

考虑原状土初始应力状态的修正 SMP 屈服准则

李顺群¹, 贾红晶¹, 夏锦红², 尚 军¹, 张少锋¹

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 新乡学院土木工程与建筑系, 河南 新乡 453003)

摘要:原状土与重塑土力学性质方面的差异性,来源于两者初始应力状态的不同及由此引起的结构性差异。重塑土的屈服曲面以等倾线为基线,原状土由于在形成过程中处于三向不等压状态,故其屈服曲面应以 K_0 固结线(初始应力线)为基线。基于松冈-中井的空间滑动面屈服准则,在考虑初始 K_0 固结状态的基础上给出了适用于原状土的修正 SMP 屈服准则。修正 SMP 屈服面由常规 SMP 屈服面绕位于 σ_2/σ_3 平面上的直线 $\sigma_2 = -\sigma_3$ 旋转得到,旋转的角度等于等倾线与 K_0 固结线之间的夹角。与在子午面和 π 平面上研究重塑土的屈服行为类似,研究原状土的屈服应该在通过 K_0 固结线的子午面和通过 $\sigma_1 + K_0\sigma_2 + K_0\sigma_3 = c$ 的 χ 平面上进行。针对砂雨法试样的真三轴实验结果计算表明,与常规 SMP 屈服准则相比,基于 K_0 固结线的修正 SMP 屈服准则更适合描述自然沉积土的强度和屈服特征。

关键词:原状土; K_0 固结线(初始应力线); π 平面; χ 平面; 修正 SMP 屈服准则

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2015)03-0102-06

A modified SMP yield criterion for undisturbed soil considering initial stress state

LI Shunqun¹, JIA Hongjing¹, XIA Jinhong², SHANG Jun¹, ZHANG Shaofeng¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Department of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract: The differences in mechanical properties between undisturbed soil and remolded soil are derived from the diverse initial stress state and the corresponding structure distinctions. In the constitutive model for remolded soil constructed usually in the spherical stress state, the isoclinic line is utilized as the baseline of the yield surface. On the contrary, the K_0 -consolidation line (or initial stress line) should be taken as the baseline of the constitutive model for undisturbed soil due to anisobaric stress state in space during settlement process. Based on the Matsuoka-Nakai's SMP yield criterion a modified criterion considering the K_0 -consolidation is proposed. The modified SMP yield surface can be obtained by rotating the conventional SMP yield surface around the line of $\sigma_1/\sigma_3 = \sigma_2 = -\sigma_3$ for an angle of ω between the isoclinic line and the K_0 -consolidation line. Similar to the meridian plane and π plane in the yield surface for remolded soil, the meridian plane through the K_0 -consolidation line and the χ plane vertical to the K_0 -consolidation line can be employed to study the undisturbed soil. True triaxial test results of the pluviating sand sample indicate that the modified SMP yield criterion is superior to the conventional SMP yield criterion and is more effective in fitting the strength and yield characteristics of natural sedimentary soils.

Keywords: undisturbed soil; K_0 -consolidation line; π plane; χ plane; modified SMP yield criterion

收稿日期: 2014-10-15; 修订日期: 2015-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(51178290, 41472253)

第一作者: 李顺群(1971-), 男, 博士后, 教授, 注册岩土工程师, 从事土力学、基础工程等方面的研究工作。

E-mail: lishunqun@sina.com

土的结构性和各向异性是普遍存在的重要土力学现象之一^[1],两者之间的关系可以是并列的,也可以认为后者是前者的一个方面。从成因上讲,结构性和各向异性都来源于土的形成过程。由于处于一维固结状态,即竖向应力不等于水平应力,原状土的初始应力可以分解为初始球应力和初始偏应力两部分。从力学角度看,土颗粒体的压实程度取决于球应力张量,而颗粒体的不均匀性、定向性依赖于偏应力张量^[2]。即从微观层次看,应力偏张量的存在必然引起颗粒体的排列存在差异^[3],土体因此显现为不同形式的原生各向异性或初始状态各向异性。

由初始应力状态引起的颗粒体、孔隙体排列方式的初始各向异性,必然导致在后续物理力学过程中,原状土的行为显现为不同形式的结构性和各向异性。常规的力学模型和传统的本构模型,是基于重塑土的室内常规三轴实验建立起来的。由于不存在初始应力偏量,力学模型中的三个主应力分量一般认为是等价的、可以互换的。因此,建立起来的弹塑性模型常常以等倾线基线,并可以通过研究垂直于等倾线的 π 平面上的迹线和经过等倾线的子午面上的迹线,研究土的强度和屈服^[4~7]。

可见,建立在重塑土基础之上的常规力学模型和传统本构模型,无法反映原状土的初始三向不等压状态,也无法描述由此引起的初始各向异性。合理表述这种与初始应力状态有关的结构性和各向异性并将其嵌入原状土屈服准则和本构关系,是正确评价岩土体工程性质的先决条件^[8~10]。

本文首先研究了重塑土和原状土在三轴实验中的应力路径差异及产生差异的原因。随后,重点研究了适用于原状土的空间滑动面屈服准则。考虑原状土初始应力状态各向不等性,研究了等倾线与原状土 K_0 固结线的关系,并在此基础上建立了适用于原状土的修正SMP屈服准则。真三轴实验结果表明,该修正模型更能客观描述原状土的强度特征和屈服特点,能反映原状土的结构性和各向异性,且相关参数具有明确的物理意义。

1 初始应力状态及其作用

在常规强度准则和本构模型中,应力是采用总量表示的。即在应力总值中,不但包含新增加的应力部分——增量应力,还包含有形成和维持土样特定初始状态所必须的应力部分——初始应力。

土的初始应力主要是由其自重引起的。在初始应力作用下,土体形成了特定的颗粒排列方式、特定的孔隙结构、以及颗粒之间的联接和胶结作用。土的密实

度、孔隙比、渗透系数、压缩特性、强度参数等力学水力学指标都依赖于土的颗粒和孔隙结构,并最终取决于土的初始应力状态。对于正常的 K_0 固结土层,其初始应力状态为:

$$\sigma_i = (\gamma z, K_0 \gamma z, K_0 \gamma z) \quad (1)$$

式中: σ_i ——三个主应力分量, $i=1, 2, 3$;

γ ——容重加权平均值;

z ——上覆土层厚度;

K_0 ——静止土压力系数。

在欠固结、超固结或其他复杂边界条件下,土的初始应力状态将与式(1)有所差别。

场地的初始应力状态可以是简单的 K_0 应力状态,即式(1);也可以是某种复杂状态。但不管处于哪种初始状态,土的微观结构都会在这个初始应力状态下处于某一特定状态,并相应的表现出与这一初始应力状态相对应的特有力学性质、水力学性质、以及其他物理性质。

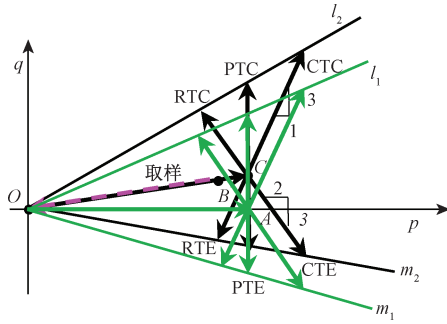
因此,不管土颗粒体是理想的球体还是复杂的其他形状,只要存在初始应力,就一定存在与之相对应的所谓结构和结构性。如果初始应力状态是球应力状态,则由于土颗粒体的排列没有方向性,相应土的各种性质都表现为各向同性。如果初始应力包含偏应力,则一定会引起颗粒体的不均匀性或在不同方向上的排列方式存在差别,从而引起不同形式的各向异性。

可见,不管是重塑土还是原状土,都是在特定应力状态条件下形成的具有独特结构和特定属性的土,因此均存在结构性。严格的等压固结方式得到的重塑土样,由于它受到的初始应力是球应力,因此各种力学性质都是各向同性的。原状土样,以及通过 K_0 固结方法、压样法、击实法、砂雨法等制样方法获得的土样,由于在其形成过程的某一环节,施加在竖向方向上的作用与施加在水平方向上的作用存在某些差异,因此获得的试样其力学性质都是各向异性的。

2 三轴实验的应力路径和屈服

重塑土失去了原始场地条件从而失去了初始应力状态决定的力学参数,而原状土记忆了原始场地条件和初始应力状态决定的力学参数。

自然状态的原状土,其固结过程一般认为属于 K_0 固结。在图1所示的平均应力 p 和广义剪应力 q 坐标系里,假定点 B 为 K_0 固结场地中某点的应力状态。则在 K_0 固结过程中,应力状态从 O 点开始沿直线 OB 前进至 B 点,相应的应力路径为直线 OB 。

图 1 等压固结和 K_0 固结三轴实验的应力路径Fig. 1 Stress paths of the triaxial tests for samples constructed respectively from spherical stress state and K_0 stress state

$$p = \frac{1 + 2K_0}{3} \sigma \quad (2)$$

$$q = (1 - K_0) \sigma \quad (3)$$

因此,在 K_0 加载过程中, p 和 q 分别为土样从原始位置取出后,其应力状态将从 B 点开始沿直线 BO 退化到原点。在常规重塑土的三轴实验中,固结阶段一般是球应力条件下的等压固结,其应力状态表现为从原点 O 开始沿直线 OA 前进至某一点。因此, K_0 固结与等压固结的应力路径是完全不同的,加载路径的不同必然引起两种方式形成的土样在微观结构和力学性质方面都存在差别。等压固结形成的土样其微观结构和力学性质是各向异性的,而 K_0 固结形成的试样其微观结构和力学性质是各向同性的。

所以,对于重塑土的三轴试样,起始应力状态是 O 点;而对于原状试样的三轴实验,起始应力状态是 B 点而不是 O 点。

静止土压力系数 K_0 与内摩擦角 φ 的经验关系:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (4)$$

因此,在 p 、 q 平面内, K_0 加载的斜率为

$$k = \frac{3(1 - K_0)}{1 + 2K_0} = \frac{3 \sin \varphi}{3 - 2 \sin \varphi} \quad (5)$$

重塑土的常规三轴实验,固结过程是等压的。对于固结排水三轴实验,不同加载条件剪切阶段的应力路径均从 A 点开始,沿不同路径发展直至破坏包线(图 1)。

其中 CTC 对应轴向增压三轴压缩试验;PTC 对应 p 为常数的三轴压缩试验;RTC 对应侧向减压的三轴压缩试验;CTE 对应侧向增压的三轴伸长试验;PTE 对应 p 为常数的三轴伸长试验;RTE 对应轴向减压三轴伸长试验。直线 l_1 是压破坏线,直线 m_1 是拉破坏线。

前面已有论述,对于原状试样,其微观结构和物理力学性质依赖于原始应力状态(图 1 中点 B 表示的应

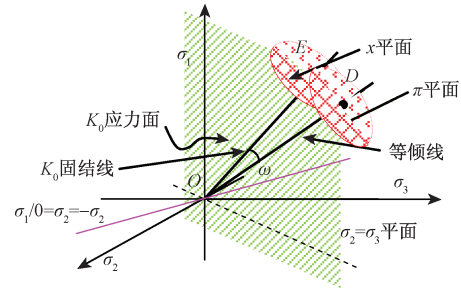
力状态)。如果采用从 O 点开始的等压固结至 A 点应力状态,再进行三轴实验,虽然表观应力路径与重塑土的三轴实验一样,但实验结果必然与重塑土的实验结果存在明显差异。

为了反映原状土的初始应力状态对土结构和物理力学性质的影响,合理的三轴实验应该是进行 K_0 固结从 O 开始至 B 再继续达到某一确定应力状态 C ,随后再进行各种不同的三轴实验,具体应力路径如图 1 中的黑色直线 l_2 、 m_2 所示。显然,此时的压破坏线 l_2 和拉破坏线 m_2 必然与重塑土三轴实验的压破坏线 l_1 和拉破坏线 m_1 有所差别。其中,原状土压破坏线的斜率较重塑土压破坏线的斜率偏大;而原状土拉破坏线的斜率较重塑土拉压破坏线的斜率偏小。因此,按照试样的初始应力状态,三轴实验包括重塑试样的三轴实验和原状试样的三轴实验两大类。

3 K_0 固结线(初始应力线)和 X 平面

在主应力空间中,等倾线定义为与三个应力主轴夹角相同的直线(图 2 中的直线 OD),其方程为

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \quad (6)$$

图 2 主应力空间中的等倾线与原状土的 K_0 固结线Fig. 2 Isoclinic line for remolded soil and K_0 consolidation line for undisturbed soil in the principal space

与等倾线 OD 垂直的平面为 π 平面,其方程为:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = c \quad (7)$$

式中: c ——常数。

在岩土塑性力学中,不同的 c 值对应于不同的 π 平面,而通过原点的 π 平面为传统塑性力学中定义的 π 平面。

根据式(1)可知,均匀土层中的初始应力沿深度是线性变化的,在主应力空间中表示为直线 OE ,此即 K_0 固结线或初始应力线。可见, K_0 固结线的方向向量为 $(1, K_0, K_0)$ 。对于极软土(液态),等倾线和初始应力线是重合的。对于一般土体,可以计算得到等倾线与 K_0 固结线之间的夹角 ω 为:

$$\omega = 54.74 - \arctan(\sqrt{2}K_0) \quad (8)$$

随 K_0 变化, K_0 固结线有不同的斜率, 但其范围被限制在一定区域内, 即位于平面 $\sigma_2 = \sigma_3$ 的上八分之一区域(图2中的 $\sigma_1 OD$ 半无限三角范围), 本文将其定义为 K_0 应力面。同时, 将通过原点且垂直于 K_0 应力面的直线定义为 K_0 应力面轴, 其方程为

$$\frac{\sigma_1}{0} = \frac{\sigma_2}{1} = \frac{\sigma_3}{-1} \quad (9)$$

与 π 平面的定义类似, 本文将与 K_0 固结线 OE 垂直的平面定义为 χ 平面。与所有垂直于等倾线的平面都定义为 π 平面类似, 所有垂直于初始应力线的平面都命名为 χ 平面。不同的原状土, 其 K_0 值一般是不同的。因此, 不同原状土对应的 K_0 固结线和 χ 平面一般是不同的。另外, 由式(8)可知, 将 π 平面绕式(9)表示的直线旋转一个角度 ω , 即可得到 χ 平面。

4 原状土的空间滑动面

SMP 屈服准则认为, 当剪应力与正应力的比值达到某一数值时材料破坏, 即:

$$\frac{\tau_{\text{SMP}}}{\sigma_{\text{SMP}}} = \lambda \quad (10)$$

式中: τ_{SMP} ——空间滑动面上的剪应力;

σ_{SMP} ——空间滑动面上的正应力;

λ ——材料常数。

空间滑动面的主应力形式为:

$$\frac{1}{3} \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sqrt{\sigma_1 \sigma_2}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{\sigma_2 \sigma_3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sqrt{\sigma_3 \sigma_1}}\right)^2} = \lambda \quad (11)$$

SMP 屈服准则的空间滑动面如图3和图4所示, 其中 φ_{moij} 表示二维内摩擦角, 且有:

$$\tan \varphi_{\text{moij}} = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{2 \sqrt{\sigma_i \sigma_j}} \quad (12)$$

因此, 空间滑动面的二维摩擦角形式为:

$$\frac{2}{3} \sqrt{\tan^2 \varphi_{\text{mo12}} + \tan^2 \varphi_{\text{mo23}} + \tan^2 \varphi_{\text{mo31}}} = \lambda \quad (13)$$

式(11)也可以写为:

$$\frac{I_1 I_2}{I_3} = \lambda \quad (14)$$

其中, I_1 、 I_2 、 I_3 分别为应力张量第一不变量、第二不变量和第三不变量。

式(14)的展开形式为:

$$\frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)}{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3} = \lambda \quad (15)$$

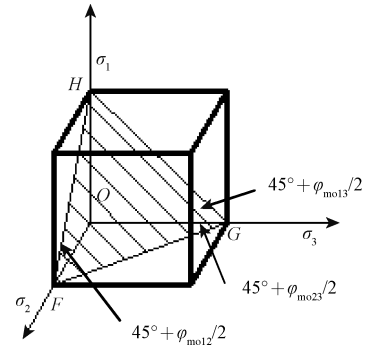


图3 SMP 屈服准则的空间滑动面

Fig.3 The space mobilized plane of the SMP yield criterion

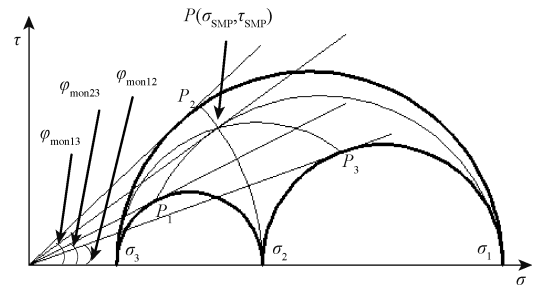


图4 三个滑动面及空间滑动面上的剪应力和主应力

Fig.4 Shear stress and principal stress on the three glide planes and the space glide planes

常规的应力状态表示方法和屈服准则建立在关于重塑土的相关实验和理论推导基础之上, 当用来描述原状土的物理力学性质时, 存在某种程度的缺陷和不足是难以避免的。

如果认为适用于重塑土的应力状态表示方法和屈服准则是基于等倾线和 π 平面的, 那么对于原状土, 基于 K_0 固结线 and 对应 χ 平面的屈服准则比基于等倾线和 π 平面的屈服准则更为合理。若重塑土的屈服曲面 F 表示为:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad (16)$$

根据图2, 将重塑土的屈服曲面以式(9)表示的直线为轴旋转一个角度 ω , 即可得到对应于原状土的屈服曲面。所以, 适用于原状土的屈服曲面 F^* 为:

$$F^*\left(\sigma_1 \cos \omega, \frac{\sigma_2}{\cos \omega}, \frac{\sigma_3}{\cos \omega}\right) = 0 \quad (17)$$

因此, 适用于原状土的修正 SMP 屈服准则为:

$$\frac{\left(\sigma_1 \cos \omega + \frac{\sigma_2}{\cos \omega} + \frac{\sigma_3}{\cos \omega}\right)\left(\sigma_1 \sigma_2 + \frac{\sigma_2 \sigma_3}{\cos^2 \omega} + \sigma_3 \sigma_1\right)}{\frac{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3}{\cos \omega}} = \lambda' \quad (18)$$

当 $\lambda = 12$ 、 $K_0 = 0.4$ 时,式(15)和式(18)在主应力空间中的曲面如图 5 所示。其中曲面 1(蓝色曲面)对应于式(15),适用于重塑土;曲面 2 对应于式(18),适用于原状土。

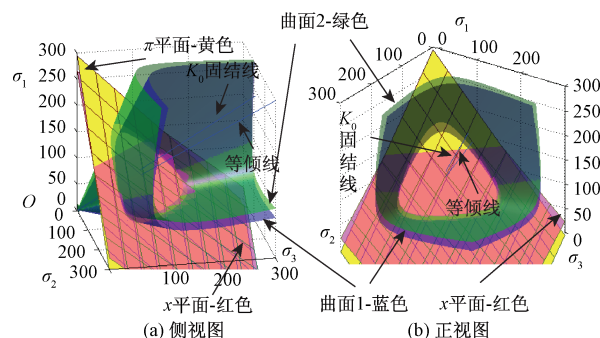


图 5 SMP 屈服曲面与修正 SMP 屈服曲面

Fig. 5 SMP yield surface and modified SMP yield surface

5 模型的验证

在研究重塑土的力学行为时,常通过研究 π 平面上的屈服迹线和经过等倾线的子午面上的屈服迹线,揭示材料的弹塑性行为。 π 平面上的真三轴实验称为等 p 实验,其加载条件满足式(7),即 $3p = c$ 。

原状土的屈服曲面由重塑土的屈服曲面旋转而来,因此,研究原状土的力学行为,可以通过研究 χ 平面上的屈服迹线和通过 K_0 固结线子午面上的屈服迹线进行。由于原状土的初始应力状态为式(1),类似于重塑土的等 p 真三轴实验,原状土 χ 平面上的真三轴实验的加载条件为:

$$\sigma_1 + K_0 \sigma_2 + K_0 \sigma_3 = c' \quad (19)$$

式中: c' ——常数。

由于 χ 平面垂直于 K_0 固结线,所以 χ 平面上的真三轴实验与 π 平面上的真三轴实验相比,更能揭示原状土的结构性和各向异性。

以式(7)和式(19)为约束条件的两种真三轴实验,其应力状态是可以相互转化的。方法是将 π 平面上的应力点投影到 χ 平面上。若 π 平面上的屈服应力为 $(\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma)$,则其在 χ 平面上的投影为:

$$\sigma'_\alpha = \sigma_\alpha - \rho \quad (20)$$

$$\sigma'_\beta = \sigma_\beta - K_0 \rho \quad (21)$$

$$\sigma'_\gamma = \sigma_\gamma - K_0 \rho \quad (22)$$

其中:

$$\rho = \frac{\sigma_\alpha + K_0 \sigma_\beta + K_0 \sigma_\gamma - c'}{1 + 2K_0^2} \quad (23)$$

鉴于目前文献载有的真三轴实验都是在 π 平面上完

成的,下文关于原状土的实验验证仍然在 π 平面上完成。

Kirkga 等曾经进行了 4 组不同屈服应变各 13 个等 p ($3p = c = 294 \text{ kPa}$) 的真三轴实验^[11],图 6 是文献提供的 π 平面上的屈服点及与屈服点对应的 Mohr-Coulomb 屈服准则迹线。

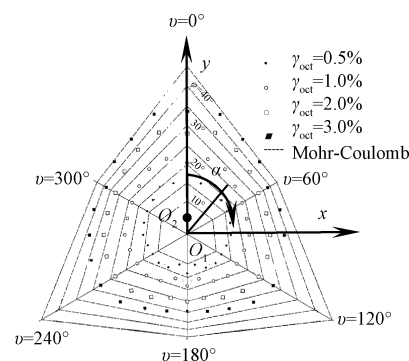


图 6 不同应变对应的屈服应力及 Mohr-Coulomb 拟合

Fig. 6 Yield stress and Mohr-coulomb criterion fitting

图 7 是 SMP 屈服准则和本文提出的修正 SMP 屈服准则对图 6 实验数据的拟合。其中蓝色曲面是 SMP 屈服曲面;绿色曲面是本文给出的修正 SMP 屈服曲面。对应的 λ 分别为 15、13、10.8、10;对应的 λ' 分别为 14、12、10.5、9.9。可见,与蓝色曲面相比,绿色曲面更接近于实验点,且绿色曲面较蓝色曲面小一些 ($\lambda' < \lambda$)。所以,与常规 SMP 屈服准则相比,修正 SMP 屈服准则更适合描述原状土的屈服行为。

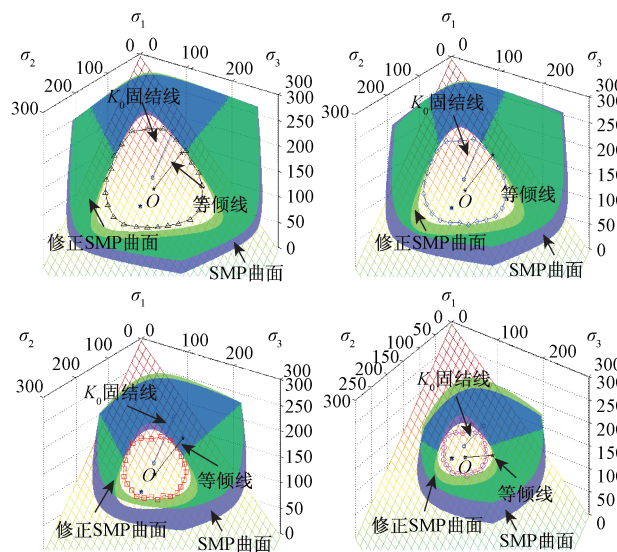


图 7 SMP 屈服准则与修正 SMP 屈服准则对砂雨法试样真三轴实验的拟合对比

Fig. 7 Fitting of the true triaxial test on the pluviating samples according to SMP yield criterion and modified SMP yield criterion

6 结论

(1) 重塑土和原状土在形成过程中经受的应力条件(初始应力状态)差别,是结构性和各向异性产生的力学机制。

(2) 由于在形成过程中存在偏应力,原状土的屈服曲面应以 K_0 固结线为基线。基于松冈-中井的空间滑动面屈服准则,给出了适用于原状土的考虑了初始偏应力状态的修正 SMP 屈服准则。

(3) 修正 SMP 屈服面由 SMP 屈服面绕直线 $\sigma_1/0 = \sigma_2 = -\sigma_3$ 旋转得到,旋转角度等于等倾线与 K_0 固结线之间的夹角。关于砂雨法的真三轴实验表明,与常规 SMP 屈服准则相比,修正 SMP 屈服准则更适合用来描述原状土的弹塑性力学行为。

参考文献:

- [1] 骆亚生, 谢定义. 复杂应力条件下土的结构性本构关系[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(5): 14-18. [LUO Y S, XIE D Y. Structural constitutive relation of soils under complex stress conditions [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2005, 37(5): 14-18. (in Chinese)]
- [2] 孙德安, 姚仰平, 殷宗泽. 初始应力各向异性土的弹塑性模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 222-226. [SUN D A, YAO Y P, YIN Z Z. An elastoplastic model for soil with initially stress-induced anisotropy[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 222-226. (in Chinese)]
- [3] 刘恩龙, 沈珠江. 不同应力路径下结构性土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2058-2064. [LIU E L, SHEN Z J. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2058-2064. (in Chinese)]
- [4] Matsuoka H, Yao YP, Sun DA. The Cam-clay models revised by the SMP criterion [J]. Soil and Foundations, 1999, 39(1): 81-95.
- [5] Matsuoka H, Junichi H, Kiyoshi H. Deformation and failure of anisotropic sand deposits [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1984, 32(11): 31-36.

- [6] 孙德安, 许志良. 结构性软土渗透特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 36-41. [SUN D A, XU Z L. Permeability of structural soft soils [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 36-41. (in Chinese)]
- [7] Matsuoka H, Nakai T. Stress-strain relationship of soil based on the SMP[J]. Proc Specialty Session 9, 9th Int Conf SMFE, 1977, 153-162.
- [8] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性黏土剪切带的微观分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 102-108. [JANG M J, SHEN Z J. Microscopic analysis of shear band in structured clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 20(2): 102-108. (in Chinese)]
- [9] 陈存礼, 郭娟, 杨鹏. 应力路径对固结排水条件下饱和原状黄土变形与强度特性的影响[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 703-708. [CHEN C L, GUO J, YANG P. Influence of stress path on deformation and strength characteristics of saturated intact loess under drainage condition [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 703-708. (in Chinese)]
- [10] 杨雪强, 朱志政, 韩高升, 等. 不同应力路径下土体的变形特化与破坏特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2181-2185. [YANG X Q, ZHU Z Z, HAN G S, et al. Deformation and failure characteristics of soil mass under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2181-2185. (in Chinese)]
- [11] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. [ZHENG Y R, KONG L. Geotechnical plastic mechanics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)]
- [12] M M Kirkga, P V Lade. Anisotropic three-dimensional behavior of a normally consolidated clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30: 848-858.
- [13] 闫亚景, 文宝萍. 非饱和黄土的结构屈服特性及主要影响因素[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 63-68. [YAN Y J, WEN B P. Structural yielding characteristics of unsaturated loess and main influencing factors [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 63-68. (in Chinese)]

责任编辑: 张若琳