บทที่ 4

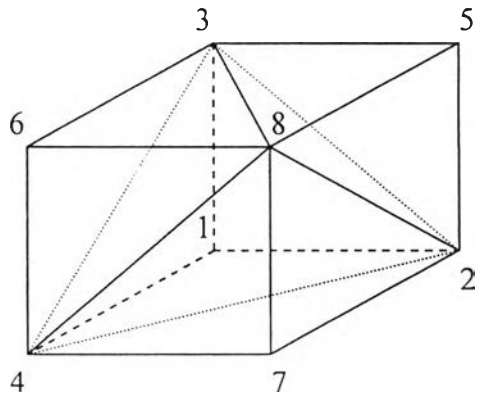
การจำลองการขุดเจาะด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.1 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้วิธีไฟไนท์ดิฟเฟอเรนท์วิเคราะห์ปัญหา

การวิเคราะห์ทำโดยใช้โปรแกรม FLAC3D ซึ่งเป็นโปรแกรม explicit finite difference วิเคราะห์ปัญหาแบบสามมิติ โดยโปรแกรมใช้การคำนวณลากรานซ์แบบแจ้งชัด(explicit lagrangian calculation scheme) และเทคนิคการแบ่งชิ้นส่วนแบบผสม (mixed discretization zoning) โดยใช้สมการการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์เต็มรูป (Full dynamic equation of motion) ซึ่งให้ความถูกต้องสูงสำหรับการศึกษาของไหลและวัสดุที่วิบัติแบบพลาสติก สำหรับปัญหาแบบสถิตศาสตร์โปรแกรมจะแก้โดยการใส่ตัวหน่วงอัตโนมัติ (automatic damping) ส่วนกลศาสตร์ของตัวกลางได้มาจากหลักปฐพีกลศาสตร์ทั่วไป เช่น ความเครียด กฎการเคลื่อนที่ และควบคุมพฤติกรรมด้วย constitutive model

4.1.1 ชิ้นส่วนพื้นฐานที่ประกอบเป็นมวลดิน

มวลดินจะเกิดจากการประกอบกันเข้าของ zone ย่อยๆซึ่งใน 1 zone จะถูกประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนย่อยรูป tetrahedral ซึ่ง จากภาพที่ 4.1 แสดง zone รูปกล่องที่มี 8 node ประกอบขึ้นจาก tetrahedral 5 ชิ้น

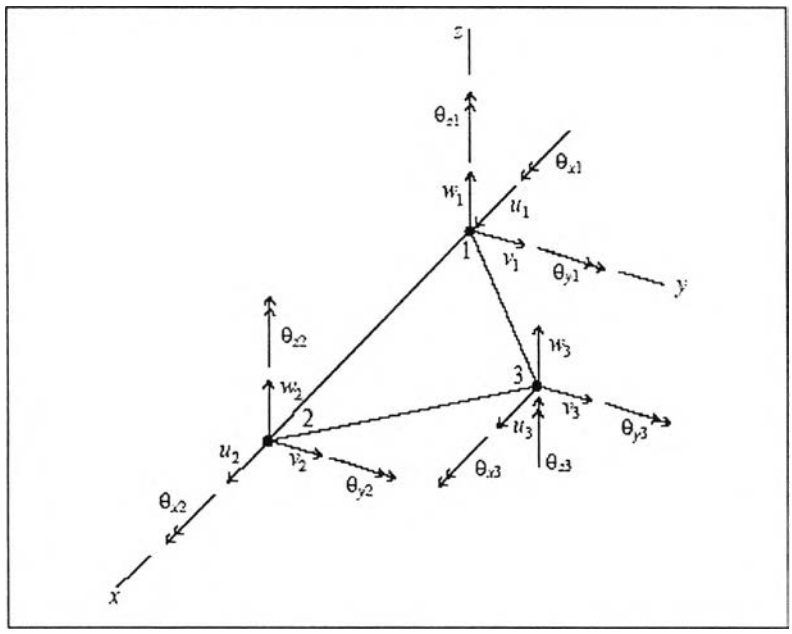


ภาพที่ 4.1 แสดง Zone แบบ 8 node และประกอบขึ้นจาก 5 Tetrahedral

4.1.2 ชิ้นส่วนพื้นฐานแบบเปลือกบาง(Shell Element)

โครงสร้างประเภทเปลือกบางที่มีความโค้ง สามารถจำลองได้โดยประกอบขึ้นจากผิวรูปสามเหลี่ยมจำนวนมากมาต่อกัน ซึ่งใช้จำลองแทนโครงสร้างเปลือกบางที่ให้การค้ำยันแก่มวลดิน อาทิ ดาดอุโมงค์(Tunnel Lining) หรือหัวเจาะ(Shield Machine) โครงสร้างของชิ้นส่วนแบบนี้แต่ละชิ้นประกอบด้วย 3 node แบนเรียบ มีดีกรีความอิสระเท่ากับ 6 สำหรับแต่ละ node

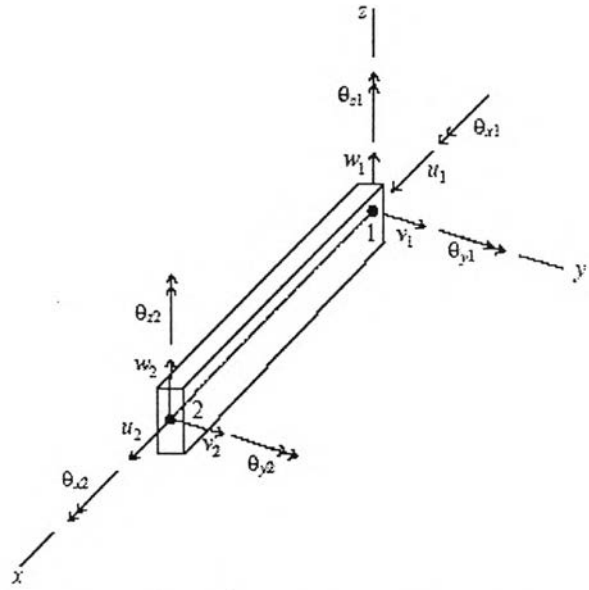
ในการคำนวณจะให้ชิ้นส่วน Shell แต่ละชิ้นเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบอีลาสติกเชิงเส้น (linearly elastic) โดยจะไม่เกิดการวิบัติ(no failure limit)



รูปที่ 4.2 แสดงชิ้นส่วนแบบ Shell ในแกน Local Coordinate System และดีกรีความอิสระที่จุดต่างๆ

4.1.3 ชิ้นส่วนพื้นฐานแบบคาน(Beam Element)

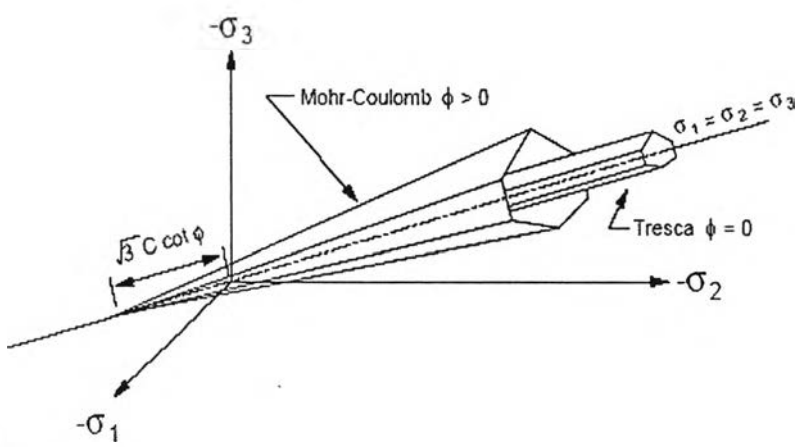
คานเป็นชิ้นส่วนเส้นตรงระหว่าง 2 จุดต่อ และมีดีกรีความอิสระแต่ละจุดต่อเท่ากับ 6 และมีคุณสมบัติสมมาตรใน 2 แกน พฤติกรรมของคานอยู่บนสมมติฐานของพฤติกรรมแบบอีลาสติกและไม่เกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองชิ้นส่วนแบบ Beam และดีกรีความอิสระที่จุดต่อ

4.2 **แบบจำลองวัสดุ**Material Model**และกฎการวิบัติ**(Failure Criteria)

ดินจะถูกสมมติให้มีพฤติกรรมแบบ elastic-plastic ซึ่งอธิบายด้วยกฎของ Mohr-Coulomb ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับตัวแปรสามประการคือ cohesion C , friction ϕ , dilation angle ψ สามารถแสดงด้วยพีระมิดหกเหลี่ยมใน principal stress space สำหรับ Tresca Criterion เป็นกรณีพิเศษสำหรับ $\phi = 0$

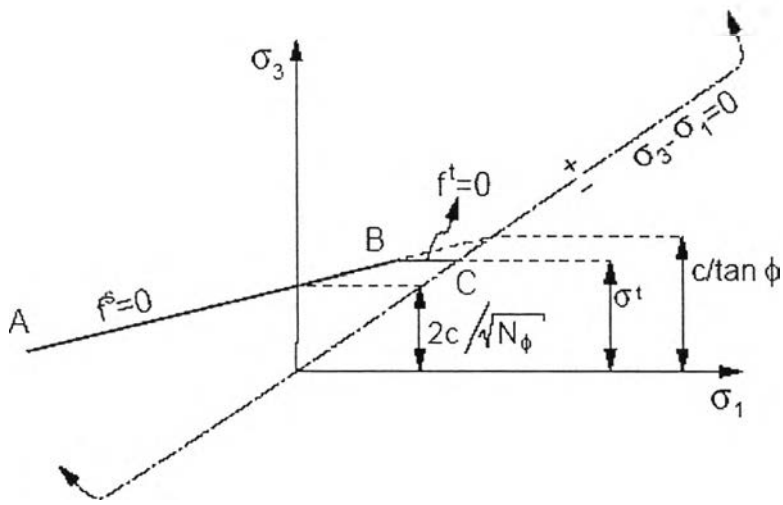


รูปที่ 4.4 แสดงพื้นผิววิบัติของ Mohr-Coulomb Model ใน Principal Stress Space

กฎวิบัติของ Mohr-Coulomb (f^s) **และกฎวิบัติของแรงดึง**(Tension failure criteria, f^t) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$f' = \sigma_1 - \sigma 3\left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right) + 2c\sqrt{\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}} \qquad (4.1)$$

$$f' = \sigma_3 - \sigma_1 \quad and \quad \sigma_t \le \frac{c}{\tan\phi} \qquad (4.2)$$



รูปที่ 4.5 แสดงฟังก์ชันการวิบัติในระนาบ σ_3 - σ_1

4.3 การจำลองเสมือนการขุดเจาะแบบสามมิติ

4.3.1 หลักการเบื้องต้นในการสร้างแบบจำลอง

ในการสร้างโมเดลเพื่อจำลองการขุดเจาะมีรายละเอียดขั้นตอนโดยทั่วๆไปดังนี้

1.ขึ้นรูปโมเดลจากปัญหาที่ต้องการ

2.กำหนดคุณสมบัติของโมเดล เช่น คุณสมบัติของดิน ความเค้น ขอบเขตของปัญหา และกฎการวิบัติของวัสดุ

3.กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา(Boundary Condition)

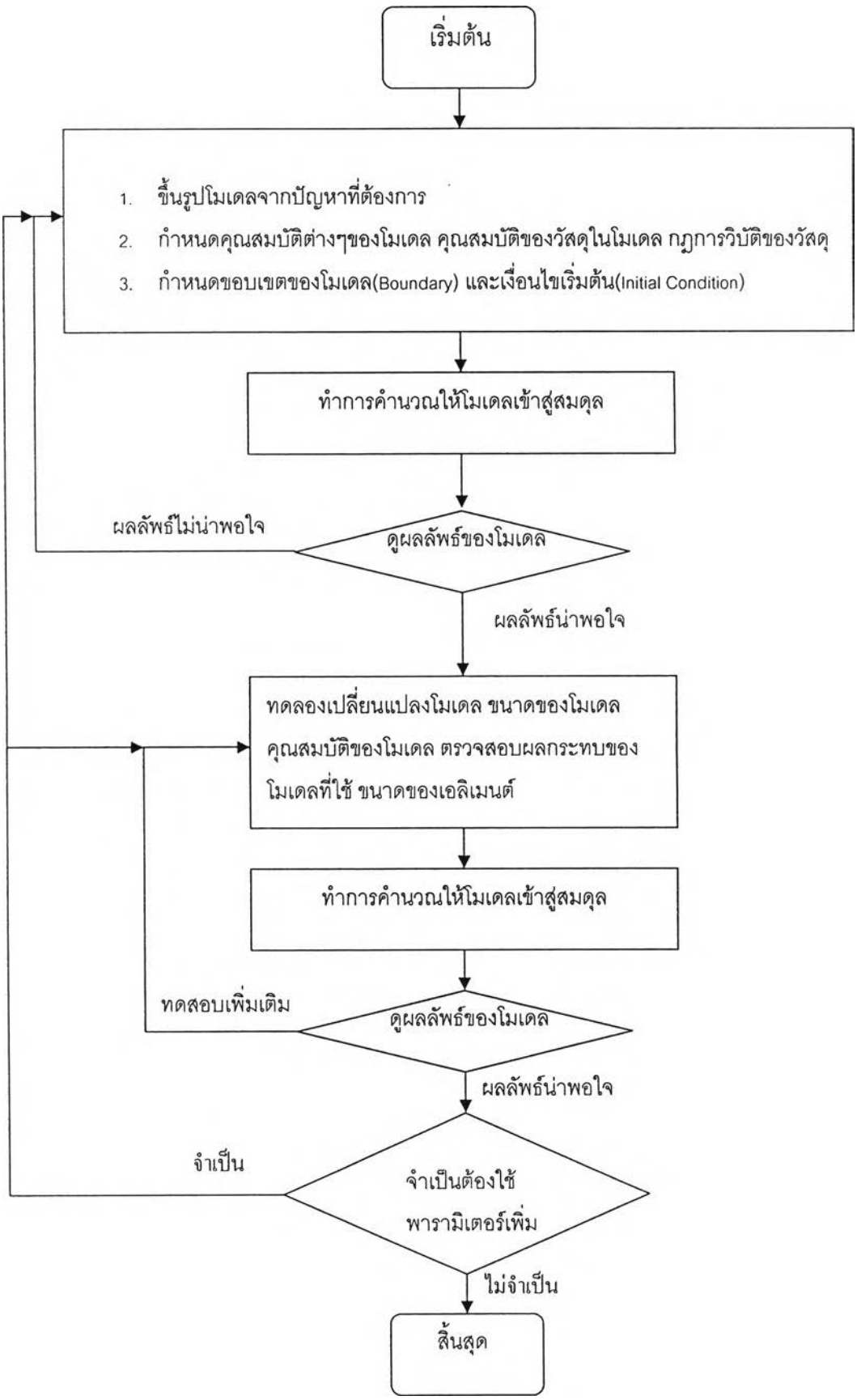
4.ทำการคำนวณให้โมเดลเข้าสู่สมดุล

5.ตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณ

6.ทดลองเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ(Parameter)ของวัสดุหรือเงื่อนไขขอบเขต(Boundary Condition)

7.ทำการคำนวณและเปรียบเทียบผลที่ได้

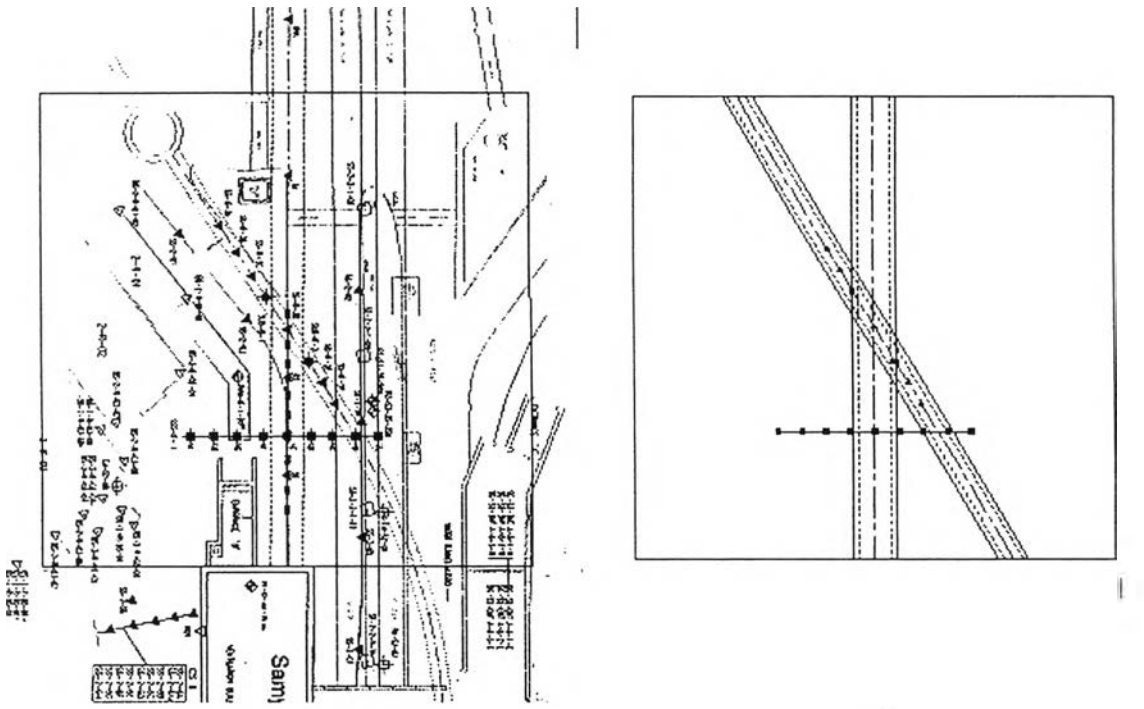
8.สรุปผล



รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอนทั่วไปของการสร้างและทดสอบโมเดล

4.3.2 **การสร้างแบบจำลองสำหรับศึกษาปัญหาการขุดเจาะผ่านแนวท่อประปาบริเวณสามย่าน**

ในการจำลองการขุดเจาะ เริ่มต้นจากการศึกษาปัญหาและรูปแบบของปัญหาที่จะทำการจำลอง ซึ่งในกรณีนี้คือบริเวณถนนพระรามสี่ สถานีสามย่านของสถานีรถไฟฟ้าใต้ดิน โดยใต้ดินมีแนวอุโมงค์ของการประปานครหลวงซึ่งมาจากถนนสี่พระยาเลี้ยวเข้าถนนพระรามสี่ตรงหัวมุมวัดหัวลำโพงตัดกับแนวอุโมงค์รถไฟฟ้าที่วิ่งไปตามแนวของถนนพระรามสี่



(a) (b)

รูปที่ 4.7 แสดงขอบเขตการจำลองปัญหา

ทำการกำหนดของเขตพื้นที่ๆจะทำการศึกษาโดยคำนึงถึงสภาพจริง การสร้างแบบจำลอง และอาณาเขตอิทธิพลจากการขุดเจาะโดยคร่าวๆ ซึ่งขอบเขตของแบบจำลองอาจจะถูกปรับปรุงในภายหลังเมื่อพบว่าไม่เหมาะสม เช่น พื้นที่มีความกว้างน้อยเกินไป ไม่ครอบคลุมอิทธิพลจากการขุดเจาะและการเคลื่อนตัวของมวลดิน พื้นที่สั้นเกินไปไม่เพียงพอแก่การศึกษาผลจากการขุดเจาะตามยาว เป็นต้น

ทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็นชิ้นย่อยๆ เพื่อให้เลือกใช้ชิ้นส่วนพื้นฐาน(Basic Primitive Model) ที่โปรแกรมมีอยู่มาประกอบกันเข้าเป็นแบบจำลองได้ ซึ่งอาจจะต้องทดลองจัดแบ่งและเลือกชนิดและรูปแบบการประกอบชิ้นส่วนขึ้นเป็นแบบจำลองหลายๆวิธี ซึ่งขั้นตอนนี้จะส่งผลถึงความยากง่ายในการสร้างแบบจำลอง ความถูกต้องของการคำนวณ เวลาที่ใช้คำนวณ ซึ่งในขั้นต้นอาจสร้างแบบจำลอง

คร่าวๆเพื่อศึกษาภาพรวมของปัญหา ขนาดของเขตอิทธิพล และแนวทางในการจำลองเบื้องต้น ก่อนที่จะทำการสร้างแบบจำลองละเอียดต่อไป

แบบจำลองคือสภาพย่อส่วนของพื้นที่จริง ดังนั้นในขั้นตอนนี้เราจำต้องทำการรวบรวมข้อมูลในส่วนของคุณลักษณะและคุณสมบัติต่างๆเชิงวิศวกรรม ของมวลดินอาทิ ชนิดและการวางตัวของชั้นดิน ระดับการวางตัว ระดับน้ำใต้ดิน ความดันน้ำในมวลดิน หน่วยน้ำหนัก ความหนาแน่น กำลังรับแรงเฉือน มุมเสียดทานภายใน โมดูลัส อัตราส่วนปัวซอง เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงคุณสมบัติอื่นๆของหัวเจาะ ดาดอุโมงค์ วัสดุที่ใช้อัดฉีด(Grouting Material) ฯลฯ

เนื่องจากการศึกษานี้เป็นการจำลองการขุดเจาะแบบต่อเนื่องดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาขั้นตอนการก่อสร้าง เริ่มตั้งแต่การขับเคลื่อนตัวของหัวเจาะ การให้แรงดันหน้าหัวเจาะ การขุดดิน การติดตั้งดาดอุโมงค์ การอัดฉีดน้ำปูน เป็นต้น เพื่อนำขั้นตอนดังกล่าวมาจำลองสภาพการทำงานให้ได้ถูกต้องใกล้เคียงมากที่สุด

สำหรับขั้นตอนการจำลองการขุดเจาะโดยใช้โปรแกรม FLAC3D จะเริ่มต้นงานส่วนแรกด้วยการสร้างแบบจำลองของสถานการณ์หรือบริเวณที่จะทำการจำลองขึ้นมาก่อน จากนั้นจึงกำหนดคุณลักษณะเกี่ยวกับชนิดของชั้นดิน แรงดันน้ำใต้ดิน หน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นของดิน คุณสมบัติด้านกำลังและการเสียรูปหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างของมวลดิน จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต(Boundary condition)และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น(Initial condition) ของแบบจำลอง จากนั้นทำการคำนวณเพื่อให้แบบจำลองเข้าสู่สมดุล ซึ่งเมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้ สิ่งที่เราได้คือแบบจำลองที่เป็นตัวแทนถึงบริเวณที่จะทำการจำลองก่อนที่จะได้มีการเริ่มทำการขุดเจาะอุโมงค์

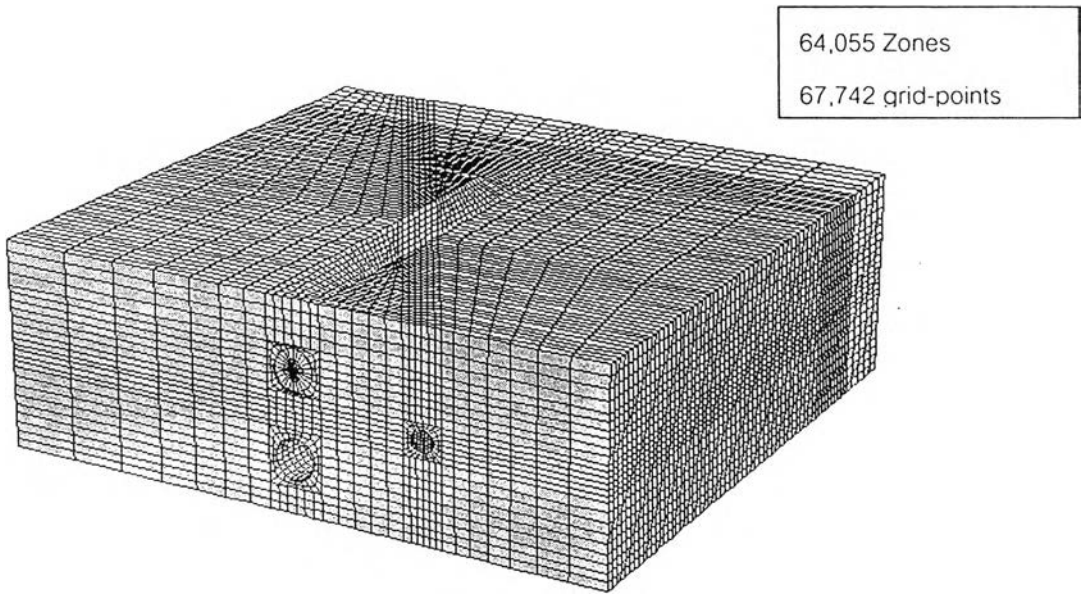
ส่วนที่สอง คือส่วนของการทำการจำลองการขุดเจาะต่อเนื่องด้วยแบบจำลองที่เราได้จำลองสภาพก่อนการขุดเจาะไว้แล้ว ซึ่งในขั้นนี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนของการจำลองการเอามวลดินออก การแทนที่มวลดินด้วยเอเลเมนต์ที่ถูกกำหนดคุณสมบัติให้เป็นหัวเจาะและดาดอุโมงค์ การให้แรงกระทำต่อมวลดินด้านหน้าหัวเจาะ การจำลองขั้นตอนการอัดฉีดน้ำปูนและวัสดุที่ใช้เป็นต้น ซึ่งสำหรับโปรแกรม FLAC3D ขั้นตอนของการจำลองการขุดเจาะต่อเนื่องทำได้โดยการเขียนชุดคำสั่งด้วยภาษาเฉพาะของโปรแกรม(FISH language)ซึ่งจะช่วยให้สะดวกแก่การทำการวนรอบหรือทำซ้ำขั้นตอนการขุดเจาะหรือการจำลองขั้นตอนที่มีความซับซ้อนมากๆ ซึ่งในขั้นตอนนี้นอกจำเป็นต้องพยายามจำลองขั้นตอนที่เกิดขึ้นจริงให้ถูกต้องแล้ว การตรวจสอบขั้นตอนของการจำลองและการวนรอบซ้ำของการจำลองการขุดเจาะต่อเนื่องให้มีความถูกต้องก็เป็นส่วนที่มีความสำคัญละใช้เวลามากช่วงหนึ่ง

ส่วนที่สาม คือการจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งกำหนดให้ทำการจัดเก็บทุกๆหนึ่งรอบของขั้นตอนการขุดเจาะ โดยเมื่อทำการจำลองการขุดเจาะเสร็จ 1 รอบ ชุดคำสั่งที่เขียนด้วย FISH จะสั่งให้ทำการบันทึกข้อมูลตามจุด(Grid point) ที่ได้มีการกำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งได้แก่จุดที่สอดคล้องกับการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดในสนามและจุดอื่นๆนอกเหนือจากนั้นที่ต้องการติดตาม

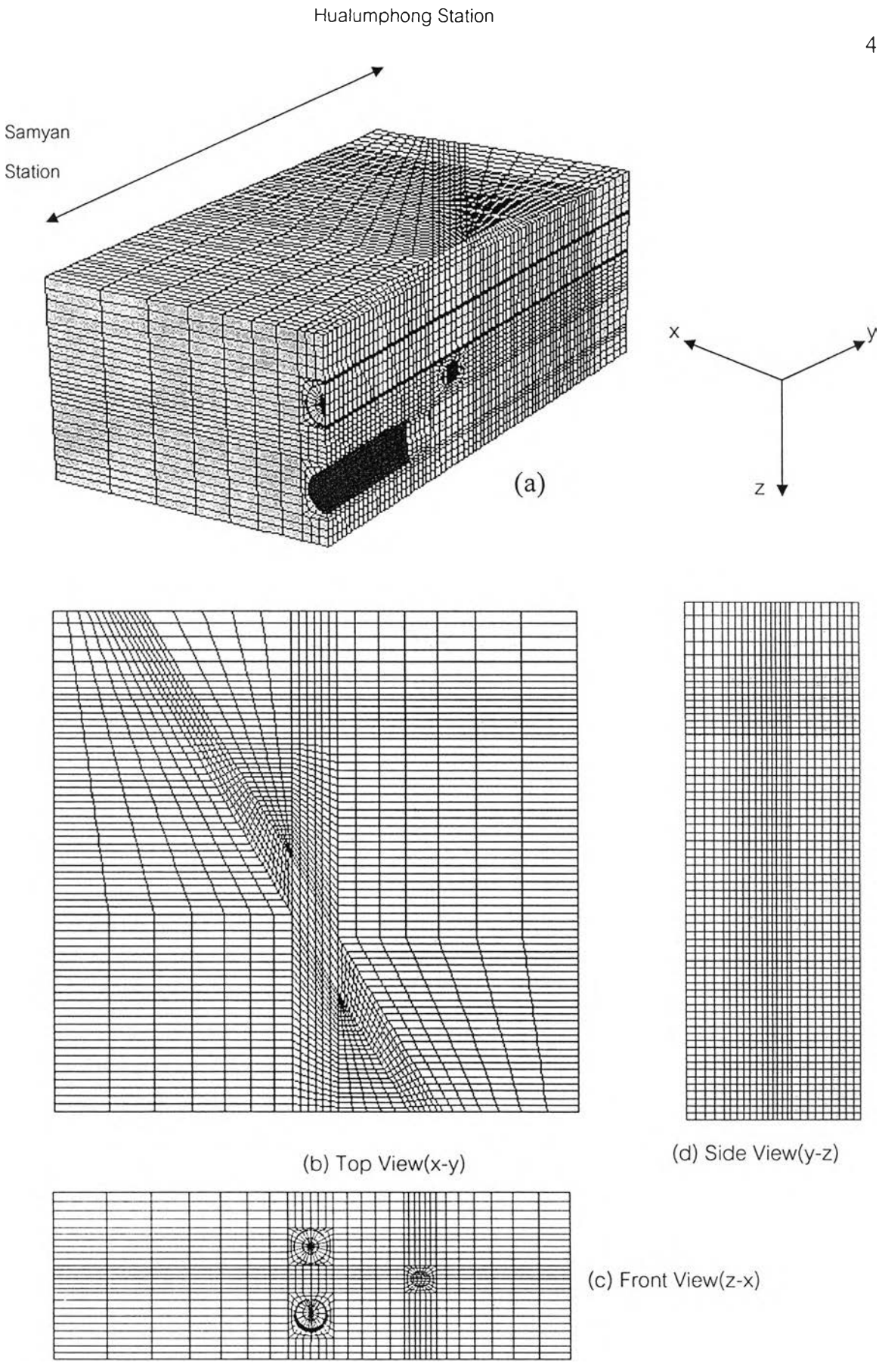
ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บในรูปแบบของไฟล์เอกสาร(Text file) ซึ่งจำเป็นจะต้องนำมาแปลงให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์แบบกระดาษทำการ(Spreadsheet – Excel file) ก่อนที่จะนำมาใช้ต่อไป ซึ่งผลการจำลองจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

4.3.3 แบบจำลองที่สร้างขึ้น(Geometry Model)

เป็นแบบจำลอง 3 มิติที่สร้างจาก Finite Difference Mesh สำหรับปัญหาการก่อสร้างลอดอุโมงค์ประปาที่มีอยู่แล้วบริเวณสามย่าน มีความยาวทั้งสิ้น 94 เมตร(แกน y) กว้าง 100 เมตร(แกน x) ความสูง 32 เมตร(แกน z) ประกอบด้วยโซนทั้งสิ้น 64,055 โซน และ 67,742 กริดพอยท์ โดยแบบจำลองประกอบขึ้นจากรูปร่างพื้นฐาน(Primitive model) จำนวน 232 ชิ้น



รูปที่ 4.8 แสดง Finite Difference Mesh ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ปัญหา



ภาพที่ 4.9 แสดงมุมมองต่างๆของแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์

4.3.4 การจำลองขั้นตอนการขุดแบบต่อเนื่อง

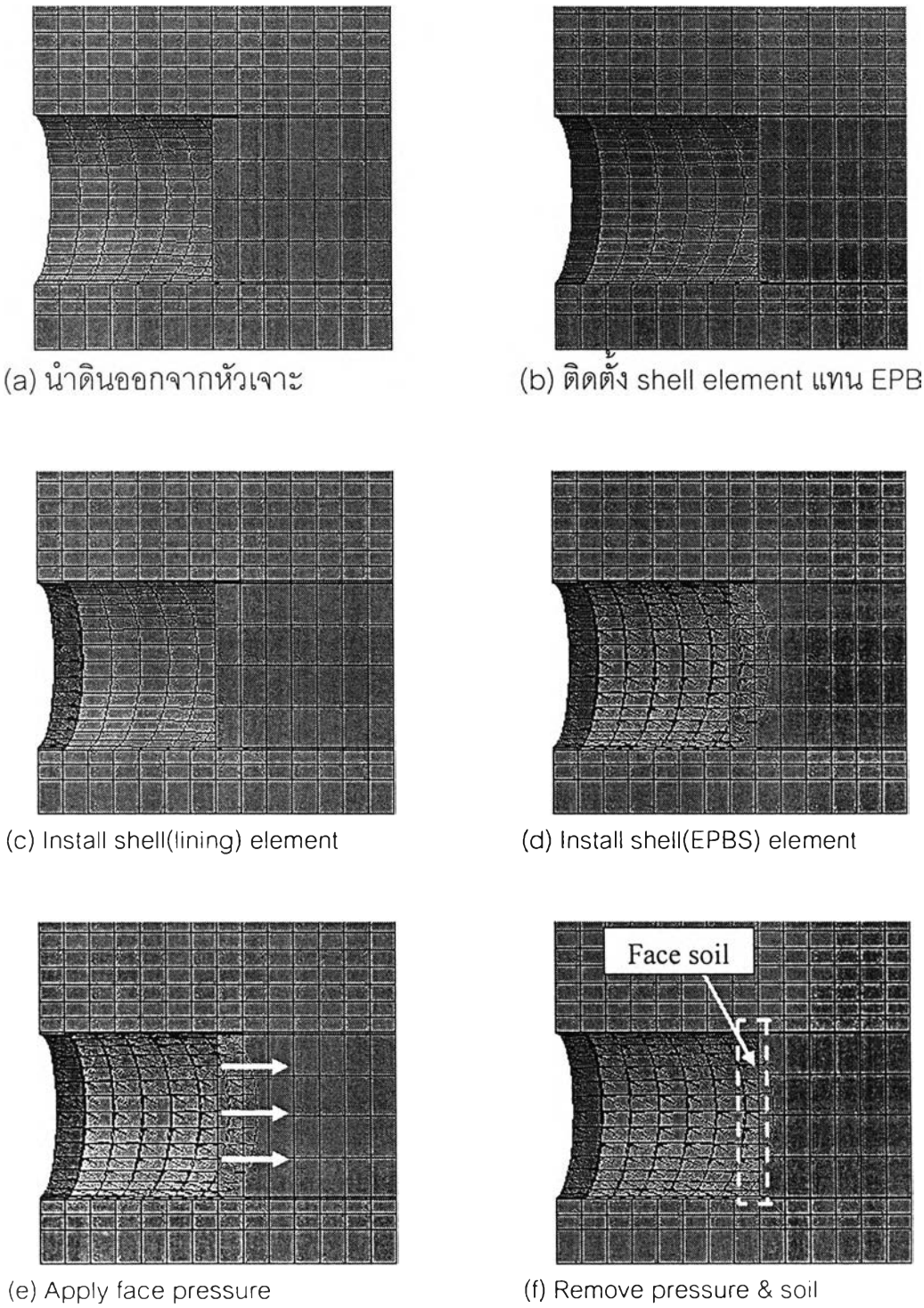
ขั้นตอนที่สำคัญในการจำลองเพื่อศึกษาปัญหาแบบ 3 มิติ คือการจำลองขั้นตอนของการขุดเจาะแบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการวนรอบซ้ำของขั้นตอนการทำงานทำสำคัญในการก่อสร้าง เริ่มตั้งแต่เริ่มแรกทำการเอาเอเลเมนต์ชนิดโซน(Zone element)ที่แทนมวลดินออกจำนวนหนึ่งและแทนที่ด้วยเอเลเมนต์แบบเปลือกบาง(Shell element) ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล จากนั้นทำการให้แรงกระทำที่ด้านหน้าของหัวเจาะและทำการคำนวณซ้ำเพื่อกระจายแรงไปสู่เอเลเมนต์โดยรอบจนมีแรงคงค้างหรือแรงไม่สมดุล(Residual force or Unbalanced force) เหลือในขนาดที่น้อยเมื่อเทียบกับแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อเริ่มการคำนวณ เมื่อจบขั้นตอนดังกล่าวเราจะเริ่มต้นขั้นตอนของการขุดเจาะแบบต่อเนื่องโดย ทำการเอาแรงกระทำที่หน้าหัวเจาะออก และทำการเอาเอเลเมนต์ด้านหน้าหัวเจาะออก 1 วงและแทนที่ด้วยเอเลเมนต์แบบเปลือกบางที่เป็นการจำลองแทนหัวเจาะทางด้านท้ายของหัวเจาะนำเอเลเมนต์วงท้ายสุดของหัวเจาะออก จากนั้นทำการติดตั้งเอเลเมนต์แบบโซนเป็นวงบางๆซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นวัสดุจากการอัดฉีดด้วยน้ำปูน จากนั้นจึงติดตั้งเอเลเมนต์แบบเปลือกบางที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นดาดอุโมงค์ใหม่ที่เพิ่งถูกติดตั้ง ซึ่งขั้นตอนช่วงที่นี้เป็นการจำลองเสมือนการเคลื่อนตัวของหัวเจาะและการติดตั้งดาดอุโมงค์ในมวลดิน จากนั้นจึงทำการให้แรงกระทำหน้าหัวเจาะ(Face pressure) และทำการคำนวณเพื่อให้โมเดลเข้าสู่สมดุลต่อไป

อนึ่งในขั้นตอนการทำงานจริง เราจะทำการติดตั้งดาดอุโมงค์ก่อนที่จะมีการอัดฉีดน้ำปูนไปแทนที่มวลดินที่หายไป แต่ในการสร้างแบบจำลอง เราไม่สามารถติดตั้งเอเลเมนต์แบบเปลือกบางโดยไม่ยึดกับเอเลเมนต์แบบโซนได้ ในขั้นตอนการจำลองจึงจำเป็นต้องติดตั้งโซนที่ทำหน้าที่แทนวัสดุที่ถูกอัดฉีด(Grouted material) ก่อนที่จะติดตั้งเอเลเมนต์แบบเปลือกบางที่ทำหน้าที่เป็นดาดอุโมงค์

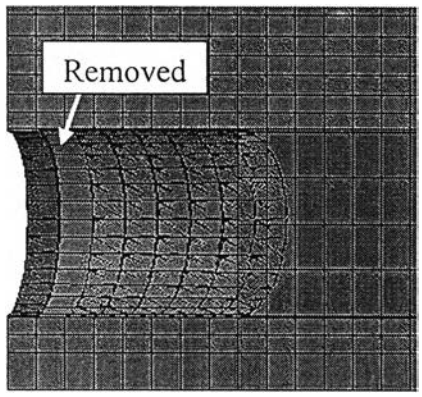
สรุปขั้นตอนการจำลองการขุดเจาะต่อเนื่องอุโมงค์

1) เอาดินออกเพื่อบรรจุ Shell Element เสมือนเป็นหัวเจาะ
2) Apply Face Pressure จากนั้นทำการคำนวณซ้ำจำนวน 1,000 รอบ
3) Remove Face Pressure
4) เอาดินหน้าหัวเจาะออก
5) ติดตั้ง Shell Element บริเวณดินที่ถูกเอาออกแทนการเลื่อนหัวเจาะ
6) Remove Shell ท้ายหัวเจาะ(เลื่อนหัวเจาะไปข้างหน้า)
7) เพิ่ม Zone วงบางๆท้ายหัวเจาะแทน Grouted Material
8) ติดตั้ง Shell Element เสมือนเป็นดาดอุโมงค์

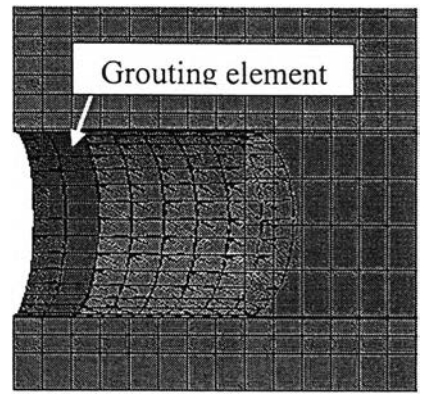
ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 – 8 จนกระทั่งเสร็จสิ้นการขุดเจาะ ขั้นตอนในส่วนการขุดเจาะต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 4.10



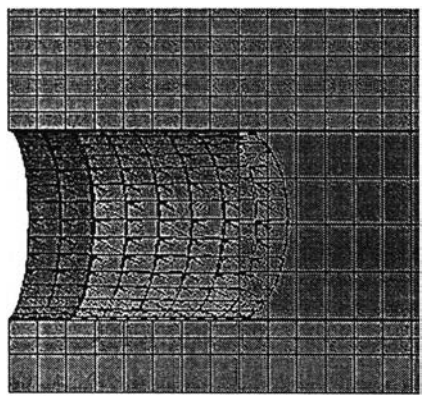
รูปที่ 4.10 แสดงขั้นตอนการจำลองการขุดเจาะแบบต่อเนื่อง



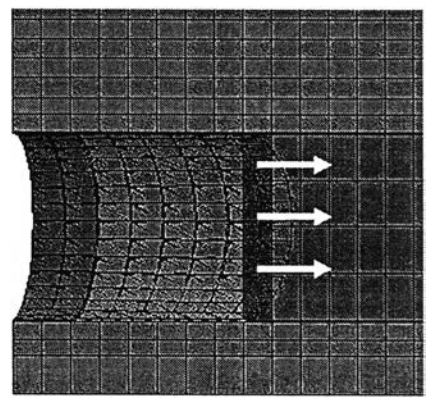
(g) Install shell at face ring &
delete shell at last EPBS ring



(h) Install grouting element



(i) Install shell(lining) element



(j) Apply face pressure &
1,000 steps calculation

รูปที่ 4.10 แสดงขั้นตอนการจำลองการขุดเจาะแบบต่อเนื่อง(ต่อ)