

DOI : 10.11779/CJGE201402004

# 非饱和土耦合本构模型的三维化

马田田<sup>1,2</sup>, 韦昌富<sup>1,2,3</sup>, 颜荣涛<sup>3</sup>, 魏厚振<sup>1,2</sup>, 田慧会<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;  
3. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 非饱和土本构关系模型通常是建立在修正剑桥模型的基础上, 并采用了广义的 von Mises 准则, 以描述非饱和土在一般应力状态下的本构行为。该准则假设在  $\pi$  平面上屈服面是个圆形, 高估了土体除三轴压缩以外的强度, 在平面应变中也会错误估计中主应力比。空间滑动面破坏准则 (SMP) 考虑了第三应力不变量的影响, 屈服面在  $\pi$  平面上为曲边三角形, 可以较好地描述一般应力状态下土体的剪切屈服和破坏特性。采用变换应力方法, 将 SMP 准则应用到最近建立的非饱和土耦合本构模型中使其合理的三维化, 能够有效地将模型从轴对称应力状态扩展至一般应力状态。根据与试验结果对比表明, 改进后的模型在不增加任何参数的情况下, 能够较好地模拟非饱和土在三轴伸长等一般应力状态下的行为特性。

**关键词:** 非饱和土; 耦合本构模型; 空间滑动面破坏准则; 变换应力; 三维化

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)02-0295-06

**作者简介:** 马田田(1986-), 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学方面的研究工作。E-mail: matiantian050@sina.com。

## SMP-based representation of a constitutive model for unsaturated soils

MA Tian-tian<sup>1,2</sup>, WEI Chang-fu<sup>1,2,3</sup>, YAN Rong-tao<sup>3</sup>, WEI Hou-zhen<sup>1,2</sup>, TIAN Hui-hui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. College of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The constitutive models for unsaturated soils are usually developed within the framework of the modified Cam-clay model, and with the generalized von Mises criterion, they are used to describe the constitutive behaviors of the unsaturated soils at general stress states. In using the generalized von Mises criterion, the yield surface is assumed to be a circle in the  $\pi$  plane. This assumption overestimates the strength of soils except that under the triaxial compression condition, yielding an incorrect estimation for the ratio of intermediate principal stress. The spatially mobilized plane (SMP) criterion takes into account the effect of the third stress invariant, and the shape of the resulted yield surface is a curved triangle in the  $\pi$  plane, so that the resulted constitutive model is capable of describing very well the yielding and failure of soils. In this paper, a newly developed constitutive model for unsaturated soils, which is developed in the triaxial stress state, is generalized to the general stress space based on the SMP criterion. Comparisons between the model simulations and experimental results show that the new model can describe very well the behaviors of unsaturated soils without introducing any new parameters.

**Key words:** unsaturated soil; coupling constitutive model; SMP criterion; transformed stress; three-dimensional stress

## 0 引言

非饱和土的本构关系模型通常建立在修正的剑桥模型基础上, 并采用三轴压缩试验来验证, 所需的强度指标也是在这种轴对称应力状态下获得。然而土体的一般受力状态并非如此, 且这种受力状态无法考虑中主应力的影响; 由此得到的强度指标并不能直接反映土体真实的力学特性。如在平面应变状态时的内摩擦角就大于三轴压缩状态的内摩擦角。在实际工程的

平面应变问题的分析计算中, 采用三轴压缩试验得到的抗剪强度参数(黏聚力和摩擦角)是偏保守的<sup>[1]</sup>。然而三轴压缩试验是目前最常用的试验手段; 因此, 有必要建立一种本构模型, 能够采用常规的三轴试验得到的参数来反映土体在一般应力状态下的力学特性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072255, 11302243); 广西自然科学基金重点项目(2011GXNSFE018004)  
收稿日期: 2013-04-11

原非饱和土耦合本构模型<sup>[2]</sup>是基于修正剑桥模型建立的,采用广义von Mises准则。屈服面在 $\pi$ 平面上是个圆形,并且认为中间主应力与其他两个主应力对土体的影响相同,这样会过高地估计了土体的强度。但是试验数据表明,土体的抗拉强度小于其抗压强度,非饱和土也不例外。当应力较小时,正常固结黏土或轻超固结黏土的屈服面在 $\pi$ 平面上接近圆形;但是当应力较大时,接近莫尔-库仑破坏准则或SMP(空间滑动屈服面准则)破坏准则。Matsuoka等<sup>[3]</sup>基于空间准滑动面(spatial mobilization plane)的概念提出了SMP准则,能够同时考虑3个剪应力的共同作用,反映了中主应力的影响,可以有效地描述砂土在一般应力状态下的力学特性,目前得到了广泛的应用<sup>[1,4]</sup>。刘金龙等<sup>[5]</sup>基于砂土的SMP强度准则,采用数值分析证明了不同中主应力系数对砂土抗剪强度有显著的影响,尤其是在平面应变状态。另外SMP准则<sup>[6]</sup>考虑了第三应力不变量的影响,在 $\pi$ 平面上屈服面为曲边三角形,能较好地描述土体的破坏。Wroth等<sup>[7]</sup>指出,将破坏准则如SMP<sup>[3]</sup>和Lade等<sup>[8]</sup>应用于剑桥模型中,会使模型更具实用性。因此为了在 $\pi$ 平面上反映应力洛德角 $\theta$ 对土体屈服及变形的影响,很多学者对剑桥模型进行了修正,引入其他的破坏准则,使其得到合理的三维化<sup>[9]</sup>,实现了临界状态模型和破坏准则的有机结合。

本文将SMP准则应用在原非饱和土的耦合本构模型<sup>[2]</sup>中,利用变换应力法<sup>[10]</sup>将所建模型与SMP准则结合起来从而将三轴试验的轴对称应力状态扩展至一般应力状态。利用变换应力方法三维化后的非饱和土本构模型,其屈服函数形式、应力不变量形式、应变空间、模型参数和原模型均相同;参数在一般应力条件下不需要再重新标定。当描述三轴压缩状态时,三维化后的修正模型和原模型完全相同。试验证明,修正后的非饱和土耦合本构模型在不增加任何参数的情况下,能较好地反映非饱和土在三轴伸长等一般应力状态下的强度与变形特性。

## 1 SMP(空间滑动屈服面)破坏准则

SMP破坏准则认为,土颗粒在剪应力作用下的运动状态是由摩擦定律控制的,即土颗粒滑动最可能发生在剪应力与正应力之比达到最大的平面,即空间滑动面(SMP面)。在三向主应力状态中,当由3个主应力所形成的3个剪应力达到某一组合时土体发生剪切破坏。SMP准则包含了3个应力不变量对土体强度的影响,是较为严密的屈服准则,可表示为

$$\frac{\tau_{\text{SMP}}}{\sigma_{\text{SMP}}} = \sqrt{\frac{I_1 I_2 - 9I_3}{9I_3}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \tan \phi_{\text{mob}} = \text{const}, \quad (1)$$

式中, $\tau_{\text{SMP}}, \sigma_{\text{SMP}}$ 分别为SMP(空间滑动面)上的剪应力和垂直应力, $I_1, I_2, I_3$ 分别为应力张量的第一、第二、第三不变量。 $\phi_{\text{mob}}$ 为三轴压缩条件下的发挥角, $\phi_{\text{mob}} = \arcsin \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)}$ ,并随着剪切从0到 $\varphi$ (内摩擦角)之间变化。

图1为SMP准则在 $\pi$ 平面上的形状,在主应力空间中满足外凸、连续、光滑的条件。从图上可以看出, $\pi$ 平面上的SMP准则在应力较小( $\phi_{\text{mob}}$ 小)时接近圆形,在应力较大时逐渐过渡为SMP破坏线( $\phi_{\text{mob}} = \varphi$ )。当平均应力 $p$ 相同时,三轴压缩的剪应力 $q$ 比三轴伸长的 $q$ 要大。

该准则在主应力空间中是个曲边三角锥形,比较符合常用的Mohr-Coulomb准则,并且在顶点上是圆滑的,修正了 $\pi$ 平面上Mohr-Coulomb强度准则的奇异性,同时改进了Drucker-Prager准则的拉压强度相等的特性。试验证明,土体的屈服线通常与SMP准则很相似,能够合理地描述土体在三维应力条件下的强度特性,是使用较为广泛的准则之一。本文采用SMP准则作为非饱和土本构模型的强度准则,将原毛细滞回与塑性变形耦合的本构模型扩展至一般应力状态中。

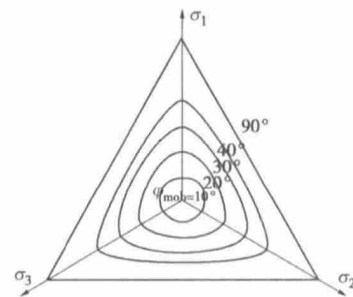


图1  $\pi$ 平面上SMP准则的形状

Fig. 1 SMP criterion in  $\pi$  plane

## 2 基于SMP破坏准则的变换应力

本构模型的三维化是指将模型从三轴压缩应力状态扩展到一般应力状态,为了实现这一目的,Matsuoka等<sup>[9]</sup>提出了变换应力(transformed stress)方法。该方法是指建立一个变换应力空间,采用数学方法将原来应力空间中不规则的曲面(曲边三角锥)转换到变换应力空间中较规则的曲面(圆锥)。目前变换应力方法已广泛应用于多种岩土本构模型的三维化,能够很好地描述土体在一般应力状态时的强度和变形特性。基于SMP准则的变换应力简单介绍如下:变换应力法是指建立一个变换应力空间,假设变换应力空间坐标轴 $\tilde{\sigma}_{ij}$ 与真实应力空间 $\sigma_{ij}$ 共轴,并且在三轴压缩条件下变换应力与真实应力相同。该方法将真实应力空间 $\pi$ 平面上的SMP曲线(实线)转换为变换应力空间 $\tilde{\pi}$ 平

面上的圆形(虚线),如图2所示。

图2为真实应力和变换应力空间中SMP准则的形状。图中 $\sigma_{ij}$ 表示真实应力空间,  $\tilde{\sigma}_{ij}$ 表示变换应力空间。图中实线表示在真实应力空间中的 $\pi$ 平面上,SMP准则为连续平滑的曲边三角形。虚线表示在变换应力空间中的 $\tilde{\pi}$ 平面上,此屈服面转化为半径为 $l_0$ 的规则圆形。设实线上的任一点 $A'$ 到原点 $O$ 的距离为 $l_\theta$ ,  $\theta=0^\circ$ 时的 $l_\theta$ 等于 $l_0$ ;设变换应力空间中点 $A$ 的应力为 $\tilde{\sigma}_{ij}$ ,在 $\sigma_{ij}$ 和 $\tilde{\sigma}_{ij}$ 主轴方向一致的前提下,可得

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \tilde{p}\delta_{ij} + \tilde{s}_{ij} = \tilde{p}\delta_{ij} + \frac{l_0}{l_\theta}s_{ij} = p\delta_{ij} + \frac{l_0}{\sqrt{s_{kl}s_{kl}}}s_{ij}, \quad (2)$$

式中,  $l_\theta = \sqrt{s_{kl}s_{kl}}$ 。 $\tilde{\sigma}_i$ 空间内的平均主应力 $\tilde{p}$ 、偏应力 $\tilde{q}$ 以及应力Lode角 $\tilde{\theta}$ 与 $\sigma_i$ 空间内的表达形式相同,

$$\left. \begin{aligned} \tilde{p} &= \tilde{\sigma}_{ii} / 3, \\ \tilde{q} &= \sqrt{\frac{3}{2}(\tilde{\sigma}_{ij} - \tilde{p}\delta_{ij})(\tilde{\sigma}_{ij} - \tilde{p}\delta_{ij})} \\ \tilde{\theta} &= \arctan \frac{\sqrt{3}(\tilde{\sigma}_2 - \tilde{\sigma}_3)}{2\tilde{\sigma}_1 - \tilde{\sigma}_2 - \tilde{\sigma}_3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

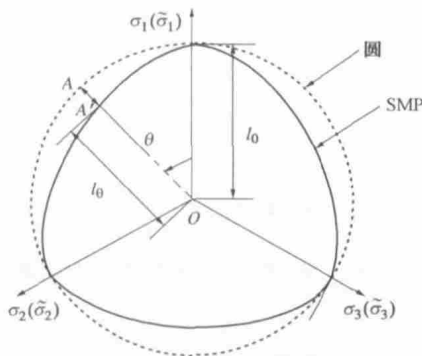


图 2  $\pi$  平面上和  $\tilde{\pi}$  平面上 SMP 准则的形状

Fig. 2 SMP criterion in  $\pi$  plane (solid curve) and transformed  $\tilde{\pi}$  plane (broken circle)

把 $\theta=0^\circ$ 代入到 $l_\theta$ 公式中可得

$$l_0 = 2\sqrt{\frac{2}{3} \frac{I_1}{3\sqrt{(I_1 I_2 - I_3)/(I_1 I_2 - 9I_3)} - 1}} \quad (4)$$

式中,  $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ,  $I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$ ,  $I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$ 。 $\theta$ 为应力洛德角,当 $\theta=0^\circ$ 为受压状态, $\theta=60^\circ$ 为受拉状态。

### 3 非饱和土弹塑性本构模型的三维化

原非饱和土耦合本构模型是基于修正剑桥模型建立的,能够有效地描述三轴压缩状态下毛细滞回和应力应变关系之间的耦合作用,具体可参考文献[2]。其屈服面在主应力空间中为规则的圆锥形(原文中式(8),其中临界状态线的斜率为常数),考虑到与SMP准则形状的相似性,可以将该耦合模型推广至一般应力状态。为了在该本构模型中引入SMP准则,利用上面描述的变换应力法。修正模型只是将原耦合模型中

的力学部分进行三维化(文献[2]中的2.2节),使其在一般应力空间中具有较真实的反映。土水特征曲线部分保持与原模型相同(文献[2]中的2.3节)。

#### 3.1 屈服函数

在变换应力空间中,耦合模型的屈服函数可写为

$$\tilde{f} = \tilde{q}^2 + M^2 \tilde{p}'(\tilde{p}' - \tilde{p}_c) = 0 \quad (5)$$

式中, $M$ 为临界状态线的斜率, $p_c$ 为硬化参数。式(5)只是将应力 $\tilde{p}'$ , $\tilde{q}$ 代替了 $p'$ , $q$ ,形式与原模型式(8)完全相同。因此屈服面在 $\tilde{p}' - \tilde{q}$ 平面上与 $p' - q$ 平面上的形状是相同的,其中 $\tilde{p}_c = p_c$ 。式(5)即为基于SMP准则三维化的耦合本构模型的屈服函数。

修正模型中的弹性变形和塑性流动法则及硬化定律均与原模型保持一致,如下所示。

#### 3.2 弹性变形

假定总应变增量可以分解为弹性部分和塑性部分:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (6)$$

其中弹性体应变和剪应变为

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_v^e &= \frac{\kappa}{\nu} \frac{dp'}{p'} \\ d\varepsilon_q^e &= \frac{1}{3G} dq \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

#### 3.3 流动法则

塑性分量由 $\tilde{\sigma}_{ij}$ 空间的相关联流动法则给出:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_v^p &= d\lambda \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \tilde{p}} \\ d\varepsilon_q^p &= d\lambda \frac{\partial \tilde{f}}{\partial \tilde{q}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, $d\lambda$ 为塑性乘子,可由一致性准则求出。

#### 3.4 硬化定律

$$p_c(\varepsilon_v^p, S_r, s_c) = p_{c0}(\varepsilon_v^p)h(\varepsilon_v^p, S_r, s_c) \quad (9)$$

$$p_{c0}(\varepsilon_v^p) = p_{c0}^* \exp\left(\frac{\nu}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^p\right) \quad (10)$$

其中 $h(\varepsilon_v^p, S_r, s_c)$ 函数表示非饱和效应对土体的硬化作用。由于毛细滞回的作用,非饱和土体的土水状态与土体所经历的水力历史密切相关,而土水状态的变化必将影响土体的强度与变形。因此,采用非饱和土中的毛细滞回效应来表征水力历史的影响。为了考虑毛细作用的硬化,定义 $h$ 函数为

$$h(\varepsilon_v^p, S_r, s_c) = r - (r - 1) \exp\left\{-m \left\langle 1 - \frac{\varepsilon_v^p}{\varepsilon_{vmax}^p} \right\rangle \frac{(1 - S_r)s_c}{(1 - S_r^{irr})}\right\} \quad (11)$$

#### 3.5 毛细滞回内变量模型(SWCC)

其中耦合本构模型中的土水特征关系部分采用Wei等<sup>[11]</sup>基于内变量热力学和多孔介质理论提出的毛细滞回内变量模型。将毛细循环现象视为一个非饱和土的能量耗散过程,因此可在同一理论框架下建立非饱和土的塑性变形和毛细滞回耦合的本构模型。在

循环边界曲线给定的情况下,该模型只需一个参数就能准确地模拟任意含水率变化路径下非饱和土的土水状态。该模型改进后可考虑体变对土水特征关系的影响。

当不考虑变形的影响时,基质吸力与饱和度变化关系为

$$dS_r = -\frac{ds_c}{K_p(s_c, S_r, \hat{n})} \quad (12)$$

式中,  $\hat{n}$  为水力路径的方向,  $K_p$  为土水特征曲线的斜率, 由下式给出:

$$K_p(s_c, S_r, \hat{n}) = \bar{K}_p(S_r, \hat{n}) + \frac{c|s_c - \bar{s}_c(S_r, \hat{n})|}{r(S_r) - |s_c - \bar{s}_c(S_r, \hat{n})|} \quad (13)$$

其中,  $\bar{K}_p(S_r, \hat{n})$  为边界上的斜率,  $c$  为正的材料参数用来描述扫描线的特征;  $\bar{s}_c(S_r, \hat{n})$  为边界线上的吸力值, 对脱湿时,  $\bar{s}_c(S_r) = \kappa_{DR}(S_r)$ , 对吸湿时,  $\bar{s}_c(S_r) = \kappa_{WT}(S_r)$ ;  $r(S_r)$  为当前饱和度和对应的边界线上基质吸力的差值, 即  $r(S_r) = \kappa_{DR}(S_r) - \kappa_{WT}(S_r)$ 。

通过试验发现, 土体的孔隙比对土水特征曲线有重要影响<sup>[12]</sup>, 孔隙比减小时, 进气值增大, 土水特征曲线向右移动。考虑变形对土水特征曲线的影响:

$$dS_r = d\left(\frac{V_w}{V_v}\right) = \frac{dV_w}{V_v} - \frac{V_w}{V_v} \frac{dV_v}{V_v} \quad (14)$$

式(14)第一项表示基质吸力对饱和度的影响, 第二项描述变形对饱和度变化的影响。忽略弹性变形的影响, 式(14)可写为

$$dS_r = -\frac{ds_c}{K_p(s_c, S_r, \hat{n}, \varepsilon_v^p)} + \frac{S_r}{n} d\varepsilon_v^p \quad (15)$$

式中,  $n$  为孔隙率。

采用 Feng 等<sup>[13]</sup>提出的土水特征曲线为边界线:

$$S_r = \frac{1 + S_r^{irr}(s_c/b)^d}{1 + (s_c/b)^d} \quad (16)$$

通常认为  $b, d$  是塑性体积应变  $\varepsilon_v^p$  的函数, 为简化假设:

$$\left. \begin{aligned} b &= b_0 + \alpha \varepsilon_v^p \\ d &= d_0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中,  $b, d, b_0, d_0, \alpha$  为材料参数, 与非饱和土的水力路径相关, 在脱湿和吸湿时取不同值。

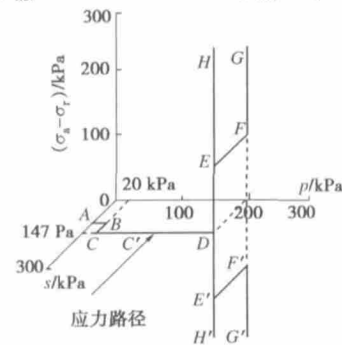
该修正模型采用 SMP 准则代替原来的广义 von Mises, 其中应力不变量、屈服函数在形式上和原模型都是相同的, 惟一的差别仅在于用变换应力张量  $\tilde{\sigma}_{ij}$  代替原来的应力张量  $\sigma_{ij}$ 。除此之外, 在三轴压缩状态时, 采用 SMP 准则修正的非饱和土模型和原模型完全相同。并且模型参数都是通过三轴压缩及其等效应力条件下获得的, 与原模型相同, 不需要重新标定。

### 4 修正模型试验预测分析

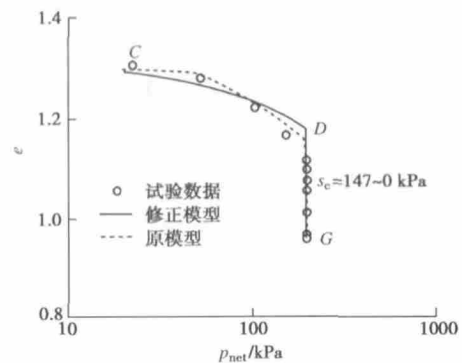
三维化后的非饱和土耦合本构模型的参数与原模

型一致, 其中应力应变关系的参数为  $(\lambda, \kappa, M, r, m)$ , 毛细滞回模型的参数为  $(b_0^{DR}, d_0^{DR}, b_0^{WT}, d_0^{WT}, c, \alpha)$ 。采用 Sun 等<sup>[14]</sup>所做的三轴伸长试验来验证所提出的模型。试样采用属于粉质黏土的珍珠黏土 (pearl clay), 非饱和击实样。该黏土的液限为 49%, 塑限为 22%, 比重为 2.71, 初始含水率为 26%。

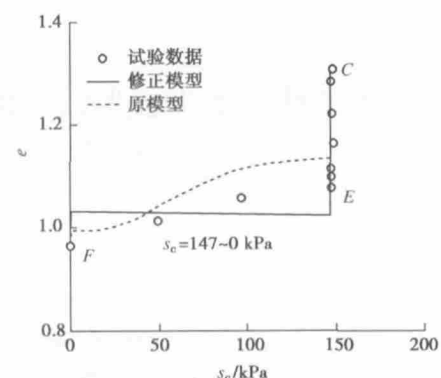
图 3, 4 为模型模拟的结果与试验数据对比图。图 3(a) 为应力路径 (ABCDEF G): 首先从初始点 A 达到平衡点 C ( $p_{net} = 20 \text{ kPa}, s_c = 147 \text{ kPa}$ ), 然后保持基质吸力为常数各向同性加载到 D 点 ( $p_{net} = 196 \text{ kPa}, s_c = 147 \text{ kPa}$ ), 然后保持净应力和基质吸力不变, 进行三轴伸长试验, 达到 E 点, 此时  $\sigma_a - \sigma_r = -196 \text{ kPa}$ ; 到达 E 点之后保持平均净应力和剪应力不变, 减小基质吸力直至为 0, 进行吸湿试验达到点 F ( $s_c = 147 \text{ kPa} \rightarrow 0$ ), 最后土样在零基质吸力下三轴伸长至点 G。其中  $p_{net}$  为平均净应力,  $p_{net} = p - u_a$ 。



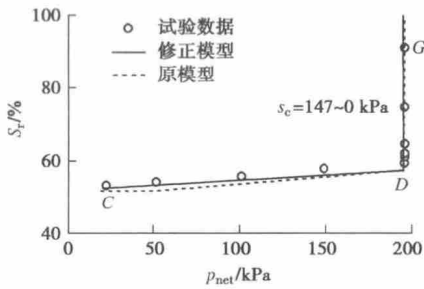
(a) 三轴试验中 ( $p_{net}=196 \text{ kPa}$ ) 的应力路径



(b) 平均净应力与孔隙比的关系



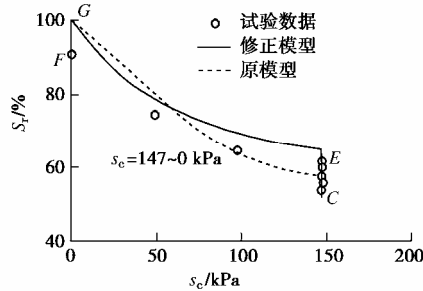
(c) 基质吸力与孔隙比的关系



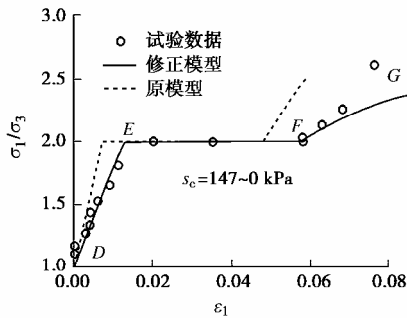
(d) 平均净应力与饱和度的关系

图 3 三轴伸长试验与模型预测

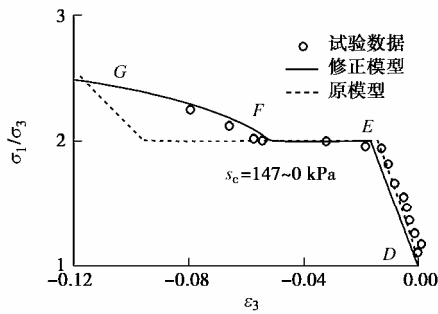
Fig. 3 Comparison between simulations and triaxial extension test results



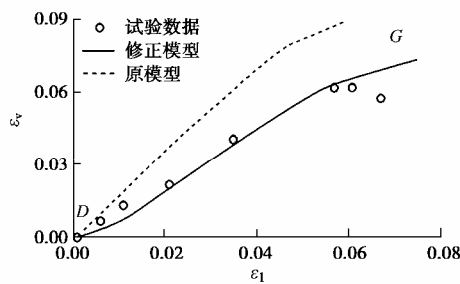
(a) 基质吸力和饱和度的关系



(b) 第一主应变与应力比的关系



(c) 第三主应变与应力比的关系



(d) 第一主应变与体变的关系

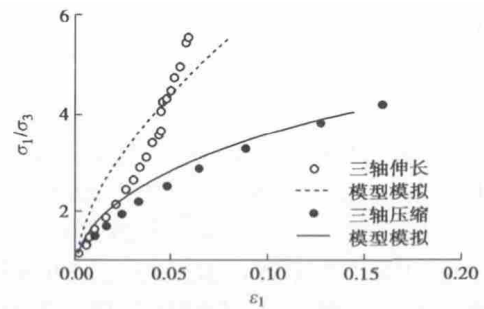
图 4 三轴伸长和吸湿试验 ( p\_net = 196 kPa )

Fig. 4 Triaxial extension and wetting tests

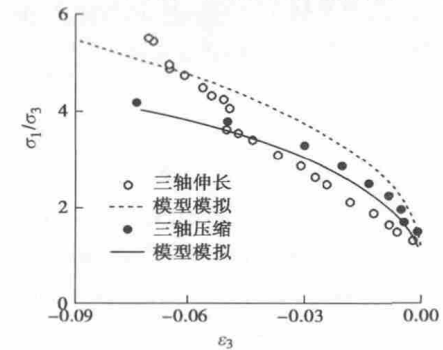
图 3 中实线是本文提出的三维化修正模型预测

的结果, 虚线为原模型模拟的结果。从图 3, 4 上可以看出, 在各向同性压缩的阶段, 两个模型预测的结果相似, 都比较接近试验结果。但是在三轴伸长阶段, 对应相同的主应力比, 原模型预测的第一主应变偏小, 与此相反第三主应变偏大, 总的来说原模型预测的体变是偏大的。在吸湿阶段, 原模型预测的吸力减小引起的孔隙比变化时结果较好。但是在模拟吸湿段的 SWCC 时, 两个模型预测的结果均有偏差。这是因为当吸力降低为 0 时, 由于土体中存在残余气体, 不能达到完全饱和。二者均没有考虑残余含气量的影响, 预测的饱和度都达到 100%。因此模型还需要进一步的修正。从总的趋势上来说, 修正后的三维模型结果较好。

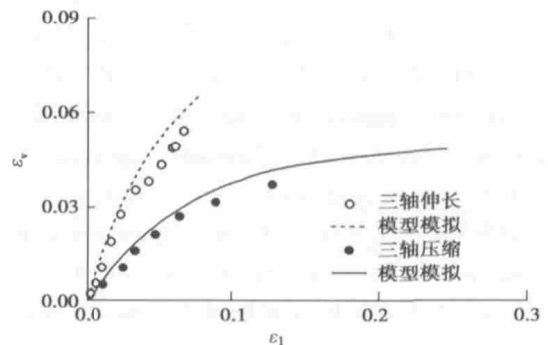
图 5 为 Sun 等<sup>[14]</sup>所做的珍珠黏土的非饱和三轴压缩和三轴伸长试验结果及其模型预测。应力路径列于图 3 (a) 中, 其中  $DH$  段为三轴伸长,  $DH'$  段为三轴压缩; 土样保持平均净应力和基质吸力为常数 (  $p_{net} = 196 \text{ kPa}$ ,  $s_c = 147 \text{ kPa}$  )。从图上可以看出, 该修正模型不仅可以很好地描述三轴压缩状态, 也可以预测三轴伸长状态下非饱和土的行为特性。由此可看出, 采用变换应力方法, 将非饱和土的耦合本构模型



(a) 第一主应变与应力比的关系



(b) 第三主应变与应力比的关系



(c) 第一主应变与体变的关系

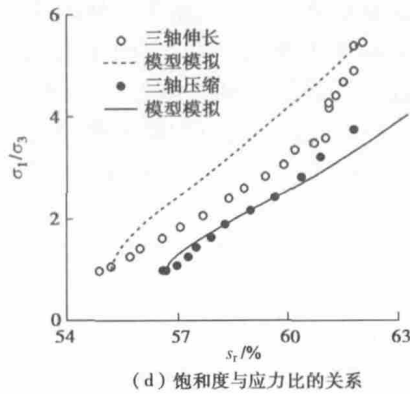


图5 三轴伸长与三轴压缩试验结果及相应模型预测

Fig. 5 Comparison between test results of triaxial extension and compression and corresponding simulations

进行三维化是非常合理和有效的，能够采用常规的三轴试验得到的参数来反映土体在一般应力状态下的力学特性。

## 5 结 语

在原始非饱和土弹塑性耦合本构模型中引入更能反映真实情况的SMP准则，采用变换应力方法将模型从三轴压缩轴对称应力状态推广至一般应力状态中，实现模型合理的三维化。三维化后的模型与原模型的应力不变量和屈服函数在形式上都是相同的，惟一的差别仅在于用变换应力张量 $\tilde{\sigma}_{ij}$ 代替原来的应力张量 $\sigma_{ij}$ 。而且在三轴压缩状态时，采用SMP准则修正的非饱和土模型和原模型完全相同。除此之外，模型参数与原模型也相同，不需要再重新标定。通过与文献中的试验数据对比表明，在没有增加任何参数的情况下，三维化后的模型能够较好地描述非饱和土在三轴伸长等一般应力状态下的力学特性。

### 参考文献：

- [1] 罗汀, 姚仰平, 松岡元. 基于SMP准则的土的平面应变强度公式[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 390–393. (LUO Ting, YAO Yang-ping, MATSUOKA H. Soil strength equation in plane strain based on SMP[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 390–393. (in Chinese))
- [2] 马田田, 韦昌富, 陈盼, 等. 非饱和土毛细滞回与变形耦合弹塑性本构模型[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3263–3270. (MA Tian-tian, WEI Chang-fu, CHEN Pan, et al. An elastoplastic constitutive model of unsaturated soils with capillary hysteresis and deformation coupling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3263–3270. (in Chinese))
- [3] MATSUOKA H, NAKAI T. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three difference principal stresses[C]// Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, 1974, 232: 59–70.
- [4] 栾茂田, 许成顺, 刘占阁, 等. 一般应力条件下土的抗剪强度参数探讨[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(2): 271–276. (LUAN Mao-tian, XU Cheng-shun, LIU Zhan-ge, et al. Study of shear strength parameters of soils under general stress conditions[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(2): 271–276. (in Chinese))
- [5] 刘金龙, 栾茂田, 袁凡凡, 等. 中主应力对砂土抗剪强度影响的分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1931–1935. (LIU Jin-long, LUAN Mao-tian, YUAN Fan-fan, et al. Evaluation of effect of intermediate principal stress on sand shear strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1931–1935. (in Chinese))
- [6] MATSUOKA H, SUN D A, KOGANE A, et al. Stress-strain behaviour of unsaturated soil in true triaxial tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 608–619.
- [7] WROTH C P, HOULSBY G T. Soil mechanics Property characterization and analysis procedures[C]// Proceedings of 11th International Conference Soil Mechannics and Foundation Engineering, ISSMFE, San Francisco, 1985, 1: 1–55.
- [8] LADE P V, DUNCAN J M. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil[J]. Journal of Geotechnolgy Engineering, 1975, 101(10): 1037–1053.
- [9] MATSUOKA H, YAO Y P, SUN D A. The Cam-clay models revised by the SMP criterion[J]. Soils and Foundations, 1999, 33(1): 81–95.
- [10] YAO Y P, SUN D A, MATSUOKA H. A unified constitutive model for both clay and sand with hardening parameter independent on stress path[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(2): 210–222.
- [11] WEI C F, DEWOOLKAR M M. Formulation of capillary hysteresis with internal state variables[J]. Water Resources Research. 2006, 42(7): 1–16.
- [12] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUF AHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique, 1999, 49(2): 143–158.
- [13] FENG M, FREDLUND D G. Hysteresis influence associated with thermal conductivity sensor measurements[C]// 52nd Canadian Geotechnical Conference and Unsaturated Soil Group, Proceedings from Theory to the Practice of Unsaturated Soil Mechanics. Regina, 1999: 651–657.
- [14] SUN D A, CUI H B, MATSUOKA H, et al. A three-dimensional elastoplastic model for unsaturated compacted soils with hydraulic hysteresis[J]. Soils and Foundations, 2007, 27(2): 253–264.