิพลของหน่วยแรงแนวดิ่ง 12.5 เปอร์เซ็นต์หรือ $0.125q$ นั้น อยู่ที่ความกว้างสี่เท่าของความกว้างฐานราก(4B) และความลึกสิบสองเท่าของความกว้างฐานราก(12B)

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของหน่วยแรงที่ปัญหาขนาดต่างๆ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากขนาดปัญหาต่างๆ ได้สรุปเลือกใช้ขนาดของปัญหากว้าง 30 เมตรและลึก 30 เมตร เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากหน่วยแรงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ มีผลต่อค่ากำลังแบกทานของดินจากการวิเคราะห์เล็กน้อย และสามารถพิจารณารูปลักษณะการวิบัติได้ดี หากใช้ขนาดของปัญหาที่กว้างมากก็จะพิจารณารูประนาบการวิบัติได้ยาก

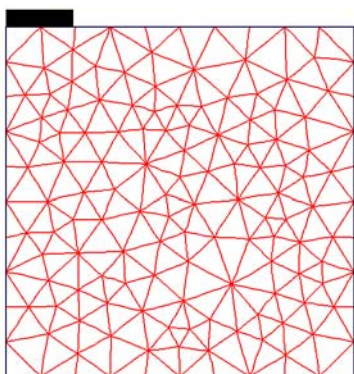


ภาพที่ 54 ขนาดของปัญหาที่ใช้ในการวิจัย

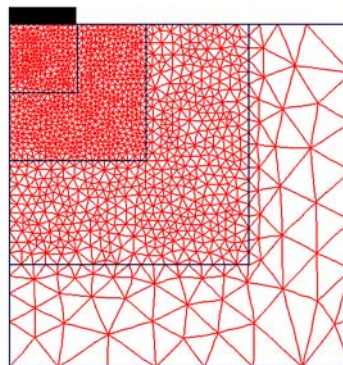
1.2 การสร้างโครงข่ายอีลิเมนต์ (Mesh Generation)

ในการสร้างโครงข่ายจะต้องคำนึงถึงความละเอียดที่เหมาะสม ซึ่งความละเอียดของโครงข่ายมีผลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ โดยโครงข่ายที่มีความละเอียดสูงก็จะให้ความถูกต้องที่สูง แต่ก็ใช้เวลาในการประมวลผลและต้องใช้หน่วยความจำของปัญหาสูงเช่นกัน ดังนั้น จึงต้องทำการกำหนดความละเอียดให้เหมาะสม

บุญชัย (2548) ได้กล่าวว่า สามารถกำหนดความละเอียดของโครงข่ายโดยพิจารณาจากผลกระทบความละเอียดของโครงข่ายต่อกำลังเบกทานของดิน หรืออาจทำการแบ่งความละเอียดตามอิทธิพลของหน่วยแรงเป็นช่วงๆ ตัวอย่างการกำหนดความละเอียดของโครงข่ายแสดงดังภาพที่ 55 และสำหรับตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นสูง เช่น ที่ขอบของฐานราก มุมของปัญหา ควรกำหนดให้มีอีลิเมนต์ขนาดเล็ก หรือมีความหนาแน่นของโครงข่ายสูงดังแสดงในภาพที่ 56



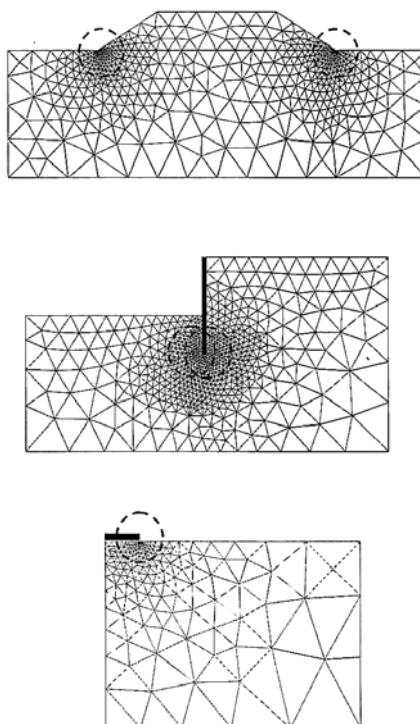
a. ความละเอียดโครงข่ายเท่ากัน



b. ความละเอียดโครงข่ายแปรผันตามอิทธิพลของความเค้น

ภาพที่ 55 การกระจายความละเอียดของโครงข่าย

ที่มา: บุญชัย (2548)

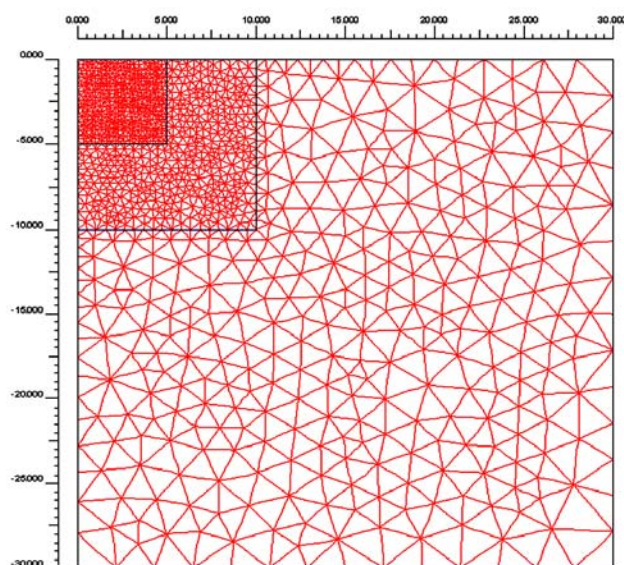


ภาพที่ 56 ตำแหน่งที่ควรพิจารณาขนาดของอีลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กหรือความหนาแน่นสูง
ที่มา: บุญชัย (2548)

Sloan (1982) กล่าวว่า ความเหมาะสมของการใช้อิเลเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาทาง Elasto-Plastic เพื่อหาค่าน้ำหนักที่จุดวิบัติ จำเป็นต้องพิจารณาค่าอัตราส่วนระหว่าง Degree of Freedom ต่อ Constraint ของอีลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองปัญหาด้วย โดยที่ค่าอัตราส่วนควรจะต้องมีค่ามากกว่าหนึ่ง กรณีที่ค่าอัตราส่วนมีค่าน้อยกว่าหนึ่งจะทำให้โปรแกรมไม่สามารถเข้าสู่คำตอบของปัญหาได้ (Non-Convergence) ในงานวิจัยครั้งนี้ อีลิเมนต์ที่เลือกใช้มีค่าอัตราส่วนดังกล่าวเท่ากับ 16/10 ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสมและให้ค่าความถูกต้องในการหาค่าน้ำหนัก ณ จุดวิบัติ และนอกจากนั้นการใช้ยังกล่าวถึงรูปร่างของอีลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองปัญหาว่า โดยปกติรูปร่างของอีลิเมนต์ที่ใช้มักเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือรูปสี่เหลี่ยม โดยจะมีจำนวนของ Node ที่แตกต่างกันไป หากมีจำนวนของ Node มากก็จะมีฟังก์ชันของอีลิเมนต์นั้นขามมากขึ้นและให้ค่าความถูกต้องมากขึ้นสำหรับการหาค่าน้ำหนักที่จุดวิบัติ (ในช่วงสภาวะพลาสติก) การใช้อิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยมแบบ 15-noded ในปัญหา Plane Strain จะให้ค่าความถูกต้องสูง

Smith (1940) กล่าวถึง การวิเคราะห์แบบกำหนด load เป็น displacement การกำหนดขนาดของอีลิเมนต์ที่มีความละเอียดมากขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ของโปรแกรมได้โดยจะทำให้สามารถเข้าสู่คำตอบได้ดีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสิ่งที่กล่าวมาข้างต้น

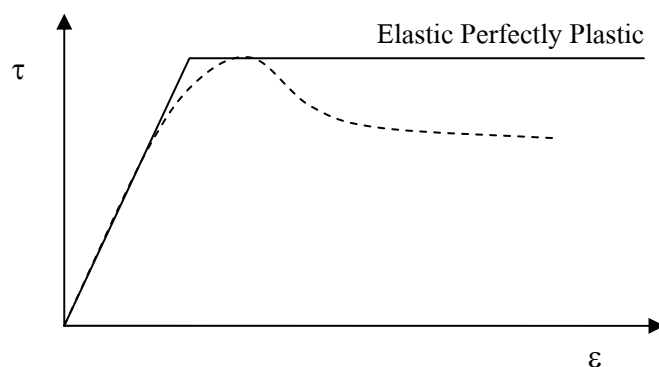
สำหรับงานวิจัยครั้งนี้กำหนดความละเอียดของโครงข่ายดังแสดงในภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 57 การกำหนดความละเอียดของโครงข่ายที่ใช้ในงานวิจัย

1.3 การเลือกแบบจำลองดิน

โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นจะมีแบบจำลองดินให้เลือกมากมาย ซึ่งแต่ละแบบจำลองก็จะเป็นตัวแทนในการแสดงพฤติกรรมของดินภายใต้การรับน้ำหนักขนาดต่างๆ หากเลือกที่จะใช้แบบจำลองที่มีความสามารถแสดงรายละเอียดหรือพฤติกรรมที่ซับซ้อน ตัวแปรที่ใช้ก็จะมีจำนวนมากขึ้นและซับซ้อนมากขึ้นตามความยากของแบบจำลอง สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ต้องการที่จะหาค่ากำลังของดินที่สภาวะที่เกิดการวิบัติเพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีในอดีต ทำการศึกษาพฤติกรรมโดยรวมของดินภายใต้การรับน้ำหนัก การเลือกแบบจำลองต้องพิจารณาให้ตรงกันกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของดิน แต่ข้อจำกัดของข้อมูลดินที่ใช้กรณีที่ไม่มีการทดสอบในสนามหรือห้องปฏิบัติการ งานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb Model ดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 แบบจำลอง Mohr-Coulomb Model

2. Analysis Phase

ขั้นตอนของวิเคราะห์เป็นการกำหนดลำดับการวิเคราะห์ตามรูปแบบของปัญหาที่ต้องการทราบ การควบคุมการวิเคราะห์สามารถทำได้ 2 แบบคือ ควบคุมด้วยการเคลื่อนตัว (Displacement Control) และควบคุมด้วยแรง (Force Control) นอกจากการกำหนดรูปแบบการควบคุมแล้วยังรวมถึงการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerated Error) และการสร้างหน่วยแรงเริ่มต้น (Initial Stress Generation) ของปัญหาด้วย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การควบคุมการวิเคราะห์ด้วยการเคลื่อนตัว ซึ่งเสมือนเป็นการจำลองพฤติกรรมฐานรากแบบ Perfectly Rigid ซึ่งถือว่าฐานรากมีการทรุดตัวเท่ากันทุกจุด โดยจะทำการกำหนดให้มีการทรุดตัวของฐานรากในแต่ละขั้นเท่ากับ 0.001 ม. จนกว่าดินจะเกิดการวิบัติ และกำหนดลักษณะผิวสัมผัสของฐานรากกับดินออกเป็น 2 แบบ คือแบบราบเรียบและแบบขรุขระเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของลักษณะผิวสัมผัสที่มีผลต่อการวิบัติของดินฐานราก

3. Post-Processing Phase

เป็นขั้นตอนที่ได้หลังจากที่โปรแกรมทำการวิเคราะห์เสร็จ นั่นคือ นำผลที่ได้มาแสดงผลในรูปแบบที่เราต้องการทราบ ได้แก่ ความเค้น ความเครียด การเสียรูปของโครงข่าย การเคลื่อนตัว เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของการแสดงผลก็จะขึ้นอยู่กับโปรแกรมนั้นๆว่ามีการพัฒนาการแสดงผลในรูปแบบ

กราฟฟิกในรูปแบบใดบ้าง ตัวอย่างของรูปแบบกราฟฟิก เช่น กราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวแปร เวกเตอร์ การเคลื่อนตัว เป็นต้น

กำหนดคุณสมบัติของดินและฐานรากที่จะใช้ในการวิเคราะห์

1. คุณสมบัติของดิน

งานวิจัยครั้งนี้แบ่งชนิดของดินในการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ชนิด คือ ดินเหนียวและดินทราย โดยได้ทำการรวบรวมข้อมูลดินโดยทั่วไปจากแหล่งข้อมูลที่ได้นำเสนอเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบจากหลากหลายแห่ง โดยตัวแปรของดินที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ หนัสน้ำหนัก, มุมเสียดทานภายใน, ความเชื่อมแน่น, โมดูลัสความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซอง ดังแสดงในตารางที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 สรุปคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ดังตารางที่ 10 สำหรับดินทรายและตารางที่ 11 สำหรับดินเหนียว

คุณสมบัติของดินที่ใช้จะแบ่งออกเป็นค่าตัวแปรความแข็งแรงของดินและตัวแปรคุณสมบัติทางด้านอิลาสติกของดิน สำหรับการกำหนดค่าตัวแปรคุณสมบัติทางอิลาสติก ได้แก่ E_s และ ν โดยตัวแปรนี้ใช้วิเคราะห์ในช่วงที่ดินอยู่ในสถานะอิลาสติก

Hoeg et al. (1968) กล่าวว่า อิทธิพลของค่าปัวซองต่อการเปลี่ยนแปลงดินสามารถที่จะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับน้ำหนัก หากกำหนดให้ค่าปัวซองมีค่ามากขึ้น ก็จะทำให้การทรุดตัวได้ฐานรากเกิดน้อยลง การเคลื่อนตัวขึ้นหรือการบวมตัวของดินด้านข้างฐานรากจะมากขึ้น และการเปลี่ยนค่าปัวซองจะมีผลมากกับค่าหน่วยแรงแนวราบในช่วงสถานะอิลาสติก โดยค่าน้ำหนักที่ First Yielding จะมีค่าสูงมากขึ้นเมื่อค่าปัวซองมีค่าสูงขึ้น ส่วนค่า E_s ก็จะมีผลต่อดินในช่วงอิลาสติกเช่นกัน โดยหากดินที่ค่า E_s สูงมากขึ้น ความชันของกราฟในช่วงอิลาสติกจะมีค่าสูงมากขึ้น แต่จะไม่มีผลต่อค่าน้ำหนักที่จุดวิบัติ

ตารางที่ 2 ค่ามุมเสียดทานภายในของดินทราย

สถานะของดิน	ค่ามุมเสียดทานภายใน	แหล่งอ้างอิง
Very loose	25-30	บุญเทพ (2542)
	<28.5	ชัย และ กาซุโตะ (2546)
	0-28	Teng (1976)
Loose	27-32	บุญเทพ (2542)
	28.5-30	ชัย และ กาซุโตะ (2546)
	25-32	Bowles (1984)
	28-30	Teng (1976)
Medium	30-36	บุญเทพ (2542)
	30-36	ชัย และ กาซุโตะ (2546)
	28-36	Bowles (1984)
	30-36	Teng (1976)
Dense	36-41	บุญเทพ (2542)
	36-41	ชัย และ กาซุโตะ (2546)
	30-40	Bowles (1984)
	36-41	Teng (1976)

ตารางที่ 2 (ต่อ)

สภาวะของดิน	ค่ามุมเสียดทานภายใน	แหล่งอ้างอิง
Very dense	>41	บุญเทพ (2542)
	>41	ชัย และ กาซุโตะ (2546)
	>35	Bowles (1984)
	>41	Teng (1976)

ตารางที่ 3 ค่าหน่วยน้ำหนักของดินทราย

สภาวะของดิน	หน่วยน้ำหนัก, kN/m^3	แหล่งอ้างอิง
Very loose	9.96-14.23	บุญเทพ (2542)
	15.72	Teng (1976)
Loose	12.81-16.37	บุญเทพ (2542)
	12-16	Bowles (1984)
	14.93-19.65	Teng (1976)
Medium	15.66-18.50	บุญเทพ (2542)
	14-18	Bowles (1984)
	17.29-20.44	Teng (1976)
Dense	15.66-19.93	บุญเทพ (2542)
	16-20	Bowles (1984)
	17.29-22.01	Teng (1976)
Very dense	18.50-21.35	บุญเทพ (2542)
	18-23	Bowles (1984)
	>20.44	Teng (1976)

ตารางที่ 4 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินทราย

สภาวะของดิน	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน, kN/m ²	แหล่งอ้างอิง
Loose sand	9000-25000	Bowles (1999)
	10350-24150	Das (1999)
	9000-25000	McCarthy (1993)
	9807-24517	Kaniraj (1988)
	8897-26690	Lambe and Whitman (1969)
Medium sand	17250-27600	Das(1999)
	26690-44484	Lambe and Whitman(1969)
Dense sand	45000-80000	Bowles (1999)
	34500-55200	Das (1999)
	45000-80000	McCarthy (1993)
	49033-83357	Kaniraj (1988)
	44484-71174	Lambe and Whitman(1969)

ตารางที่ 5 ค่าอัตราส่วนปัวซองของดินทราย

สภาวะของดิน	อัตราส่วนปัวซอง	แหล่งอ้างอิง
Loose sand	0.20-0.40	Bowles (1999)
	0.20-0.40	Das (1999)
	0.20-0.35	Lambe and Whitman (1969)
Medium sand	0.25-0.40	Das (1999)
Dense sand	0.30-0.45	Bowles (1999)
	0.30-0.45	Das (1999)
	0.30-0.40	Lambe and Whitman (1969)

ตารางที่ 6 ค่าความเชื่อมั่นของดินเหนียว

สภาวะของดิน	S_u , kPa	แหล่งอ้างอิง
Very soft	0.00-11.12	Terzaghi and Peck (1967)
	0.00-11.12	ชัย และ กาซุโตะ (2526)
	0.00-20.00	Azizi (2000)
	0.00-11.12	บุญเทพ (2542)
	0.00-11.97	Teng (1976)
Soft	11.12-22.24	ชัย และ กาซุโตะ (2526)
	11.12-22.24	ชัย และ กาซุโตะ (2526)
	20	Azizi (2000)
	11.12-22.24	บุญเทพ (2542)
	11.97-23.94	Teng (1976)

ตารางที่ 6 (ต่อ)

สภาวะของดิน	S_u , kPa	แหล่งอ้างอิง
Medium	22.24-44.48	Terzaghi and Peck (1967)
	22.24-44.48	ชัย และ กาซุโตะ (2526)
	40	Azizi (2000)
	22.24-44.48	บุญเทพ (2542)
	23.94-47.88	Teng (1976)
Stiff	44.48-88.96	Terzaghi and Peck (1967)
	44.48-88.96	ชัย และ กาซุโตะ (2526)
	75	Azizi 2000)
	44.48-88.96	บุญเทพ (2542)
	47.88-95.76	Teng (1976)
Very stiff	88.96-177.92	Terzaghi and Peck (1967)
	88.96-177.92	ชัย และ กาซุโตะ (2526)
	150	Azizi (2000)
	88.96-177.92	บุญเทพ (2542)
	95.76-191.52	Teng (1976)
Hard	>177.92	Terzaghi and Peck (1967)
	>177.92	ชัย และ กาซุโตะ (2526)
	>150.00	Azizi (2000)
	>177.92	บุญเทพ (2542)

ตารางที่ 7 ค่าหน่วยน้ำหนักของดินเหนียว

สภาวะของดิน	หน่วยน้ำหนักของดิน, kN/m ³	แหล่งอ้างอิง
Very soft	14.00-18.00	Bowles (1984)
	15.72-18.86	Teng (1976)
Soft	16.00-18.00	Bowles (1984)
	14.23-17.08	บุญเทพ (2542)
	15.72-18.86	Teng (1976)
Medium	16.00-18.00	Bowles (1984)
	17.29-20.44	Teng (1976)
Stiff	16.00-20.00	Bowles (1984)
	15.66-18.50	บุญเทพ (2542)
	18.86-22.01	Teng (1976)
Very stiff	17.08-19.93	บุญเทพ (2542)
	18.86-22.01	Teng (1976)
Hard	>20.00	Bowles(1984)
	>20.44	Teng (1976)

ตารางที่ 8 ค่าอัตราส่วนปั๊วของของดินเหนียว

สถานะของดิน	อัตราส่วนปั๊วของ	แหล่งอ้างอิง
Very Soft Clay	0.20 - 0.40	Das (1999)
Soft Clay	0.35 - 0.45	Poulos (1975)
	0.35 - 0.45	Bowles (1996)
Medium Clay	0.30 - 0.35	Bowles (1996)
	0.20 - 0.50	Das (1999)
Stiff Clay	0.30 - 0.35	Poulos (1975)
	0.10 - 0.30	Bowles (1996)

ตารางที่ 9 ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดินเหนียว

สถานะของดิน	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน, kN/m^2	แหล่งอ้างอิง
Very Soft Clay	2,000-15,000	Bowles (1996)
Soft Clay	5000-25000	Bowles (1996)
	4100-10000	Das (1999)
	500-5000	MacCarthy (1993)
Medium Clay	15000-50000	Bowles (1996)
	20700-41400	Das (1999)
	4000-10000	MacCarthy (1993)
Stiff Clay	50000-100000	Bowles (1996)
	41400-96600	Das (1999)
	7000-20000	MacCarthy (1993)

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของดินเหนียวที่ใช้ในการวิจัย

สภาวะของดิน	ค่าความเชื่อมั่นแน่น (kN/m ²)	ค่ามุมเสียดทานภายใน , (degree)	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน , (kN/m ²)	หน่วยน้ำหนักของดิน , (kN/m ³)	อัตราส่วนปัวซองของดิน
Soft clay	20	-	10000	16	0.3
Medium clay	40	-	30000	17	0.3
Stiff clay	80	-	80000	18	0.3

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของดินทรายที่ใช้ในการวิจัย

สภาวะของดิน	ค่าความเชื่อมั่นแน่น (kN/m ²)	ค่ามุมเสียดทานภายใน , (degree)	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน , (kN/m ²)	หน่วยน้ำหนักของดิน , (kN/m ³)	อัตราส่วนปัวซองของดิน
Loose sand	-	30	18000	17	0.3
Medium sand	-	35	25000	18	0.3
Dense sand	-	40	50000	19	0.3

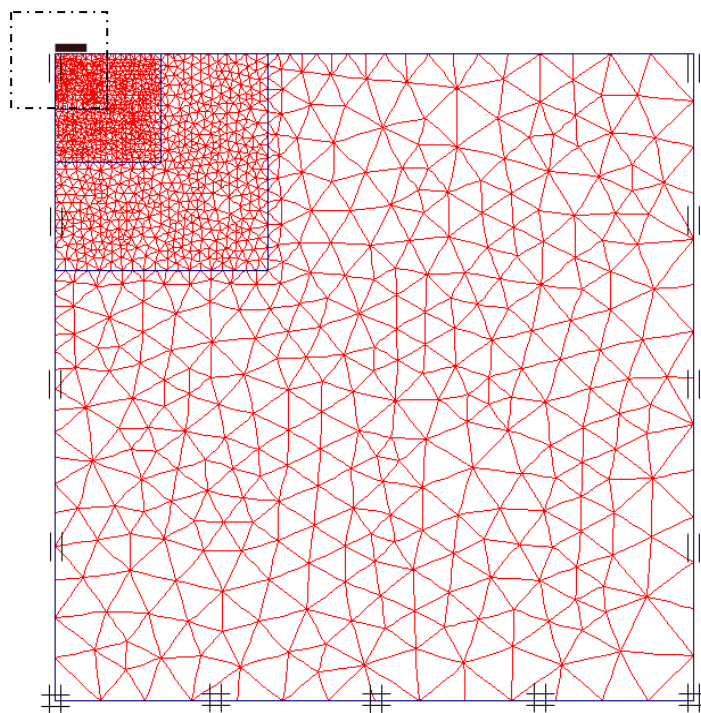
หมายเหตุ กรณีทำการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวหรือค่าหน่วยแรงในช่วงอิลาสติกของดิน ต้องกำหนดค่าอัตราส่วนปัวซองของดินที่เหมาะสมกับคุณสมบัติของดินจริง แต่การวิจัยครั้งนี้ค่าอัตราส่วนปัวซองไม่มีผลต่อการหาค่ากำลังแบกทานของดินจึงกำหนดให้เท่ากับ 0.30 เท่ากับทั้งหมด

2. คุณสมบัติของฐานราก

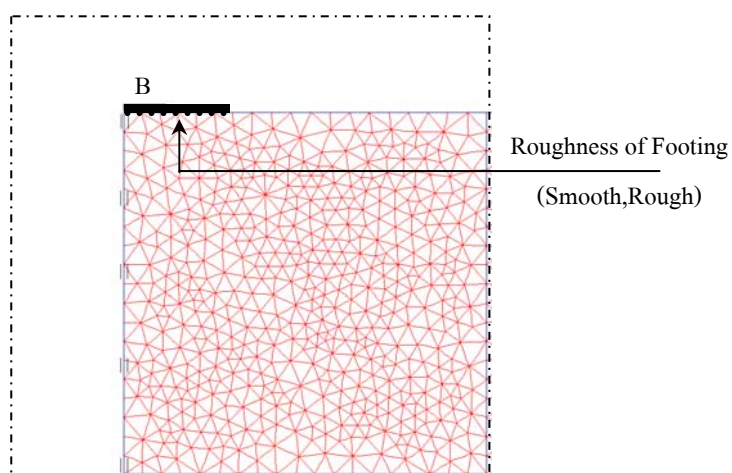
ประเภทของฐานรากที่ใช้ในงานวิจัยเลือกใช้ฐานรากแบบ Strip โดยพิจารณาเป็นฐานรากแบบเกร็ง (Perfectly Rigid) ซึ่งกำหนดขนาดของฐานราก และความลึกของฐานรากจากผิวดิน นอกจากนั้นยังพิจารณาผลเนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างฐานรากกับดินใต้ฐานรากด้วย (Roughness) ดังนั้นสามารถสรุปลักษณะของฐานรากที่ใช้วิเคราะห์ได้ตามตารางที่ 12 และรูปแบบการจำลองปัญหาที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แสดงสรุปไว้ดังภาพที่ 59 และ 60

ตารางที่ 12 คุณสมบัติฐานรากที่ใช้ในการวิเคราะห์

คุณสมบัติฐานราก	กรณีที่ใช้
ความกว้างของฐานราก	1 ม. , 2 ม. , 3 ม.
อัตราส่วนความลึกต่อความกว้างของฐานราก	0 , 0.5 , 1 , 2
ผิวสัมผัสระหว่างดินกับฐานราก (Roughness)	ราบเรียบ (Smooth), ขรุขระ (Rough)

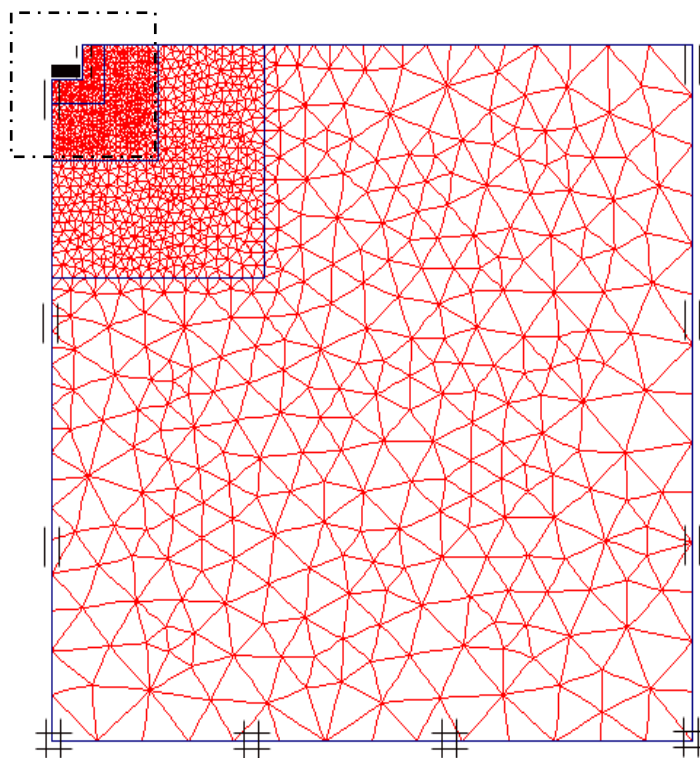


a. การจำลองรูปแบบปัญหาการวิเคราะห์กรณีฐานรากวางที่ผิวดิน

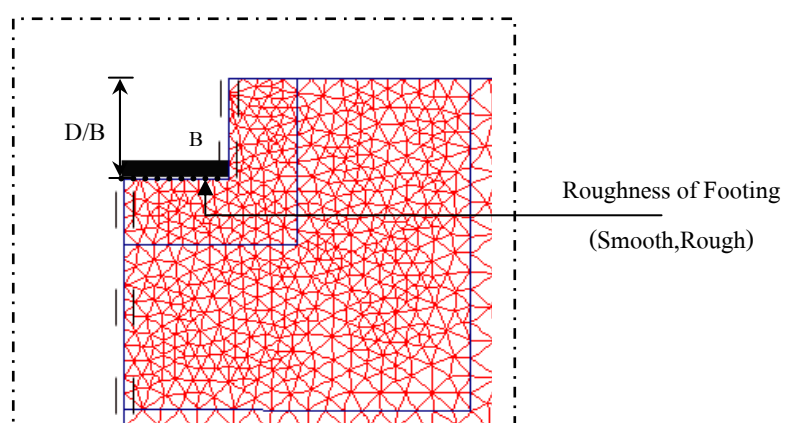


b. ภาพขยายแสดงการกำหนด Boundary Condition ของฐานราก

ภาพที่ 59 การจำลองรูปแบบปัญหาการวิเคราะห์กรณีฐานรากวางที่ระดับผิวดินหรือ $D/B = 0$



a. การจำลองรูปแบบปัญหาการวิเคราะห์กรณีฐานรากวางที่ระดับ $D/B = 0.5, 1, 2$

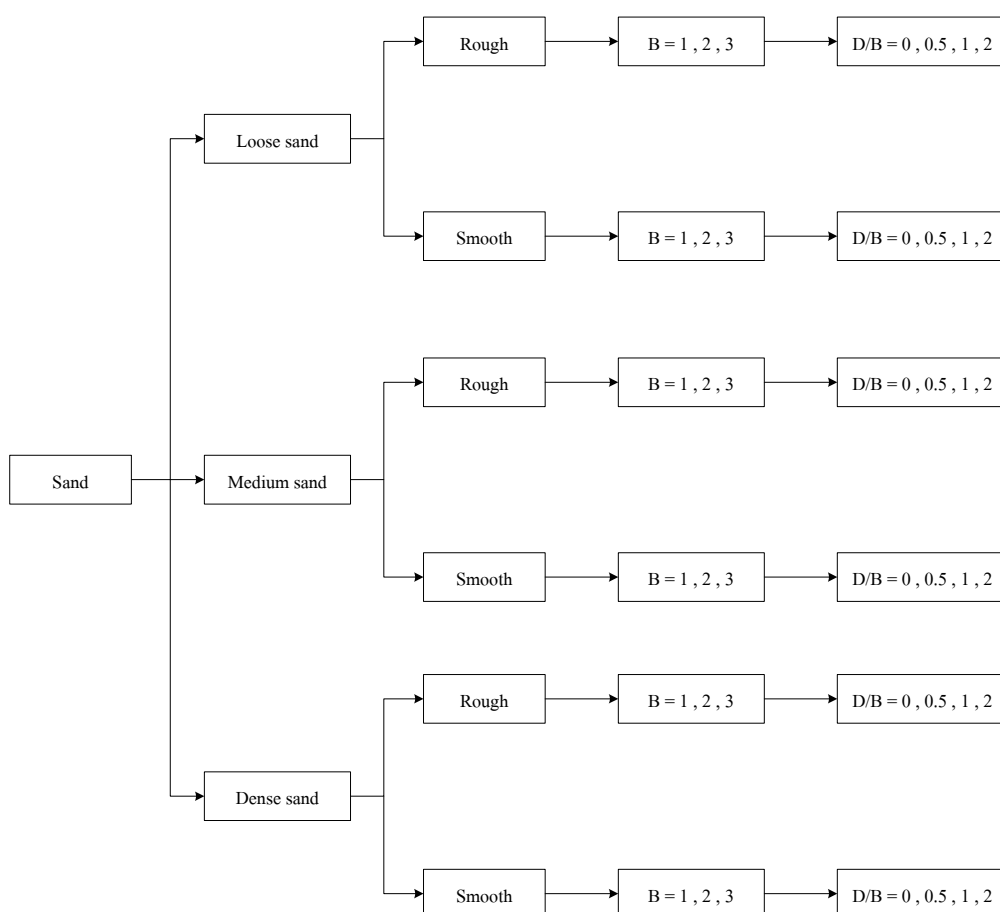


b. ภาพขยายแสดงการกำหนด Boundary Condition ของฐานรากที่ระดับ $D/B = 0.5, 1, 2$

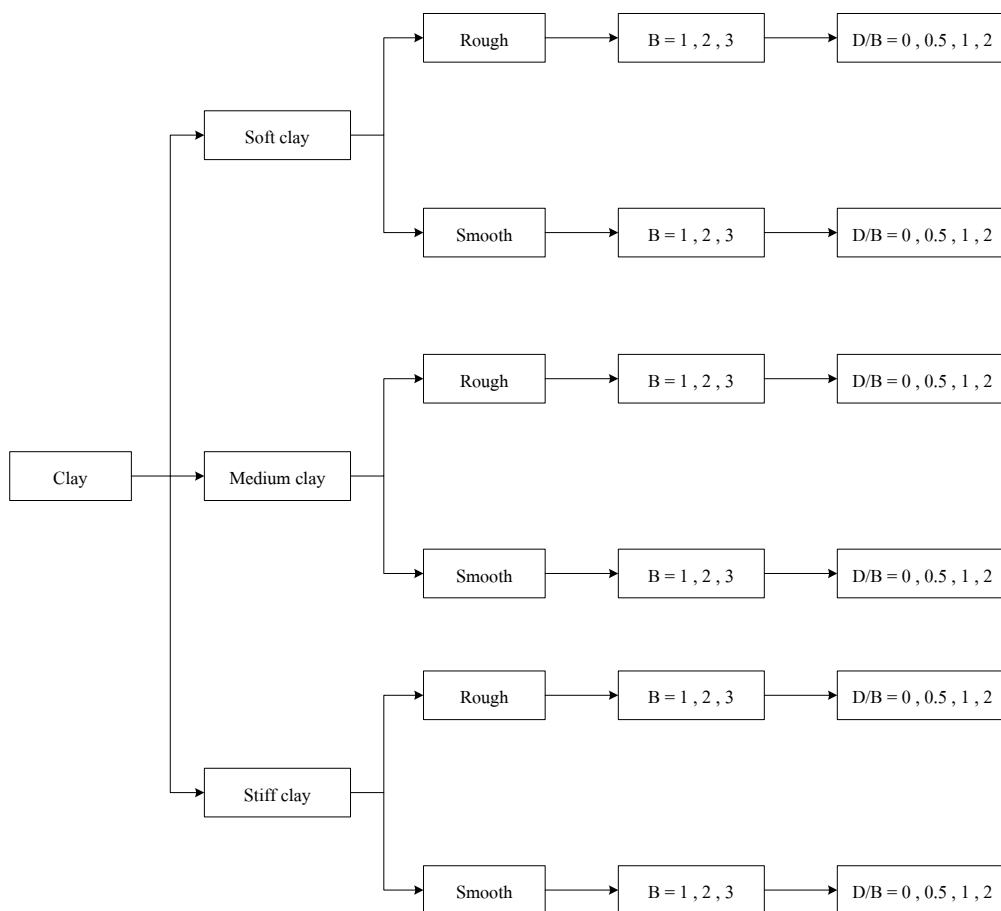
ภาพที่ 60 การจำลองรูปแบบปัญหาการวิเคราะห์กรณีฐานรากวางที่ระดับ $D/B = 0.5, 1, 2$

วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับทฤษฎีของฐานรากดิน

การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้สามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังตารางที่ ซึ่งจะแบ่งตามชนิดของดิน ค่าความแข็งแรงของดิน ขนาดของฐานราก ความลึกของฐานรากจากผิวดิน และ Roughness รวมจำนวนกรณีที่ทำกรวิเคราะห์ทั้งหมดเท่ากับ 144 กรณี ซึ่งมีรายละเอียดของการตั้งชื่อแต่ละกรณีตามตารางที่ 13



ภาพที่ 61 แผนภูมิแสดงการวิเคราะห์สำหรับดินทราย



ภาพที่ 62 แผนภูมิแสดงการวิเคราะห์สำหรับดินเหนียว

ตารางที่ 13 แสดงรายละเอียดของฐานรากและดินในแต่ละกรณีที่ทำกรวิเคราะห์

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion c, (kN/m ²)	Angel of Internal Friction ϕ , (degree)	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough, (R)
1	10SCR	1	0	Soft Clay	20	-	-	R
2	10SCS	1	0	Soft Clay	20	-	S	-
3	10MCR	1	0	Medium Clay	40	-	-	R
4	10MCS	1	0	Medium Clay	40	-	S	-
5	10STCR	1	0	Stiff Clay	80	-	-	R
6	10STCS	1	0	Stiff Clay	80	-	S	-
7	105SCR	1	0.5	Soft Clay	20	-	-	R
8	105SCS	1	0.5	Soft Clay	20	-	S	-
9	105MCR	1	0.5	Medium Clay	40	-	-	R
10	105MCS	1	0.5	Medium Clay	40	-	S	-
11	105STCR	1	0.5	Stiff Clay	80	-	-	R
12	105STCS	1	0.5	Stiff Clay	80	-	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion c, (kN/m ²)	Angel of Internal Friction ϕ , (degree)	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough,(R)
13	11SCR	1	1	Soft Clay	20	-	-	R
14	11SCS	1	1	Soft Clay	20	-	S	-
15	11MCR	1	1	Medium Clay	40	-	-	R
16	11MCS	1	1	Medium Clay	40	-	S	-
17	11STCR	1	1	Stiff Clay	80	-	-	R
18	11STCS	1	1	Stiff Clay	80	-	S	-
19	12SCR	1	2	Soft Clay	20	-	-	R
20	12SCS	1	2	Soft Clay	20	-	S	-
21	12MCR	1	2	Medium Clay	40	-	-	R
22	12MCS	1	2	Medium Clay	40	-	S	-
23	12STCR	1	2	Stiff Clay	80	-	-	R
24	12STCS	1	2	Stiff Clay	80	-	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion c, (kN/m ²)	Angel of Internal Friction ϕ , (degree)	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough,(R)
25	20SCR	2	0	Soft Clay	20	-	-	R
26	20SCS	2	0	Soft Clay	20	-	S	-
27	20MCR	2	0	Medium Clay	40	-	-	R
28	20MCS	2	0	Medium Clay	40	-	S	-
29	20STCR	2	0	Stiff Clay	80	-	-	R
30	20STCS	2	0	Stiff Clay	80	-	S	-
31	205SCR	2	0.5	Soft Clay	20	-	-	R
32	205SCS	2	0.5	Soft Clay	20	-	S	-
33	205MCR	2	0.5	Medium Clay	40	-	-	R
34	205MCS	2	0.5	Medium Clay	40	-	S	-
35	205STCR	2	0.5	Stiff Clay	80	-	-	R
36	205STCS	2	0.5	Stiff Clay	80	-	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion c, (kN/m ²)	Angel of Internal Friction ϕ , (degree)	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough,(R)
37	21SCR	2	1	Soft Clay	20	-	-	R
38	21SCS	2	1	Soft Clay	20	-	S	-
39	21MCR	2	1	Medium Clay	40	-	-	R
40	21MCS	2	1	Medium Clay	40	-	S	-
41	21STCR	2	1	Stiff Clay	80	-	-	R
42	21STCS	2	1	Stiff Clay	80	-	S	-
43	225SCR	2	2	Soft Clay	20	-	-	R
44	225SCS	2	2	Soft Clay	20	-	S	-
45	225MCR	2	2	Medium Clay	40	-	-	R
46	225MCS	2	2	Medium Clay	40	-	S	-
47	225STCR	2	2	Stiff Clay	80	-	-	R
48	225STCS	2	2	Stiff Clay	80	-	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion c, (kN/m ²)	Angel of Internal Friction ϕ , (degree)	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough,(R)
49	30SCR	3	0	Soft Clay	20	-	-	R
50	30SCS	3	0	Soft Clay	20	-	S	-
51	30MCR	3	0	Medium Clay	40	-	-	R
52	30MCS	3	0	Medium Clay	40	-	S	-
53	30STCR	3	0	Stiff Clay	80	-	-	R
54	30STCS	3	0	Stiff Clay	80	-	S	-
55	305SCR	3	0.5	Soft Clay	20	-	-	R
56	305SCS	3	0.5	Soft Clay	20	-	S	-
57	305MCR	3	0.5	Medium Clay	40	-	-	R
58	305MCS	3	0.5	Medium Clay	40	-	S	-
59	305STCR	3	0.5	Stiff Clay	80	-	-	R
60	305STCS	3	0.5	Stiff Clay	80	-	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion c, (kN/m ²)	Angel of Internal Friction ϕ , (degree)	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough,(R)
61	31SCR	3	1	Soft Clay	20	-	-	R
62	31SCS	3	1	Soft Clay	20	-	S	-
63	31MCR	3	1	Medium Clay	40	-	-	R
64	31MCS	3	1	Medium Clay	40	-	S	-
65	31STCR	3	1	Stiff Clay	80	-	-	R
66	31STCS	3	1	Stiff Clay	80	-	S	-
67	32SCR	3	2	Soft Clay	20	-	-	R
68	32SCS	3	2	Soft Clay	20	-	S	-
69	32MCR	3	2	Medium Clay	40	-	-	R
70	32MCS	3	2	Medium Clay	40	-	S	-
71	32STCR	3	2	Stiff Clay	80	-	-	R
72	32STCS	3	2	Stiff Clay	80	-	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion	Angel of Internal Friction	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough,(R)
73	10LSR	1	0	Loose Sand	-	30	-	R
74	10LSS	1	0	Loose Sand	-	30	S	-
75	10MSR	1	0	Medium Sand	-	35	-	R
76	10MSS	1	0	Medium Sand	-	35	S	-
77	10DSR	1	0	Dense Sand	-	40	-	R
78	10DSS	1	0	Dense Sand	-	40	S	-
79	105LSR	1	0.5	Loose Sand	-	30	-	R
80	105LSS	1	0.5	Loose Sand	-	30	S	-
81	105MSR	1	0.5	Medium Sand	-	35	-	R
82	105MSS	1	0.5	Medium Sand	-	35	S	-
83	105DSR	1	0.5	Dense Sand	-	40	-	R
84	105DSS	1	0.5	Dense Sand	-	40	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion	Angel of Internal Friction	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough,(R)
85	11LSR	1	1	Loose Sand	-	30	-	R
86	11LSS	1	1	Loose Sand	-	30	S	-
87	11MSR	1	1	Medium Sand	-	35	-	R
88	11MSS	1	1	Medium Sand	-	35	S	-
89	11DSR	1	1	Dense Sand	-	40	-	R
90	11DSS	1	1	Dense Sand	-	40	S	-
91	12LSR	1	2	Loose Sand	-	30	-	R
92	12LSS	1	2	Loose Sand	-	30	S	-
93	12MSR	1	2	Medium Sand	-	35	-	R
94	12MSS	1	2	Medium Sand	-	35	S	-
95	12DSR	1	2	Dense Sand	-	40	-	R
96	12DSS	1	2	Dense Sand	-	40	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion	Angel of Internal Friction	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough, (R)
97	20LSR	2	0	Loose Sand	-	30	-	R
98	20LSS	2	0	Loose Sand	-	30	S	-
99	20MSR	2	0	Medium Sand	-	35	-	R
100	20MSS	2	0	Medium Sand	-	35	S	-
101	20DSR	2	0	Dense Sand	-	40	-	R
102	20DSS	2	0	Dense Sand	-	40	S	-
103	205LSR	2	0.5	Loose Sand	-	30	-	R
104	205LSS	2	0.5	Loose Sand	-	30	S	-
105	205MSR	2	0.5	Medium Sand	-	35	-	R
106	205MSS	2	0.5	Medium Sand	-	35	S	-
107	205DSR	2	0.5	Dense Sand	-	40	-	R
108	205DSS	2	0.5	Dense Sand	-	40	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion	Angel of Internal Friction	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough, (R)
109	21LSR	2	1	Loose Sand	-	30	-	R
110	21LSS	2	1	Loose Sand	-	30	S	-
111	21MSR	2	1	Medium Sand	-	35	-	R
112	21MSS	2	1	Medium Sand	-	35	S	-
113	21DSR	2	1	Dense Sand	-	40	-	R
114	21DSS	2	1	Dense Sand	-	40	S	-
115	22LSR	2	2	Loose Sand	-	30	-	R
116	22LSS	2	2	Loose Sand	-	30	S	-
117	22MSR	2	2	Medium Sand	-	35	-	R
118	22MSS	2	2	Medium Sand	-	35	S	-
119	22DSR	2	2	Dense Sand	-	40	-	R
120	22DSS	2	2	Dense Sand	-	40	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion	Angel of Internal Friction	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough, (R)
					c, (kN/m ²)	φ, (degree)		
121	30LSR	3	0	Loose Sand	-	30	-	R
122	30LSS	3	0	Loose Sand	-	30	S	-
123	30MSR	3	0	Medium Sand	-	35	-	R
124	30MSS	3	0	Medium Sand	-	35	S	-
125	30DSR	3	0	Dense Sand	-	40	-	R
126	30DSS	3	0	Dense Sand	-	40	S	-
127	305LSR	3	0.5	Loose Sand	-	30	-	R
128	305LSS	3	0.5	Loose Sand	-	30	S	-
129	305MSR	3	0.5	Medium Sand	-	35	-	R
130	305MSS	3	0.5	Medium Sand	-	35	S	-
131	305DSR	3	0.5	Dense Sand	-	40	-	R
132	305DSS	3	0.5	Dense Sand	-	40	S	-

ตารางที่ 13 (ต่อ)

No.	Analysis	ความกว้างฐานราก	อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง	ชนิดของดิน	Cohesion	Angel of Internal Friction	Roughness of Footing	
		(B)	(D/B)				Smooth, (S)	Rough, (R)
					c, (kN/m ²)	φ, (degree)		
133	31LSR	3	1	Loose Sand	-	30	-	R
134	31LSS	3	1	Loose Sand	-	30	S	-
135	31MSR	3	1	Medium Sand	-	35	-	R
136	31MSS	3	1	Medium Sand	-	35	S	-
137	31DSR	3	1	Dense Sand	-	40	-	R
138	31DSS	3	1	Dense Sand	-	40	S	-
139	32LSR	3	2	Loose Sand	-	30	-	R
140	32LSS	3	2	Loose Sand	-	30	S	-
141	32MSR	3	2	Medium Sand	-	35	-	R
142	32MSS	3	2	Medium Sand	-	35	S	-
143	32DSR	3	2	Dense Sand	-	40	-	R
144	32DSS	3	2	Dense Sand	-	40	S	-