

การตรวจสอบ Soil Models โดยใช้โปรแกรม Numerical Element Test^{*}

อังคณา พันธุ์หล่อ¹⁾

¹⁾ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

Email: ank_pun@yahoo.com

บทนำ

บทความนี้จะนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของ Constitutive Soil Model โดยใช้โปรแกรม Numerical Element Test ซึ่งจะจำลองการทดสอบดินและคำนวณผลการทดสอบ เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการจริง ซึ่งจะช่วยยืนยันถึงความสามารถในนำ Constitutive Soil Model ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์งานด้านวิศวกรรมปฐพีต่อไป โดยในบทความนี้จะนำเสนอผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Numerical Element test สำหรับ Hypoplastic Soil Model และ Visco-hypoplastic Soil Model เพื่อเป็นตัวอย่าง

คำสำคัญ : Element Test, Hypoplastic soil model, Visco-hypoplastic soil model

^{*} รับผิดชอบฉบับเมื่อวันที่ 7 เมษายน 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 17 เมษายน 2549

Validation of Soil Models by using Numerical Element Test Programs*

Ankana Punlor¹⁾

¹⁾ Lecturer, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Rangsit University

Email: ank_pun@yahoo.com

ABSTRACT

This paper will show the validation of soil models by using the numerical element test programs which can simulate and analyze the laboratory tests. An agreement between the calculated results and the experimental results can evaluate the usefulness and the applicability of the soil models. As example, a back analysis of the experiments by using the numerical element test programs for hypoplastic and visco-hypoplastic soil models will be shown.

Keywords : Element Test, Hypoplastic soil model, Visco-hypoplastic soil model

*

Original manuscript submitted: April 7, 2006 and Final manuscript received: April 17, 2006

1. บทนำ

Constitutive Soil Models ต่างๆได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของดินประเภทต่างๆ และนำไปใช้ในการวิเคราะห์งานทางด้านวิศวกรรมปฐพี เนื่องจากความก้าวหน้าด้านคอมพิวเตอร์ส่งผลให้การวิเคราะห์ปัญหาในปัจจุบันอยู่ในรูปของการใช้โปรแกรม Finite Element โดยอาศัย Constitutive Soil Models ต่างๆที่มีในโปรแกรมเหล่านั้น ในกรณีที่มีการพัฒนา Constitutive Soil Model ขึ้นมาใหม่ ควรจะมีการตรวจสอบความถูกต้องและความสามารถในการคำนวณของ Constitutive Soil Model ดังกล่าว ก่อนที่จะนำไปใช้ในโปรแกรม Finite Element ต่างๆ ซึ่งหนึ่งในวิธีตรวจสอบสามารถทำได้โดยการสร้างโปรแกรม Numerical Element Test ขึ้นมา เพื่อใช้จำลองการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการจริง และนำผลการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ผลการเปรียบเทียบที่ได้จะช่วยยืนยันถึงความถูกต้องของการคำนวณโดยใช้ Constitutive Soil Model ดังกล่าว และช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของ Constitutive Soil Model ก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาจริงโดยอาศัยโปรแกรม Finite Element

2. ทฤษฎี

2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับ Element Test

Element test คือการทดสอบซึ่งตั้งสมมุติฐานให้ตัวอย่างดินมีความเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด (Homogeneous) ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างดินเมื่อรับแรงมีลักษณะเดียวกันโดยตลอด ในกรณีที่พิจารณาระดับปัญหาขนาดใหญ่ จะหมายถึงการนำมวลดินที่สามารถเป็นตัวแทนของดินทั้งหมดมาทดสอบ Element Test สามารถทำได้ทั้งในห้องปฏิบัติการจริง หรือจำลองการทดสอบโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และใช้หลักการคำนวณวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งเรียกว่า Numerical Element Test การทดสอบ (Element Test) ที่นิยมทำในห้องปฏิบัติการได้แก่ Oedometer Test และ Triaxial Test ซึ่งจะต้องมีการเตรียมตัวอย่างดินให้อยู่ในสภาพที่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีสภาพเริ่มต้นที่เหมือนกับสภาพจริงตามธรรมชาติให้มากที่สุด

การทำ Numerical Element Test ดังกล่าวข้างต้นเป็นการจำลองการทดสอบดินให้เหมือนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ กล่าวคือ กำหนดค่า Material Parameters และสภาพเริ่มต้นของตัวอย่างดิน รวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตของการทดสอบให้เหมือนการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการมากที่สุด จากนั้นจะคำนวณผลจากการทดสอบโดยอาศัยความสัมพันธ์ต่างๆที่มีใน Constitutive Soil Model ผลการคำนวณที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบจริง โดยความสอดคล้องกันของผลการทดสอบจะช่วยยืนยันถึงความถูกต้องและความสามารถนำไปใช้ได้ของ Constitutive Soil Model ตามขอบเขตที่กำหนดไว้ในกรณีที่ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างเด่นชัด แสดงว่า Constitutive Soil Model ไม่สมบูรณ์หรือมีข้อผิดพลาด อย่างไรก็ตามควรพิจารณาถึงข้อจำกัดของการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะเตรียมตัวอย่างดินให้ Homogeneous รวมทั้งข้อผิดพลาดต่างๆที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการ

ทดสอบ ดังนั้นจึงไม่ควรจะนำเพียงความแตกต่างของผลที่ได้มาตัดสินว่า Constitutive Soil Model ดังกล่าว ใช้ไม่ได้ การตรวจสอบในขั้นถัดไปโดยการนำ Constitutive Soil Model ไปใช้วิเคราะห์ปัญหาขนาดใหญ่โดยใช้โปรแกรม Finite Element จะช่วยในการตรวจสอบ Constitutive Soil Model ให้สมบูรณ์และน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

2.2 ข้อมูลพื้นฐานของ Constitutive Soil models

บทความนี้จะแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการทดสอบ Element Test จากห้องปฏิบัติการกับผลการคำนวณตรวจสอบโดยใช้โปรแกรม Numerical Element Test ของ Constitutive Soil Models สองแบบคือ Hypoplastic Soil Model และ Visco-hypoplastic Soil Model

- **Hypoplastic Soil Model** ถูกพัฒนาขึ้นมาครั้งแรกโดย Kolymbas (1977) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (Granular Soils) จากนั้นได้ถูกนำมาปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาขนาดใหญ่โดยอาศัยโปรแกรม Finite Element โดยให้ผลที่น่าเชื่อถือ

สมการหลักที่ใช้แสดงความสัมพันธ์มีลักษณะเป็น Non-linear rate type model ดังสมการ

$$\dot{\mathbf{T}}_s = f_b(\mathbf{L} : \mathbf{D} + f_d \mathbf{N} \|\mathbf{D}\|) \quad (1.1)$$

โดยที่ $\dot{\mathbf{T}}_s$ คือ Jaumann rate of $\mathbf{T}$ ($\mathbf{T}$ หมายถึง Effective Cauchy stress tensor) และ $\mathbf{D}$ คือ Euler's stretching tensor โดยที่ $\|\mathbf{D}\|$ คือ Euclidean norm of $\mathbf{D}$ ซึ่งเท่ากับ $\sqrt{\text{tr} \mathbf{D}^2}$ ส่วน Tensor $\mathbf{L}$ (fourth order) และ $\mathbf{N}$ (second order) กำหนดไว้ดังสมการที่ (1.2) และ (1.3) คือ

$$\mathbf{L} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{\text{tr}(\hat{\mathbf{T}} \cdot \hat{\mathbf{T}})} (F^2 \mathbf{I} + a^2 \hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{T}}) \quad (1.2)$$

$$\mathbf{N} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{aF}{\text{tr}(\hat{\mathbf{T}} \cdot \hat{\mathbf{T}})} (\hat{\mathbf{T}} + \hat{\mathbf{T}}^*) \quad (1.3)$$

เมื่อ $\hat{\mathbf{T}} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbf{T} / \text{tr} \mathbf{T}$ (ในที่นี้ $\text{tr} \mathbf{T} = T_{ii} = T_{11} + T_{22} + T_{33}$) และ $\hat{\mathbf{T}}^* \stackrel{\text{def}}{=} \hat{\mathbf{T}} - \frac{1}{3} \mathbf{I}$ โดยที่ $\mathbf{I}$ คือ Fourth order unit tensor สำหรับค่า Density Factor, f_d ในสมการ (1.1) คำนวณได้จาก

$$f_d \stackrel{\text{def}}{=} \left(\frac{e - e_d}{e_c - e_d} \right)^\alpha \quad (1.4)$$

ส่วนค่า Barotropy Factor, f_b มีค่าดังสมการ (1.5) โดยที่ค่า α และ β คือค่า Exponents

$$f_b \stackrel{\text{def}}{=} \frac{h_s}{n} \left(\frac{e_i}{e} \right)^\beta \frac{1 + e_i}{e_i} \left(\frac{3p_s}{h_s} \right)^{1-n} \left[3 + a^2 - a\sqrt{3} \left(\frac{e_{i0} - e_{d0}}{e_{c0} - e_{d0}} \right)^\alpha \right]^{-1} \quad (1.5)$$

เมื่อค่า Scalar Factor, a ขึ้นอยู่กับค่า Critical friction Angle (φ_c) ตามเงื่อนไขของ Matsuoka-Nakai คือ

$$a \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi_c)}{2\sqrt{2} \sin \varphi_c} \quad (1.6)$$

ค่า Scalar Factor, F ในสมการ (1.2) และ (1.3) หาได้จาก

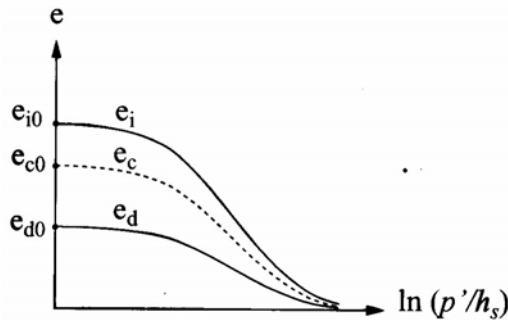
$$F \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{1}{8} \tan^2 \psi + \frac{2 - \tan^2 \psi}{2 + \sqrt{2} \tan \psi \cos 3\theta} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \tan \psi} \quad (1.7)$$

เมื่อ $\tan \psi \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{3} \|\hat{\mathbf{T}}^*\|$ และ $\cos 3\theta \stackrel{\text{def}}{=} -\sqrt{6} \frac{\text{tr}(\hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^*)}{[\text{tr}(\hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^*)]^{3/2}}$ โดยที่ค่า $F = 1$ ในกรณีที่ เป็น Cylindrical Symmetry และ $\|\hat{\mathbf{T}}^*\| = 0$

ค่า Limiting Void Ratio 3 ค่า (e_{i0} , e_{c0} และ e_{d0}) ขึ้นอยู่กับค่าความเค้น (p_s หรือ p') และเป็นไปตามสมการของ Bauer คือ

$$\frac{e_i}{e_{i0}} = \frac{e_c}{e_{c0}} = \frac{e_d}{e_{d0}} = \exp \left[- \left(\frac{3p_s}{h_s} \right)^n \right] \quad (1.8)$$

โดยค่า e_i คือค่า Maximum void ratio from isotropic compression ส่วนค่า e_c คือค่า Critical void ratio และ e_d คือค่า Minimum void ratio สมการที่ (1.8) สามารถอธิบายได้ในรูปของ Phase Diagram ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 Phase Diagram ของ Granular Materials

ค่า Parameters ที่ใช้ใน Hypoplastic soil model มีทั้งหมด 8 ค่า คือ ค่า Solid Hardness (h_s), ค่า Exponent (n), ค่า Critical friction Angle (φ_c), ค่า Limiting Void Ratio 3 ค่า (e_{i0} , e_{c0} และ e_{d0}), ค่า Exponents α และ β

- **Visco-hypoplastic Soil Model** ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Gudehus โดยอาศัยสมการพื้นฐานของ Hypoplastic Soil Model และแนวคิดบางส่วนจาก Visco-hypoplastic Soil Model ของ Niemunis (2003) เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของดินอ่อน (Soft Soils) โดยคิดรวม Viscous effects ของดิน เช่น Creep และ Relaxation และมีความสัมพันธ์ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (1.9) คือ

$$\dot{\mathbf{T}}_s = f_b(\mathbf{L} : \mathbf{D} + f_d \mathbf{N} f_v D_r) \quad (1.9)$$

เมื่อ D_r คือ Reference stretching rate ส่วน $\mathbf{L}$, $\mathbf{N}$, f_d และ f_b เป็นไปตามสมการที่ (1.2)-(1.4) ตามลำดับ สำหรับค่า Factor f_v ขึ้นอยู่กับค่า Overconsolidation Ratio, OCR ของดิน ในที่นี้กำหนดให้ $\text{OCR} = p_e/p_s$ ค่า f_v สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} f_v &= \exp\left(\frac{p_s/p_e - 1}{I_v}\right) \quad \text{for } p_s/p_e \geq \alpha_r \\ &= 0 \quad \text{for } p_s/p_e < \alpha_r \end{aligned} \quad (1.10)$$

ค่า Viscosity Index, I_v คือค่าที่เสนอโดย Leinenkugel (1976) และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.02 ถึง 0.06 ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ส่วนค่า Relaxation Factor, α_r กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.50 หรือหาได้จากผลการทดสอบ Relaxation ของดิน

ส่วนค่า p_e คือค่า Equivalent pressure ตามที่กำหนดโดย Horslev (1937) ซึ่งในที่นี้เป็นดังสมการ

$$p_e = \frac{1}{3} h_{sr} \left[-\ln\left(\frac{e f_T}{e_{c0}}\right) \right]^{1/n} \quad (1.11)$$

ค่า Reference solid hardness, h_{sr} มีความสัมพันธ์กับค่า $\mathbf{D}$ ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{h_s}{h_{sr}} &= 1 + I_v \ln\left(\frac{D}{D_r}\right) \quad \text{for } D \geq D_0 \\ &= \alpha_r \quad \text{for } D < D_0 \end{aligned} \quad (1.12)$$

ค่า D_0 คือค่า Lower bound โดย $D_0 = D_r \exp[(\alpha_r - 1)/I_v]$ ส่วนค่า f_T คือ

$$f_T = \left(\frac{e_{c0}}{e_{d0}}\right) - \left(\frac{e_{c0}}{e_{d0}} - 1\right) \left(\frac{-\lambda_\sigma}{k_c}\right)^m \quad (1.13)$$

เมื่อ

$$\lambda_\sigma = \frac{\hat{\mathbf{I}}_3}{\hat{\mathbf{I}}_2} = \frac{2\frac{1+2K^3}{1+2K} - 3(1+2K^2) + (1+2K)^2}{3(1+2K^2) - 3(1+2K)^2} \quad (1.14)$$

กำหนดให้ $K = \sigma'_2/\sigma'_1$ สำหรับกรณีที่เป็น Cylindrical Symmetry ส่วนค่า k_c หรือค่า Bauer's friction factor หาได้จากสมการ

$$k_c = \frac{1 - \sin^2 \varphi_c}{9 - \sin^2 \varphi_c} \quad (1.15)$$

และค่า m ในสมการ (1.13) คือ

$$m = \ln\left(\frac{1/e_{d0} - 1/e_{i0}}{1/e_{d0} - 1/e_{c0}}\right) \left[\ln\left(\frac{1}{9k_c}\right)\right]^{-1} \quad (1.16)$$

ค่า Parameters ทั้งหมดของ Visco-hypoplastic soil model มี 10 ค่า คือค่า Viscosity Index (I_v), ค่า Reference Solid Hardness (h_{sr}), ค่า Exponent (n), ค่า Critical friction Angle (φ_c), ค่า Limiting Void Ratios 3 ค่า (e_{i0} , e_{c0} และ e_{d0}), ค่า Exponents α_r , α และ β

รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับ Soil Models ทั้งสอง รวมทั้งการหาค่า Parameters ต่างๆ สามารถอ่านได้จาก (Niemunis, 2003), (Punlor, 2004), (Kolymbas, 2000) และ (Herle, 1997)

2.3 วิธีการสร้างโปรแกรม Numerical Element Test

โปรแกรม Numerical Element Test สามารถถูกสร้างขึ้นมาโดยอาศัยสมการพื้นฐานของ Soil Model นั้นๆ ตัวอย่างเช่น สำหรับ Visco-hypoplastic Soil Model จะนำสมการที่ (1.9)-(1.16) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1 มาประกอบการคำนวณ โดยเลือกใช้ Numerical methods ที่เหมาะสมในการคำนวณหาคำตอบ

ในการใช้งานโปรแกรม เมื่อผู้ใช้เลือกวิธีการทดสอบและป้อนค่า Parameters ที่จำเป็นจำนวน 10 ค่า รวมทั้งค่าสภาพเริ่มต้น (Initial state) ของดิน เช่น ค่าหน่วยแรงเริ่มต้น (Initial effective stresses) และค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ของดิน โปรแกรมจะจำลองการทดสอบขึ้นมา และคำนวณผลที่ได้จากการทดสอบโดยอัตโนมัติ

Type of test	Stress rate	Strain rate
Isotropic CRSN compression		$-\dot{\epsilon}_1 = -\dot{\epsilon}_2 = -\dot{\epsilon}_3$
Isotropic CRSN decompression		$+\dot{\epsilon}_1 = +\dot{\epsilon}_2 = +\dot{\epsilon}_3$
Oedometric CRSN compression		$-\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_3 = 0$
Oedometric CRSN decompression		$+\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_3 = 0$
Triaxial compression	$\dot{\sigma}'_2 = \dot{\sigma}'_3 = 0$	$-\dot{\epsilon}_1$
Triaxial extension	$\dot{\sigma}'_2 = \dot{\sigma}'_3 = 0$	$+\dot{\epsilon}_1$
Creep	$\dot{\sigma}'_1 = \dot{\sigma}'_2 = \dot{\sigma}'_3 = 0$	
Relaxation		$\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_3 = 0$

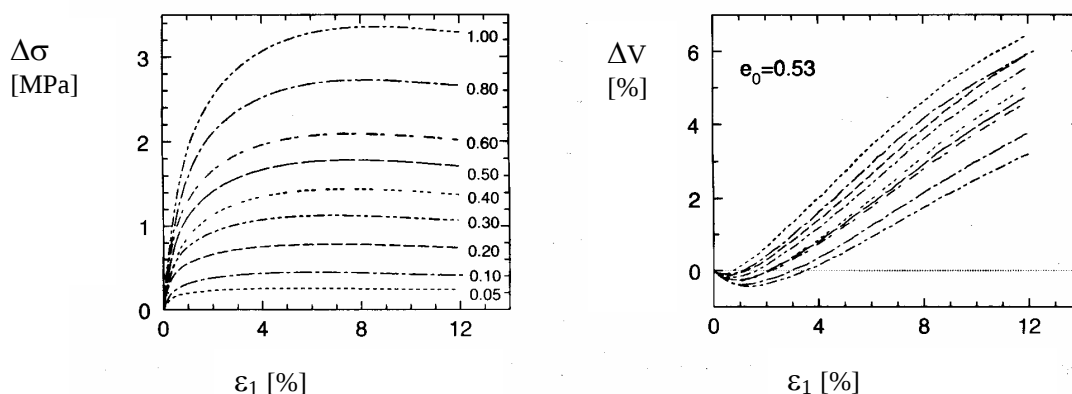
ตารางที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการทดสอบประเภทต่างๆ (Punlor, 2004)

3. ตัวอย่างผลการคำนวณ

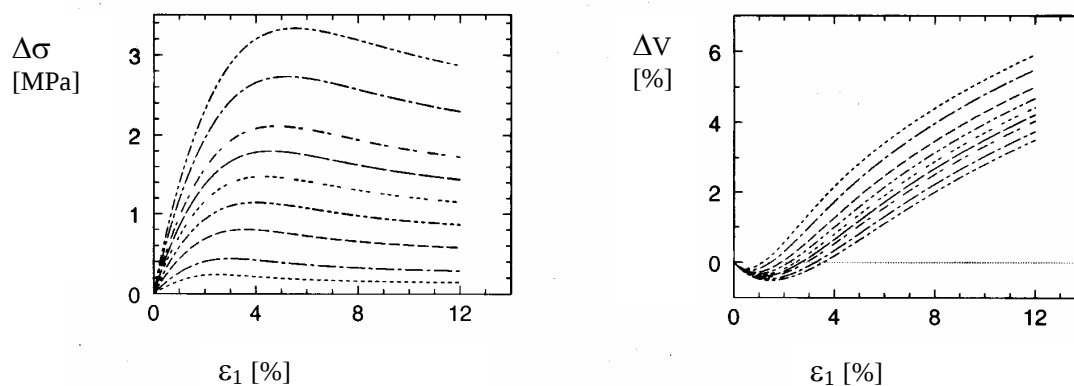
3.1 Hypoplastic soil model

Herle ได้สร้างโปรแกรม Numerical element test สำหรับตรวจสอบ Hypoplastic soil model ขึ้นมา และทำการคำนวณเปรียบเทียบผลกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น การทดสอบ Triaxial compression โดยใช้ Karlsruhe sand ซึ่งมีค่า Parameters ต่างๆคือ $h_s = 5800$ MPa,

$n = 0.28$, $\varphi_c = 30^\circ$, $e_{i0} = 1.00$, $e_{c0} = 0.84$ และ $e_{d0} = 0.53$, ค่า Exponents $\alpha = 0.13$ และ $\beta = 1.05$ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณ (เส้นประ) และจากการทดสอบ (เส้นทึบ) แสดงได้ดังรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 ผลการทดสอบ Triaxial compression ของ Karlsruhe-sand จากห้องปฏิบัติการ โดยค่าตัวเลขที่เส้นกราฟคือค่า Confining pressure(MPa) (Herle, 1997)



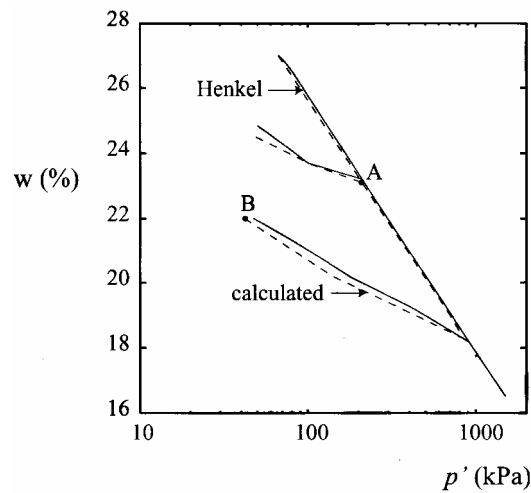
รูปที่ 3 ผลการคำนวณ Triaxial compression ของ Karlsruhe-sand โดยใช้โปรแกรม Numerical element test (Herle, 1997)

3.2 Visco-hypoplastic soil model

ในที่นี้จะนำเสนอผลการคำนวณซึ่งนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของ Henkel (1956) และ Krieg (2000) โดยใช้โปรแกรมซึ่งถูกสร้างขึ้นโดย Punlor (Punlor, 2004)

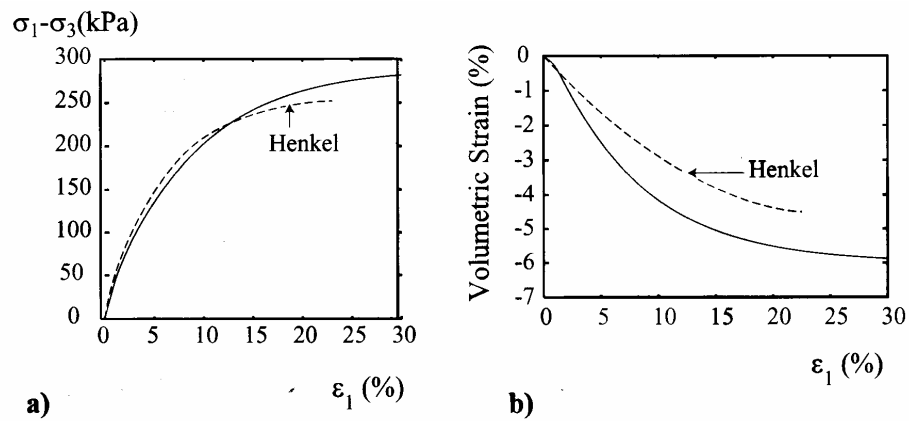
3.2.1 การทดสอบ Isotropic compression และ Drained triaxial compression ของ Henkel ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณโดยอาศัยโปรแกรม Numerical Element Test โดยตัวอย่างดินเป็น Weald clay ซึ่งมีค่า Parameters ต่างๆ คือ $I_v = 0.03$, $h_{sr} = 679$ kPa, $n = 0.15$, $\varphi_c = 24^\circ$, $e_{i0} = 1.69$, $e_{c0} = 1.50$ และ $e_{d0} =$

1.25, ค่า Exponents $\alpha_r = 0.50$, $\alpha = 0.15$ และ $\beta = 1.20$ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณ (เส้นประ) และจากการทดสอบ (เส้นทึบ) แสดงได้ดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 ผลการทดสอบ Isotropic Compression

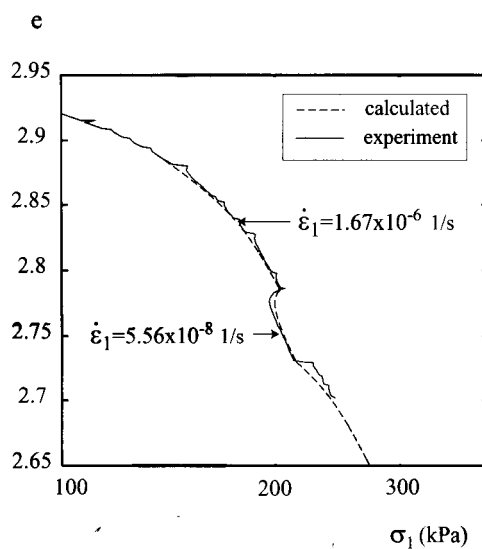
จากการคำนวณ (calculated) และจากการทดสอบ (Henkel) (Punlor, 2004)



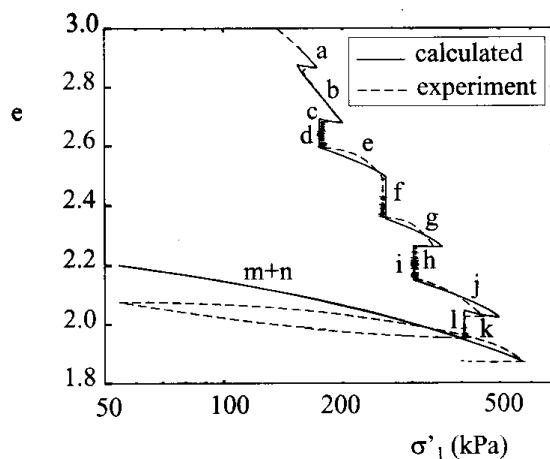
รูปที่ 5 ผลการทดสอบ Drained triaxial compression

จากการคำนวณ (calculated) และจากการทดสอบ (Henkel) (Punlor, 2004)

3.2.2 การทดสอบ Odometric compression สองแบบของ Krieg ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ตรวจสอบ โดยตัวอย่างดินเป็น Organic clayey silt ซึ่งมีค่า Parameters ต่างๆคือ $I_v = 0.03$, $h_{sr} = 317$ kPa, $n = 0.12$, $\varphi_c = 48^\circ$, $e_{i0} = 3.72$, $e_{c0} = 5.95$ และ $e_{d0} = 6.84$, ค่า Exponents $\alpha_r = 0.50$, $\alpha = 0.15$ และ $\beta = 1.20$ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและจากการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 ผลการทดสอบ Odometric compression with a constant strain rate
จากการคำนวณ (calculated) และจากการทดสอบ (experiment) (Punlor, 2004)



รูปที่ 7 ผลการทดสอบ Odometric compression with creep and relaxation
จากการคำนวณ (calculated) และจากการทดสอบ (experiment) (Punlor, 2004)

4. บทสรุป

จากการเปรียบเทียบผลของ Element Test ในห้องปฏิบัติการกับผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Numerical element test สำหรับ Hypoplastic Soil Model และ Visco-hypoplastic Soil Model พบว่ามีความใกล้เคียงกัน ยกเว้นช่วง Unloading และ Reloading ของการทดสอบ Odometric compression ในรูปที่ 7 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด ในกรณีนี้สามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มการคำนวณ Intergranular strain ซึ่งถูกเสนอโดย Niemunis และ Herle (Niemunis, 2003) เข้าไปใน Soil Model เพื่อช่วยแก้ปัญหาการคำนวณซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่ส่ออย่างทันที (Abrupt change) ของความเค้นหรือความเครียด (Punlor, 2004)

ประโยชน์ของการสร้างโปรแกรม Numerical Element Test ขึ้นมา นอกเหนือจากการนำไปใช้คำนวณผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการจริง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและน่าเชื่อถือของ Soil Model ยังสามารถนำไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของดินเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่า Parameters ต่างๆ รวมทั้งสภาพเริ่มต้นอื่นๆ ตลอดจนผลจากการรับแรงในลักษณะต่างๆกัน ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะช่วยพัฒนาแนวคิดในการปรับปรุง Soil Model ให้ดีขึ้นต่อไป ทั้งในแง่ของความแม่นยำของผลการคำนวณและขอบเขตการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- A. Niemunis. 2003. **Extended hypoplastic models for soils**. No. 163. University of Bochum, Germany.
- A. Punlor. 2004. **Numerical Modeling of the Visco-Plastic Behaviour of Soft Soils**. PhD thesis No. 163. University of Karlsruhe, Germany.
- D.J. Henkel. 1956. The effect of overconsolidation on the behaviour of clays during shear. **Geotechnique**. 6: 139-149.
- D. Kolymbas. 1988. **Eine Konstitutive Theorie fuer Boeden und andere koernige Stoffe**. Habilitation No. 109. University of Karlsruhe, Germany.
- D. Kolymbas. 2000. **Introduction to Hypoplasticity**. A.A. Balkema.
- G. Gudehus, 1985. Requirements for constitutive relations for soils. **Mechanics of Geomaterials**.
- I. Herle. 1997. **Hypoplastizitaet und Granulometrie einfacher Korngerueste**. PhD thesis No. 142. University of Karlsruhe, Germany.
- S. Krieg. 2000. **Viskoses Verhalten von Mudden, Seeton und Klei**. PhD thesis No. 150. University of Karlsruhe, Germany.