

บทที่ 5

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ในการวิเคราะห์พฤติกรรมเสาเข็ม

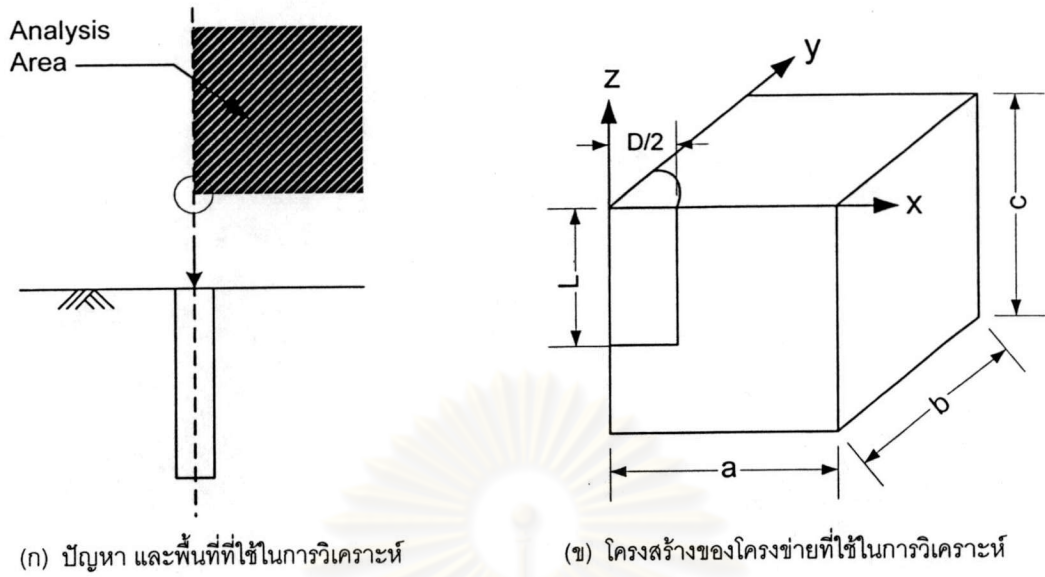
5.1 การวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว (Single Pile Analysis)

ในส่วนนี้ แสดงรายละเอียดวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยวในงานวิจัย แสดงรูปแบบ และการกระจายขนาดของโครงข่าย สภาวะขอบเขต (Boundary condition) ชนิดของแรงกระทำ ชนิดของชั้นส่วน แบบจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างที่ใช้ และแสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มเดี่ยวในกรณีศึกษาต่าง ๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลเฉลยที่มีอยู่ และผลงานวิจัยในอดีต

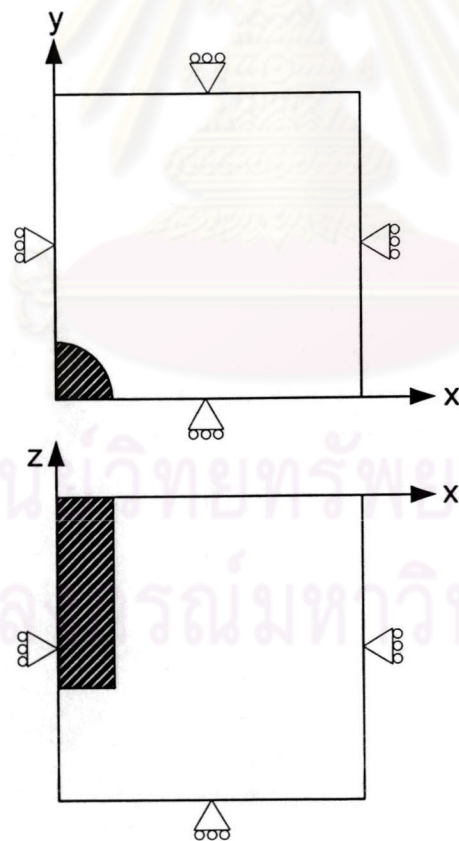
5.1.1 โครงข่าย (mesh)

เนื่องจากคุณสมบัติสมมาตรของปัญหาเสาเข็มรับแรงในแนวดิ่ง จึงสามารถลดขนาดของปัญหาจากการวิเคราะห์เสาเข็มเต็มทั้งต้น เป็นการวิเคราะห์เพียง 1 ใน 4 ของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยการเลือกขนาดขอบเขตของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.1(ข) จะขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหานั้น ๆ เช่น ในกรณีที่รูปแบบของปัญหาเป็น elastic half-space ในงานวิจัยนี้ได้เลือกระยะขอบเขตในแนวราบ(a ,b) ต่ำที่สุด คือ 5.3 เท่าของความยาวเสาเข็ม ในขณะที่ขอบเขตในแนวดิ่งขึ้นกับระดับฐานแข็งที่กำหนด ในกรณีที่ฐานแข็งอยู่ลึกมาก ๆ (floating pile) เลือกให้อยู่ในระดับลึกจากปลายเข็มต่ำที่สุดเป็น 5.7 เท่าของความยาวเสาเข็ม ซึ่งเป็นระยะขอบเขตที่เพียงพอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของเสาเข็ม (Trochanis ,1991)

การกำหนดการกระจายขนาดของชั้นส่วนในโครงข่าย โดยทั่วไปกำหนดให้โครงข่ายมีความละเอียดสูงในบริเวณใกล้เสาเข็ม โดยเพิ่มความละเอียดที่บริเวณหัว และที่ปลายเสาเข็ม ในกรณีที่สร้างโดยโปรแกรม GEOMPACK เนื่องจากกำหนดขนาดของชั้นส่วนโดยใช้เป็นค่าสัดส่วนกับความยาวด้าน โครงข่ายจึงมีความละเอียดสูงบริเวณใกล้กับเสาเข็มโดยอัตโนมัติ แต่การเพิ่มความละเอียดที่บริเวณหัว และที่ปลายเสาเข็ม ต้องระบุหมายเลขชั้นส่วนภายในบริเวณที่ต้องการเพิ่มความละเอียด จึงได้สร้างโปรแกรมย่อยซึ่งสามารถหาหมายเลขชั้นส่วนในบริเวณที่กำหนดได้ลดความยุ่งยากในการทำ mesh refinement



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียว



รูปที่ 5.2 สภาวะขอบเขตที่กำหนดในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียว

ในกรณีสร้างด้วยโปรแกรม GMSH สามารถกำหนดการกระจายขนาดในโครงข่ายได้อย่างสะดวก ตั้งแต่เริ่มต้นสร้างโครงข่าย โดยการกำหนดค่า 'characteristic length' ที่จุดมุมของขอบเขตต่าง ๆ อย่างเหมาะสม คือ กำหนดให้โครงข่ายมีความละเอียดสูงที่บริเวณหัวเข็ม และปลายเข็ม โดยเพิ่มขนาดขั้นบริเวณตอนกลางของเสาเข็ม และขยายขนาดขึ้นอย่างสม่ำเสมอที่ระยะห่างออกจากตัวเข็ม

5.1.2 ชนิดของชิ้นส่วน (Element types)

ในงานวิจัยนี้ ใช้ทั้งชิ้นส่วนแบบเตตระฮีดรอน 4 จุดต่อ และเฮกซะฮีดรอน 8 จุดต่อ ในการสร้างโครงข่ายเพื่อการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว โดยในกรณีของชิ้นส่วนเฮกซะฮีดรอนซึ่งสร้างโดยโปรแกรมย่อยเดิม หรือ โปรแกรม GEOMPACK จะใช้สร้างโครงข่ายสำหรับเสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยม และในกรณีของชิ้นส่วนเตตระฮีดรอน ซึ่งสร้างโดยโปรแกรม GEOMPACK หรือ โปรแกรม GMSH สามารถใช้ในการสร้างโครงข่ายทั้งเสาเข็มหน้าตัดกลม และสี่เหลี่ยม โดยจะเลือกใช้ตามความเหมาะสมในแต่ละกรณี

5.1.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

กำหนดให้การเคลื่อนตัวของจุดต่อที่อยู่บนขอบเขตบางส่วน ถูกจำกัดในทิศทางที่กำหนด โดยพยายามให้จำลองพฤติกรรมของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ให้มากที่สุด โดยทั่วไป จะกำหนดให้จำกัดการเคลื่อนตัวที่ระนาบขอบเขตต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.1(ข) ดังนี้

(1) ระนาบ $x = 0$ และ $x = a$: จำกัดการเคลื่อนตัวในแนวแกน x

(2) ระนาบ $y = 0$ และ $y = b$: จำกัดการเคลื่อนตัวในแนวแกน y

(3) ระนาบ $z = -c$: จำกัดการเคลื่อนตัวในแนวแกน z

สำหรับจุดต่ออื่น ๆ นอกจากจุดต่อที่กำหนด สามารถเคลื่อนตัวในทุกทิศทางได้อย่างอิสระ โดยสมภาวะขอบเขตที่กำหนดแสดงดังรูปที่ 5.2

5.1.4 แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ

พฤติกรรมของวัสดุ ในโครงสร้างเสาเข็ม-ดิน สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งกรณีที่มีพฤติกรรมแบบอริสติก หรืออริสโตพลาสติก โดยมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic) และพฤติกรรมบริเวณรอยต่อระหว่างเสาเข็มและดิน กำหนดให้เป็นแบบยึดเหนี่ยวสมบูรณ์ (perfectly bonded) คือ ไม่เกิดการเลื่อน หรือแยกตัวจากกันระหว่างจุดต่อ

ในกรณีที่พฤติกรรมเป็นอริสติก ซึ่งเป็นจริงในกรณีที่แรงกระทำอยู่ในระดับต่ำ พฤติกรรมดิน และเสาเข็มจะกำหนดให้เป็นเป็นอริสติกเชิงเส้น (linear elastic) ซึ่งกราฟแรงกระทำ และการทรุดตัว (load-settlement curve) จะเป็นเส้นตรง เมื่อแรงกระทำภายนอกเพิ่มสูงขึ้น สามารถจำลองพฤติกรรมของดินเป็นอริสโตพลาสติกโดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมแบบอริสติก-พลาสติกสมบูรณ์ ด้วยกฎการวิบัติ แบบมอร์-คูลอมบ์ ในขณะที่พฤติกรรมของเสาเข็มยังอยู่ในช่วงอริสติก กราฟแรงกระทำ และการทรุดตัวในส่วนนี้จะลู่เข้า (converge) สู่แกนของการทรุดตัว

5.1.5 แรงกระทำภายนอก (External Loading)

ในงานวิจัยนี้ แรงกระทำภายนอกเป็นแรงในแนวตั้งกระทำที่หัวเสาเข็ม โดยจะกระทำเป็นแรงสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดเสาเข็ม ซึ่งกำหนดโดยการรวมแรง (lump) เขาสู่จุดต่อแต่ละจุดบนหน้าตัดที่หัวเสาเข็ม โดยหลักการที่เสนอโดย Smith และ Griffiths (1999)

สำหรับในการวิเคราะห์ช่วงพฤติกรรมเป็นอริสโตพลาสติก สามารถกำหนดแรงกระทำเริ่มต้น และแรงกระทำเพิ่ม (load increment) เป็นลำดับขั้น ได้ทั้งในกรณีการเพิ่มแรงกระทำ หรือการเพิ่มระดับการทรุดตัวที่หัวเข็ม ซึ่งในกรณีหลังจะกำหนดให้ค่าการทรุดตัวในแต่ละระดับมีค่าเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด การกำหนดค่าการทรุดตัวจะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้การเคลื่อนตัวเป็นตัวควบคุม (displacement control) ซึ่งมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ด้วยวิธีสตีเฟนสคองที่ที่ค่าแรงกระทำภายนอกสูง ๆ เนื่องจากสตีเฟนสเมตริกซ์ที่ใช้เริ่มจะให้ค่าสตีเฟนสสูงกว่าพฤติกรรมจริงของวัสดุในช่วงนั้นมาก

5.1.6 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ใช้ในงานวิจัย

หัวข้อต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียวในงานวิจัย แสดงทั้งในกรณีของเสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะใช้งาน (working load) และสภาวะสุดขีด (ultimate load) แสดงโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ในแต่ละปัญหา และแสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลเฉลยต่าง ๆ

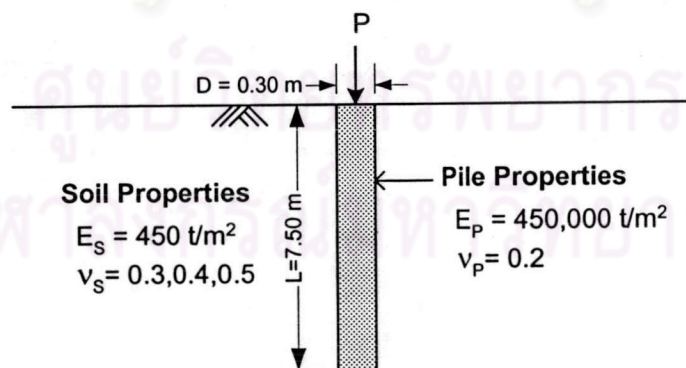
5.1.6.1 เสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะใช้งาน

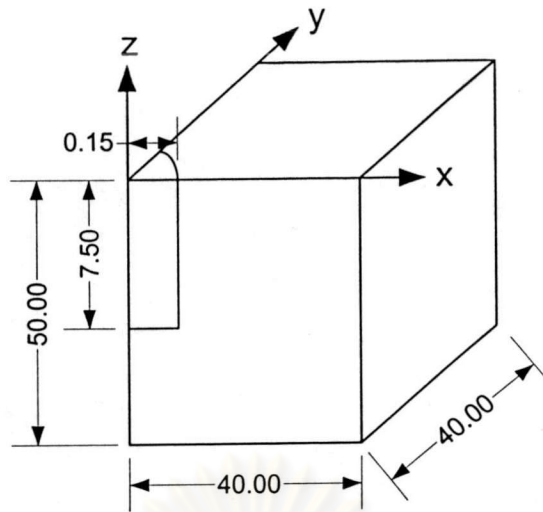
วิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างเสาเข็มกลมหน้าตัดกลม และเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลเฉลยจากวิธีอีลาสติก (Elastic Solution) ในกรณีศึกษาต่าง ๆ ดังนี้

(1) เสาเข็มแบบลอย (Floating pile)

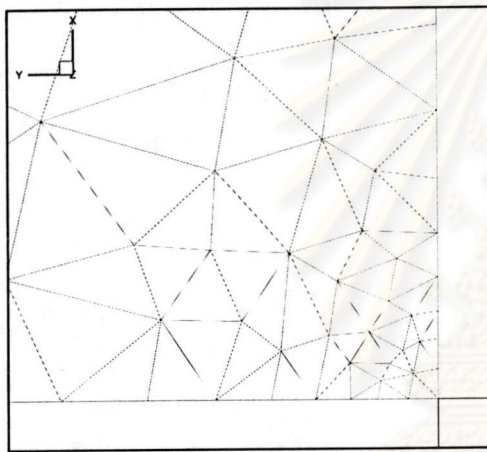
เป็นกรณีวิเคราะห์เสาเข็มต้นเดียว ในดินเนื้อเดียว (Homogeneous soil) ที่มีฐานแข็ง (rigid base) อยู่ลึกมาก ๆ ปัญหาที่ใช้เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ เลือกรณีที่มีผลเฉลยค่อนข้างชัดเจน ดังแสดงต่อไปนี้

ปัญหา

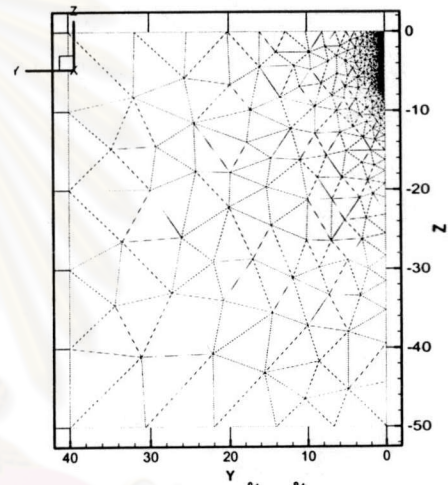




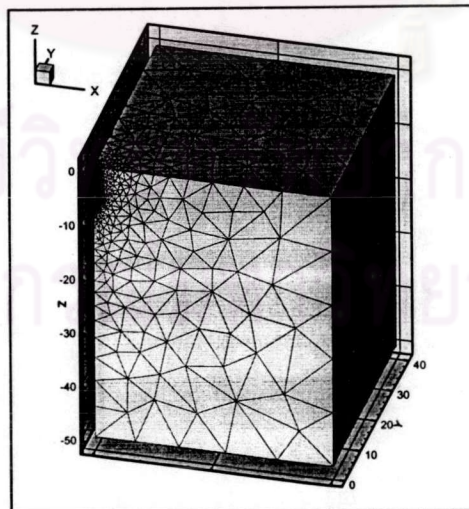
รูปที่ 5.3 ขนาดโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียวแบบลอย



(ก) มุมมองด้านบน



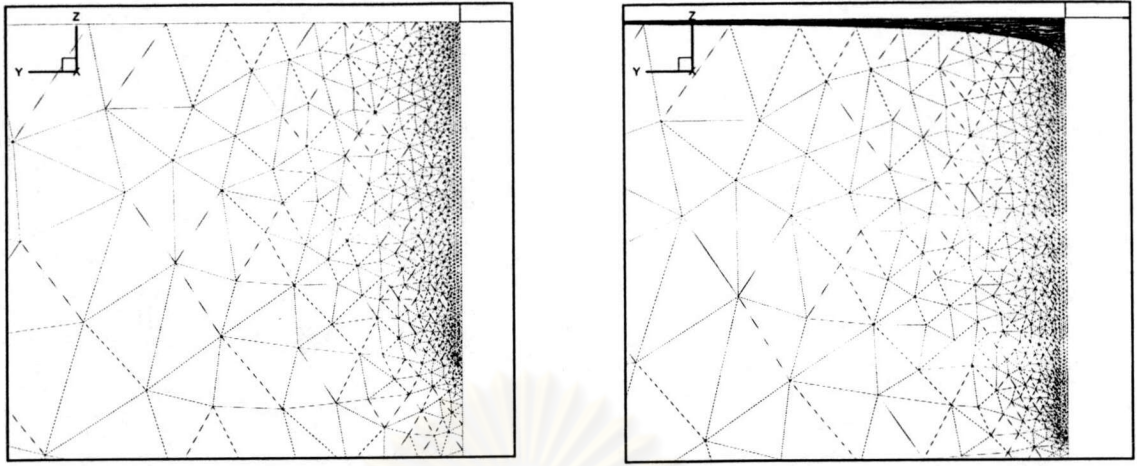
(ข) มุมมองด้านข้าง



(ค) มุมมอง 3 มิติ

รูปที่ 5.4 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียวแบบลอย(single floating pile)

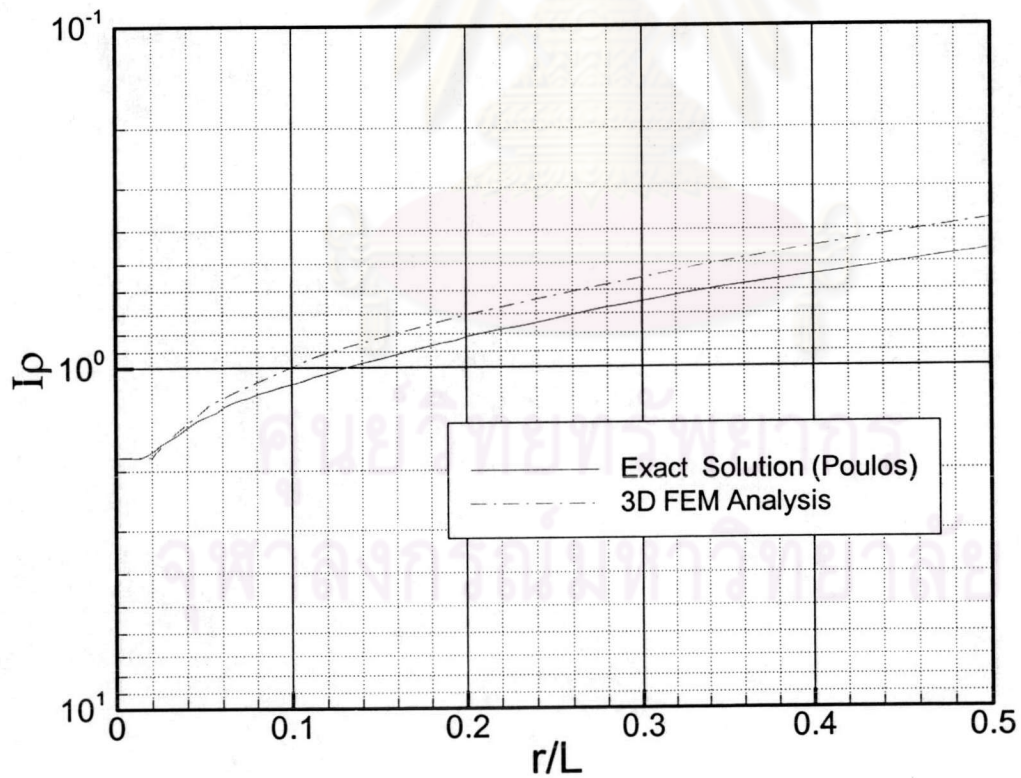
(โครงข่าย 4,076 จุดต่อ และ 19,539 ชิ้นส่วน)

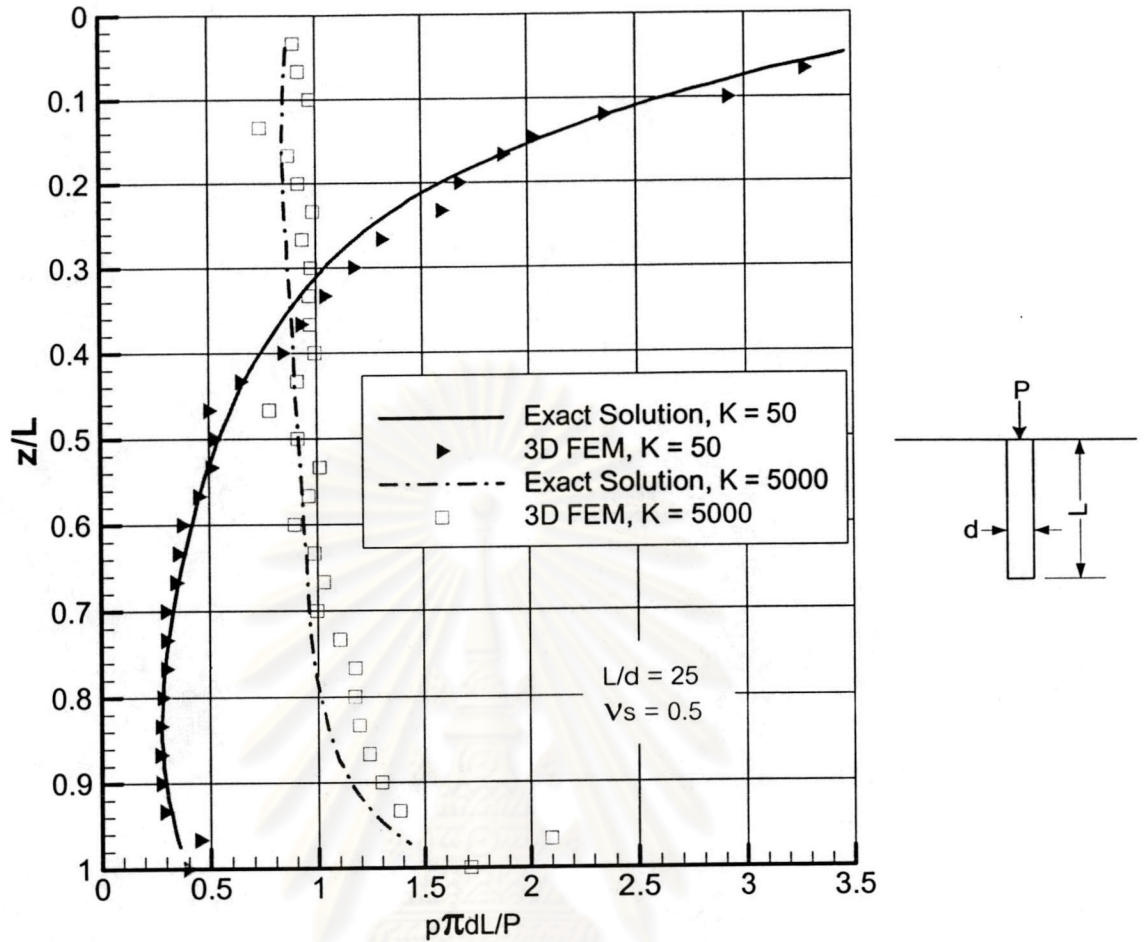


(ก) โครงข่ายเริ่มต้น (ด้านข้าง)

(ข) โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว (ด้านข้าง)

รูปที่ 5.5 โครงข่ายเริ่มต้น และภายหลังการเคลื่อนตัวของเสาเข็มต้นเดียวแบบลอย

รูปที่ 5.6 ค่าอินฟลูเอนซ์แฟกเตอร์ของการเคลื่อนตัวของเสาเข็มต้นเดียวแบบลอย ที่ระยะ r/L ใด ๆ เปรียบเทียบกับผลเฉลยจากวิธีอิลาสติก



รูปที่ 5.7 การกระจายของค่าหน่วยแรงเฉือนตามผิวของเสาเข็ม ในกรณีวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็ม
ต้นเดียวแบบลอย เปรียบเทียบกับผลเฉลยจากวิธีวิเคราะห์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงข่าย

ขนาดของขอบเขตที่เลือกใช้ในการสร้างโครงข่ายของกรณีศึกษานี้ แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งเป็นโครงข่ายที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องโดยการปรับขนาดของขอบเขต และความละเอียดของโครงข่ายในแต่ละส่วนตามความเหมาะสม

ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์แสดงในกรณีที่กำหนดแรงกระทำ P เป็นแรงกระทำสมำเสมอที่หัวเสาเข็ม ขนาด 100 ตัน/ตร.ม. ซึ่งเป็นแรงรวมประมาณ 7.07 ตัน โดยรูปที่ 5.5 เปรียบเทียบภาพด้านข้างของโครงข่ายเริ่มต้น และภายหลังการเคลื่อนตัว รูปที่ 5.6 แสดงการทรุดตัวโครงสร้างที่ระดับผิวดิน และระยะห่างใด ๆ จากจุดศูนย์กลางเสาเข็ม(r) โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากวิธีอิลาสติก แสดงในรูปของแฟกเตอร์ที่ไม่มีหน่วย คือ r/L เมื่อ L คือ ความยาวเสาเข็ม และค่าการทรุดตัวแทนโดยอินฟลูเอนซ์แฟกเตอร์ของการเคลื่อนตัว (displacement-influence factor) I_p ซึ่งนิยามดังนี้

$$\rho = PI_p/LE_s \quad (5.1)$$

โดยที่ ρ : ค่าการทรุดตัว
 P : แรงกระทำในแนวตั้งที่หัวเสาเข็ม
 E_s : ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน
 L : ความยาวเสาเข็ม

ซึ่งจะเห็นว่าค่า I_p เป็นสัดส่วนกับค่าการทรุดตัว กราฟของผลเฉลยเสนอโดย Poulos (1974) ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ (poisson's ratio, ν_s) ของดิน เป็น 0.5 ซึ่งการกำหนดค่าดังกล่าวในโปรแกรมจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลข จึงต้องกำหนดโดยประมาณเป็น 0.49 ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่า I_p ที่จุดศูนย์กลางเสาเข็มได้จากผลเฉลยมีค่าเท่ากับ 1.83 ในขณะที่ค่าที่ได้จากโปรแกรม คือ 1.82 มีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.005 % แต่การทรุดตัวที่ผิวดินระยะห่างออกไป พบว่าผลจากโปรแกรมมีแนวโน้มที่ต่ำกว่า โดยความแตกต่างจะมีมากขึ้นตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเกิดจากการประมาณค่าอัตราส่วนปัวซองส์ และการจำกัดขอบเขตด้านข้าง

ในกรณีเปรียบเทียบการทรุดตัวเฉพาะที่หัวเสาเข็ม ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทดลองเปรียบเทียบกับผลเฉลยในกรณีต่าง ๆ Poulos และ Davis (1980) ได้เสนอค่าปรับแก้ผลของปัจจัยทำการผล

ของระดับของฐานแข็ง ที่ไม่อยู่ในระดับที่ลึกเพียงพอ และผลของค่าอัตราส่วนปัวซองส์ที่ใกล้เคียงกับ 0.5 ดังกล่าว ดังสมการต่อไปนี้

$$\rho = PI/E_s d \quad (5.2)$$

- โดยที่
- I : $I_0 R_k R_h R_v$
 - I_0 : อินฟลูเอนซ์แฟกเตอร์ของการทรุดตัว(settlement-influence factor) ในกรณีเสาเข็มแบบไม่อัดตัว(incompressible pile) เมื่อฐานแข็งอยู่ในระดับลึก และอัตราส่วนปัวซองส์ $V_s = 0.5$
 - R_k : ค่าปรับแก้ค่าความอัดตัวของเสาเข็ม
 - R_h : ค่าปรับแก้ระดับของฐานแข็ง
 - R_v : ค่าปรับแก้ค่าอัตราส่วนปัวซองส์
 - d : ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ทดลองวิเคราะห์ปัญหาเดิมเมื่อลดความลึกของระดับฐานแข็งลงเป็น 22 เมตร ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนปัวซองส์เป็น 0.3 และ 0.4 และคำนวณค่าการทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม(ρ) เปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้รับการปรับแก้ค่าแล้ว รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก. ซึ่งสรุปได้ดังนี้

(ก) กรณีอัตราส่วนปัวซองส์เป็น 0.3

ρ จากโปรแกรม = 3.62 มิลลิเมตร

ρ จากผลเฉลย = 3.51 มิลลิเมตร

ความคลาดเคลื่อน = 3%

(ข) กรณีอัตราส่วนปัวซองส์เป็น 0.4

ρ จากโปรแกรม = 3.67 มิลลิเมตร

ρ จากผลเฉลย = 3.67 มิลลิเมตร

ความคลาดเคลื่อน = 0%

จะเห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนมีน้อยมาก สรุปได้ว่าโปรแกรมสามารถประมาณค่าการทรุดตัวของเสาเข็มในสภาวะอิลาสติกได้ใกล้เคียงกับผลทางทฤษฎี

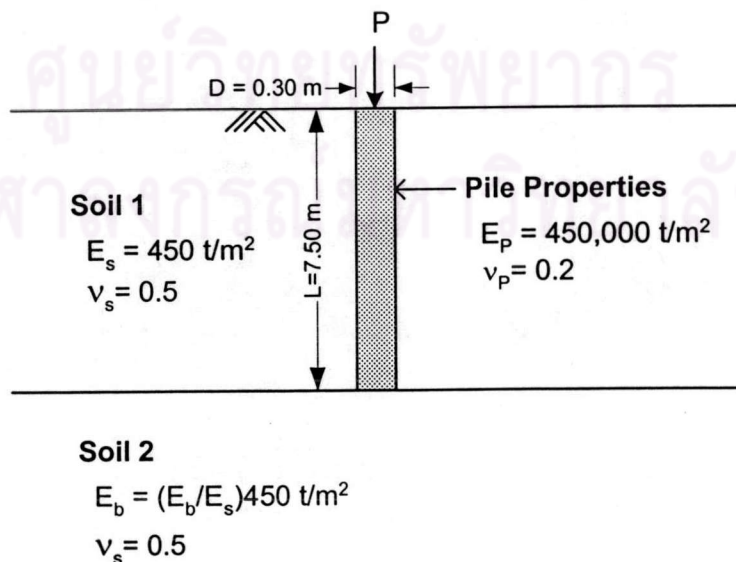
รูปที่ 5.7 แสดงค่าการกระจายของหน่วยแรงเฉือนตามแนวผิวของเข็ม โดยกราฟเสนอโดย Poulos และ Davis (1980) โดยใช้พารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วย pT_dL/P แทนหน่วยแรงเฉือน p ซึ่งคือ ค่า τ_{rz} ในระบบพิกัดทรงกระบอก ในกรณีกำหนดค่า K เป็น 50 และ 5000 เมื่อค่า $K = E_p/E_s$ ผลที่ได้พบว่าการวิเคราะห์โดยโปรแกรมให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลเฉลย

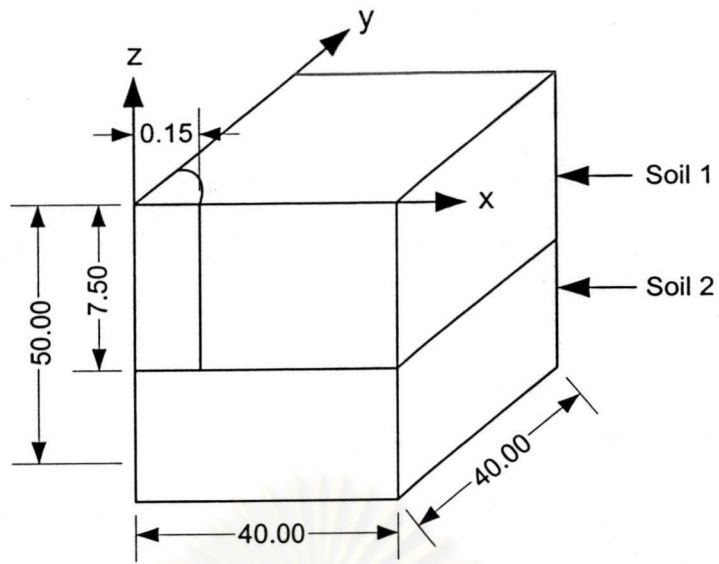
นอกจากนี้ เปรียบเทียบค่า สัดส่วนของแรงกระทำที่ปลายต่อแรงกระทำที่หัวเสาเข็ม (percent load carried by base) เสนอโดย Poulos(1974) ในกรณีตัวอย่าง จากผลเฉลยมีค่าเป็น 6 % ในขณะที่ผลจากงานวิจัย เปรียบเทียบโดยใช้สัดส่วนของหน่วยแรงในแนวตั้งตามแกนกลางของเสาเข็มได้ค่าเป็น 6.06 % ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเพียง 1 %

(2) กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า (Pile bearing on stiffer stratum)

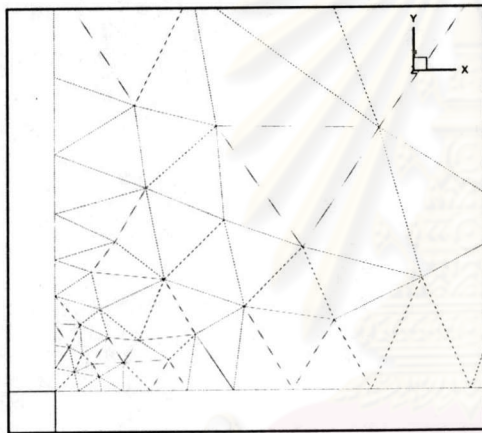
เป็นกรณีวิเคราะห์เสาเข็มต้นเดียว ในดินที่มี 2 ชั้นดิน ดินชั้นล่างมีสติเฟนสูงกว่าดินชั้นบน โดยปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับรอยต่อของชั้นดิน โดยที่ฐานแข็ง (rigid base) อยู่ในระดับลึกมาก ๆ ปัญหาที่ใช้เป็นตัวอย่งการวิเคราะห์ แสดงต่อไปนี้

ปัญหา

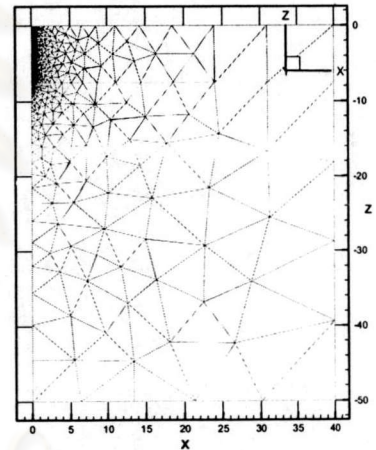




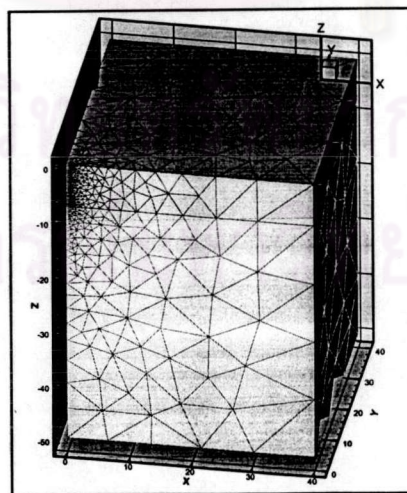
รูปที่ 5.8 ขนาดโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า



(ก) มุมมองด้านบน

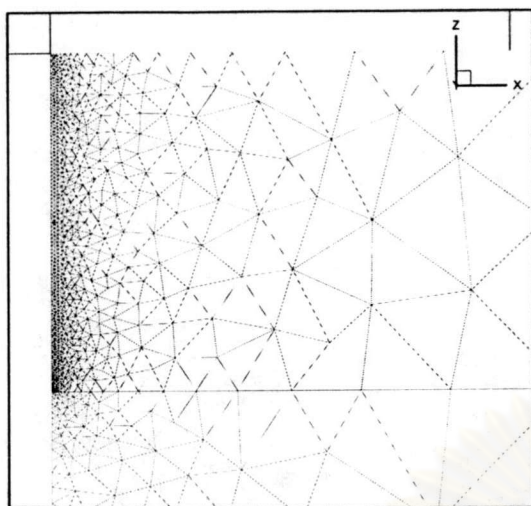


(ข) มุมมองด้านข้าง

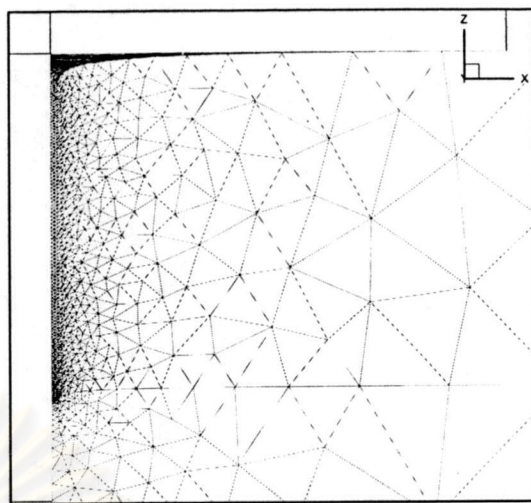


(ค) มุมมอง 3 มิติ

รูปที่ 5.9 โครงข่ายที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า (โครงข่าย 4,439 จุดต่อ และ 21,856 ชิ้นส่วน)

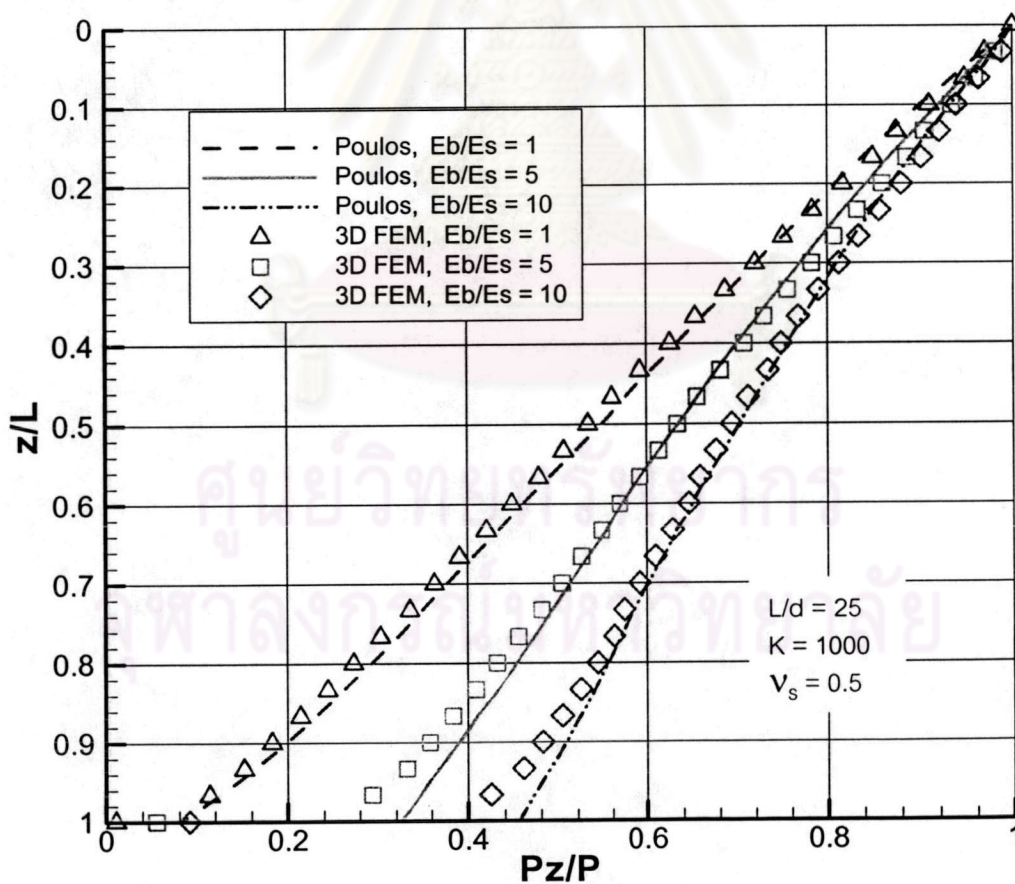


(ก) โครงข่ายเริ่มต้น (ด้านข้าง)



(ข) โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว (ด้านข้าง)

รูปที่ 5.10 โครงข่ายเริ่มต้น และ ภายหลังการเคลื่อนตัว ของการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวกรณี
ปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า



รูปที่ 5.11 แรงภายในเสาเข็มที่ระดับต่างๆ ของตัวอย่างปัญหาเสาเข็มเดี่ยวกรณีปลายเสาเข็ม
อยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า เปรียบเทียบกับผลเฉลยของวิธีอิลาสติก

โครงข่าย

ขนาดของขอบเขตที่เลือกใช้ในการสร้างโครงข่ายของกรณีศึกษานี้ ใช้ขอบเขตเดียวกับกรณีเสาเข็มลอย (Floating pile) โดยเพิ่มส่วนของชั้นดิน ดังแสดงดังรูปที่ 5.8 โดยตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งเป็นโครงข่ายที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องโดยการปรับขนาดของขอบเขต และความละเอียดของโครงข่ายในแต่ละส่วนตามความเหมาะสม

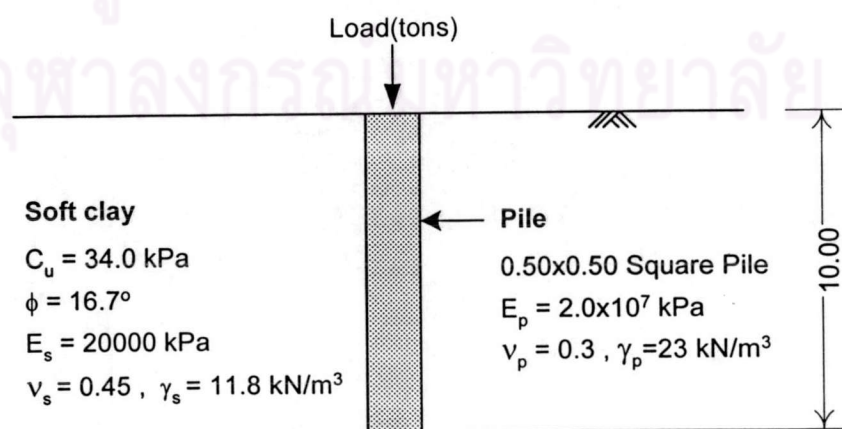
ผลการวิเคราะห์

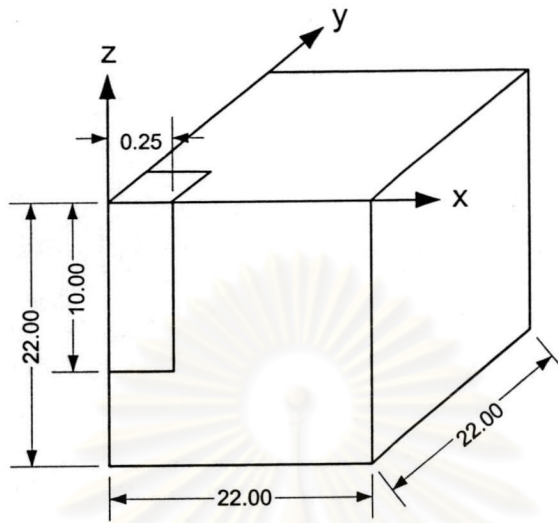
ผลการวิเคราะห์แสดงในกรณีที่กำหนดแรงกระทำ P เป็นแรงกระทำสมำเสมอที่หัวเสาเข็ม ขนาด 100 ตัน/ตร.ม. ซึ่งเป็นแรงรวมประมาณ 7.07 ตัน รูปที่ 5.10 แสดงภาพด้านข้างของโครงข่ายเริ่มต้น และภายหลังการเคลื่อนตัว การกระจายของแรงกายรวมของหน้าตัดเสาเข็มที่ระดับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.11 กราฟผลเฉลยเสนอโดย Poulos และ Davis (1980) แสดงสัดส่วนของแรงรวมที่หน้าตัดใด ๆ ต่อแรงกระทำที่หัวเสาเข็ม ที่ระดับ z/L ต่าง ๆ โดยผลที่การเปรียบเทียบพบว่าผลจากการวิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับผลเฉลย ผลต่างจะเกิดที่ระดับปลายเสาเข็ม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงมาก และคุณสมบัติของวัสดุมีความไม่ต่อเนื่อง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการประมาณค่าหน่วยแรงที่จุดต่อ

5.1.6.2 เสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุดขีด

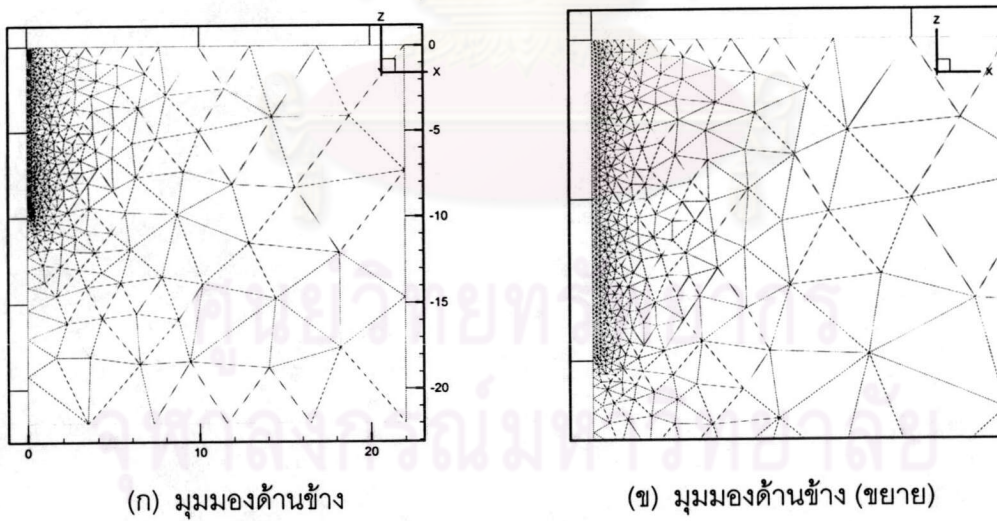
(1) กรณีเปรียบเทียบกับผลวิจัยด้วย FEM ในอดีต

ปัญหา

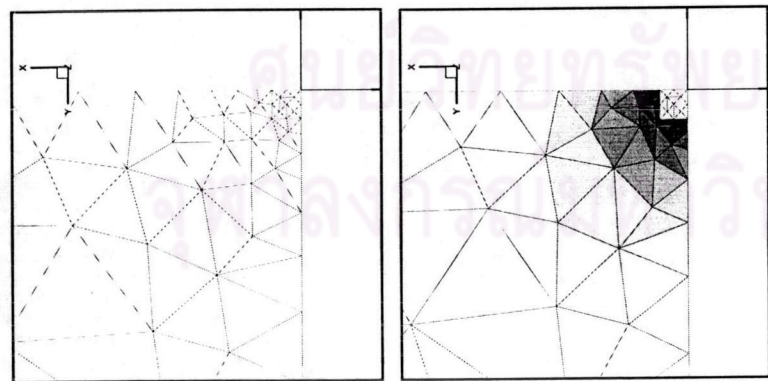




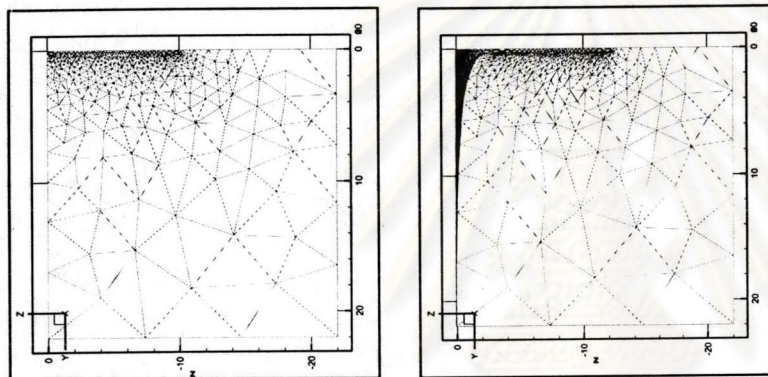
รูปที่ 5.12 ขนาดโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุดขีด



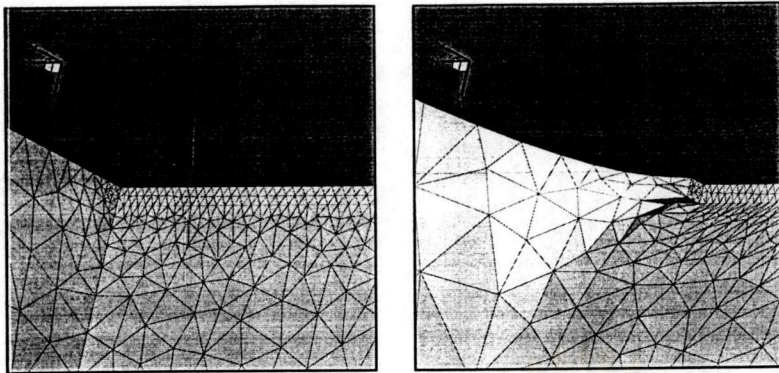
รูปที่ 5.13 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุดขีด (โครงข่าย 2379 จุดต่อ และ 11149 ชิ้นส่วน)



(ก) มุมมองด้านบน



(ข) มุมมองด้านข้าง



(ค) มุมมอง 3 มิติ

รูปที่ 5.14 โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว(deformed mesh) เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้นในตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุติขีด

วิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างเสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างเสาเข็มด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เสนอโดย Trochanis (1991) ซึ่งเป็นเสาเข็มลอย (Floating pile) ที่พฤติกรรมในช่วงพลาสติก กำหนดโดยแบบจำลองดรักเกอร์-แฟรกเกอร์ (Drucker-Prager model)

สำหรับหน่วยแรงในสภาวะเริ่มต้น หน่วยแรงในแนวตั้งสามารถหาได้จาก หน่วยน้ำหนัก γ_p ในขณะที่หน่วยแรงในแนวราบจะได้จากค่า k_0 ซึ่งไม่ได้กำหนดไว้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เป็น 0.66 ซึ่งประมาณจากความสัมพันธ์ $k_0 = 0.95 - \sin \bar{\phi}$ สำหรับดินเหนียวแบบ 'normally consolidated clay' (Brooker and Ireland, 1965)

สำหรับแรงกระทำ (Load) ในแผนภาพ สามารถกำหนดเป็นทั้งแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น (load increment) และค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น (settlement increment) ซึ่งจะใช้ในกรณีแรงกระทำสูง ๆ

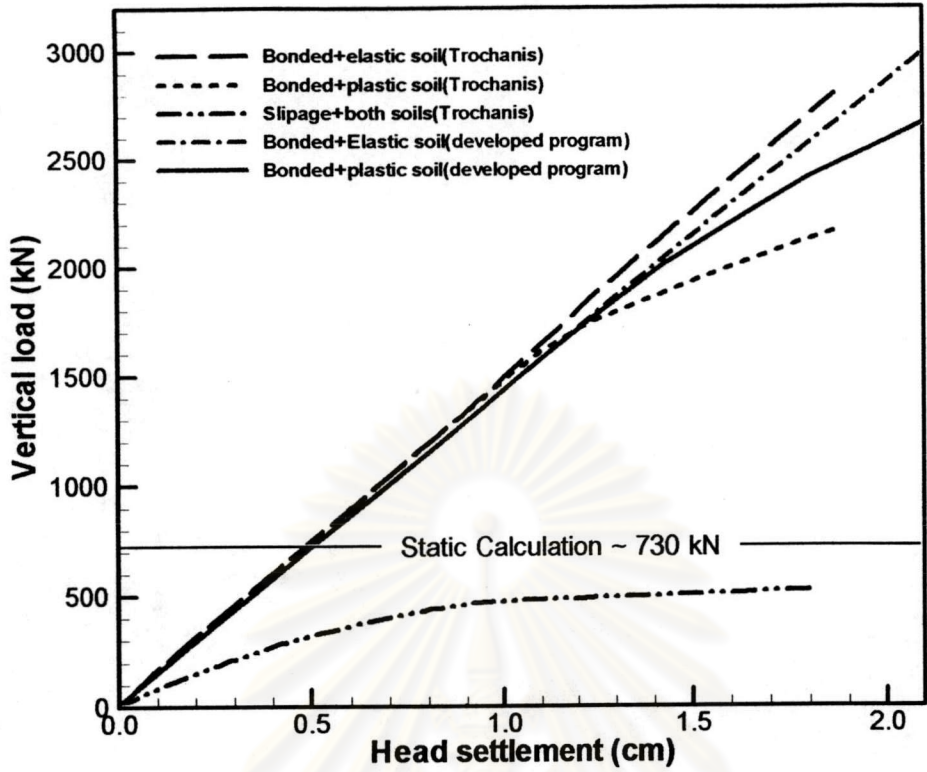
โครงข่าย

ขนาดโครงสร้างที่เลือกใช้ในการสร้างโครงข่าย แสดงดังรูปที่ 5.12 โดยใช้ชิ้นส่วนเตตระฮีดรอนสร้างโครงข่ายโดยมีการกระจายขนาดอย่างเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 5.13

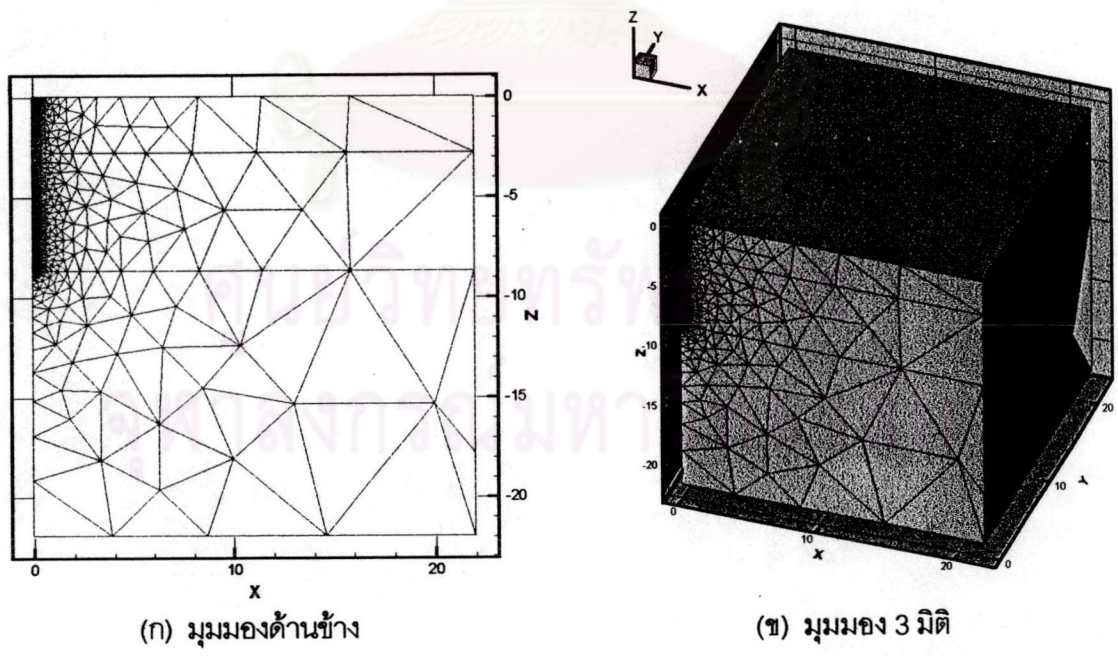
ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 5.14 แสดงภาพโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว (Deformed mesh) ในมุมต่าง ๆ ผลจากการวิเคราะห์ แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการทรุดตัว (load-settlement curve) ดังรูปที่ 5.15 ผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเสนอโดย Trochanis (1991) จะเห็นว่าในกรณีกำหนดพฤติกรรมเป็นอีลาสติก กราฟที่ได้จากโปรแกรม จะมีความชันน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่าเกิดจากผลของความละเอียดของโครงข่ายที่เลือกใช้แตกต่างกัน

สำหรับในกรณีที่พฤติกรรมเป็นอีลาสติกโตพลาสติก (คือ กรณี plastic soil ดังแสดงในกราฟ) พบว่าระดับที่กราฟเริ่มลู่เข้า (converge) ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มเกิดพฤติกรรมแบบพลาสติกในบางส่วน ของโครงข่าย อยู่ที่ระดับแรงกระทำที่หัวเสาเข็มประมาณ 1600 kN ซึ่งใกล้เคียงกัน แต่อัตราการโค้งเข้า ของกราฟที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะต่ำกว่าที่ได้จากผลวิจัยของ Trochanis คาดว่าเกิดจากแบบจำลองพฤติกรรมดิน (soil model) ที่แตกต่างกัน ซึ่ง Trochanis ใช้แบบจำลองดรักเกอร์-แฟรกเกอร์ ในขณะที่โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใช้แบบจำลองมอร์-คูลอมบ์ นอกจากนี้อาจเกิดจากวิธีการ (approach) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ช่วงพลาสติกที่แตกต่างกัน



รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการทรุดตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุดท้าย

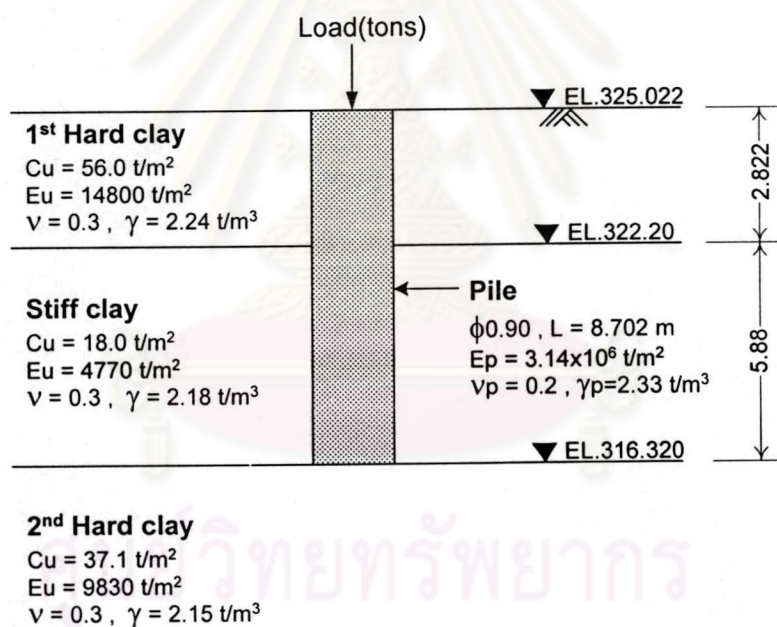


รูปที่ 5.16 โครงข่ายที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว กรณีเปรียบเทียบกับผลผลทดสอบเสาเข็มในสนาม (โครงข่าย 2,676 จุดต่อ และ 13,209 ชิ้นส่วน)

ข้อสังเกต จากผลการศึกษาของ Trochanis ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.15 ในกรณีที่การวิเคราะห์พฤติกรรมบริเวณผิวรอยต่อ อนุญาตให้เกิดการเลื่อนแยกตัว (slippage) ที่ผิวรอยต่อระหว่างเสาเข็ม และดิน จะเห็นว่าการหลุดตัวของเสาเข็มจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่แรงกระทำในระดับต่ำ และค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะต่ำมาก เมื่อเทียบกับกรณีที่ผิวรอยต่อมีพฤติกรรมยึดเหนี่ยวสมบูรณ์ และวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองพลาสติก (bonded+plastic) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากการคำนวณตามทฤษฎี (Static Calculation) เมื่อพิจารณาดินเป็นดินเหนียว จะมีค่าประมาณ 730 kN พบว่ากรณีที่เสาเข็ม และดินมีการเลื่อนแยกตัว ให้ผลที่ถูกต้องตามทฤษฎีมากกว่า รายละเอียดการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากการคำนวณตามทฤษฎีแสดงในภาคผนวก ค.

(2) กรณีเปรียบเทียบกับผลทดสอบเสาเข็มในสนาม

ปัญหา



ตัวอย่างผลทดสอบเสาเข็มในสนาม ใช้ข้อมูลการทดสอบซึ่งรวบรวมโดย สุวรรณ เชี่ยวชาญศิลป์ (วิทยานิพนธ์, 2531) ซึ่งเป็นข้อมูลการทดสอบเสาเข็มหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.90 เมตร ยาว 8.702 เมตร ในโครงการก่อสร้างโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยสภาพดินเป็นดินเหนียวแข็ง ถึงแข็งมาก (stiff and hard clay) ชีตจำกัดพลาสติก (Plastic Limit) ประมาณ 19–26% ปริมาณความชื้นในธรรมชาติ (natural water content) ประมาณ 10–23% และสำรวจไม่พบน้ำใต้ดิน โดยภายในเสาเข็มติดตั้งเครื่องมือวัดประกอบด้วย load cell บริเวณปลายเสาเข็ม และ tell tale rod ที่ระดับต่าง ๆ 4 ระดับภายในเสาเข็ม

โครงข่าย

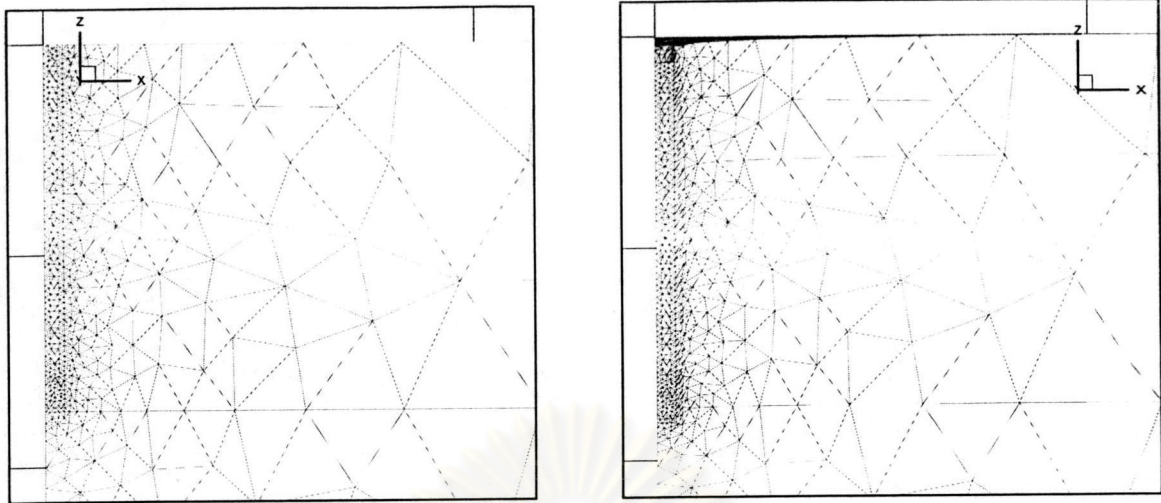
โครงข่ายที่สร้างขึ้น กำหนดให้มีขนาดขอบเขต (boundary) ในแกน x, y และ z เป็น 22x22x22 เมตร โดยใช้ชิ้นส่วนเตตระฮีดรอนสร้างโครงข่ายโดยมีการกระจายขนาดอย่างเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 5.16

ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบ โครงข่ายเริ่มต้น และภายหลังการเคลื่อนตัว (Deformed mesh) สำหรับผลการวิเคราะห์ แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการทรุดตัว (load-settlement curve) ดังรูปที่ 5.18 ผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลทดสอบเสาเข็มในสนามพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบ เสาเข็มจะแสดงพฤติกรรมทรุดตัวลงอย่างรวดเร็วที่แรงกระทำในระดับต่ำ และค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มต่ำ เมื่อเทียบกับผลจากโปรแกรม ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการศึกษาของ Trochanis (1991) ในหัวข้อที่ผ่านมา อาจสรุปได้ว่า สาเหตุเกิดจากการที่โปรแกรมไม่สามารถจำลองพฤติกรรมเคลื่อนแยกตัวบริเวณผิวรอยต่อระหว่างเสาเข็ม และดินได้ โดยบทที่ 6 ได้แสดงผลการศึกษา และจำลองพฤติกรรมในส่วนนี้ไว้ในเบื้องต้น

รูปที่ ๓.2 และ ๓.3 ในภาคผนวก ๓. แสดงพฤติกรรมของเสาเข็มตัวอย่างในรายละเอียด โดยรูปที่ ๓.2 แสดงกราฟหน่วยแรงเฉือน ต่อความเค้นเฉือนที่ผิวเสาเข็ม ที่ระดับแรงต่าง ๆ พบว่ากราฟมีพฤติกรรมการสู้เข้า ที่ระดับแรงสูง ๆ โดยมีค่าหน่วยแรงเฉือนเกินกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (C_u) ประมาณ 11 % แสดงว่ามีความคลาดเคลื่อน ในขั้นตอนการตรวจสอบค่าหน่วยแรงกับผิววิบัติ ในการคำนวณแบบทวนซ้ำ (iteration) ในขณะที่เมื่อพิจารณากราฟ p-q (p-q diagram) ที่จุดปลายเสาเข็มตามแนวแกนกลาง ดังรูปที่ ๓.3 จะพบว่า stress path ไม่เกินค่าหน่วยแรงเฉือนเกินกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน แต่มีการวกกลับของกราฟ ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

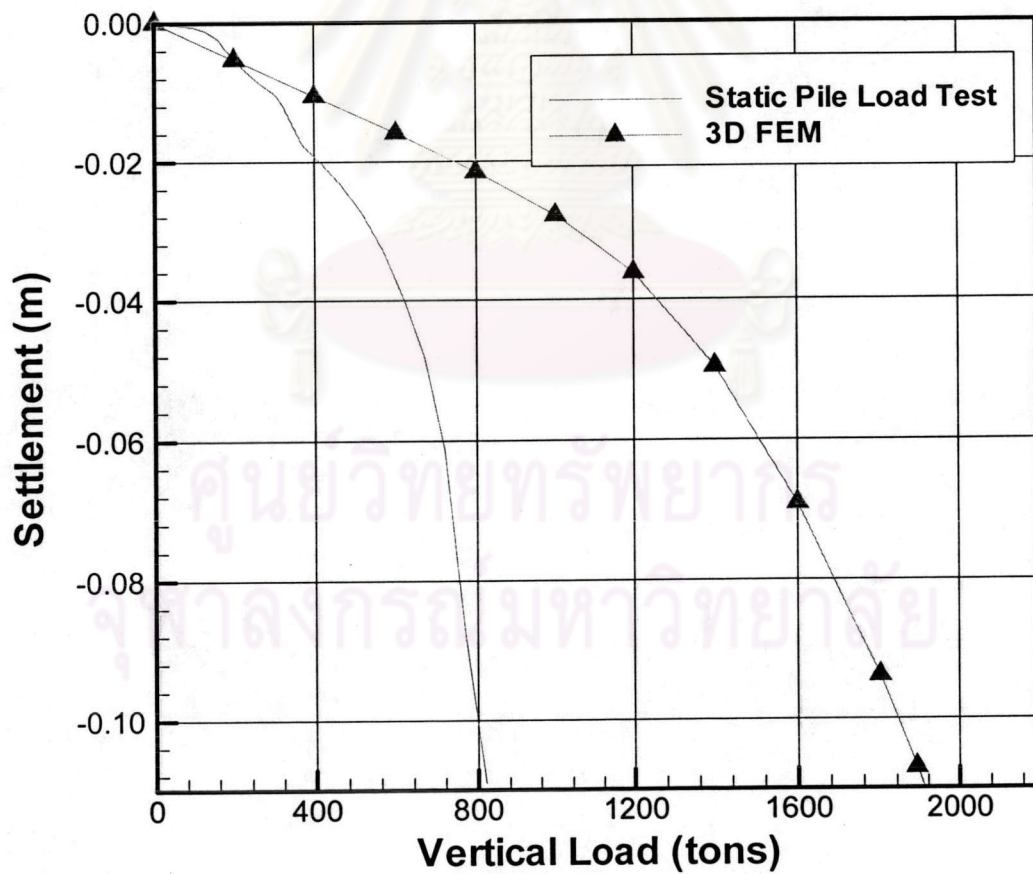
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) โครงข่ายเริ่มต้น (ด้านข้าง)

(ข) โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว (ด้านข้าง)

รูปที่ 5.17 โครงข่ายเริ่มต้น และ ภายหลังการเคลื่อนตัว ของการวิเคราะห์เสาค้ำเดี่ยวกรณี
เปรียบเทียบกับผลผลทดสอบเสาค้ำในสนาม



รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการทรุดตัว ในกรณีการวิเคราะห์
เปรียบเทียบกับผลผลทดสอบเสาค้ำในสนาม

5.2 การวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม (Pile Group Analysis)

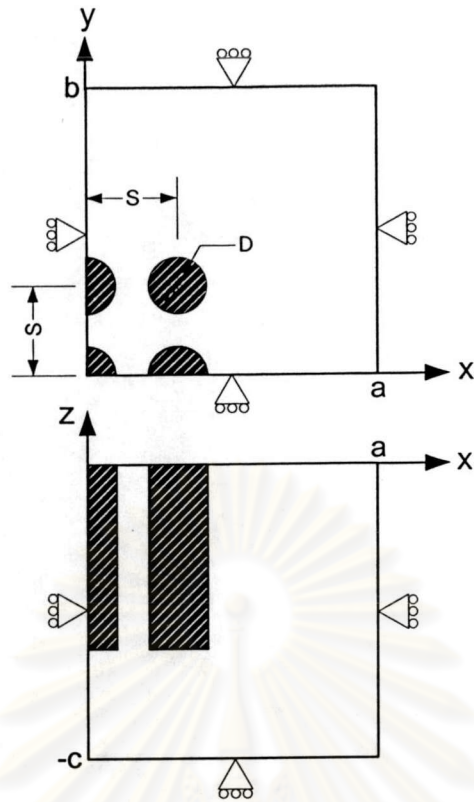
ในส่วนนี้ แสดงรายละเอียดวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มกลุ่มในงานวิจัย แสดงรูปแบบ และการกระจายขนาดของโครงข่าย สภาวะขอบเขต (Boundary condition) ชนิดของแรงกระทำ ชนิดของชั้นส่วน แบบจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างที่ใช้ และแสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่มในกรณีศึกษาต่าง ๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลเฉลยที่มีอยู่

5.2.1 โครงข่าย (mesh)

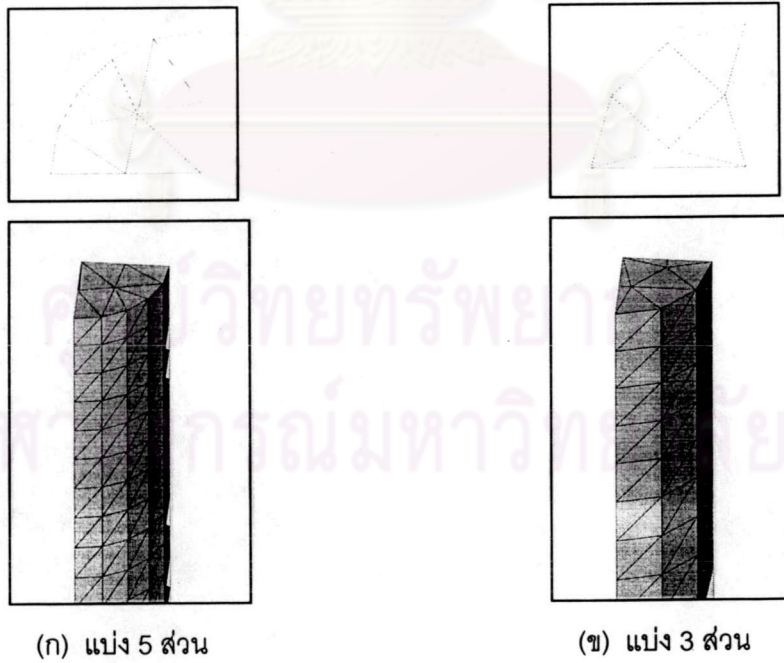
เช่นเดียวกับกรณีของเสาเข็มต้นเดี่ยว การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มสามารถใช้คุณสมบัติสมมาตรในการลดขนาดของปัญหาจากการวิเคราะห์โครงสร้างเต็ม เป็นการวิเคราะห์เพียง 1 ใน 4 ของโครงสร้างทั้งหมด โดยมีรูปแบบของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.19 การเลือกขนาดขอบเขตของโครงสร้าง จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหา เช่น ขนาด และความยาวเสาเข็ม ระยะห่างระหว่างต้นของเสาเข็ม (spacing) จำนวน และการจัดเรียงของเสาเข็มในกลุ่ม เป็นต้น ซึ่งจะแสดงรายละเอียดไว้ในตัวอย่างกรณีศึกษาแต่ละกรณีในส่วนถัดไป

ในงานวิจัยนี้ แสดงตัวอย่างวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มกลุ่มหน้าตัดกลม การสร้างโครงข่ายใช้ชั้นส่วนชนิดเตตระฮีดรอน 4 จุดต่อ ซึ่งสร้างโดยโปรแกรม GMSH ซึ่งมีความสามารถในส่วนของ Graphic User Interface ทำให้สามารถสร้างโครงข่ายของโครงสร้างที่มีความซับซ้อนสูง ๆ ได้ ในขณะที่การใช้โปรแกรม GEOMPACK ต้องใช้เวลา และความละเอียดที่สูงในการสร้างสูงกว่ามาก ดังแสดงในหัวข้อ 3.2.2

การกำหนดการกระจายขนาดของชั้นส่วนในโครงข่าย เช่นเดียวกับกรณีเสาเข็มต้นเดี่ยว คือกำหนดให้โครงข่ายมีความละเอียดสูงในบริเวณใกล้กับที่หัว และที่ปลายของกลุ่มเสาเข็ม โดยเพิ่มขนาดชั้นบริเวณตอนกลางของเสาเข็ม และขนาดโดยรวมขยายขึ้นอย่างสม่ำเสมอเป็นสัดส่วนกับระยะที่ห่างออกจากบริเวณกลุ่มเสาเข็ม การกำหนดขนาดทำได้โดยการระบุค่า 'Characteristic Length' ที่จุดมุมของขอบเขตต่าง ๆ อย่างเหมาะสม



รูปที่ 5.19 รูปแบบโครงสร้าง และสภาวะขอบเขตที่กำหนดในการวิเคราะห์ปัญหาเส้าเข็มกลุ่ม แสดงตัวอย่างกรณีเส้าเข็ม 9 ต้น



รูปที่ 5.20 การแบ่งส่วนตามโครงสร้างผิวเส้าเข็มหน้าตัดกลม ในการวิเคราะห์ปัญหาเส้าเข็มกลุ่ม

ความละเอียดของโครงข่ายในโครงสร้างเสาเข็มมีผลอย่างมากต่อจำนวนจุดต่อ และชิ้นส่วนทั้งหมด และส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยเฉพาะในกรณีของเสาเข็มกลุ่ม เพื่อลดปริมาณข้อมูลทั้งหมด ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่มในงานวิจัยนี้ จึงลดจำนวนของการแบ่งส่วนตามผิวโค้งของเสาเข็มกลมจาก 5 ส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว เป็น 3 ส่วน ดังแสดงตัวอย่าง $\frac{1}{4}$ ของหน้าตัดเสาเข็มในรูปที่ 5.20 ซึ่งจากการผลการวิเคราะห์ของหน้าตัดทั้งสองในกรณีศึกษาของเสาเข็มต้นเดียว พบว่าความแตกต่างไม่มากนัก และสามารถยอมรับได้

5.2.2 ชนิดของชิ้นส่วน (Element types)

ในงานวิจัยนี้ ใช้ทั้งชิ้นส่วนแบบเตตระฮีดรอน 4 จุดต่อ ในการสร้างโครงข่ายเพื่อการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มกลุ่ม ซึ่งเหมาะสมในการสร้างโครงข่ายสำหรับโครงสร้างเสาเข็มกลม และเป็นโครงข่ายที่สามารถสร้างได้ด้วยโปรแกรม GMSH ที่ใช้ในงานวิจัย

5.2.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

กำหนดให้การเคลื่อนตัวของจุดต่อที่อยู่บนขอบเขตบางส่วน ถูกจำกัดในทิศทางที่กำหนด โดยพยายามให้จำลองพฤติกรรมของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ให้มากที่สุด โดยกำหนดในรูปแบบเดียวกันกับการวิเคราะห์เสาเข็มต้นเดียว ดังรูปที่ 5.19 สรุปได้ดังนี้

(1) ระนาบ $x = 0$ และ $x = a$: จำกัดการเคลื่อนตัวในแนวแกน x

(2) ระนาบ $y = 0$ และ $y = b$: จำกัดการเคลื่อนตัวในแนวแกน y

(3) ระนาบ $z = -c$: จำกัดการเคลื่อนตัวในแนวแกน z

5.2.4 แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ

พฤติกรรมของวัสดุ ในโครงสร้างเสาเข็ม-ดิน ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มกลุ่มในงานวิจัยนี้ กำหนดขอบเขตในการวิเคราะห์เฉพาะพฤติกรรมแบบอิลาสติกเชิงเส้น (Linear Elastic) โดยวัสดุมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic) และ พฤติกรรมบริเวณรอยต่อระหว่างเสาเข็ม และดิน

กำหนดให้เป็นแบบยึดเหนี่ยวสมบูรณ์ (perfectly bonded) คือ ไม่เกิดการเลื่อน หรือแยกตัวจากกันของจุดต่อ

5.2.5 แรงกระทำภายนอก (External Loading)

ในงานวิจัยนี้ แรงกระทำภายนอกเป็นแรงในแนวตั้งกระทำที่หัวเสาเข็ม โดยกำหนดเป็นแรงกระทำสม่ำเสมอ (uniform load) กระทำเท่ากันสำหรับทุก ๆ ต้นของเสาเข็มซึ่งกำหนดตามสมมุติฐานที่ใช้ในการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างต้นของเสาเข็มกลุ่ม (Pile Group interaction) ซึ่งเสนอโดย Poulos และ Davis (1980)

5.2.6 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ใช้ในงานวิจัย

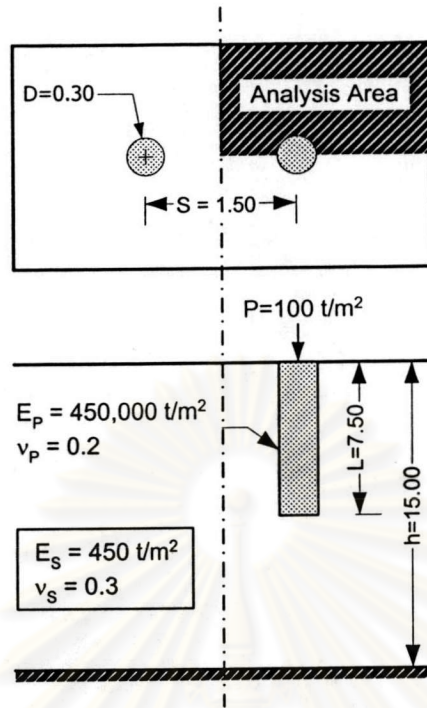
หัวข้อต่อไปนี้ แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มกลุ่มในงานวิจัย โดยเสาเข็มกลุ่มมีจำนวน การจัดเรียงของเสาเข็ม และรูปแบบโครงสร้างดินต่าง ๆ แสดงโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ในแต่ละปัญหา และ แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลเฉลยจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีอีลาสติก (Elastic Solution) ซึ่งเสนอโดย Poulos และ Davis (1980) ซึ่งรายละเอียดการคำนวณ แสดงไว้ในภาคผนวก ก

5.2.6.1 การวิเคราะห์เสาเข็ม 2 ต้น

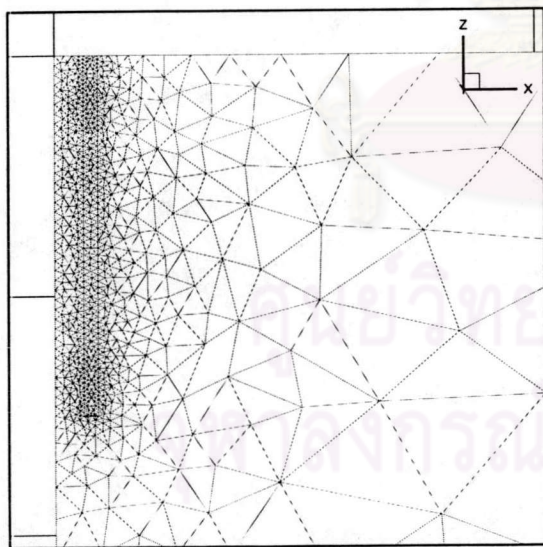
(1) กรณีเสาเข็มแบบลอย (floating pile)

รูปที่ 5.21 แสดงตัวอย่างปัญหา และโครงสร้างที่เลือกใช้ในการปัญหาเสาเข็มกลุ่มแบบลอย สำหรับโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 5.22

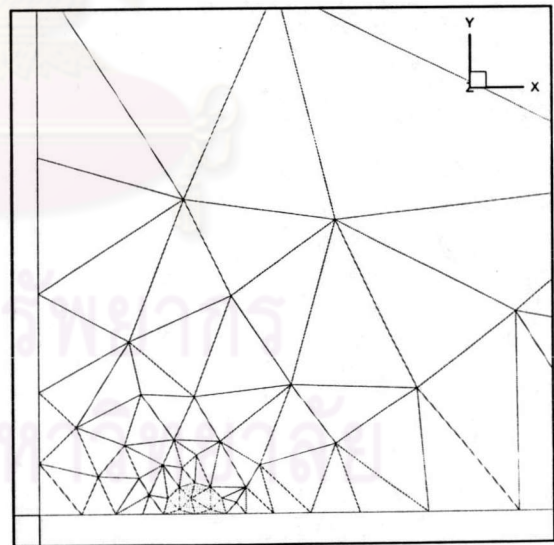
ผลการวิเคราะห์ แสดงโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัวในมุมมองด้านข้างดังรูปที่ 5.23 โดยค่าการทรุดตัวหัวเสาเข็มที่ได้จากผลของโปรแกรม คือ 4.46 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับผลเฉลยของวิธีอีลาสติก คือ 4.53 มิลลิเมตร ค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 1.6 %



รูปที่ 5.21 ปัญหา และ โครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น ชนิด เสาเข็มลอย(floating pile)

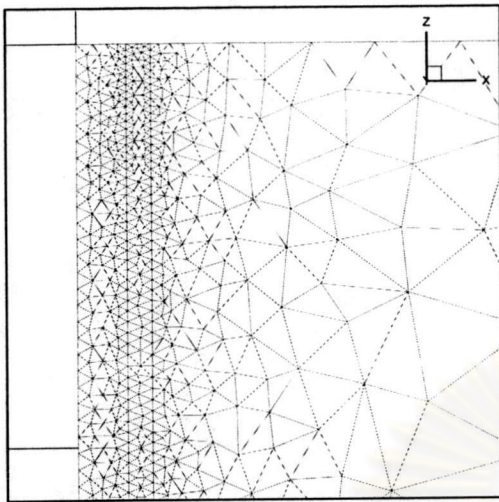


(ก) มุมมองด้านข้าง

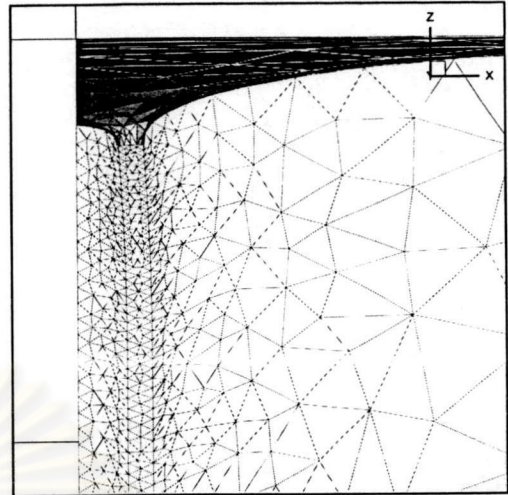


(ข) มุมมองด้านบน

รูปที่ 5.22 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น ชนิดเสาเสาเข็มลอย (โครงข่าย 2,189 จุดต่อ และ 10,411 ชิ้นส่วน)

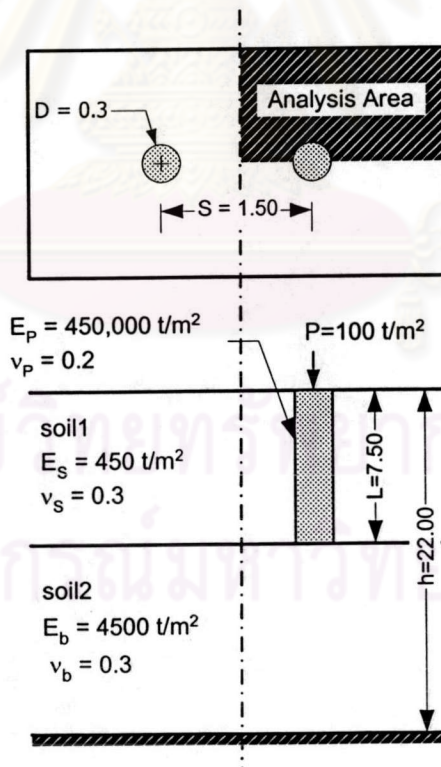


(ก) โครงข่ายเริ่มต้น



(ข) โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว

รูปที่ 5.23 โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น ชนิดเสาเข็มลอย เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น



รูปที่ 5.24 ปัญหา และโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น ในกรณี
ที่ปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งแรงกว่า

(2) กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า (Pile bearing on stiffer stratum)

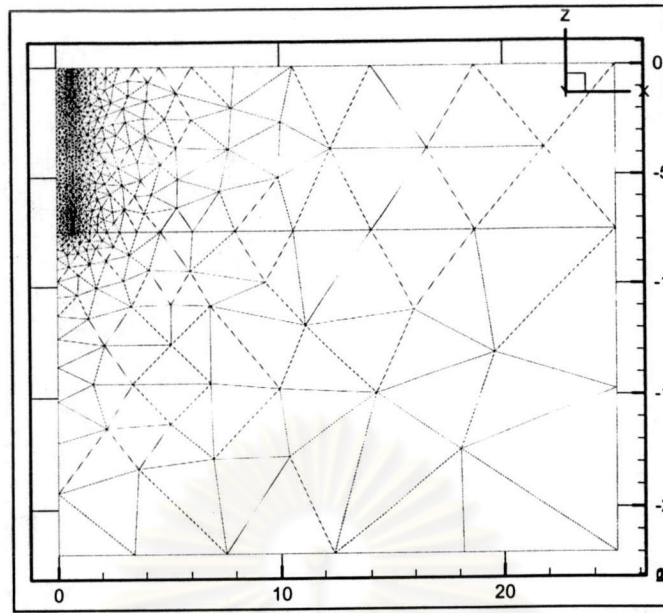
รูปที่ 5.24 แสดงตัวอย่างปัญหา และโครงสร้างที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา เสาเข็มกลุ่มกรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า โดยในตัวอย่างนี้ กำหนดให้ค่า E_p/E_s เป็น 10 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 5.25

ผลการวิเคราะห์ แสดงโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัวในมุมมองด้านข้างดังรูปที่ 5.26 โดยค่าการทรุดตัวหัวเสาเข็มที่ได้จากผลของโปรแกรม คือ 2.62 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับผลเฉลยของวิธีอิลาสติก คือ 2.62 มิลลิเมตร พบว่าในกรณีนี้ไม่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

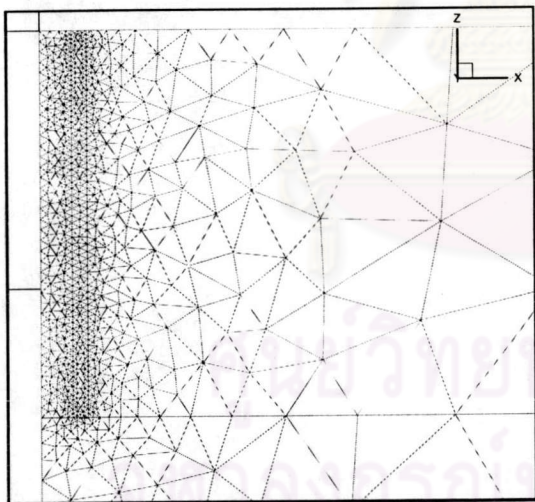
(3) กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนฐานแข็ง (Pile bearing on rigid base)

รูปที่ 5.27 แสดงตัวอย่างปัญหา และโครงสร้างที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา เสาเข็มกลุ่มกรณีปลายเสาเข็มอยู่บนฐานแข็ง (rigid base)

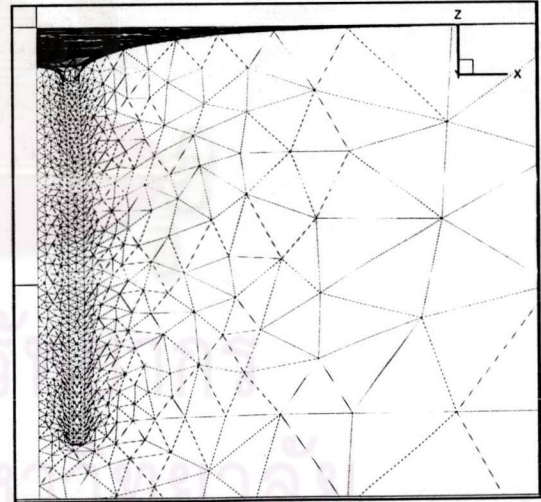
ผลการวิเคราะห์ แสดงโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัวในมุมมองด้านข้างดังรูปที่ 5.28 โดยค่าการทรุดตัวหัวเสาเข็มที่ได้จากผลของโปรแกรม คือ 1.44 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับผลเฉลยของวิธีอิลาสติก คือ 1.45 มิลลิเมตร ค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 0.7 %



รูปที่ 5.25 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า (โครงข่าย 2,495 จุดต่อ และ 12,254 ชิ้นส่วน)

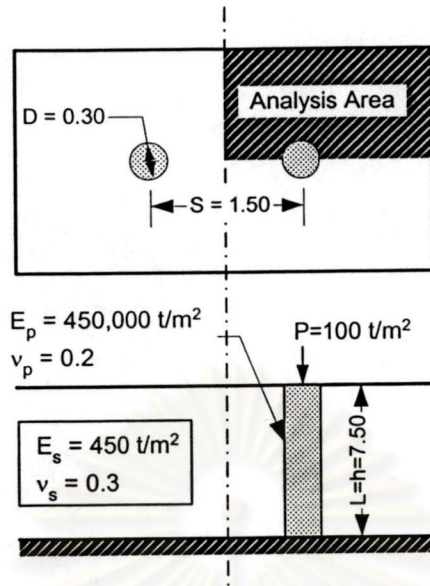


(ก) โครงข่ายเริ่มต้น

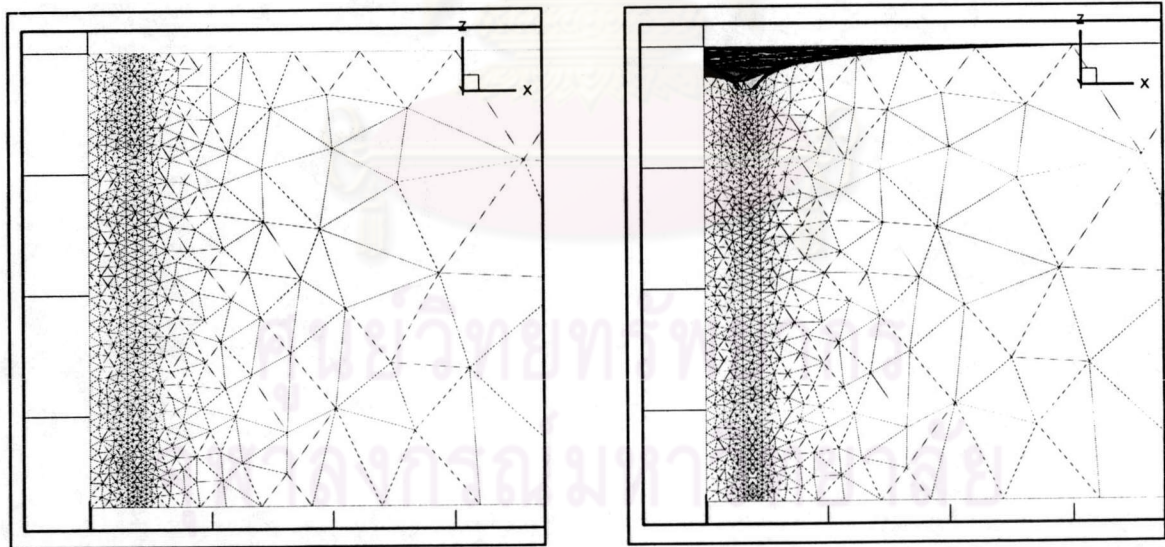


(ข) โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว

รูปที่ 5.26 โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น



รูปที่ 5.27 ปัญหา และโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น ในกรณี
ที่ปลายเสาเข็มอยู่บนฐานแข็ง



(ก) โครงข่ายเริ่มต้น

(ข) โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว

รูปที่ 5.28 โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 2 ต้น กรณีที่
ปลายเสาเข็มอยู่บนฐานแข็ง เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น (โครงข่าย
2,041 จุดต่อ และ 9,802 ชิ้นส่วน)

5.2.6.2 การวิเคราะห์เสาเข็ม 4 ต้น

ตัวอย่างการวิเคราะห์เสาเข็ม 4 ต้นในงานวิจัยนี้ ใช้เสาเข็มแบบลอย (Floating pile) จัดเรียงเสาเข็มแบบ 2x2 โดยมีระยะห่างระหว่างต้นของเสาเข็ม (pile spacing) เท่า ๆ กัน รูปที่ 5.29 แสดงตัวอย่างปัญหา และโครงสร้างที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ และรูปที่ 5.30 แสดงโครงข่ายที่ใช้

ผลการวิเคราะห์ แสดงโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัวในมุมมองด้านข้างดังรูปที่ 5.31 โดยค่าการทรุดตัวหัวเสาเข็มที่ได้คือ 7.28 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับผลเฉลยของวิธีอิลาสติก คือ 7.67 มิลลิเมตร ค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 5.1 %

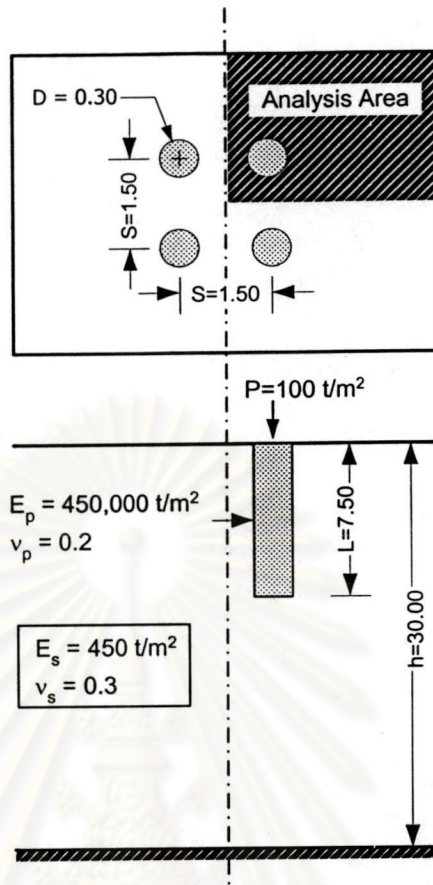
5.2.6.3 การวิเคราะห์เสาเข็ม 9 ต้น

การวิเคราะห์เสาเข็ม 9 ต้น เลือกใช้เสาเข็มตัวอย่างในกรณีเสาเข็มลอย (Floating Pile) เมื่อกำหนดระดับความลึกของฐานแข็งอยู่เป็น 2 เท่าของความยาวเสาเข็ม การจัดเรียงเสาเข็มเป็นแบบ 3x3 โดยมีระยะห่างระหว่างต้นของเสาเข็ม (pile spacing) เท่า ๆ กัน รูปที่ 5.32 แสดงตัวอย่างปัญหา และโครงสร้างที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ สำหรับโครงข่ายที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.33

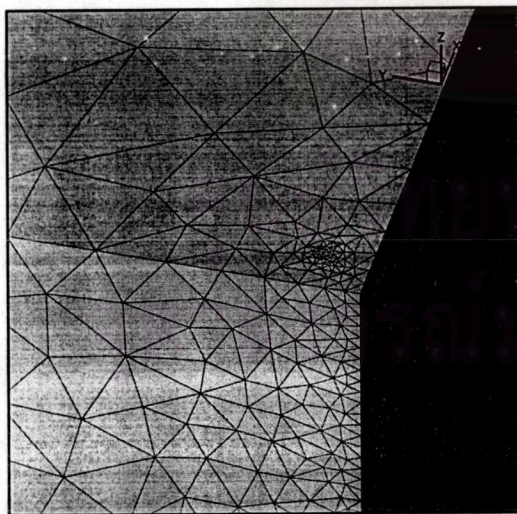
ผลการวิเคราะห์ แสดงโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัวในมุมมองด้านข้างดังรูปที่ 5.34 โดยค่าการทรุดตัวหัวเสาเข็ม เลือกใช้ค่าเฉลี่ยของการทรุดตัวของเสาเข็มต้นที่อยู่บนกึ่งกลางด้านรอบนอกของกลุ่มเสาเข็ม ซึ่งสามารถใช้เป็นเข็มตัวแทน (representative pile) ในการประมาณค่าการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่ม (Poulos และ Davis ,1980) จะได้ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มจากผลของโปรแกรม คือ 13.6 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับผลเฉลยของวิธีอิลาสติก คือ 14.1 มิลลิเมตร ค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 3.9 %

5.2.7 สรุปผลการศึกษา

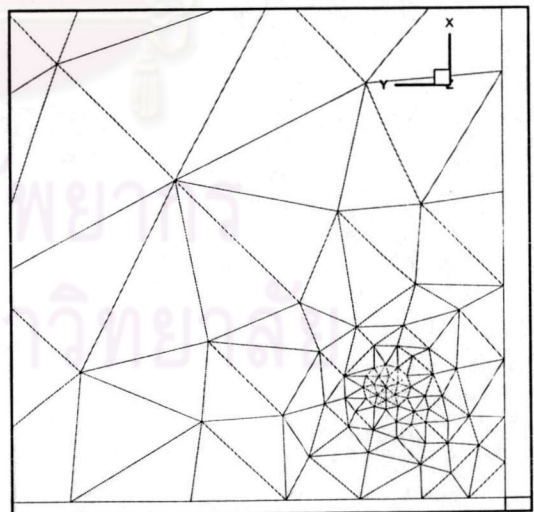
ผลการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มกลุ่มที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัย สรุปได้ดังตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มในกรณีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติก จากผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น และผลเฉลยจากวิธีอิลาสติกมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 % สรุปว่าการทำนายค่าการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มในสถานะใช้งาน ด้วยระบบการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอ



รูปที่ 5.29 ปัญหา และโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 4 ต้น ในกรณีเสาเข็มแบบลอย

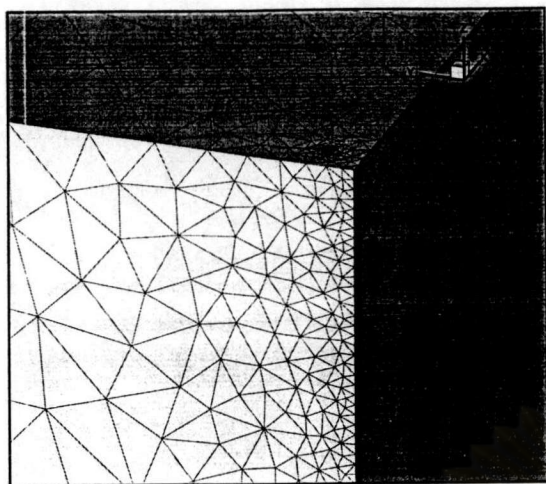


(ก) มุมมอง 3 มิติ

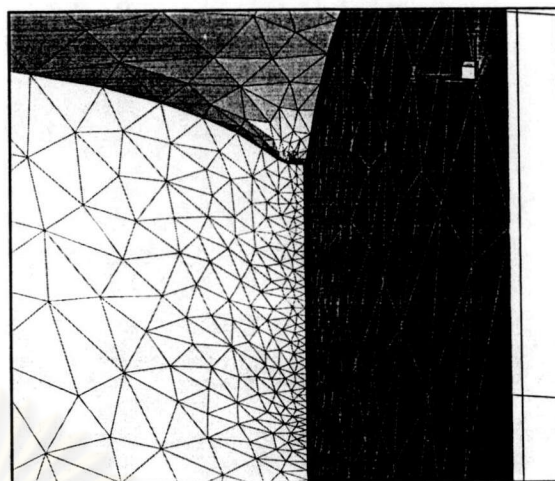


(ข) มุมมองด้านบน

รูปที่ 5.30 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 4 ต้นในกรณีเสาเข็มแบบลอย (โครงข่าย 3,615 จุดต่อ และ 19,904 ชิ้นส่วน)

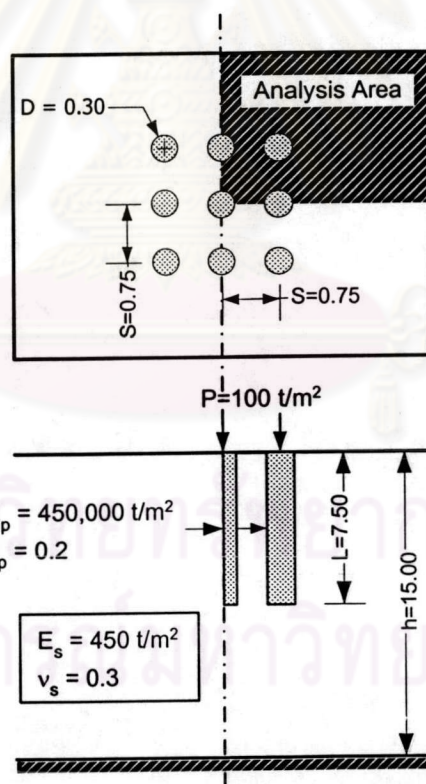


(ก) โครงข่ายเริ่มต้น

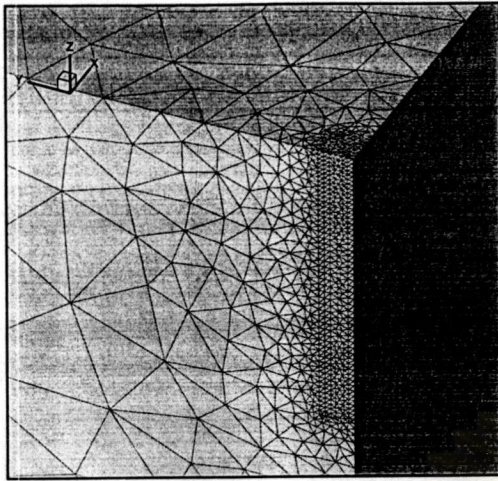


(ข) โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว

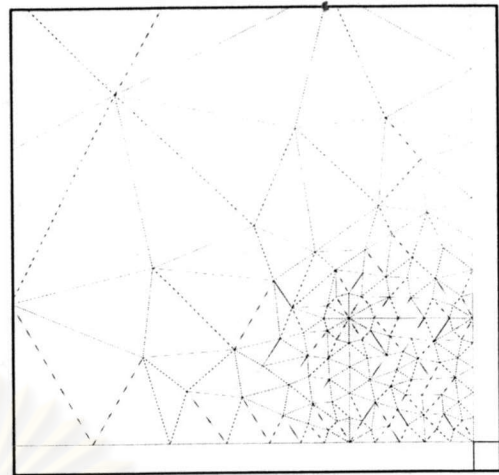
รูปที่ 5.31 โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 4 ต้น ในกรณีเสาเข็มแบบลอย เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น



รูปที่ 5.32 ปัญหา และโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 9 ต้น ในกรณีเสาเข็มแบบลอย

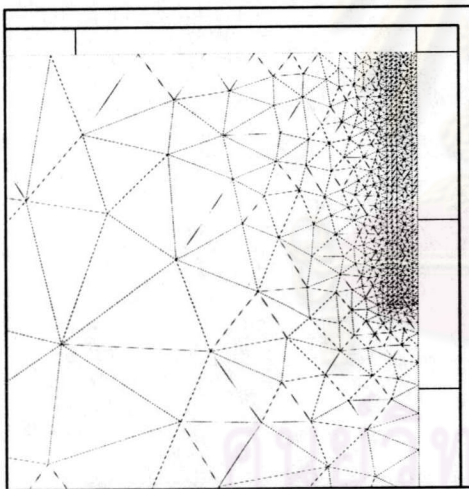


(ก) มุมมอง 3 มิติ

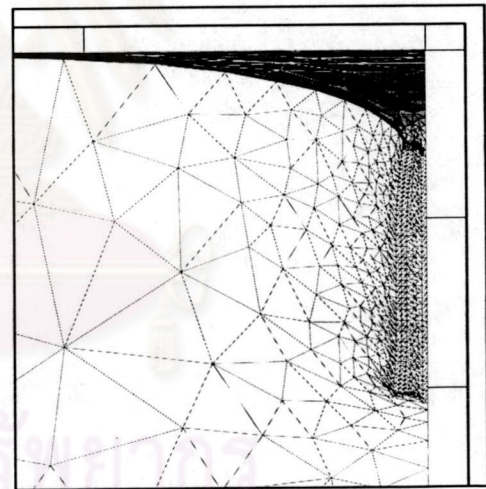


(ข) มุมมองด้านบน

รูปที่ 5.33 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 9 ต้น ในกรณีเสาเข็มแบบลอย (โครงข่าย 5,450 จุดต่อ และ 30,047 ชิ้นส่วน)



(ก) โครงข่ายเริ่มต้น



(ข) โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว

รูปที่ 5.34 โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 9 ต้น ในกรณีเสาเข็มแบบลอย เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกรณีศึกษาเริ่มกลุ่มในงานวิจัย

Pile head settlement (cm)					
		2 piles		4 piles	9 piles
Floating pile		bearing on rigid base	bearing on stiffer stratum		
Analytical Solution	0.453	0.145	0.262	0.767	1.412
วิทยานิพนธ์ (FEM)	0.446	0.144	0.262	0.728	1.357
error (%)	1.6	0.7	0.0	5.1	3.9