

## บทที่ 4

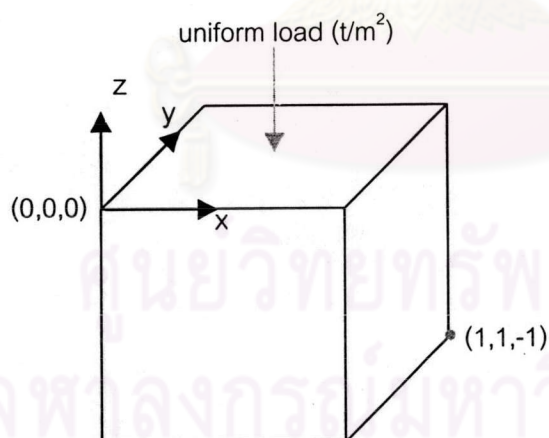
### การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ในการวิเคราะห์ปัญหา 3 มิติพื้นฐาน

ในส่วนนี้ แสดงรายละเอียดของการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัย โดยทำการวิเคราะห์ปัญหา 3 มิติพื้นฐาน และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ กับผลเฉลยที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของโปรแกรม สำหรับตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับเสาเข็มจะสรุปรวมไว้ในบทที่ 5 และบทที่ 6

#### 4.1 รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน

แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน (simple box) ซึ่งมีผลเฉลยชัดเจนทั้งในกรณีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก หรือ อิลาสโตพลาสติก ดังต่อไปนี้

##### ปัญหา



คุณสมบัติ :

$$E = 100 \text{ t/m}^2$$
$$\nu = 0.3$$
$$\phi = 30^\circ$$
$$c = 0$$
$$\gamma = 0$$

แบบจำลองพลาสติก : มอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb)

การจำกัดการเคลื่อนตัว :

(1) ที่ระนาบ  $x = 0$  , จำกัดการเคลื่อนตัวตามแนวแกน  $x$

(2) ที่ระนาบ  $y = 0$  , จำกัดการเคลื่อนตัวตามแนวแกน  $y$

(3) ที่ระนาบ  $z = -1$  , จำกัดการเคลื่อนตัวตามแนวแกน  $z$

โครงข่าย (mesh)

ทำการทดสอบทั้งโครงข่ายที่ใช้ชิ้นส่วนชนิดเตตระฮีดรอน และเฮกซะฮีดรอน ในความละเอียดต่าง ๆ กันดังรูปที่ 4.1

ผลการวิเคราะห์

(1) กรณีพฤติกรรมวัสดุเป็นอีลาสติก

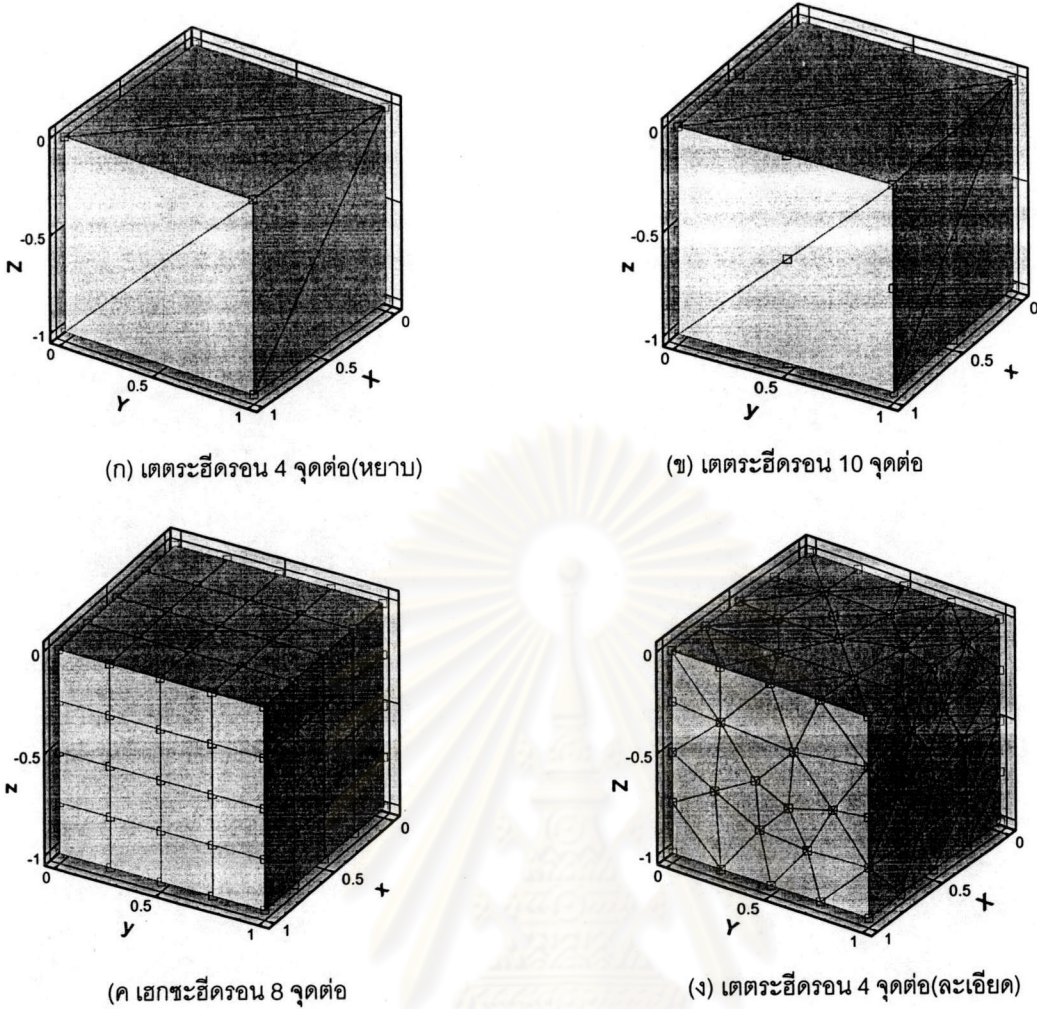
กำหนดแรงกระทำเป็น  $25 \text{ t/m}^2$  ได้ผลการวิเคราะห์เดียวกันสำหรับทุก ๆ โครงข่ายที่ใช้คือ หน่วยแรงที่จุดต่อเป็น  $25 \text{ t/m}^2$  เท่ากันทุกจุด และโครงสร้างยุบตัวลง 0.25 เมตร และขยายตัวทางข้าง 0.075 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎีอีลาสติก ดังแสดงตัวอย่างการคำนวณหาการเคลื่อนตัวที่จุด (1,1,0) ดังนี้

$$\epsilon_v = \sigma/E = 25/100 = 0.25$$

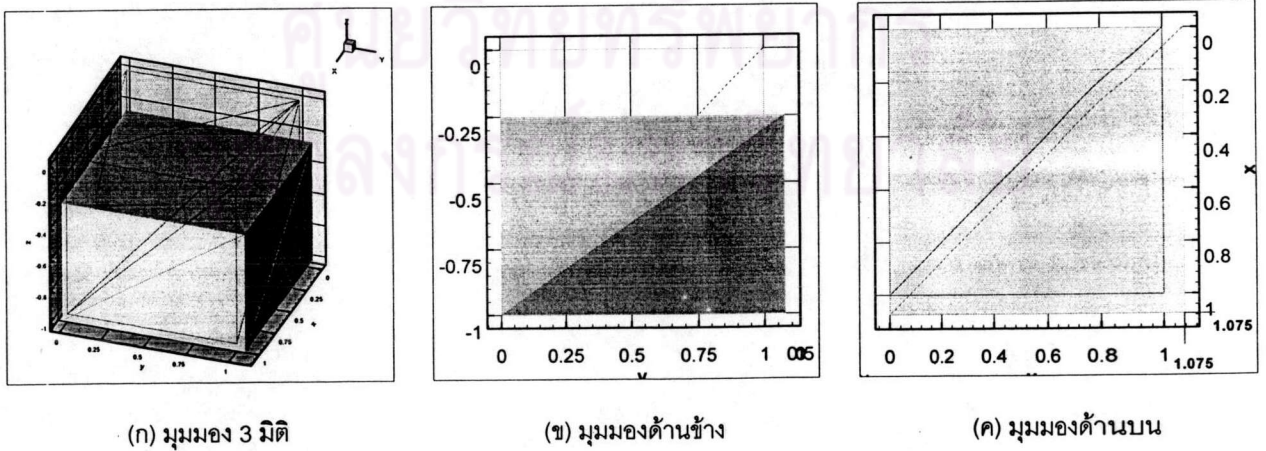
$$\epsilon_H = \epsilon_v \nu = 0.25(0.3) = 0.075$$

$$\text{การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง} = \epsilon_v L = 0.25(1) = 0.25 \text{ เมตร}$$

$$\text{การเคลื่อนตัวในแนวราบ} = \epsilon_H L = 0.075(1) = 0.075 \text{ เมตร}$$



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างโครงข่ายที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน



รูปที่ 4.2 การเคลื่อนตัวของโครงข่ายในตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาการทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน

## (2) กรณีพฤติกรรมวัสดุเป็นอีลาสโตพลาสติก

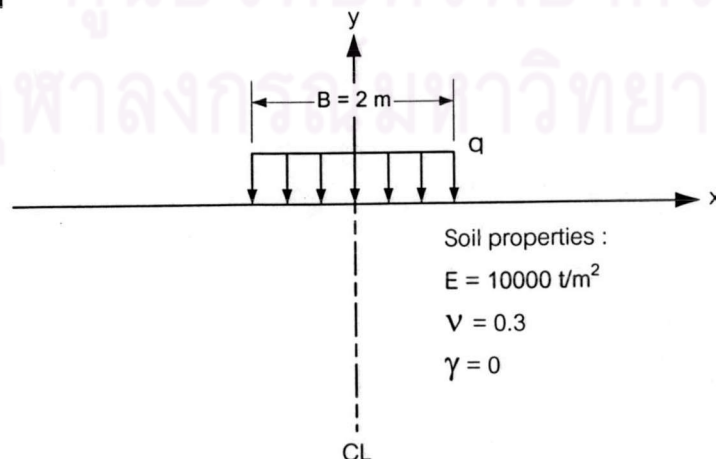
กำหนดให้เพิ่มแรงเป็นระดับควบคุมด้วยการเพิ่มการยุบตัวในแนวดิ่ง (Displacement control) ครั้งละ 0.05 เมตร ( $\Delta z = -0.05$  m) และกำหนดให้ที่สภาวะเริ่มต้นทุกจุดในโครงสร้างมีหน่วยแรงเท่ากันทุกทิศทาง หรือแรงดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure ;  $\sigma_H$ ) เป็น  $-20$  t/m<sup>2</sup>

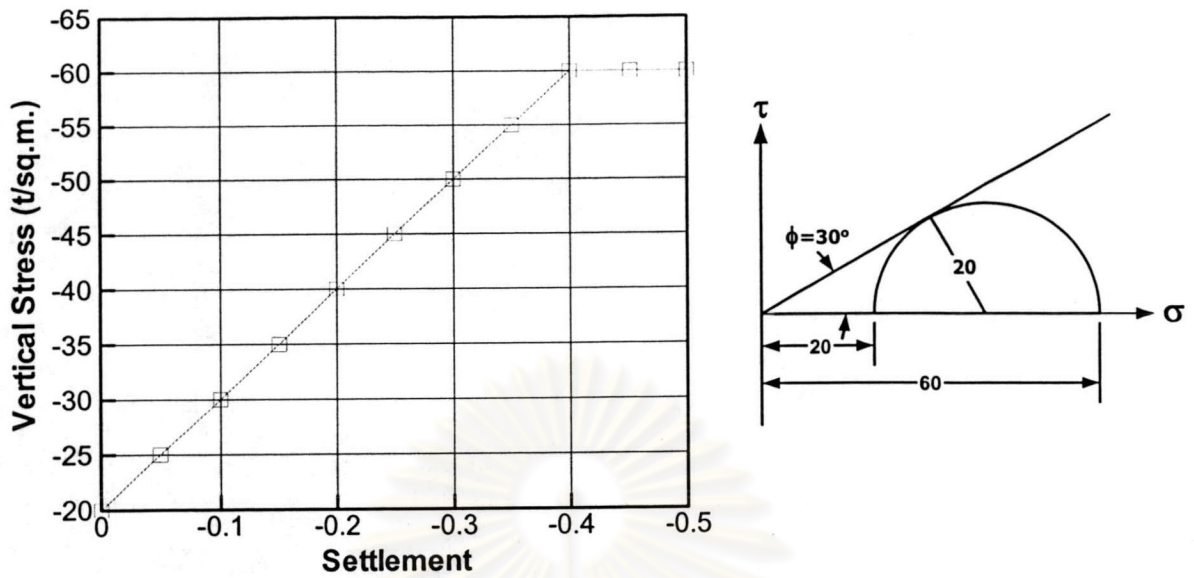
ผลการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าในช่วงแรก พฤติกรรมของวัสดุยังอยู่ในช่วงอีลาสติก การเพิ่มการยุบตัวครั้งละ 0.05 m จะเพิ่มหน่วยแรง  $5$  t/m<sup>2</sup> เป็นไปตามสมการพื้นฐาน  $\Delta\sigma = \frac{\Delta L}{L} E$  เมื่อหน่วยแรงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหน่วยแรงสูงสุดตามกฎการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ คือ  $60$  t/m<sup>2</sup> (ดังแสดงวงกลมมอร์ในรูปที่ 4.3) การเคลื่อนตัวก็จะเพิ่มขึ้นในขณะที่หน่วยแรงคงที่ เป็นไปตามพฤติกรรมของวัสดุแบบอีลาสติก-พลาสติกสมบูรณ์ (Elastic-perfectly plastic)

## 4.2 ฐานรากแผ่แบบสตริป (Strip footing)

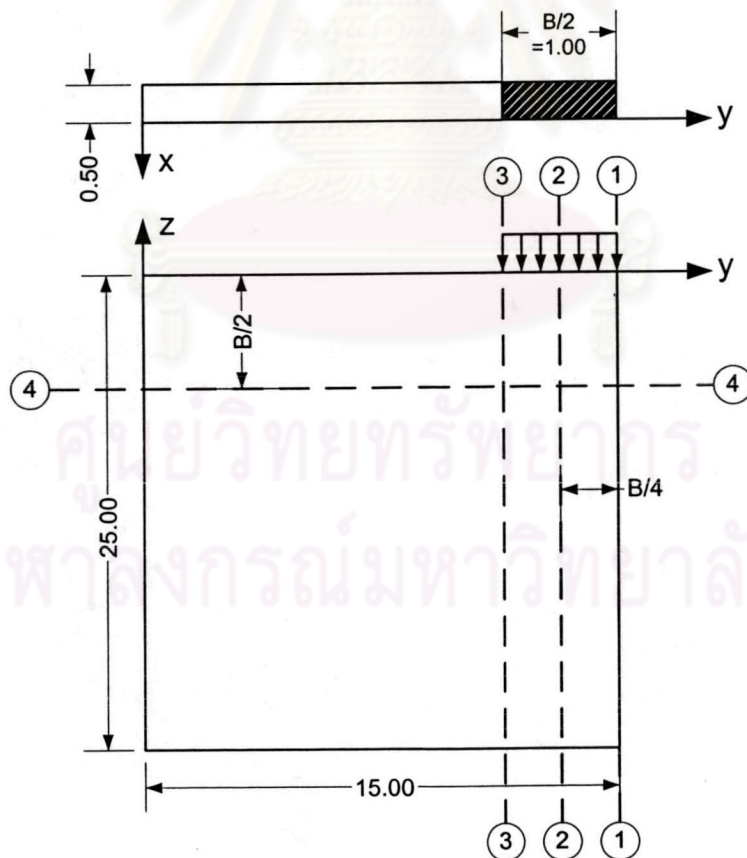
ทดสอบใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในการวิเคราะห์ปัญหาฐานรากแผ่แบบสตริป ซึ่งเป็นฐานรากแผ่ที่มีความยาวด้านยาว ยาวกว่าความยาวด้านสั้นมาก ๆ ทำให้ความเครียดในทิศทางตามด้านยาวของฐานรากมีค่าเป็นศูนย์ (plane strain) ปัญหาจึงสามารถวิเคราะห์เป็นปัญหา 2 มิติ แต่ในงานวิจัยนี้ ทดลองวิเคราะห์ปัญหานี้ใน 3 มิติ และตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ กับผลเฉลยด้วยวิธีอีลาสติก (Elastic Solution) ซึ่งเสนอโดย Poulos และ Davis (1974) โดยสมมุติฐานเบื้องต้น คือ ฐานรากเป็นแบบอ่อนตัว (flexible footing) เพื่อให้แรงกระทำเป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform load) และดินมีคุณสมบัติแบบอีลาสติกเชิงเส้น (linear elastic) และฐานแข็ง (rigid base) อยู่ในระดับลึกมาก ๆ

ปัญหา

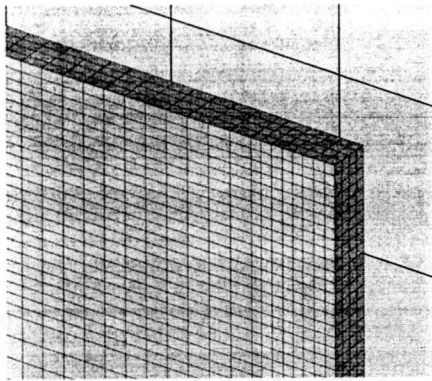




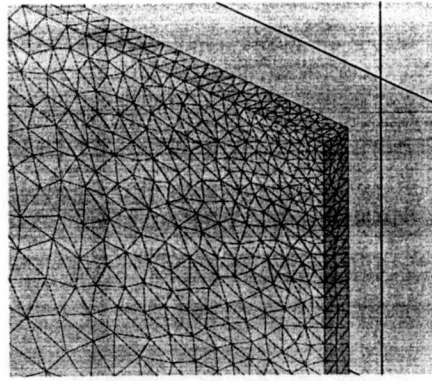
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน ในกรณีพฤติกรรมวัสดุเป็นอิลาสโตพลาสติก



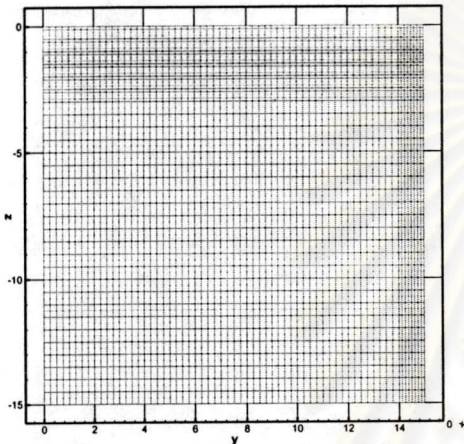
รูปที่ 4.4 ขนาดโครงสร้าง และหน้าตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่แบบสตริป



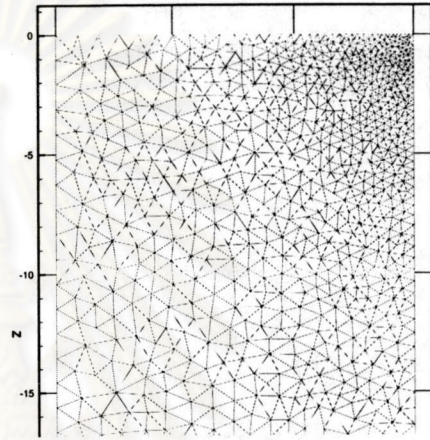
(ก) ชั้นส่วนเฮกซะฮีดรอน(มุมมอง 3 มิติ)



(ข) ชั้นส่วนเตตระฮีดรอน(มุมมอง 3 มิติ)

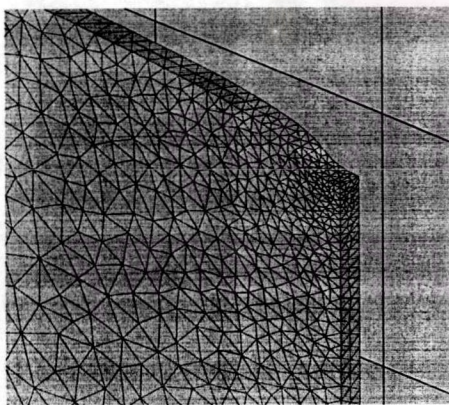


(ค) ชั้นส่วนเฮกซะฮีดรอน(มุมมองด้านข้าง)

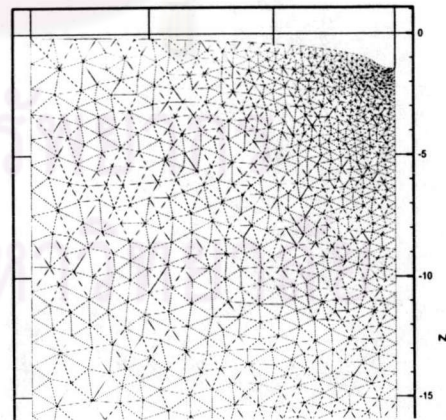


(ง) ชั้นส่วนเตตระฮีดรอน(มุมมองด้านข้าง)

รูปที่ 4.5 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่แบบสตริป



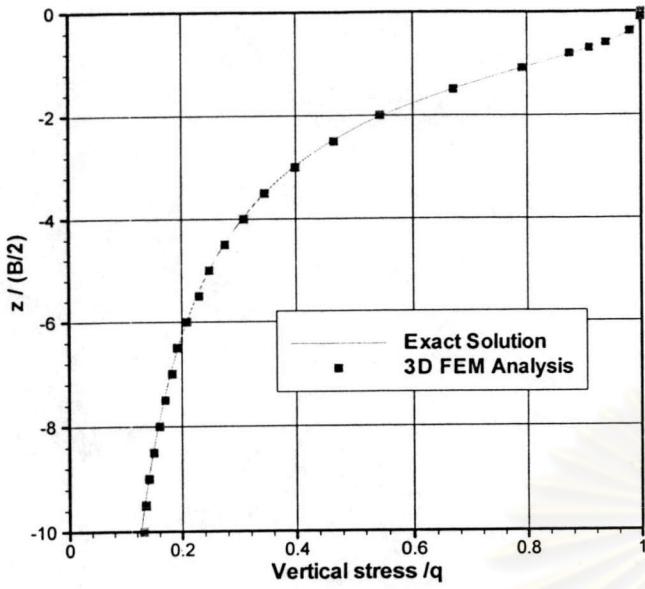
(ก) มุมมอง 3 มิติ



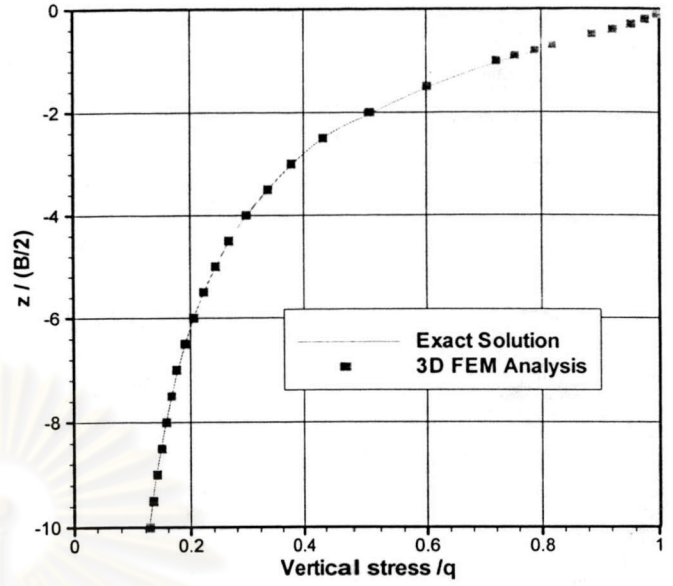
(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 4.6 โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัวในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่แบบสตริป

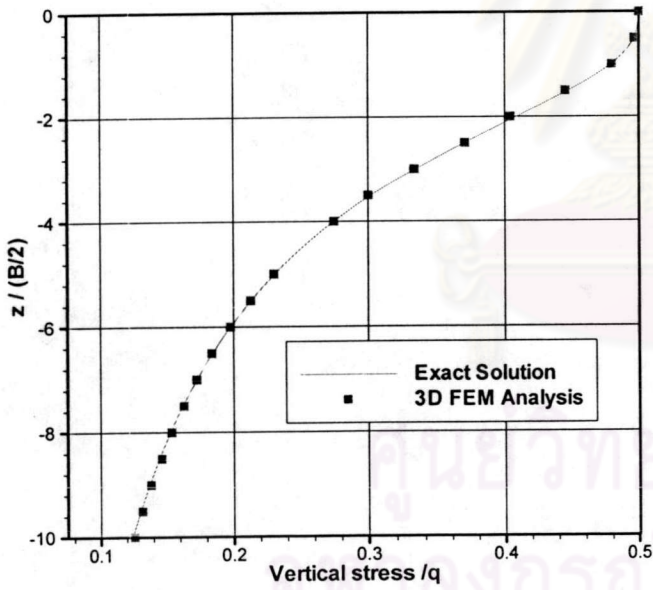
(โครงข่าย 2,520 จุดต่อ และ 9,259 ชั้นส่วน)



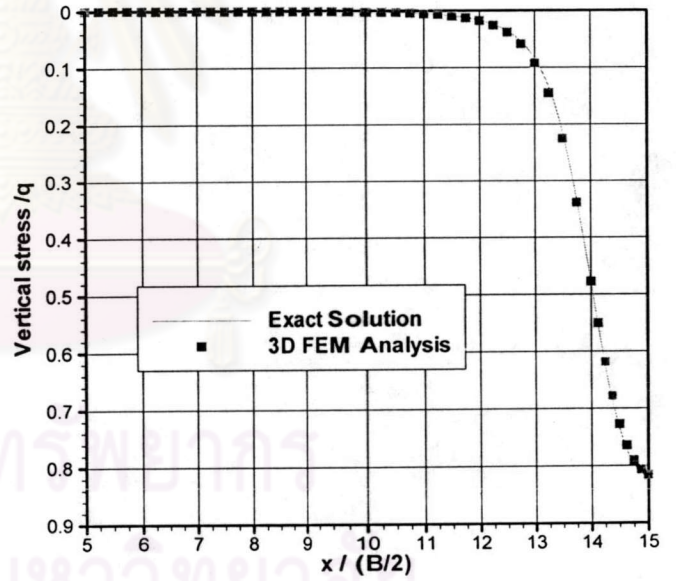
(n) หน้าตัด 1-1



(ข) หน้าตัด 2-2



(ค) หน้าตัด 3-3



(ง) หน้าตัด 4-4

รูปที่ 4.7 หน่วยแรงในแนวตั้งที่หน้าตัดต่าง ๆ (จากรูปที่ 4.4) ของตัวอย่างฐานรากแผ่แบบสตริป  
เปรียบเทียบ ระหว่างผลจากโปรแกรมที่พัฒนา (3D FEM) และผลเฉลยจากวิธีอิลาสติก  
(Exact Solution)

## โครงข่าย

เนื่องจากโครงสร้างมีคุณสมบัติการมีสมมาตร การวิเคราะห์จะใช้เพียงครึ่งหนึ่งของโครงสร้าง เพื่อลดขนาดของข้อมูล และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ นอกจากนี้เนื่องจากความเครียดตามแนวแกน  $x$  เป็นศูนย์ จึงสามารถลดขนาดความหนาโครงสร้างในแนวแกน  $x$  ได้ ซึ่งในตัวอย่างนี้ ใช้เพียง 0.50 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงขนาดโครงสร้างที่เลือกใช้ในการสร้างโครงข่าย และ หน้าตัด (section) ที่ใช้เปรียบเทียบผลกับวิธีอิลาสติก โดยโครงข่ายที่ใช้ ทดลองใช้ชิ้นส่วนทั้งชนิดเตตระฮีดรอน และเฮกซะฮีดรอน ดังรูปที่ 4.5

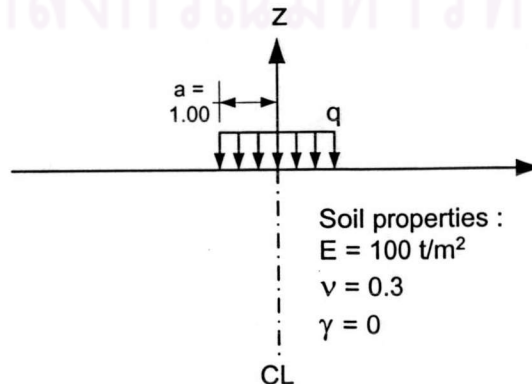
## ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้ชิ้นส่วนต่างชนิดกัน ได้ผลใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.6 แสดงโครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว (Deformed mesh) ในกรณีใช้ชิ้นส่วนแบบเตตระฮีดรอน สำหรับหน่วยแรงในแนวตั้งที่หน้าตัดต่างๆ(ดังรูปที่ 4.4) ที่ได้จากการวิเคราะห์ของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับผลเฉลยจากวิธีอิลาสติก แสดงดังรูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบพบว่าได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

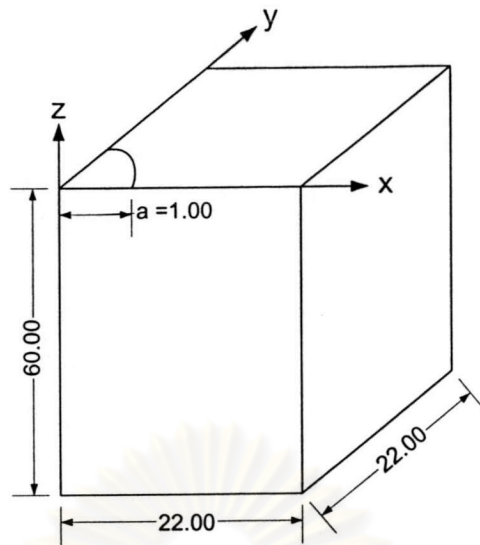
### 4.3 ฐานรากแผ่วงกลม(Circular footing)

ทดลองใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นวิเคราะห์ปัญหาฐานรากแผ่วงกลม เพื่อเปรียบเทียบหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับผลเฉลยด้วยวิธีอิลาสติก เสนอโดย Poulos และ Davis (1974) โดยสมมติฐานเบื้องต้น คือ ฐานรากเป็นแบบอ่อนตัว (flexible footing) เพื่อให้แรงกระทำเป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform load) ดินมีคุณสมบัติแบบอิลาสติกเชิงเส้น (linear elastic) และฐานแข็ง (rigid base) อยู่ในระดับลึกมาก ๆ

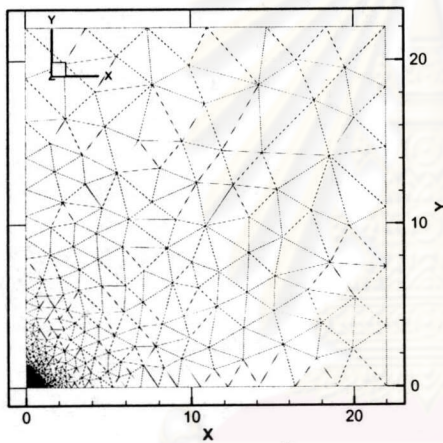
### ปัญหา



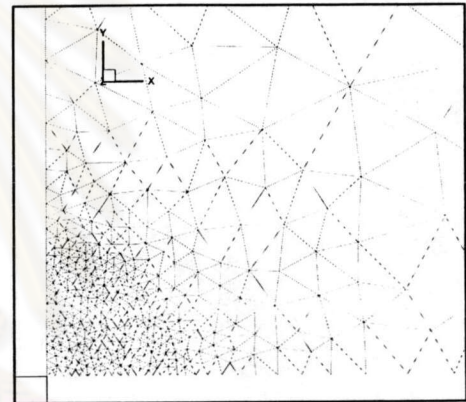




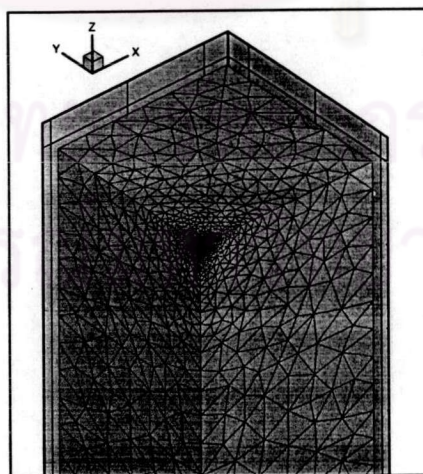
รูปที่ 4.8 ขนาดโครงสร้างที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีฐานรากแผ่วงกลม



(ก) มุมมองด้านบน(ทั้งหมด)



(ข) มุมมองด้านบน(ขยาย)



(ค) มุมมอง 3 มิติ

รูปที่ 4.9 โครงข่ายที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีฐานรากแผ่วงกลม (โครงข่าย 3,157 จุดต่อ และ 15,134 ชิ้นส่วน)

## โครงข่าย

จากคุณสมบัติการมีสมมาตรของปัญหา สามารถลดขนาดของปัญหาโดยวิเคราะห์เพียง  $\frac{1}{4}$  ของโครงสร้างทั้งหมด ขอบเขตของโครงสร้างที่เลือกใช้ในงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 4.8

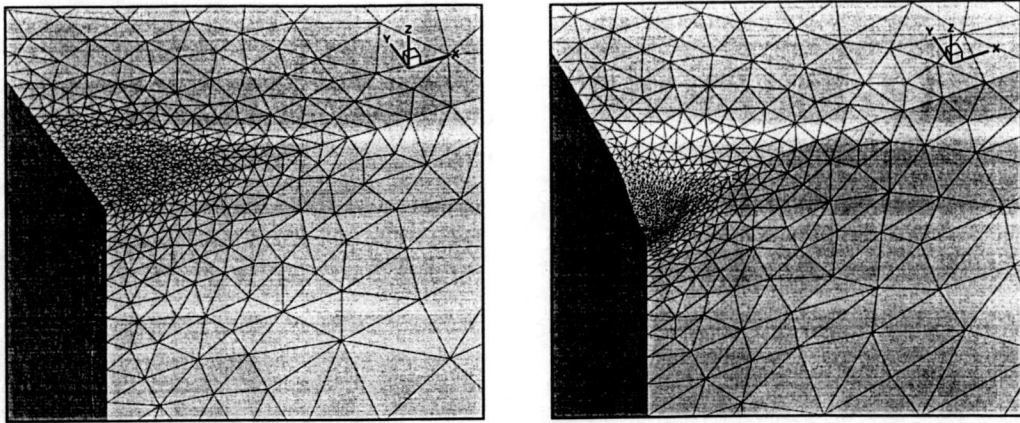
การสร้างโครงข่าย เลือกใช้ชิ้นส่วนเตตระฮีดรอน ชนิด 4 จุดต่อ กำหนดให้ชิ้นส่วนมีความละเอียดสูงในบริเวณใกล้กับแรงกระทำ และลดลงในระยะห่างออกมา ดังแสดงในรูปที่ 4.9

## ผลการวิเคราะห์

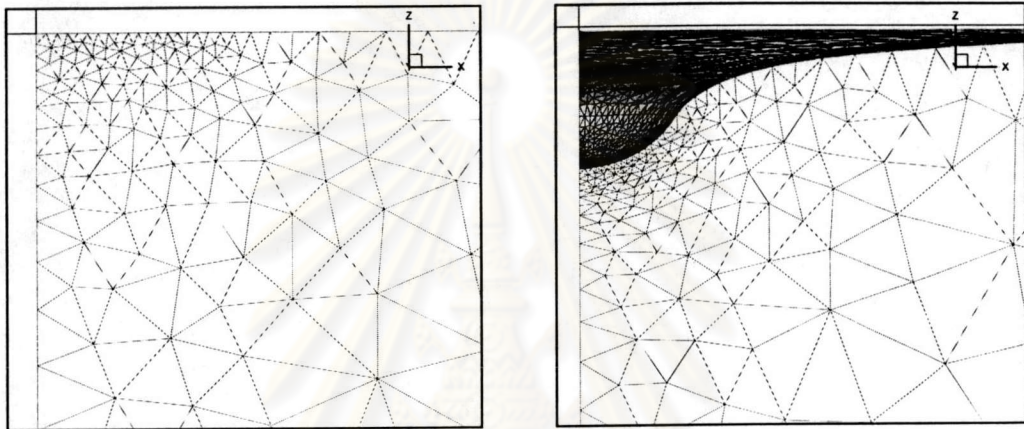
รูปที่ 4.10 แสดงโครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว(deformed mesh) เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น โดยแสดงในบริเวณใกล้ตำแหน่งแรงกระทำ สำหรับค่าหน่วยแรง และการเคลื่อนตัวตามแนวแกนต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลเฉลยจากวิธีอีลาสติก(elastic solution) แสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.11 และ 4.12

ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (vertical deflection) ตามแนวแกนกลาง (center line) หรือแกน z ตามรูปที่ 4.8 ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ใกล้เคียงกับผลเฉลยของวิธีอีลาสติกมาก ดังรูป 4.11 โดยผลจากโปรแกรมให้ค่าการเคลื่อนตัวต่ำกว่าเล็กน้อย คาดว่าเป็นผลมาจากขอบเขต(boundary) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่เพียงพอที่จะจำลองสภาวะ elastic haft-space ตามสมมุติฐานของวิธีอีลาสติก ในตัวอย่างนี้ ค่าการทรุดตัวที่ระดับผิวดินตามแนวแกนกลางของฐานราก ซึ่งได้จากโปรแกรม คือ 1.73 เซนติเมตร และการทรุดตัวจากวิธีอีลาสติก คือ 1.82 เซนติเมตร โดยมีผลต่างประมาณ 5%

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า ค่าหน่วยแรงในแนวตั้ง และแนวราบ ตามแนวแกนกลาง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยมาก สำหรับหน่วยแรงในแนวนอนที่ระดับผิวดินตามแนวรัศมี ( $\sigma_r$ ) และแนวสัมผัส ( $\sigma_\theta$ ) ในระบบพิกัดทรงกระบอก ซึ่งในการเปรียบเทียบใช้  $\sigma_{xx}$  หรือ  $\sigma_{yy}$  แทน  $\sigma_r$  และ  $\sigma_{xy}$  หรือ  $\sigma_{yx}$  แทน  $\sigma_\theta$  พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลต่างเกิดบ้างในกรณี  $\sigma_r$  บริเวณขอบของฐานรากซึ่งหน่วยแรงมีการเปลี่ยนแปลงมากทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการประมาณค่าหน่วยแรงที่จุดต่อด้วยวิธี SPR

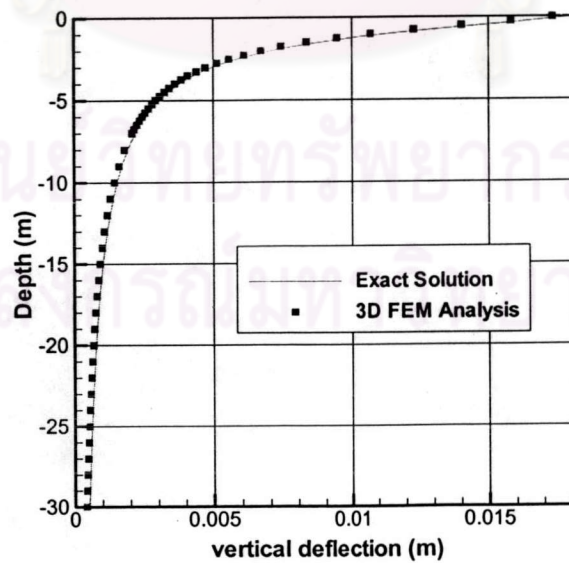


(ก) มุมมอง 3 มิติ

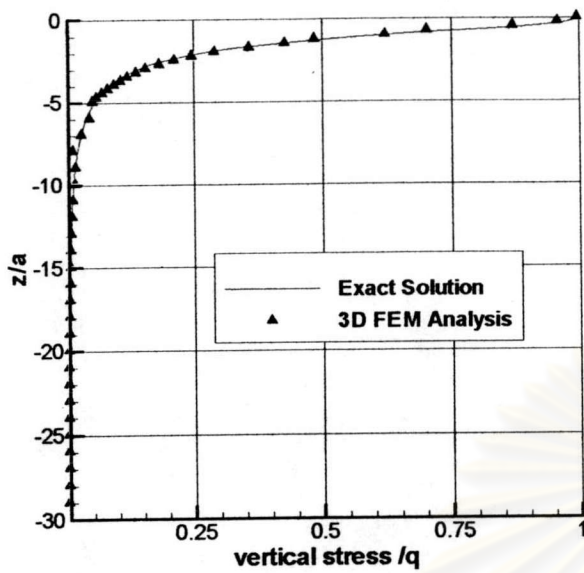


(ข) มุมมองด้านข้าง

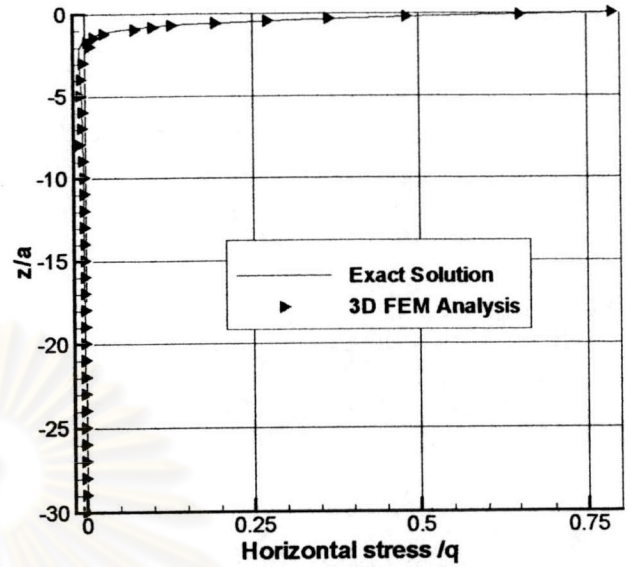
รูปที่ 4.10 โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว(ขวา) เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น(ซ้าย) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่วงกลม



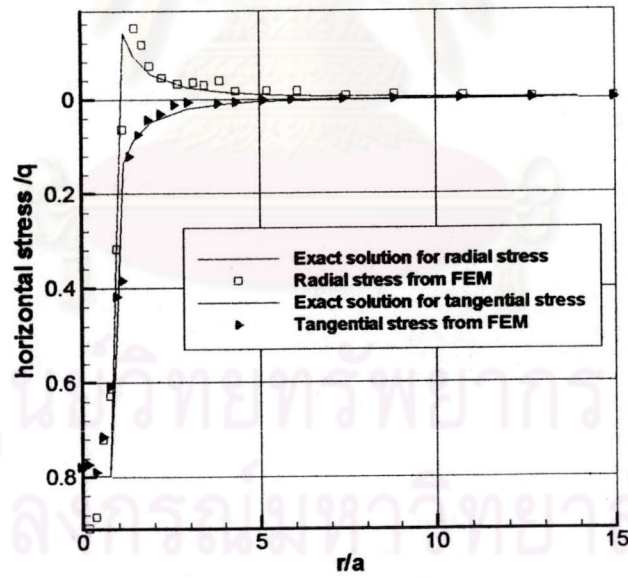
รูปที่ 4.11 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งตามแนวแกนกลางของตัวอย่างฐานรากแผ่วงกลม เปรียบเทียบระหว่างผลจากโปรแกรมที่พัฒนา และผลเฉลยจากวิธีอิลาสติก



๑) หน่วยแรงในแนวตั้ง ตามแนวแกนกลาง(center line)  
ของฐานรากวงกลม



๓) หน่วยแรงในแนวราบ ตามแนวแกนกลาง(center line)  
ของฐานรากวงกลม



๔) หน่วยแรงในแนวนอนตามแนวรัศมี และแนวสัมผัส ที่  
ระดับผิวดินของฐานรากวงกลม

รูปที่ 4.12 หน่วยแรงในแนวแกนต่าง ๆ ของตัวอย่างฐานรากแผ่วงกลม เปรียบเทียบ ระหว่างผล  
จากโปรแกรมที่พัฒนา(3D FEM) และผลเฉลยจากวิธีคลาสสิก(Exact Solution)