统一硬化模型在复杂加载条件下的应用

侯 伟 姚仰平

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院,北京 100191)

摘 要:超固结土模型是能够描述土的剪缩、剪胀、硬化、软化和应力路径依赖性等特性的简单、实用的模型,与剑桥模型相比,仅增加了一个材料参数(Hvorslev 面斜率).采用基于 SMP(Specialy Mobilized Plane)强度准则的变换应力方法对模型实现了三维化.在模型中应用加卸载准则来反映复杂加载条件下土体的应力应变特性,模拟了随着循环次数的增加,土体会逐渐变硬,剪切模量逐渐增大、孔隙比减小、超固结程度不断增大等趋势.由循环加载以及真三轴试验数据和预测结果的基本吻合表明了模型能够合理地反映复杂加载条件下土的变形特性.

关 键 词:超固结土;硬化模型;三维化;复杂加载

中图分类号:TU 411.1

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2008)09-1105-04

Application of unified hardening model under complex loading

Hou Wei Yao Yangping

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The overconsolidated clay model, a simple and applied model, can describe many characteristics of overconsolidated clays well, including stress-strain relationships, stress dilatancy, strain hardening and softening, and path dependency behaviour. Compared with the Cam-clay model, the overconsolidated model only requires one additional soil parameter which is the slope of the Hvorslev envelope. Based on the specialy mobilezed plane(SMP) criterion and the corresponding transformed stress tensors, the model can be applied conveniently to three-dimensional complex stress state. By using the loading criteria, the model can be used to describe that the hardening degree, the shear modulus and the overconsolidated degree increase, and the void ratio decreases with increasing cyclic times under the complex loading. The comparisons between predicted results and test data from the cyclic loading and true triaxial tests show that the model can rationally exhibit the soil behaviors under the complex loading.

Key words: overconsolidated clays; hardening model; three-dimensional; complex loading

地震、爆破、移动荷载(火车、汽车和地铁)、风力以及海浪压力等动力荷载会对土体的强度和变形产生巨大的影响,所以对土体动力响应的探讨一直是国内外土力学界关注的研究课题.Mroz 建立了多面模型来描述土体在循环加载条件下的变性特性[1].Dafalias 建立的双面模型是通过边界面上对偶应力点处的塑性模量来计算当前应力点处的变形[2].Hashiguchi 采用次加载面的概念来建立土的弹塑性本构模型[3].Asaoka 等将下加载面的概念与剑桥模型相结合,用于描述超固结土的应力应变特性[4-5].Nakai 等将下加载面的概念应用于 t_{ij} 模型[6],使之能够较好地反映土体在复杂应力路径下的三维变形性状.姚仰平等提出的超固结土模型[7]是以修正剑桥模型为理论基

收稿日期:2007-09-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10672010);国家基础研究计划资助项目(2007CB714203)

作者简介:侯 伟(1969—),女,陕西潼关人,博士生,houwei@ce.buaa.edu.cn.

础,在下加载面思想框架下,通过采用统一硬化参数建立的能够描述土体的剪缩、剪胀、硬化、软化和应力路径依赖性等特性的简单、合理的弹塑性模型. 同时,采用基于 SMP(Specialy Mobilized Plane)强度准则变换应力张量对模型实现了三维化. 本文采用该模型模拟了复杂加载条件对土的强度、超固结程度以及变形的影响,并对循环加载试验数据以及真三轴复杂应力路径条件下的试验结果进行了合理预测.

1 统一硬化模型的特性

1.1 统一硬化模型

为了反映超固结土在整个应力变化过程中超固结程度会逐渐减弱的趋势,采用参考屈服面和当前屈服面来描述[7]. 参考屈服面为参考应力点 B 所在的屈服面,它是以塑性体应变 ε_v^p 为硬化参数. 如图 1 所示.

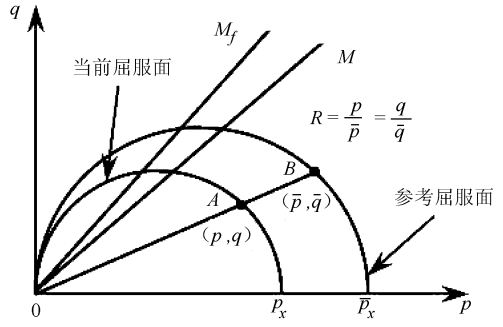


图 1 当前屈服面和参考屈服面

当前屈服面以统一硬化参数 H 为硬化参数(详见后述). 点 A 为当前应力点,参考应力点 B 为参考屈服面上与当前应力点 A 等应力比条件下的对应点. 参考屈服面的表达式为

$$\bar{f}=\ln\frac{\bar{p}}{\bar{p}_0}+\ln\left[1+\frac{\bar{q}^2}{M^2\bar{p}^2}\right]-\frac{1}{c_p}\varepsilon_v^p=0 \quad (1)$$

式中,$\bar{p}$ 为参考应力点上的平均主应力;$\bar{q}$ 为该点上的广义剪应力;$c_p=(\lambda-\kappa)/(1+e_0)$;$\lambda$ 为等向压缩线的斜率;κ 为等向回弹线的斜率;e_0 为初始孔隙比;M 为特征状态和临界状态应力比;$\bar{p}_0$ 为前期固结压力.

当前屈服面以及相应的塑性势面可统一表示为

$$f=\ln\frac{p}{p_0}+\ln\left[1+\frac{q^2}{M^2p^2}\right]-\frac{1}{c_p}H=0 \quad (2)$$

式中,p 为当前应力点上的平均主应力;q 为该点上的广义剪应力;p_0 为相应的初始平均主应力;硬化参数 H 可表示为

$$H=\int \mathrm{d}H=\int\frac{M_f^4-\eta^4}{M^4-\eta^4}\mathrm{d}\varepsilon_v^p \quad (3)$$

其中

$$\left.\begin{aligned}M_f&=\left(\frac{1}{R}-1\right)(M-M_h)+M\\R&=\frac{p}{\bar{p}_0}\left(1+\frac{\eta^2}{M^2}\right)\exp\left(-\frac{\varepsilon_v^p}{c_p}\right)\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

式中,M_f 为潜在强度;M_h 为 Hvorslev 面的斜率;R 为超固结参数.

1.2 加卸载准则

在复杂应力路径条件下,采用加卸载准则来区分软化和卸载状态[6]. 软化时屈服面收缩,土为弹塑性变形,而卸载时屈服面位置不变,土体表现为弹性变形.

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial\tilde{\sigma}_{ij}}\boldsymbol{D}^e_{ijkl}\mathrm{d}\varepsilon_{kl}>0 \quad &\text{加载}\\\frac{\partial f}{\partial\tilde{\sigma}_{ij}}\boldsymbol{D}^e_{ijkl}\mathrm{d}\varepsilon_{kl}=0 \quad &\text{中性变载}\\\frac{\partial f}{\partial\tilde{\sigma}_{ij}}\boldsymbol{D}^e_{ijkl}\mathrm{d}\varepsilon_{kl}<0 \quad &\text{卸载}\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

式中,$\boldsymbol{D}^e_{ijkl}$ 为弹性刚度矩阵.

1.3 基于 SMP 准则的变换应力方法

为了准确地描述土的三维应力状态下的变形和强度特性,本文基于 SMP 强度准则,将一般应力空间的应力张量变换成变换应力空间的应力张量[8-9].

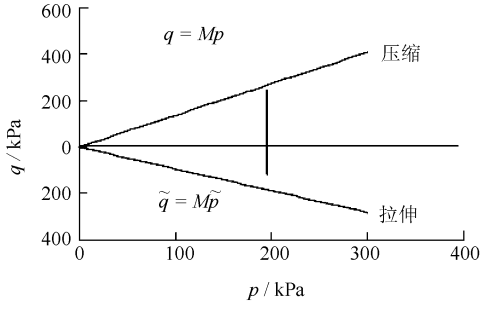
$$\left.\begin{aligned}\tilde{\sigma}_{ij}&=p\delta_{ij}+\frac{q_c}{q}(\sigma_{ij}-p\delta_{ij})\\q_c&=\frac{2I_1}{3\sqrt{(I_1I_2-I_3)/(I_1I_2-9I_3)}-1}\\q&=\sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_{ij}-p\delta_{ij})(\sigma_{ij}-p\delta_{ij})}\\p&=\frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij}\end{aligned}\right\} \quad (6)$$

式中,I_1,I_2 和 I_3 分别为第 1、第 2 和第 3 应力不变量.

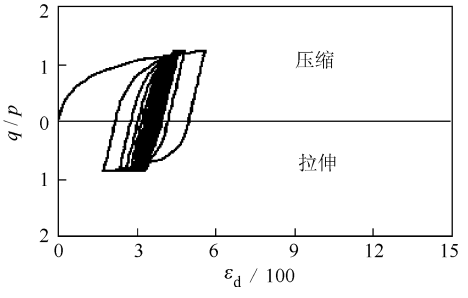
2 复杂加载条件对土特性的影响

图 2 为平均主应力 $p=196$ kPa 三轴压缩和拉伸条件下加卸载循环的预测结果(模型参数见第 3 节中的表 1 所示). 由图 2 可见,在循环加载初期,每一加载循环所产生的变形较大,孔隙比减小得很快;而多次循环之后,每一加载循环所产生的变形变小,孔隙比的变化也相应减小;当循环次数达到一定值时,每次循环产生的应变增量趋于 0,孔隙比也趋于某一稳定的值;由于压缩曲线距离正常固结线越来越远,相当于超固结程度不断增大,即超固结参数 R 逐渐变小;随着循环次数的增多,R 的变化幅度逐渐减小并趋于稳定. 综上

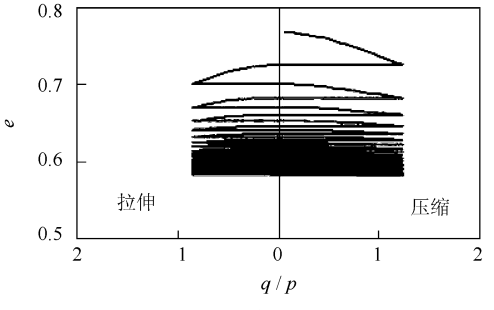
所述,随着循环次数的增加,对应相同的应力状态,每次循环产生的应变增量逐渐减小,表现为卸载再加载曲线逐步密集,土变得逐渐密实并趋于某一稳定的值.



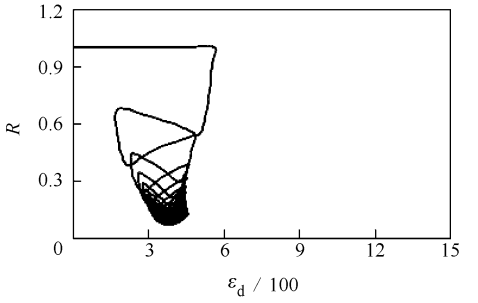
a　应力路径



b　剪应变 ε_d 和 q/p 的关系曲线



c　q/p 和孔隙比 e 的关系曲线



d　ε_d 和 R 的关系曲线

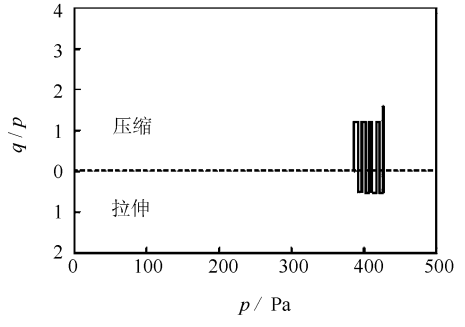
图 2　$p=196$ kPa 三轴压缩条件下预测结果

3　试验预测

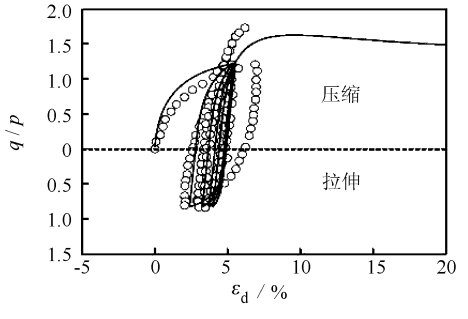
采用 Nakai 的饱和 Fujinomori 粘土排水三轴循环加载试验数据[6]来验证模型的有效性(见图 3),模型参数见表 1. 由图 3 可见,模型能够较好地模拟循环加载条件下的累积变形,即随着循环次数的增加,每次循环产生的应变增量逐渐减小,应力应变曲线逐步密集并趋于稳定的特性.

表 1　模型材料参数

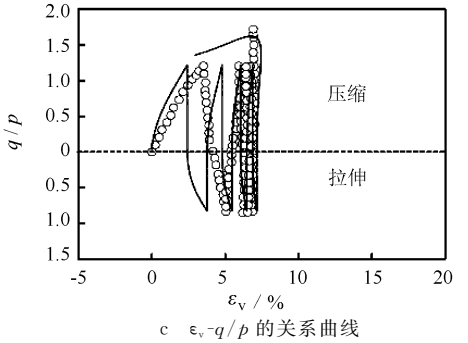
参数	λ	κ	v	N	e_0	M_h	M
数值	0.09	0.02	0.2	0.83	0.768	1.14	1.36



a　应力路径



b　ε_d-q/p 的关系曲线



c　ε_v-q/p 的关系曲线

图 3　$p=392$ kPa 等幅循环加载预测与试验结果比较

采用超固结土模型预测平均主应力 $p=98$ kPa真三轴试验,模型参数见表 1. 在 π 平面上的应力路径为 $O-A-B-O-C-D-O-E$(见图 4),OA 为 σ_y 为大主应力三轴压缩试验的应力路径;AB 为沿着 $\sigma_y/\sigma_z=\sigma_1/\sigma_3=3$ 路径加载到三轴拉伸状态;BO 为大主应力 σ_y 和中主应力 σ_z 相等并同时减小的弹性卸载路径;OC 为大主应力 σ_x 三轴压缩应力路径;CD 为沿着 $\sigma_x/\sigma_y=\sigma_1/\sigma_3=3$ 路径加载到大主应力 σ_x 和中主应力 σ_z 相等的三轴拉伸状态;DO 为弹性卸载路径;最后沿着大主应力为 σ_z 的三轴压缩(OE)路径剪切至破坏. 图 5 为试验结果与预测曲线的比较,虽然 OA,OC 和 OE 对应相同的应力路径,但由于它们的初始超固结度依次增大,它们在相同应力状态下产生

的变形依次减小. 同理,在相同应力状态条件下,具有相同路径的 CD 阶段所产生的变形小于 AB 阶段的变形.

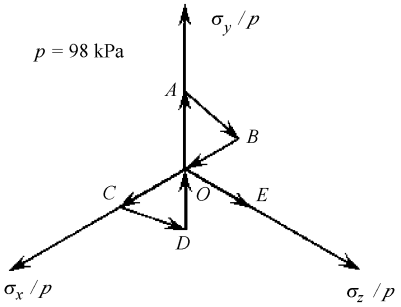
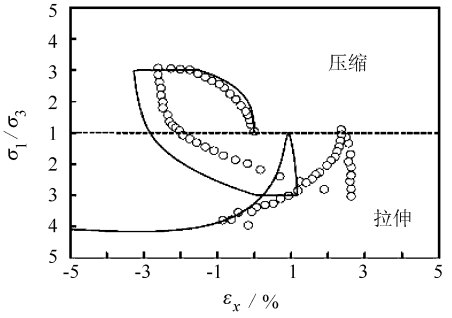
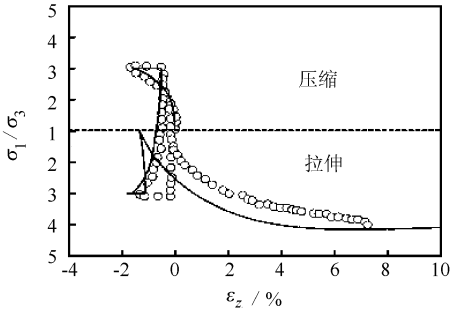


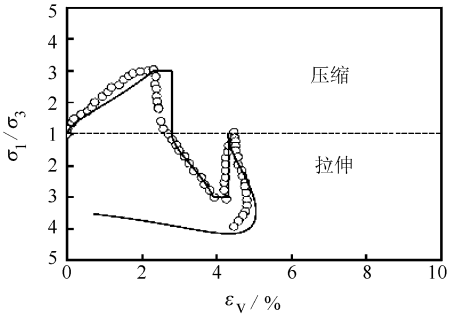
图 4 π 平面上的应力路径



a x 方向应变 ε_x-σ_1/σ_3 的关系曲线



b z 方向应变 ε_z-σ_1/σ_3 的关系曲线



c ε_v-σ_1/σ_3 的关系曲线

图 5 真三轴试验与预测结果比较

4 结 论

超固结土模型是以修正剑桥模型为理论基础,在下加载面思想框架下,通过采用统一硬化参数建立的能够描述土体的剪缩、剪胀、硬化、软化和应力路径依赖性等特性的简单、合理的弹塑性模型. 同时,采用基于 SMP 强度准则变换应力张量对模型实现了三维化. 本文采用该模型模拟了复杂加载条件下土的如下变形特性:随着循环次数的增加,对应相同的应力状态,超固结程度逐渐增加,每次循环所产生的应变增量逐渐减小,应力应变曲线逐步密集,土变得逐渐密实并趋于某一稳定的值的特性. 通过对复杂应力路径试验数据的合理预测表明了模型能够较好地描述循环加载以及真三轴复杂应力路径条件下土的变形特性.

参考文献(References)

[1] Mroz Z, Norris V A, Zienkiewicz O C. Application of an anisotropic hardening model in the analysis of elasto-plastic deformation of soils[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 1-34

[2] Dafalias Y F. Bounding surface plasticity Ⅰ: mathematical formulation and hypoplasticity[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1986, 112(9): 966-985

[3] Hashiguchi K. Subloading surface model in unconventional plasticity[J]. Int J of Solids and Structures, 1989, (25): 917-945

[4] Asaoka A, Nakano M, Noda T. Elastoplastic behavior of structured overconsolidated soils[J]. J Appl Mech, JSCE, 2000, (3): 335-342

[5] Asaoka A, Nakano M, Noda T, et al. Delayed compression / consolidation of naturally clay due to degradation of soil structure[J]. Soils and Foundation, 2000, 40(3): 75-85

[6] Nakai T, Hinokio M. A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters[J]. Soils and Foundations, 2004, 44 (2): 53-70

[7] Yao Y P, Hou W, Zhou A N. A constitutive model for overconsolidated clays based on the Hvorslev envelope[J]. Science in China, 2008, 51(2): 179-191

[8] Yao Y P, Luo T, Sun D A, el al. A simple 3-D constitutive model for both clay and sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 240-246

[9] Matsuoka H, Yao Y P, Sun D A. The cam-clay models revised by the SMP criterion[J]. Soils and Foundations, 1999, 39(1): 81-95

(责任编辑:张 嵘)