

同时考虑结构性和初始应力影响的双参量土体本构模型*

牟春梅 刘之葵 刘宝臣

(桂林理工大学土木与建筑工程学院 桂林 541004)

摘要 原状土的结构性和初始应力状态对土的力学效应影响比较显著,在应力水平较小的情况下,原状土的力学行为与重塑土有很大的差异。目前,在描述土体应力应变的本构模型中,绝大多数模型都是基于重塑土在实验的基础上构建的,没有充分考虑土的结构性和初始应力状态的影响。本文在经典的弹塑性理论的大框架下,以桂林岩溶区分布的饱和软黏土为研究对象,结合室内试验的成果,依据前人已建的模型,考虑了土的结构性和初始应力的影响,在充分发挥修正剑桥模型优点的基础上对其进行改进,构建了一种新的饱和软黏土的弹塑性本构模型,并对模型作了分析和比较,初步表明了模型的合理性和有效性,进一步的工程验证研究还在进行之中。该模型的构建可使桂林岩溶区分布的饱和软黏土的应力应变计算更加趋近于实际,并且,对于桂林岩溶区高速公路饱和软基填土过程中,控制加荷速率和控制分级荷载的大小具有重要的现实意义。

关键词 软黏土 微观结构 初始应力 弹塑性模型

中图分类号: TU44 文献标识码: A

AN ELASTO-PLASTIC MODEL SYNCHRONOUSLY CONSIDERING STRUCTURE CHARACTERS AND ORIGINAL STRESS FOR CLAY SOILS

MU Chunmei LIU Zhikui LIU Baochen

(College of Civil Engineering Guilin University of Technology, Guangxi, Guilin 541004)

Abstract The mechanical characteristics of natural soils are significantly affected by their structure and original stress. As undisturbed soil and remolded soil possess different structural features, they demonstrate different mechanical properties in the case of minor stress. At present, lots of structural models have been established by remolded soil and experimental conditions without considering structure and original stress. Under the classical theories of elasto-plastic, based on soft clay in Guilin areas, combine with test indoor, according to the former model, an elasto-plastic constitutive model has been established to synchronously consider the structural characters and the original stress state based on the Modified Cam Clay. The comparison and analysis of various calculated results have shown the rationality and validity of the model. The applications of the model expressions make the strain result more correspond to the engineering practice. They have important significance for controlling not only rate of loading but also size of load grade during highway filled soil in Guilin areas.

Key words Soft clay, Microstructure, Original stress, Elasto-plastic model

* 收稿日期: 2012-01-20; 收到修改稿日期: 2012-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51169004); 广西岩土力学与工程重点实验室项目(11-CX-02-2); 广西自然科学基金重点项目(2010GXNSFD013011); 广西科技攻关与新产品试制项目(桂科攻0992027-8).

第一作者简介: 牟春梅, 主要从事岩土工程的教学与研究. Email: muchunmei@163.com, 421079166@qq.com

1 引言

土的结构性问题已被公认为是一个非常重要、而又非常复杂的研究课题。已有研究表明^[1,2]:软黏土的应力与应变之间的关系、孔隙水压力和应变之间的关系以及固结变形等都与软黏土的结构特性有着显著的关系,土体的结构特性已成为影响土力学特性诸要素中一个最为重要的要素。但是,长期以来都无法找到既明确合理又方便适用的综合性定量指标,对土结构性研究只能从定性角度予以解释和描述,以至于给土的结构性研究带来很大的不便和复杂化。近年来,天然土体的结构性对其工程力学效应的影响引起了岩土工程学界更进一步的关注,同时也针对区域性软土建立了大量的工程应用模型^[1~4],但模型的适用性也存在着诸多的局限,无法得到更进一步的推广应用。由于土体材料的特殊性(即非连续介质),以及目前对土体结构性方面的研究尚不成熟,建立新的土体结构性的本构关系确实具有一定的难度,而要建立适用于各种不同条件下的微结构力学模型的普遍形式,更不切合实际。在有关土体的各种变形和强度计算中,选用合适的土的本构关系与模型参数,对于计算结果的可靠性十分重要。修正剑桥模型是广泛用于土体材料的一种弹塑性本构模型,也是目前国际上在土体材料方面唯一得到公认的弹塑性模型。因此,它受到国内外岩土力学学者和岩土工程界的普遍重视,已经应用在许多岩土工程的设计、施工和研究之中,取得了较好的效果。但是,修正剑桥模型是在重塑土的试验基础上发展起来的,没有考虑结构性和初始应力状态的影响,本文试图在这方面做些探索性的工作。本文在经典的弹塑性理论的大框架下,以桂林岩溶区分布的饱和软黏土为研究对象,结合室内大量的试验成果,依据前人已构建的剑桥模型,充分考虑了饱和软土的结构特性和初始应力状态的影响,在继承修正剑桥模型优点的基础上对其进行改进,构建了一种新的饱和软黏土的弹塑性本构模型,并对模型作了分析和比较,初步表明了模型的合理性和有效性,进一步的工程验证研究还在进行之中。

2 结构性土剑桥模型的研究及构建模型思路

2.1 结构性土剑桥模型的研究

修正剑桥模型仅在屈服线上与原始剑桥模型有

所不同,是由 Roscoe 和 Burland^[3,4] 所提出,认为模型的屈服轨迹应为椭圆,建议使用塑性能增量来代替原来的表达式,解决了剑桥模型中存在的不足。即用塑性能增量 $dW^p = p[(d\varepsilon_v^p)^2 + (Md\varepsilon_s^p)^2]^{1/2}$ 来代替原来剑桥模型中的塑性能增量表达式,得到修正剑桥模型的弹塑性矩阵为^[5~8]:

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_s \end{Bmatrix} = \frac{\lambda - k}{(1 + e)} \frac{2\eta}{(M^2 + \eta^2)} \times \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{\lambda - k} \frac{M^2 + \eta^2}{2\eta} & 1 \\ 1 & \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{dp}{p} \\ d\eta \end{Bmatrix} \quad (1)$$

对于一定初始压力和重度的土,修正的剑桥模型需要用 5 个土性参数来描述土体的力学特征, M 、 λ 、 k 是土性参数,表征的物理含义分别是摩擦常量、压缩和回弹曲线的斜率。修正剑桥模型是在大量的固结和膨胀试验基础上得出的,因此,模型中的参数也可以从固结试验中得出。

修正的剑桥模型是在饱和重塑土的基础上建立起来的,国内外许多学者对修正剑桥模型进行了改进并建立了新的本构模型。目前,一般通过引入结构性参数来反映结构性对土的变形特性和破坏影响^[9],如 Liu 和 Carter^[10,12]、Baudet 等(2001)^[13]、谢定义和齐吉琳^[14]、谢定义等^[15]、肖树芳等^[2,7,16]、饶仰平^[17,18]、孙德安^[19]、刘孟飞^[20]、李俊连^[21]、曾玲玲^[22]、饶为国等^[23] 均建立了结构性土体模型。其中 Liu 和 Carter 等^[10,12,20~22] 对结构性饱和软黏土的特性进行了非常细致的理论研究,并将软黏土结构特性的影响因素引入到修正的剑桥模型中,建立了一个充分考虑结构性的剑桥模型;如果土体没有结构性或者因外荷作用导致土体的结构完全破坏,则该模型退化为修正剑桥模型。为了描述饱和软黏土结构特性的影响引入了 3 个结构特性参数,结果证实该结构性剑桥模型可以从定性和定量两个方面共同反映结构性土的许多特征。饶为国等考虑到剑桥模型中没有包含软黏土的结构特性这一因素,于是将土体结构性影响因子——“综合结构势”引入到修正的剑桥模型中,构建了一个可以考虑结构性影响的本构模型。

2.2 新建模型的研究思路

受到以上学者对结构性土本构模型研究的启发,综合吸取以上学者的研究精华,本文的研究思路主要包括以下几个方面:

(1) 饶为国等人是将谢定义的用来表征结构特性的量化指标-综合结构势,与修正剑桥模型结合,导出了一个新的弹塑性本构模型。

(2) Liu 等是用结构屈服应力、结构性孔隙比、结构性指数等 3 个指标来表征土的结构特性。

(3) 本文以饶为国等的研究思路为出发点,借用 Liu 的 3 个结构性参数来表征饱和软黏土的结构特性;从土的天然状态分析可知,在初始应力状态下有 $\sigma_x = k_0 \sigma_z$,而通常情况下 k_0 不等于 1.0,这一点在修正剑桥模型中没有考虑,本文则考虑初始应力的影响,以桂林岩溶区饱和软黏土为研究对象,吸取以上两者的研究精华,导出本文的弹塑性本构模型。新建本构模型可以同时考虑结构性和初始应力这两个因素。

(4) 本文研究的是饱和软黏土,由此可以假设,影响结构性的两大关键性因素中的联结的影响大大降低,而排列是影响结构性的主要因素,而直接影响排列的关键物理量也是孔隙比。在外力作用下产生的变形是结构联结、颗粒和孔隙等要素变形的综合结果,孔隙的存在是结构要素发生变形的根本原因,在荷载作用下,颗粒相互靠拢、相互镶嵌造成颗粒间距减小,孔径也随之减小。因此,本文引入的结构性参数也主要体现在孔隙比 e 的变化上。

3 软黏土结构性模型的建立

3.1 软黏土原始结构性模型的引用

饶为国等在修正的剑桥模型基础上,引用谢定义的“综合结构势”,得出考虑土结构性的弹塑性本构模型如下^[23]:

$$\begin{cases} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_s \end{cases} = A \frac{C_c - C_s}{v} \frac{\eta}{(M^2 + \eta^2)} \times \begin{bmatrix} \frac{C_s}{C_c - C_s} \frac{M^2 + \eta^2}{2\eta} & 1 + m_p \\ 1 + m_p & \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{dp}{p} \\ d\eta \end{cases} \quad (2)$$

式中, m_p 为土体结构性影响因子,称为“综合结构势”; A 为平衡关系式的待定系数,起平衡关系式的作用,没有物理意义。其他参数的物理意义与修正剑桥模型中参数的含义相同。

3.2 软黏土结构性参数的引入

本文利用 Liu 和 Carter 等的研究结果^[10, 12],结

合室内压缩试验曲线 ($e - \ln p$), 引入 Liu 和 Carter 的结构性孔隙比 Δe 来描述桂林岩溶区饱和软黏土的结构性:

$$\Delta e = e - e^* = \Delta e_y \left(\frac{P_y}{P} \right)^b \quad (3)$$

式中, e 为饱和结构性土的孔隙比; e^* 为饱和重塑土的孔隙比; Δe 为结构性孔隙比,即某一应力 p 下,原状土和重塑土二者孔隙比的差值; p_y 为初始结构屈服应力; Δe_y 是在 $p = p_y$ 应力状态下所对应的结构性孔隙比; b 为结构性指数,是用来描述结构性土其结构破坏速率的一个量化指标,即 b 值越大,土体破坏的越快。Liu 和 Carter 经过大量的室内试验分析研究得出: b 值的大小取决于土的类型和结构特性,对于矿物成分相同、应力历史相同但具有不同深度的饱和软黏土试样, b 值主要取决于软黏土的液性指数 I_L , b 值的确定方法详见文献[11]。

3.3 软黏土结构性模型的建立

结合式(2)和(3),并用应力比 η^* 代替原有模型中应力比 η ,以描述初始不等向固结(k_0 固结)所诱发的各向异性;以 Δe 来反映软黏土的结构性,本文建立了如下增量矩阵形式的软黏土弹塑性本构关系式:

$$\begin{cases} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_s \end{cases} = A \frac{\lambda - k}{(1 + e)} \frac{\eta^*}{(M^2 + \eta^{*2})} \times \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{\lambda - k} \frac{M^2 + \eta^{*2}}{2\eta^*} & 1 + \Delta e \\ 1 + \Delta e & \frac{2\eta^*}{M^2 - \eta^{*2}} \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{dp}{p} \\ d\eta^* \end{cases} \quad (4)$$

式(4)为新建的能反映结构性和初始应力的弹塑性模型,以下对其中的参数进行定义: Δe 是结构性孔隙比,某一应力状态下,原状土和重塑土二者孔隙比的差值, $\Delta e = \Delta e_y \left(\frac{P_y}{P} \right)^b$; $\eta^* = \sqrt{\frac{3}{2}(\eta_{ij} - \eta_{i0})(\eta_{ij} - \eta_{j0})}$ 相对应力比(又称剪压比),常规三轴试验中 $\eta^* = \frac{q}{p}$, $\eta_0^* = \frac{3(1 - k_0)}{1 + 2k_0}$ 为初始相对应力比(又称初始剪压比), k_0 为静止土压力系数; $\eta_{ij} = \frac{S_{ij}}{p'}$ 为应力偏张量; $\eta_{i0} = \frac{S_{i0}}{p'_0}$ 表示 k_0 固结完成时的应力偏张量; p 为有效平均正应力, $q = \sqrt{\frac{3}{2}S_{ij}S_{ij}}$ 为广义剪应力,与修正剑桥模型参数含义

相同。对于三轴固结不排水情况,轴向应力和径向应力与相应的应变之间应满足如下关系式:

$$\sigma_2 = \sigma_3 \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3$$

$$\begin{Bmatrix} p \\ q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_v \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix}$$

其他参数的含义与前述的参数含义相同。

3.4 模型的分析与讨论

改进后的弹塑性模型就可以反映土的初始不等向固结诱发的各向异性以及结构性的土体的变形特性。现对新建模型进行分析:

(1)由新构建的模型可以看出,模型矩阵的所有元素均不为零,这说明正应力不仅可以产生体应变,而且对剪应变有影响;剪应力不但可以产生剪应变,而且对体应变也产生影响,因此,新构建的模型同时考虑了土体材料的压硬性和剪胀性(对于正常固结黏土实际为剪缩性)。

(2)新建模型采用了参量 p_0 (隐含于模型中)^[23],因而剪切变形的影响也已充分考虑。

(1)、(2)继承了饶为国等^[23]所建模型的精华。

(3)新建模型引入参量 Δe ,因而土的结构特性这一根本内在因素的影响已考虑在模型中。

(4)用应力比 η^* 代替原有模型中的 η ,描述了初始不等向固结所诱发的各向异性。

(5)、(6)为本文的突破点之所在,在 1 和 2 的基础上,采用 Liu 和 Carter 的结构性孔隙比来考虑结构性,以 η^* 代替 η 来考虑初始应力状态的影响

构建新的弹塑性模型。

(5)从新建模型可以看出,当 $A = 1, \Delta e \approx 0$ (土无结构性),式(3.3.1)退化为修正剑桥模型;当 $\Delta e_y = 0$ 或 $b = 0$ 时,结构性土退化为重塑土,式(3.3.1)退化到修正剑桥模型。

(6)当 $\eta_0^* = \eta_0$ 时,不考虑初始应力状态的影响,式(3.3.1)退化到修正剑桥模型。

以上 5 和 6 两点针对新建模型考虑结构性和初始应力影响的分析与讨论,若不考虑结构性和初始应力的影响,新建模型退化到修正剑桥模型。

4 模型计算值和试验值的比较

为了检验新建模型的性能,用所构建的新模型来预测饱和和软黏土的变形和强度特性,以验证所建模型的可靠性。试验土样是取自桂林岩溶区某石化公司软基处理工程场地地基土中的淤泥(表 1)。把试验参数 ($M = 1.0785, \lambda = 0.2445, k = 0.0169, e = 1.68, \Delta e_y = 0.33, P_y = 42 \text{ kPa}, b = 1.4, k_0 = 0.4987$) 代入模型,计算出给定应力增量时,各应力状态下的应变值,从而得到饱和软黏土的应力应变关系(图 1)。

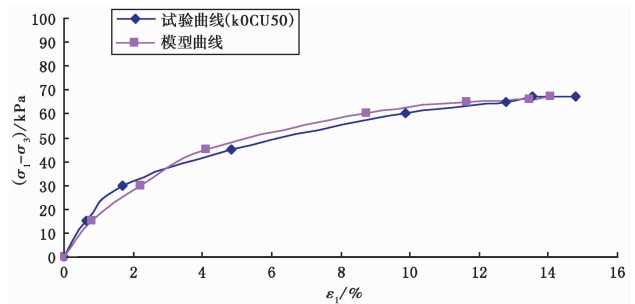


图 1 计算结果与试验结果的对比如

Fig. 1 Comparison of theoretical with testing results

表 1 软黏土的基本物理力学指标的统计值

Table 1 Statistical values of physical and mechanical indexes of soft clay soil

指标	$W / (\%)$	e_0	G_s	$W_L / (\%)$	$W_p / (\%)$	I_L	I_p	C_c	C_s	$a_{1-2} / \text{MPa}^{-1}$	E_{1-2} / MPa	深度
统计值	59.5	1.68	2.71	49.8	28.4	1.42	21.1	0.563	0.039	1.354	1.96	整层

从图 1 可以看出,新构建模型所预测的值与三轴压缩试验中的试验值拟合的比较好。基于此,本文所构建的模型可以比较合理地描述饱和和软黏土的应力与应变特性,可以定量地描述饱和和软黏土的变形和强度特性。

5 结 论

(1)在利用经典的弹塑性理论和吸取前人已建本构模型及结构性的研究精华,结合试验成果,并引入土体的结构特性参数的基础上提出了本文构建模型的思路。

(2)在修正剑桥模型的基础上,充分考虑了土体的结构特性和初始应力状态的影响,得到了饱和软黏土应力与应变的本构关系,模型比较全面地反映了土体变形的弹塑性特征。

(3)模型描述了饱和软黏土结构特性这一根本内在因素的影响,反映了初始应力各向异性的塑性体硬化,能较好地适用于桂林岩溶区饱和软黏土;模型参数确定也不复杂,通过普通的应变和应力式三轴试验即可测定。

(4)通过对新建模型的预测和评价,得到该模型的预测值和试验值具有比较好的一致性,初步验证了新建模型的合理性和有效性。

本文只是作了一个初步的尝试,模型的可靠性需要多方面的验证,该本构模型的实用性还没有工程实例来验证,笔者将继续这一工作,在实践中进一步积累试验资料对理论模型进行验证。

参 考 文 献

- [1] 刘恩龙,沈珠江.结构性黏土研究进展[J].岩土力学,2005,26(增1):1~8.
Liu Enlong, Shen Zhujiang. Advance in researches on structured clay. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(S1):1~8.
- [2] 王国欣,肖树芳.土结构性本构模型研究现状综述[J].工程地质学报,2006,14(5):620~626.
Wang Guoxin, Xiao Shufang. Review on current situation of soil structural constitutive models. Journal of Engineering Geology, 2006,14(5):620~626.
- [3] KH Roscoe, AN Schofield & A Thurairajah. Yielding of clays in states wetter than critical. Geotechnique. 1963, 13(3):211~240.
- [4] KH Roscoe, JB Burland. On the Generalized Stress-Strain Behavior of "Wet Clay" in Engineering Plasticity. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1968.
- [5] 屈智炯.土的塑性力学[M].成都:成都科技大学出版社,1987.
Qu Zhijiong. Soil Plastic Mechanics. Chengdu: Chengdu Technology University Press, 1987.
- [6] 章根德.土的本构模型及其工程应用[M].北京:科学出版社,1995.
Zhang Gende. Soil Constitutive Model and Engineering Application. Beijing: Science Press, 1995.
- [7] 雷华阳,肖树芳.天津软土的次固结变形特性研究[J].工程地质学报,2002,10(4):385~389.
Lei Huayang, Xiao Shufang. Study on secondary-consolidation deformation characteristics of soft soil in Tianjin. Journal of Engineering Geology, 2002,10(4):385~389.
- [8] 张学言,闫澍旺.岩土塑性力学基础[M].天津:天津大学出版社,2003.
Zhang Xueyan, Yan Shuwang. Geotechnical Plastic Mechanics. Tianjin: Tianjing University Press, 2003.
- [9] 刘恩龙,沈珠江.结构性土的二元介质模型[J].水利学报,2005,36(4):391~395.
Liu Enlong, Shen Zhujiang. Binary medium model for structured soils. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(4):391~395.
- [10] MD Liu, JP Cater. Virgin compression of structured soils, Geotechnique, 1999. (1):43~57.
- [11] MD Liu, JP Cater. Modeling the destructuring of soils during virgin compression. Geotechnique, 2000,50(4):479~483.
- [12] Liu MD, Cater JP. A Structured Cam Clay Model[A]. Research Report No R814, 2002.
- [13] BA Baudet, SE Stallebrass. Modeling the destructuration of soft natural clays. In: Computer Methods and Advances in Geomechanics. 2001.
- [14] 谢定义,齐吉琳.土结构性及其定量化参数研究的新途径[J].岩土工程学报,1999,21(6):651~656.
Xie Dingyi, Qi Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999,21(6):651~656.
- [15] 谢定义,齐吉琳,张振中.考虑土结构性的本构关系[J].土木工程学报,2000,33(4):35~41.
Xie Dingyi, Qi Jilin, Zhang Zhenzhong. A constitutive laws considering soil structural properties. China Civil Engineering Journal, 2000,33(4):35~41.
- [16] 肖树芳,雷华阳,房后国,等.近代海积软黏土结构及弹-塑性模型研究[J].工程地质学报,2000,8(4):394~399.
Xiao Shufang, Lei Huayang, Fang Houguo, et al. Study on the structural characteristics and elastic-plastic model of recent marine soft soil. Journal of Engineering Geology, 2000,8(4):394~399.
- [17] YP Yao, T Luo, DA Sun, H Matsuoka. A simple 3-D constitutive model for both clay and sand. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(2):240~246.
- [18] 罗汀,路德春,姚仰平.考虑应力路径影响下砂土的三维本构模型[J].岩土力学,2004,25(5):688~693.
Luo Ting, Lu Dechun, Yao Yangping. Three-dimensional constitutive model of sand considering stress path. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(5):688~693.
- [19] 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 De'an, Yao Yangping, Yin Zongze. An elasto plastic model for soil with initially stress induced anisotropy. Rock and Soil Mechanics, 2000,21(3):222~226.
- [20] 刘孟飞.饱和K₀固结黄土的结构性研究[D].西安建筑科技大学硕士论文,2005,6.
Liu Mengfei. The Characteristics of Structure of Saturated K₀ Consolidated Loess. Xi'an University of Architecture & Technology, 2005.
- [21] 李俊连.饱和结构性K₀固结黄土的变形强度特性研究[D].西安建筑科技大学硕士论文,2004,6.
Li Junlian. The Characteristics of Deformation and Strength of Saturated Structural K₀ Consolidated Loess. Xi'an University of Architecture & Technology, 2004.
- [22] 曾玲玲.软土的结构性及不同应力路径下的力学特性试验研究[D].暨南大学硕士论文.2007.
Zeng Lingling. Experimental Studies on Structural Properties and Mechanical Behavior under Different Stress Paths of Soft Soil. Guangzhou: Jinan University. 2007.
- [23] 饶为国,赵成刚,王哲,等.一个可考虑结构性影响的土体本构模型[J].固体力学学报,2002,23(3):34~39.
Rao Weiguo, Zhao Chenggang, Wang Zhe, et al. Constitutive model considering the influence of soil structure. Acta Mechanica Solida Sinica, 2002,23(3):34~39.