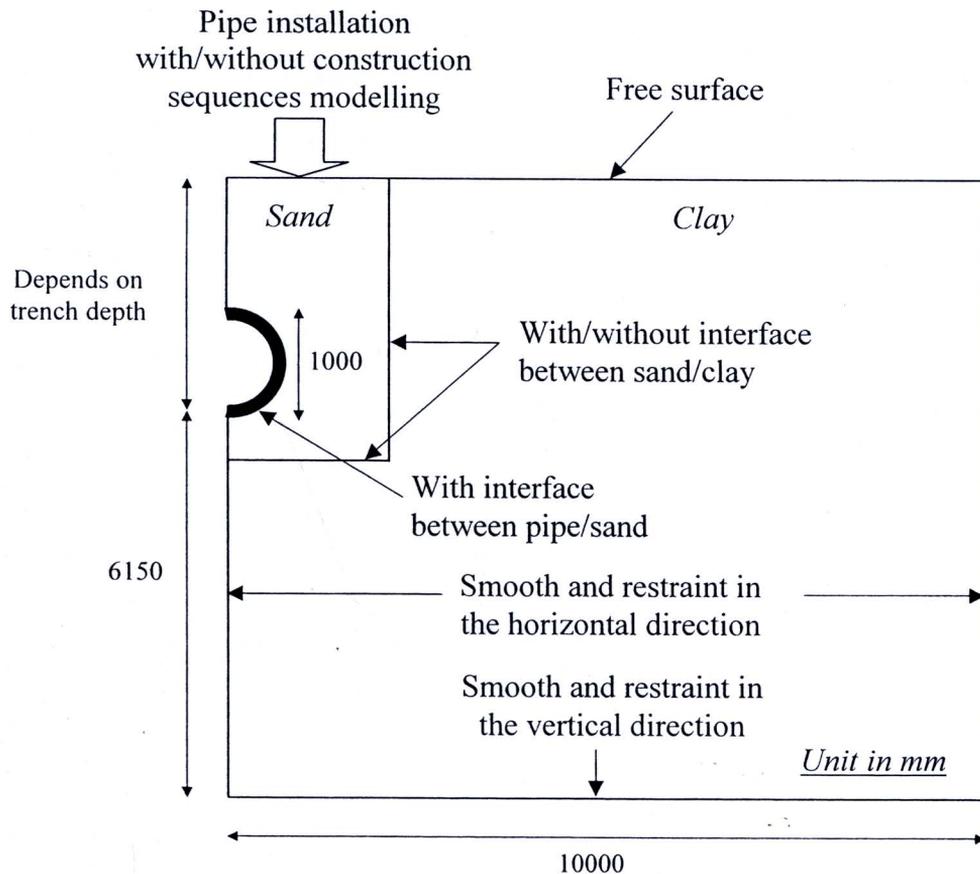


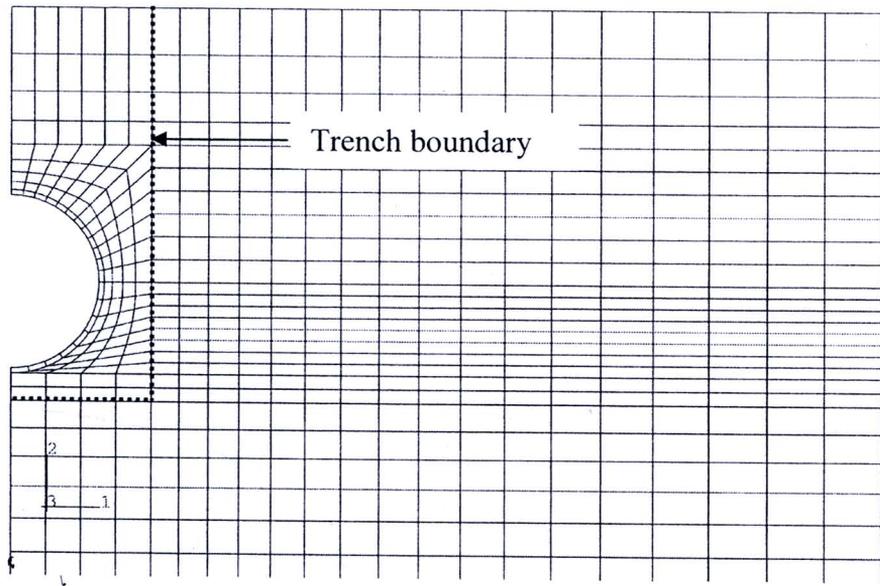
บทที่ 3 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 ทัวไป

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม ABAQUS รูปร่างทางเรขาคณิตและส่วนประกอบของ element ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แสดงในรูปที่ 3-1 การวิเคราะห์ดำเนินการแบบ plane-strain condition สภาวะขอบเขตด้านข้างและด้านล่างสมมุติเป็นแบบเรียบและรับแรงในแนวตั้งฉากเท่านั้น และเนื่องจากความสมมาตรของปัญหาจึงจำลองแบบจำลองเพียงครึ่งหนึ่งของปัญหา ทราายถมและท่อจำลองด้วย 8-node biquadratic displacement, reduced integration continuum element และดินเหนียวจำลองด้วย 8-node biquadratic displacement, bilinear pore pressure, reduced integration continuum element พฤติกรรมของทราายถมได้จำลองโดยใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb และพฤติกรรมของดินเหนียวจำลองโดยใช้แบบจำลอง clay plasticity วัสดุที่เป็นท่อจำลองเป็น linear elastic material (ASTM F 679-86: type T-2) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อและทราายถมรอบๆจำลองโดยใช้ surface-based contact โดยที่อนุญาตให้มีการเลื่อนไถลและการแยกออกจากกันระหว่างท่อและทราายถม ตัวอย่างของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แสดงในรูปที่ 3-2 จำนวนของ element ที่ใช้เริ่มจาก 1900 (กรณีของร่องลึก 2 เมตร) ถึง 2200 (กรณีของร่องลึก 3 เมตร) ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลกระทบของ mesh size แล้วพบว่ามีความเพียงพอ



รูปที่ 3-1 แบบจำลองทางเรขาคณิตสำหรับปัญหาที่วิเคราะห์



รูปที่ 3-2 ตัวอย่างของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ (กรณีร่องลึก 2.0 ม และกว้าง 1.5 ม)

3.2 แบบจำลองดิน

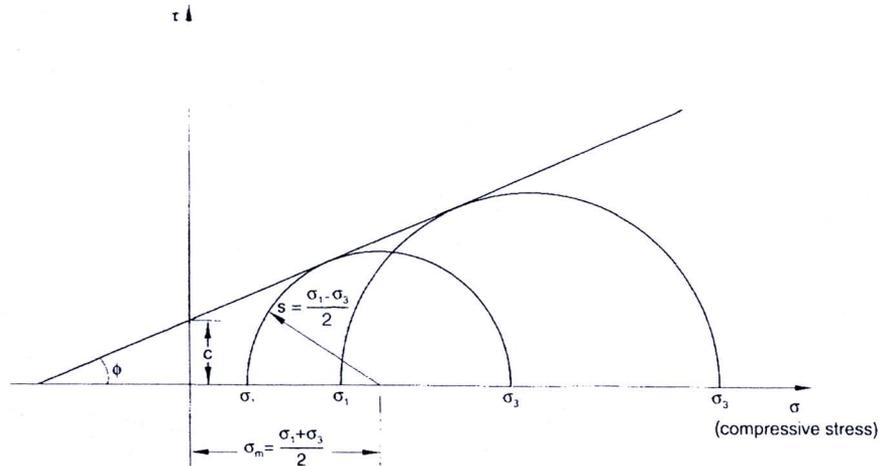
3.2.1 แบบจำลองดินแบบ Mohr-Coulomb

แบบจำลองดินแบบ Mohr-Coulomb เป็นแบบจำลองแบบ linear elastic-perfectly plastic ผู้ใช้ต้องกำหนดค่า Young's modulus E และ Poisson's ratio ν สำหรับคุณสมบัติอีลาสติกของดิน และต้องกำหนดค่า friction angle ϕ_{max} , dilation angle ψ , และ cohesion intercept c' สำหรับคุณสมบัติการวิบัติของดิน ต่อไปนี้จะอธิบายลักษณะของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ที่ใช้ในโปรแกรม ABAQUS

ข้อกำหนดการวิบัติของแบบจำลอง Mohr-Coulomb กำหนดให้การวิบัติเกิดขึ้นเมื่อ shear stress ที่จุดใดจุดก็ตามในมวลดินมีค่าเท่ากับค่าที่แปรผันโดยตรงกับค่า normal stress ในระนาบเดียวกัน แบบจำลอง Mohr-Coulomb มีพื้นฐานจากการวาดวงกลมของ Mohr สำหรับสภาพของความเค้นที่สภาวะวิบัติในระนาบของความเค้นหลักมากที่สุดและน้อยสุด เส้นวิบัติคือเส้นตรงที่สัมผัสวงกลมของ Mohr เหล่านี้แสดงในรูปที่ 3-3 ดังนั้นข้อกำหนดสำหรับการวิบัติของแบบจำลอง Mohr-Coulomb จะนิยามโดยสมการที่ (3-1)

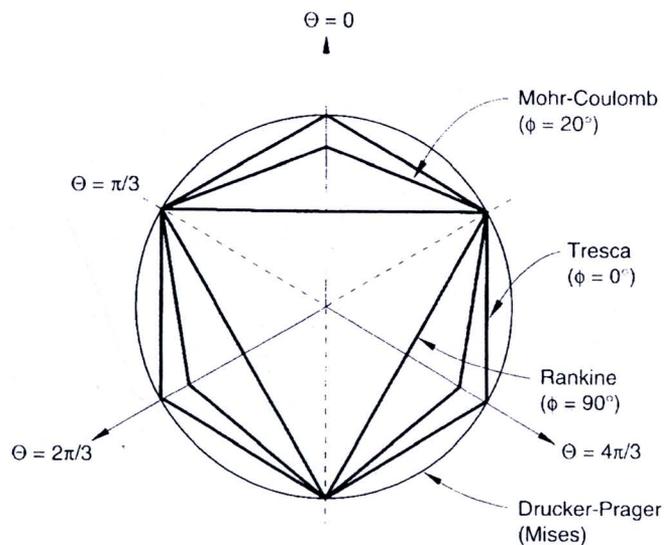
$$\tau = c' + \sigma \times \tan \phi \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

โดยที่ τ คือ shear stress, c' คือ cohesion intercept, σ คือ effective normal stress, และ ϕ คือ friction angle ของดิน



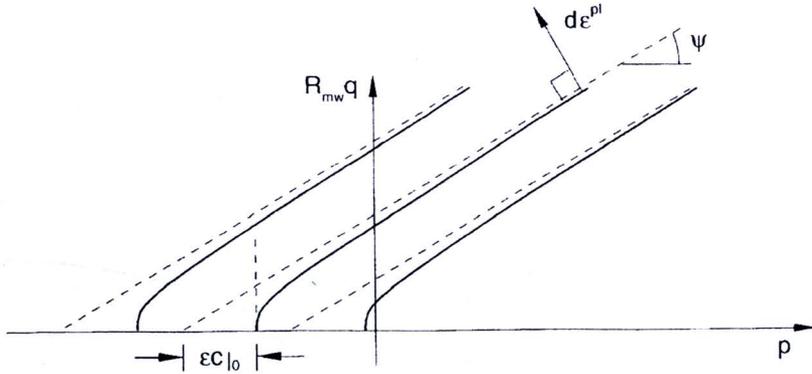
รูปที่ 3-3 ข้อกำหนดการวิบัติของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในระนาบ meridion (HKS, 2006)

ค่า friction angle ϕ จะควบคุมรูปร่างของ yield surface ในระนาบ deviatoric ดังแสดงในรูปที่ 3-4 ค่า friction angle สามารถมีค่าระหว่าง $0^\circ \leq \phi < 90^\circ$ ในกรณีที่ $\phi = 0^\circ$ นั้นแบบจำลอง Mohr-Coulomb จะกลายเป็นแบบจำลอง pressure-independent Tresca โดยที่มีรูปร่างเป็นหกเหลี่ยมในระนาบ deviatoric ในกรณีสำหรับ $\phi = 90^\circ$ แบบจำลอง Mohr-Coulomb จะกลายเป็นแบบจำลอง “tension cut-off” Rankine model ที่มีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมในระนาบ deviatoric (กรณีนี้ไม่อนุญาตสำหรับแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในโปรแกรม ABAQUS)

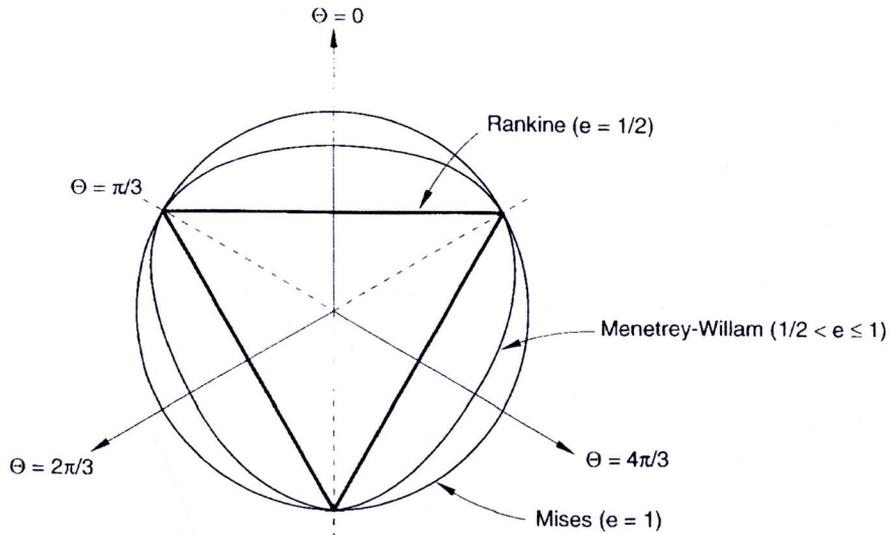


รูปที่ 3-4 ข้อกำหนดการวิบัติของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในระนาบ deviatoric (HKS, 2006) (ความเค้นกดจะแสดงค่าเป็นลบ)

ข้อกำหนดของ flow potential จะใช้เป็นฟังก์ชันแบบ hyperbolic ในระนาบความเค้น meridional ดังแสดงในรูปที่ 3-5 และเป็นฟังก์ชันแบบ smooth elliptic ที่เสนอโดย Menetrey & William (1995) ในระนาบ deviatoric ดังแสดงในรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-5 ข้อกำหนดของ flow potential ของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในระนาบ meridional (HKS, 2006)



รูปที่ 3-6 ข้อกำหนดของ flow potential ของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในระนาบ deviatoric (HKS, 2006) (ความเค้นกดจะแสดงค่าเป็นลบ)

โดยข้อกำหนดเริ่มต้นของค่า deviatoric eccentricity e จะคำนวณโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม ABAQUS ตามนิยามในสมการ (3-2) การคำนวณนี้เพื่อให้ flow potential ตรงกับ yield surface ในทั้ง triaxial compression และ extension ในระนาบ deviatoric

$$e = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \dots \dots \dots (3-2)$$

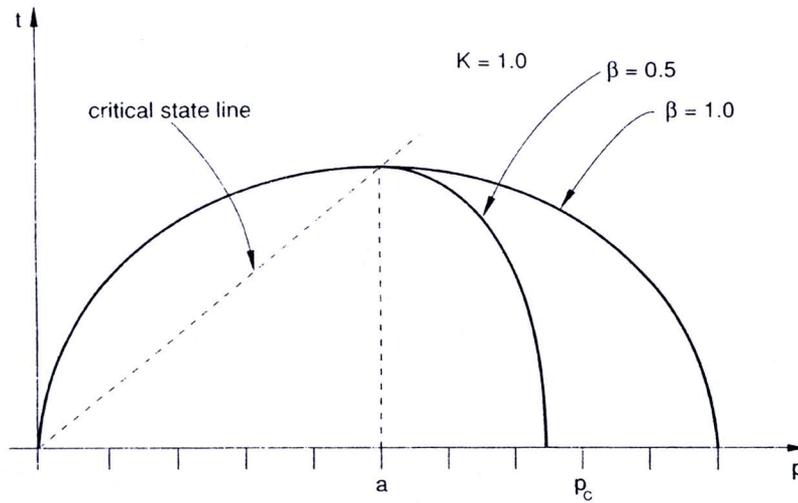
ข้อกำหนดของ plastic flow ในระนาบ meridional stress plane สามารถมีสภาพใกล้เคียง associated เมื่อค่า angle of friction ϕ และค่า angle of dilation ψ มีค่าเท่ากันและกำหนดค่า meridional éccentricity \mathcal{E} ที่มีค่าน้อยมาก อย่างไรก็ตามโดยปกติ plastic flow ในระนาบนี้จะเป็นแบบ nonassociated ส่วนสภาพ plastic flow ในระนาบ deviatoric stress จะเป็นแบบ nonassociated เสมอ ฉะนั้นการใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb จะต้องการการคำนวณแบบ unsymmetric matrix storage and solution scheme

3.2.2 แบบจำลองดินแบบ Clay plasticity

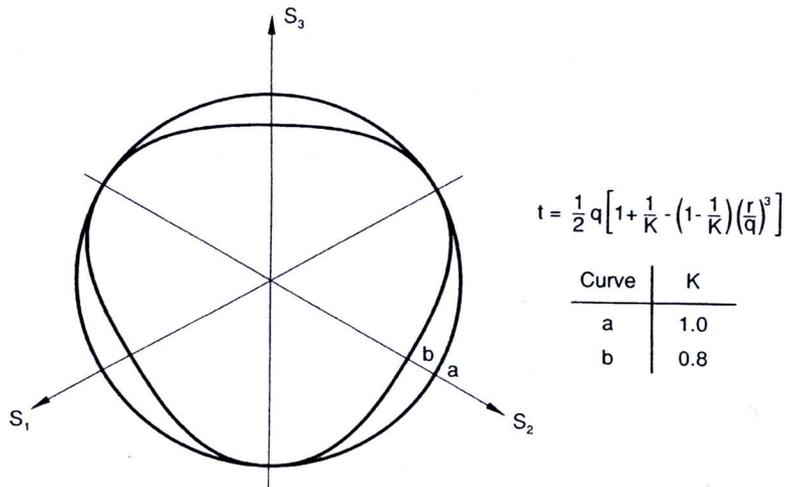
แบบจำลอง clay plasticity ในโปรแกรม ABAQUS นั้นเป็นส่วนขยายของแบบจำลอง Cam-Clay (Schofield & Wroth, 1968) แบบจำลองนี้มี yield surface ดังสมการที่ (3-3)

$$\frac{1}{\beta^2} \left(\frac{p}{a} - 1 \right)^2 + \left(\frac{t}{Ma} \right)^2 - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

- | | | |
|--------|--|--|
| โดยที่ | $p = \frac{1}{3} \text{trace } \sigma$ | คือ average confining pressure |
| | $t = \frac{1}{2} q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right]$ | คือ deviatoric stress |
| | $q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}}$ | คือ Mises equivalent stress |
| | $r = \left(\frac{9}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S} \cdot \mathbf{S} \right)^{\frac{1}{3}}$ | คือ third stress invariant |
| | M | คือค่าคงที่ที่กำหนดความชันของเส้น critical state |
| | β | คือค่าคงที่ โดยมีค่าเท่ากับ 1.0 เมื่ออยู่ที่ "dry" side ของเส้น critical state ($t > Mp$) แต่อาจจะมีค่าต่างจาก 1.0 เมื่ออยู่ที่ "wet" side ของเส้น critical state (ข้อกำหนด $\beta \neq 1.0$ จะทำให้เกิดความแตกต่างของ ellipse ของ wet side ของเส้น critical state และจะมี "cap" ที่หดลงถ้า $\beta < 1.0$ ดังแสดงในรูปที่ 3-7) |
| | a_0 | คือตัวแปร hardening parameter ที่กำหนดขนาดของ yield surface |
| | K | คืออัตราส่วนของค่า flow stress ในสภาพ triaxial extension ต่อค่า flow stress ในสภาพ triaxial compression และกำหนดรูปร่างของ yield surface ในระนาบ deviatoric (Π -plane) (ตามแสดงในรูปที่ 3-8) |



รูปที่ 3-7 Clay yield surface ในระนาบ p-t



รูปที่ 3-8 Clay yield surface ในระนาบ Π -plane (ความเค้นกดจะแสดงค่าเป็นลบ)

ข้อกำหนด hardening law ที่กำหนดขนาดของ yield surface ในทุกๆขณะจะคำนวณจากค่าเริ่มต้นของ hardening parameter a_0 และปริมาณของ plastic volumetric strain จะเกิดขึ้นตามสมการที่ (3-4)

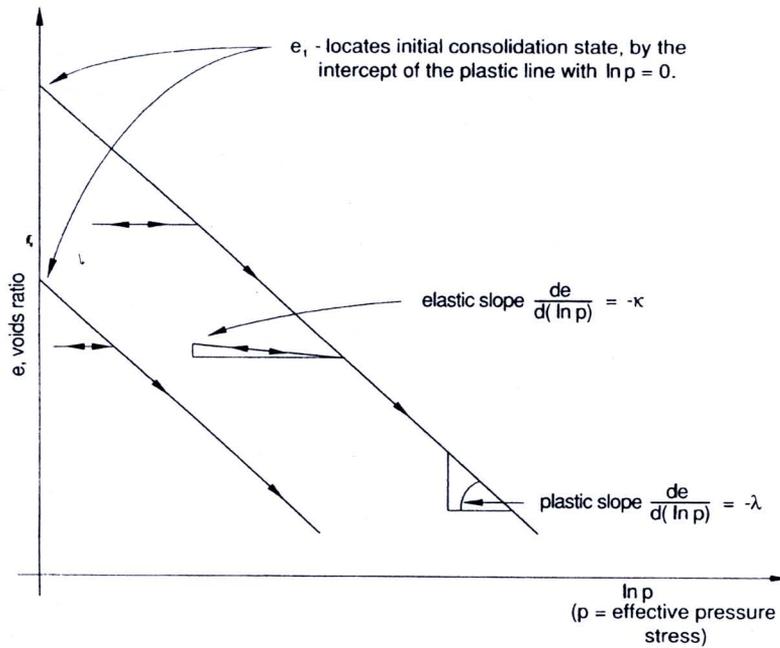
$$a = a_0 \exp \left[\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \Delta \varepsilon_{vol}^{plastic} \right] \dots \dots \dots (3-4)$$

- โดยที่
- $\Delta \varepsilon_{vol}^{plastic}$ คือ plastic volumetric strain (การหดตัวจะเป็นบวก)
 - κ คือ logarithmic bulk modulus ของวัสดุ
 - λ คือ logarithmic hardening constant
 - e_0 คือค่า initial void ratio.

ค่า a_0 จะสามารถนิยามโดยกำหนดค่า e_1 ซึ่งเป็นจุดตัดของเส้น virgin consolidation line กับแกน void ratio ในพล็อตของ void ratio e versus logarithm of effective confining pressure $\ln p$ (ตามแสดงในรูปที่ 3-9) ค่า a_0 จะนิยามตามสมการที่ (3-5)

$$a_0 = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{e_1 - e_0 - \kappa \ln p_0}{\lambda - \kappa}\right) \dots\dots\dots (3-5)$$

โดยที่ p_0 คือค่าเริ่มต้นของ equivalent hydrostatic pressure



รูปที่ 3-9 พฤติกรรม pure compression ของแบบจำลอง clay plasticity

3.3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 ท่อ

(คุณสมบัติตาม ASTM F 679-86: type T-2)

| | |
|--|---------------------------|
| วัสดุ: | Poly Vinyl Chloride (PVC) |
| เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (nominal pipe diameter): | 36 นิ้ว |
| เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก: | 1000 มม |
| เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน: | 942.6 มม |
| ความหนาของท่อ: | 28.7 มม |
| Modulus of elasticity in tension: | 2758 MPa |
| Poisson's ratio: | 0.3 |
| หน่วยน้ำหนัก: | 14.0 kN/m ³ |



3.3.2 ทราบถมกลับ

(สมมุติให้เป็นตาม *dense sand* ของ Trautmann & O'Rourke (1983))

| | |
|--|------------------------|
| Young's modulus E : | 2894 kPa |
| Poisson's ratio ν : | 0.3 |
| Peak friction angle ϕ_{peak} : | 44° |
| Dilation angle ψ : | 16° |
| Initial void ratio e_o : | 0.584 |
| Initial dry density γ_{dry} : | 17.7 kN/m ³ |
| Initial saturated density γ_{sat} : | 21.4 kN/m ³ |
| Initial submerged density γ : | 11.4 kN/m ³ |

3.3.3 ดินเหนียว

(สมมุติคุณสมบัติของ *Bangkok Clay* ตาม Balasubramaniam & Chaudhry (1978), Kuwano & Bhattarai (1989), และ Tamrakar et al. (2000))

| | |
|---|---------------------------------------|
| ความชันของเส้น critical state line ใน triaxial compression M_{TC} : | 1.0 ($\phi_{crit TC} = 25.4^\circ$) |
| ความชันของเส้น critical state line ใน triaxial extension M_{TE} : | 0.8 |
| อัตราส่วนของ $M_{TE}:M_{TC}$ (K): | 0.8 |
| ความชันของเส้น normal compression line λ : | 0.50 |
| ความชันของเส้น reloading line K : | 0.05 |
| Void ratio ของเส้น ICL ที่ $p' = 1$ kPa: | 4.012 |
| Poisson's ratio ν : | 0.3 |
| ค่าคงที่ที่กำหนดรูปร่างของ yield surface ในระนาบ $p-t$ β : | 1.0 |
| Coefficient of earth pressure at rest K_o : | 0.6 |
| Initial void ratio e_o : | 2.0 |
| Undrained shear strength s_u : | 15 kPa |
| Saturated unit weight γ_{sat} : | 17.0 kN/m ³ |
| Dry unit weight γ_{dry} : | 10.3 kN/m ³ |
| Submerged unit weight γ : | 7.2 kN/m ³ |
| Coefficient of permeability k : | 5×10^{-11} m/s |

3.3.4 ผิวสัมผัสระหว่างท่อและทราบถม (จำลองในทุกกรณี)

Interface friction angle ϕ_{μ} (pipe-sand) = 22° ($=\phi_{peak}/2$)

| | |
|---------------------------------|--------------|
| สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ | |
| ห้องสมุดงานวิจัย | |
| วันที่..... | 25 ก.ค. 2555 |
| เลขทะเบียน..... | 247519 |
| เลขเรียกหนังสือ..... | |

3.3.5 ผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว (เมื่อมีการจำลอง)

$$\text{Interface friction angle } \phi_{\mu} \text{ (sand-clay)} = 25.4^{\circ} (= \phi_{crit})$$

3.4 วิธีการดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

กระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ (i) กรณีที่ไม่พิจารณาการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง และ (ii) กรณีที่พิจารณาการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง ในกรณีที่ไม่มีพิจารณาการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างนั้น ทรายถม (bedding, haunching, และ backfill) และท่อจะสร้างพร้อมกันในเวลาเดียวกันมาก ในกรณีที่พิจารณาการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างการถล่มกลับของร่องนั้นจะดำเนินการเป็นขั้นๆ โดยการวาง bedding และท่อ, haunching, และ backfill ตามลำดับ ในต่อไปนี้จะอธิบายกระบวนการวิเคราะห์ของทั้งสองกรณี

3.4.1 กรณีไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง

ขั้นที่ 1: Geostatic (1 วินาที)

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก: ทุก element = 7.19 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$: ผิวบนสุด

ขั้นที่ 2: Trench excavation (1 วินาที)

เอา trench element ออก

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก: clay element = 7.19 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$: ผิวบนสุด

ขั้นที่ 3: วาง bedding, pipe, haunching, และ backfill ในสภาพแห้ง (1 วินาที)

วาง bedding, pipe, haunching, และ backfill element ในสภาพ strain free

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก: clay element = 7.19 kN/m^3

sand element = 17.7 kN/m^3

pipe element = 14.0 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$: ผิวบนสุด

ขั้นที่ 4: Trench flooding (เติมน้ำลงในร่องขุด) (1 วินาที)

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก: clay element = 7.19 kN/m^3

sand element = 11.4 kN/m^3

pipe element = 4.0 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$: ผิวบนสุด

ขอบเขตของร่องขุด

ขั้นที่ 5: Long-term consolidation of clay (200 ปี)

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$: ผิวบนสุด

ขอบเขตของร่องขุด

3.4.2 กรณีมีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง

ขั้นที่ 1: Geostatic (1 วินาที)

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

ทุก element = 7.19 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$:

ผิวบนสุด

ขั้นที่ 2: Trench excavation (1 วินาที)

เอา trench element ออก

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element = 7.19 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$:

ผิวบนสุด

ขั้นที่ 3: Place bedding and pipe in dry condition (1 วินาที)

วาง bedding และท่อในสภาพ strain free

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element = 7.19 kN/m^3

bedding element = 17.7 kN/m^3

pipe element = 14.0 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$:

ผิวบนสุด

ขั้นที่ 4: Place haunching in dry condition (1 วินาที)

วาง haunching ในสภาพ strain free

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element = 7.19 kN/m^3

bedding และ haunching element = 17.7 kN/m^3

pipe element = 14.0 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$:

ผิวบนสุด

Step 5: Place backfill in dry condition (1 วินาที)

วาง backfill ในสภาพ strain free

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element = 7.19 kN/m^3

sand element = 17.7 kN/m^3

pipe element = 14.0 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$:

ผิวบนสุด

Step 6: Trench flooding (fill trench with water) (1 sec)

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element = 7.19 kN/m^3

sand element = 11.4 kN/m^3

pipe element = 4.0 kN/m^3

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$:

ผิวบนสุด

ขอบเขตของร่องขุด

Step 7: Long-term consolidation of clay (200 years)

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure $\Delta u = 0$: ผิวบนสุด
ขอบเขตของร่องขุด

3.4.3 Dummy element

เมื่อทำการเอา trench element ออกเพื่อจำลองการขุดร่องขุดนั้น node ด้านนอก (node ที่อยู่บน sand/clay interface) จะเคลื่อนตัวไปกับการเสียรูปของ mesh โดยที่ node ด้านในจะไม่มีเคลื่อนที่ เนื่องจากกำหนดให้มีสภาพ inactive กรณีเช่นนี้อาจจะทำให้เกิดปัญหาในการคำนวณ (convergence problem) เมื่อกำหนดสภาพ element กลับเป็น active ในกรณีที่ element เหล่านั้นเกิดการเคลื่อนตัวอย่างมาก ปัญหานี้จะแก้ไขได้ด้วยการอนุญาตให้ node ภายในสามารถเคลื่อนตัวไปกับ node ภายนอกได้ก่อนจะกำหนดสภาพเป็น active โดยการกำหนด elastic element ที่มีค่า stiffness ต่ำมาก ให้กับ sand element ซึ่งเรียกว่า “dummy” element โดย dummy element นี้จะใช้ node เดียวกับของ sand element แต่จะอ่อนตัวมากพอที่จะทำให้ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ “dummy” element นี้จะมีสภาพ active ตลอดการวิเคราะห์เพื่อให้ node ภายในเคลื่อนตัวตาม node ภายนอกได้ กลยุทธ์ “dummy” element นี้ได้ใช้สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ การใช้ dummy element จะแก้ปัญหาคอนเวอร์เจนซ์ problem เมื่อกำหนดสภาพ sand element ให้ active เพื่อจำลองกระบวนการ backfilling

3.5 โปรแกรมการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ 16 กรณี ดังแสดงรายการในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 โปรแกรมการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

| กรณีการวิเคราะห์ | การจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง | การจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว | ความลึกของร่องขุด (ม) | ความกว้างของร่องขุด (ม) |
|--------------------|----------------------------|--|-----------------------|-------------------------|
| D20W15(nocon) | ไม่มี | ไม่มี | 2.0 | 1.5 |
| D20W15int(nocon) | ไม่มี | มี | 2.0 | 1.5 |
| D20W20(nocon) | ไม่มี | ไม่มี | 2.0 | 2.0 |
| D20W20int(nocon) | ไม่มี | มี | 2.0 | 2.0 |
| D30W15(nocon) | ไม่มี | ไม่มี | 3.0 | 1.5 |
| D30W15int(nocon) | ไม่มี | มี | 3.0 | 1.5 |
| D30w20(nocon) | ไม่มี | ไม่มี | 3.0 | 2.0 |
| D30W20int(nocon) | ไม่มี | มี | 3.0 | 2.0 |
| D20W15(withcon) | มี | ไม่มี | 2.0 | 1.5 |
| D20W15int(withcon) | มี | มี | 2.0 | 1.5 |
| D20W20(withcon) | มี | ไม่มี | 2.0 | 2.0 |

พฤติกรรมระยะยาวของท่อส่งน้ำชลประทานในพื้นที่ดินอ่อน

| | | | | |
|--------------------|----|-------|-----|-----|
| D20W20int(withcon) | มี | มี | 2.0 | 2.0 |
| D30W15(withcon) | มี | ไม่มี | 3.0 | 1.5 |
| D30W15int(withcon) | มี | มี | 3.0 | 1.5 |
| D30w20(withcon) | มี | ไม่มี | 3.0 | 2.0 |
| D30W20int(withcon) | มี | มี | 3.0 | 2.0 |