

考虑两种不同性质超固结的土体本构模型

张永兴¹, 郑智能^{1,2}, 刘元雪³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;
3. 后勤工程学院 地下工程系, 重庆 400016)

摘要: 结构对土体的变形特性有强烈影响, 土体本构模型应该反映土体的结构性。通过调研分析将土体变形表现出的超固结划分为结构超固结与应力超固结这 2 种不同性质的超固结, 从而使结构超固结与应力超固结统一起来。土体结构超固结采用结构超固结参数来表示。模型对修正剑桥模型进行扩展, 模型的屈服面形状与修正剑桥模型一致, 而屈服面的大小由结构超固结和应力超固结 p_s 之和决定, 而屈服面的变化由体积硬化与结构损伤共同来描述, 模型采用相关联流动法则; 从而提出了一个可考虑结构性的粘土本构模型。模型概念明确, 参数简单并有物理意义。初步验证表明, 模型可以较好的反映结构性土体的变形特性。

关键词: 土体; 本构模型; 结构性; 超固结

中图分类号: TU 856 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)01-0001-03

A Constitutive Model for Structured Clays based on Two Different Types of Overconsolidation

ZHANG Yong-xing¹, ZHENG Zhi-neng^{1,2}, LIU Yuan-xue³

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 3. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, P. R. China)

Abstract: Structure has a major influence on the stress-strain relation of soil, which implies that the constitutive model should reflect the its structure. Based on the investigation, the over-consolidation (OC) of the soils was made up of two different types, which were structure-induced OC and stress-induced OC. And then the structure-induced OC and stress-induced OC were united. Structure-induced OC index was used to represent the degree of structure and the cam clay model was extended. The shape of the yield surface was the same as cam clay model, whise the size was equal to the sum of the structure-induced OC and stress-induced OC. And the change in size of the yield surface was decerminated by the volume-harden function and the structural damage function. The associated flow rule was adopted in the model. Afterwards constitutive model for structured clays was presented.

Key words: clays; constitutive model; structure; over consolidation

绝大多数天然土都有一定的结构。土体的结构对其工程性质有强烈的影响^[1]。饱和重塑正常固结粘土, 在临界应力状态时其应力状态与体积状态(或含水量、孔隙比)之间存在着唯一性关系^[2]。然而, 对于结构性土体, 其应力状态与体积状态之间并不存在着唯一性关系。结构性土体的变形除受应力影

响外, 还受其结构的影响。

当前剑桥模型应用广泛, 为相对完善的土体本构模型之一。但剑桥模型的对象是饱和重塑土。该模型不考虑土体的结构性, 所以更适用于堤坝、填方挡土墙、冲填土的固结等问题。而对于天然地基、基坑硐室开挖、煤矿开采等问题的分析, 采用

收稿日期: 2009-09-12

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTC 2005BB6114)

作者简介: 张永兴(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程的教学科研, (E-mail) cqyxzhang@163.com。

剑桥模型进行预测计算常常会产生较大的偏差^[3]。为准确描述结构性土体的变形特性,以剑桥模型为基础,考虑 2 种不同性质的超固结-结构超固结和应力超固结,建立了考虑结构性的土体本构模型。

1 应力超固结与结构超固结

研究^[4-6]表明:与重塑土变形特性相比,结构性粘土的变形特性主要存在 3 个方面的不同:1) 屈服应力,土体的结构使土体的屈服应力增加;2) 初始模量,土体的结构使土体的初始模量增加,在相同孔隙率下,结构性土体具有更大的刚度;3) 最大应力比不同。结构性与超固结都可以使土体变形表现出超固结特性。在对土体变形特性作用方面,超固结与结构性的相似性主要有^[4]:1) 结构性与超固结都会提高土体的强度;2) 在相同应力作用下,结构性与超固结都会减小土样的变形。

土体变形所表现出来的超固结(称为表观前期固结)可以分为 2 种不同性质的超固结:土体的前期应力超固结(称为应力超固结)和结构引起的超固结(称为结构超固结,文献^[7]称为假固结)。结构超固结与应力超固结一样,都将使屈服面扩大,但是两者随土体变形时的变化规律与机理不同。应力硬化使应力超固结增大,而结构损伤使结构超固结减小。

2 一般弹塑性公式

根据塑性理论,一点的应变率张量可分解成弹性部分和塑性部分,并写成如下形式:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^e + d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

其中, $d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^e$ 弹性分量可表示为

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^e = [D_{ijkl}^e d\sigma_{kl}] \quad (2)$$

式中: D_{ijkl}^e 是弹性模量张量,且被表示成体积模量 K 和剪切模量 G 的函数。

$$D_{ijkl}^e = (K - \frac{2}{3}G)\delta_{ij}\delta_{kl} + G(\delta_{ij}\delta_{jl} + \delta_{ik}\delta_{jk}) \quad (3)$$

式中: δ_{ij} 是 Kronecker 符号, K 、 G 采用修正剑桥模型的定义,如式 4。

$$K = \frac{(1+e)p'}{\kappa}, G = \frac{9(1-2\mu)(1+e)p'}{2\kappa(1+\mu)} \quad (4)$$

式中: κ 表示体积应变与对数平均压力 ($\boldsymbol{\varepsilon}_v \sim \ln p$) 平面中回弹线的斜率; μ 为泊松比,并假设泊松比 μ 为常数。

塑性分量 $d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p$ 的求解推导如下。

3 结构性粘土的塑性变形

3.1 屈服面

模型在应力空间采用了一个同时考虑结构超固结和应力超固结的屈服面,但不考虑土体的各向异性。模型的屈服面与修正剑桥模型的屈服面形状相

似,如图 1 所示。模型屈服面表达式如下:

$$f(p', q, p'_0) = q^2 - M^2[p'(p'_0 - p')] = 0 \quad (5)$$

式中: M 在变形极限状态的应力率; p'_0 定义为表观前期固结压力,表示屈服面的大小, p' 为屈服面与轴的非零交点。根据结构超固结与应力超固结概念,有

$$p'_0 = p'_r + p'_s \quad (6)$$

式中: p'_r 为前期固结应力; p'_s 为结构超固结应力。

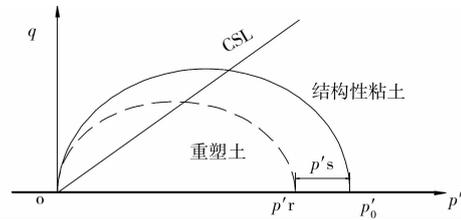


图 1 模型的屈服面

3.2 体积硬化与结构损伤

模型屈服面采用各向同性硬化。屈服面的硬化由应力的硬化 dp'_r 与结构损伤 dp'_s 2 个方面表示。屈服面随着土体结构的损伤的累积而不断减小,而随着土体塑性变形的增加而增大。从而,应力超固结参数与结构超固结参数一起,描述天然粘土从超固结到正常固结,从结构性土体到重塑土的过程。

模型假设:1) 应力超固结和结构超固结两者对屈服面的作用是独立、不耦合的;2) 结构损伤是一个单向的、不可逆的过程;3) 弹性变形不引起土体结构的损伤;4) 不考虑结构的各向异性。在假设 1) 的条件下,根据式(6)有,

$$dp_0 = dp'_r + dp'_s \quad (7)$$

1) p'_r 的各向同性硬化 p'_r 的各向同性硬化采用与修正剑桥模型类似的体积硬化定律,有:

$$dp'_r = \frac{vp'_r}{\lambda - \kappa} d\boldsymbol{\varepsilon}_v^p \quad (8)$$

2) p'_s 的损伤 土体的结构损伤主要由土体的塑性变形引起。随土体损伤程度的增加,应变导致的损伤增量越小;当损伤达到某一值时,可认为土体的结构性完全破损^[8]。土体的结构损伤使土体结构超固结逐渐减小,当结构完全破损时,土体的结构超固结为零。据此假设土体的损伤度量为:

$$r = \exp\left[\frac{-k_1 \boldsymbol{\varepsilon}^d}{\lambda^* - \kappa^*}\right] \quad (9)$$

所以:

$$dr = -\frac{k_1}{\lambda^* - \kappa^*} r d\boldsymbol{\varepsilon}^d \quad (10)$$

式中: k_1 为材料参数, $\boldsymbol{\varepsilon}^d$ 为结构损伤应变, λ^* 为土体的等压固结压缩参数。

土体的塑性体积变形和塑性剪切变形都会引起结构损伤;但塑性体积应变和塑性剪切应变对结构损伤速率的贡献大小是不同的^[9],因此定义 $d\boldsymbol{\varepsilon}^d$ 为:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^d = \sqrt{(1-A)(d\boldsymbol{\varepsilon}_v^p)^2 + A(d\boldsymbol{\varepsilon}_s^p)^2} \quad (11)$$

综上可得:

$$dp'_o = \frac{vp'_r}{\lambda - \kappa} d\epsilon_v^p = \frac{vp'_r}{\lambda - \kappa} d\epsilon_v^p - p'_o \frac{\alpha}{\lambda - \kappa} \sqrt{(1-A)(d\epsilon_v^p)^2 + A(d\epsilon_s^p)^2} \quad (12)$$

土体结构性描述的参数有 3 个,分别为 k_1 、 A 和 p'_{s_0} 。 k_1 表示土体塑性变形对结构损伤影响的速率大小; A 表示塑性体积应变和塑性剪切应变在总的损伤应变中所占的大小比重,如两者相同则 A 取 0.5; p'_{s_0} 表示土体初始结构性的大小。

3.3 流动法则

采用相关联的流动法则,屈服面函数与塑性势函数相等,即:

$$g(p', q, p'_o) = f(p', q, p'_o) = q^2 - M^2 [p'(p'_o - p')] = 0 \quad (13)$$

3.4 增量型应力-应变关系

根据以上推导可得:

$$d\epsilon_v^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial p}, d\epsilon_s^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial q} \quad (14)$$

$$\text{而, } d\lambda = \frac{1}{H}, H = -\frac{\partial f}{\partial p'_o} \frac{\partial p'_o}{\partial \epsilon^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma}$$

4 模型初步验证

超固结参数与结构性参数的确定方法见文献[10]。文献[11]对结构性土体 calcarenite 进行了大量的试验研究;通过文献[17]可获得 calcarenite 的参数如下: $M=1.45$ 、 $\lambda=0.208$ 、 $\kappa=0.0165$ 、 $e_{ic}^* = 2.57$ 、 $v=0.25$ 、 $p'_{s_0}=2400$ kPa、 $p'_r=147$ kPa、 $k_1=5.4$ 、 $A=0.7$ 。图 2 为文献[17]试验结果与该文模型预测结果之间的对比关系图。

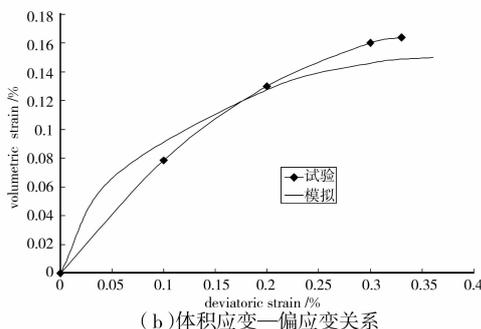
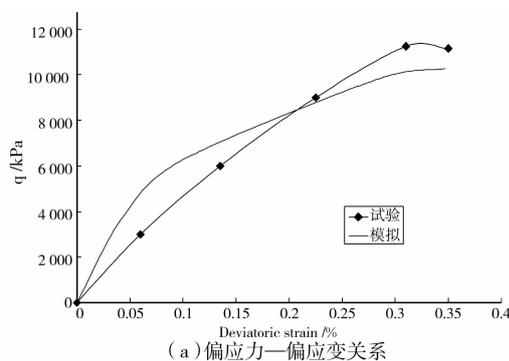


图 2 模型预测与试验结果对比

对比可以看出:模型对 calcarenite 的变形预测中,体积变形的定性和定量预测与试验结构一致,剪应变定性不错,在定量上较差。模型较好的反映了结构性土体的变形特性:在应力较小的阶段,土体结构完整,土体具有较高的模量;当变形进一步积累增大,土体结构损伤后,土体模量迅速降低。

5 结 语

该文总结土体变形的超固结特性的 2 种不同性质的原因——应力超固结和结构性,提出了结构损伤规律和应力硬化规律,在修正剑桥模型的基础上,推导出了一个适用于天然结构性粘土的各向同性的弹塑性本构模型。模型概念明确,参数简单并有物理意义。初步预测结果表明,模型可以较好的反映结构性土体的变形特性。

参考文献:

[1] LEROUEIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soil and weak rock[J]. Geotechnique, 1990, 40(3):467-488.

[2] ANDREW SCHOFIELD, PETER WROTH. Critical state soil mechanics [M]. England: McGraw-Hill Publishing Company limited. 1968.

[3] 李广信. 土的基本性质与测试技术[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学会会议论文集. 北京:清华大学出版社, 2003.

[4] 刘元雪,王培勇,王良. 粘土的结构性与超固结[J]. 后勤工程学院学报, 2005, 21(4):1-6.

[5] 郑智能,刘元雪,张永兴. 考虑结构性的土体本构模型的建模方法[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(3):77-80.

[6] 陈晓平,曾玲玲,吕晶,等. 结构性软土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12):3223-3228.

[7] HAMAMDSHIEV K B. Investigation of pseudo-overconsolidation of soils [C] // Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981.

[8] 刘元雪,施建勇,尹光志,等. 基于空间变换的土体小应变本构模型研究[J] 水利学报, 2004(6):14-20.

[9] LUIGI CALLISTO, SEBASTIANO RAMPELLO. An interpretation of structural degradation for three natural clays[J]. Canada Geotechnical Journal, 2004, 41(1): 392-407.

[10] 刘元雪. 基于应变空间变换的土体小应变本构模型研究 [D]. 南京:河海大学, 2003.

[11] LAGIOIA R, VAUGHAN P R. An experimental and theoretical study of the behavior of a calcarenite in triaxial compression[J]. Geotechnique, 1995, 40(3): 467-488.

(编辑 胡 玲)