

非饱和原状膨胀土的弹塑性损伤本构模型研究

An elastoplastic damage constitutive model of unsaturated undisturbed expansive soil

卢再华¹, 陈正汉²

(1. 海军工程大学 文理学院, 湖北 武汉 430033; 2. 后勤工程学院 土木系, 重庆 400041)

摘要: 以复合体损伤理论为基础, 建立了非饱和原状膨胀土的弹塑性损伤本构模型。模型可反映原状膨胀土的三个主要特征(胀缩性、裂隙性和超固结性)造成的独特的力学特性, 即, 低围压情况下的软化和剪胀, 围压较高时的硬化和剪缩以及干湿变化时的反复胀缩特性。模型共包含 23 个参数, 都可由试验测定。

关键词: 非饱和土; 膨胀土; 弹塑性; 损伤; 本构模型

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0422-05

作者简介: 卢再华(1972-), 男, 岩土工程工学博士, 从事非饱和土、膨胀土等特殊土的力学特性研究。

LU Zai-hua¹, CHEN Zheng-han²

(1. Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

Abstract: Based on the damage theory of composite substance, an elastoplastic damage constitutive model of unsaturated undisturbed expansive soil was developed. The model can describe the complex mechanical behaviors of undisturbed expansive soil as a result of the three main characters of expansive soil, i. e. high swelling or shrinking deformation, cracks and over consolidation. In detail, the model can reflect the following behaviors of unsaturated undisturbed expansive soil, softening and bulging when sheared under low pressure, while hardening and contracting under high pressure and repeated swelling or shrinking when it was wetted or dried up. There are 23 parameters in the constitutive model which can be determined from the test results of unsaturated undisturbed expansive soil.

Key words: unsaturated soil; expansive soil; elastic plasticity; damage; constitutive model

0 前言*

膨胀土具有胀缩性、裂隙性和超固结性三个主要工程特性。在膨胀土的本构模型研究方面, Gens 和 Alonso 提出了一个膨胀土弹塑性概念模型(膨胀土 G-A 模型)^[1]。该模型以 Alonso 提出的非饱和土弹塑性模型为基础, 将土体变形分为微观和宏观两个结构层次, 主要描述了重塑膨胀土在干湿循环过程中的反复胀缩特性。原状膨胀土的裂隙性和超固结性使其还具有一定的软化和剪胀特性, 能同时反映膨胀土的湿胀干缩变形、软化和剪胀特性的本构模型尚未见报道。

在土体损伤理论方面, 沈珠江院士先后提出了弹塑性损伤模型和非线性损伤力学模型^[2,3], 可反映饱和和的结构性土体在低围压下的剪胀和软化特性。Desai 也提出了类似的结构性土体的扰动状态概念模型^[4]。两者的基本思想都是复合体损伤理论, 该理论内容包括: 将整个土单元看成由两部分混合而成, 相对完整的土和相对破碎的土; 两种土的力学性状差别较大, 分别用不同的本构模型描述; 在受力过程中, 相对完整的土逐渐转化为相对破碎的土。

原状膨胀土具有超固结性, 裂隙大量发育, 是一种典型的结构性黏土。原状膨胀土在三轴剪切试验过程

中的 CT 扫描结果^[5,6]: 剪切前试样断面相对较完整; 随剪切进行, 试样断面上裂隙、空洞和软弱面等结构损伤所占比例逐渐增加; 剪到残余状态后, 土样断面比较破碎, 结构损伤的演化较明显。因此可以非饱和土本构理论为基础, 结合复合体损伤理论, 建立非饱和原状膨胀土的弹塑性损伤本构模型, 从而反映原状膨胀土的反复胀缩、软化和剪胀等较复杂的变形特性。

1 本构模型的建立

复合体损伤理论包括三个主要内容: ①相对破碎土体的应力应变关系; ②相对完整土体的应力应变关系; ③受力过程中完整土体转化为破碎土体的变化规律, 即结构损伤的演化方程。对于原状膨胀土的复合体损伤模型, 上述三个方面的内容如下。

1.1 相对破碎土体的应力应变关系

相对破碎的膨胀土受力后的塑性变形大, 可采用弹塑性模型描述。膨胀土 G-A 模型能描述膨胀土的胀缩性, 但土体变形分为微观结构变形和宏观结构变形两个层次, 需分别计算两个层次的变形才能得到土

体总变形,模型比较复杂。笔者曾对膨胀土 G-A 模型进行了改进^[7],并将殷宗泽提出的抛物线剪切屈服面引入到该模型中^[8],使其能反映膨胀土的剪胀特性和反复胀缩特性,可用于描述相对破碎膨胀土的应力应变关系,下面叙述其基本内容。

(1) 弹性变形

$$d\epsilon_v^e = d\epsilon_p^e + d\epsilon_s^e; \quad (1)$$

$$d\epsilon_s^e = \frac{1}{3G}dq. \quad (2)$$

式(1)中,

$$d\epsilon_p^e = \frac{k}{v} \frac{dp}{p}, \quad (3)$$

$$d\epsilon_{vs}^e = \frac{k_s}{v} \frac{ds}{s + p_{atm}}. \quad (4)$$

上面4式中 p, q, s 分别称为净平均应力、偏应力和吸力; $d\epsilon_v^e, d\epsilon_s^e$ 分别是弹性体变增量、弹性偏应变增量; $d\epsilon_p^e, d\epsilon_{vs}^e$ 分别为与净平均应力变化相关的弹性体变增量、与吸力变化相关的弹性体变增量; G 为剪切模量; k 是与净平均应力加载相关的弹性刚度系数; v 是土的比容; k_s 是与吸力加载相关的弹性刚度系数; p_{atm} 为大气压力。

膨胀土的湿胀变形较大,且膨胀变形随围压增大而减小。为此模型引入膨胀函数 f_d 来计算吸力降低时的弹性体变增量,那么有

$$d\epsilon_{vs}^e = \frac{f_d k_s}{v} \frac{ds}{s + p_{atm}}, ds < 0, \quad (5)$$

$$f_d = t_d (1 - \frac{p}{p_0})^n. \quad (6)$$

式中 t_d 是膨胀系数,反映土的膨胀性强弱; p_0 为某吸力下屈服净平均应力; n 为膨胀因子,反映膨胀变形随围压衰减快慢程度。

(2) 塑性变形

引入剪切屈服面(用 S_y 表示)后,改进的膨胀土 G-A 模型的屈服面如图1所示,屈服方程如下:

Ly 屈服面

$$f_1(p, q, s, p_0^*) = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0, \quad (7)$$

$$p_s = K_s, \quad (8)$$

$$\frac{p_0}{p_c} = \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{[\lambda(0) - k]/[\lambda(s) - k]}, \quad (9)$$

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1 - r)\exp(-\beta s) + r]; \quad (10)$$

S_y 屈服面

$$f_2(p, q, s, \epsilon_s^p) = \frac{aq}{G} \sqrt{\frac{q}{M_2(p + p_s) - q}} - \epsilon_s^p = 0. \quad (11)$$

式中 p_0^* 是饱和状态下的屈服净平均应力; M 是临界状态线(CSL)的斜率; p_s 是某吸力下临界状态线在 p 轴上截距; K 为反映黏聚力随吸力增长的参数; p_c 为参考应力; $\lambda(s)$ 是某吸力下净平均应力加载屈服后的压缩指数,当土饱和时,即为 $\lambda(0)$; r 为与土最大刚度相关的常数, $r = \lambda(s \rightarrow \infty)/\lambda(0)$; β 为控制土刚度随吸力增长速率的参数; a 是反映剪胀性强弱的参数; M_2 是曲线形状参数; ϵ_s^p 为塑性偏应变。

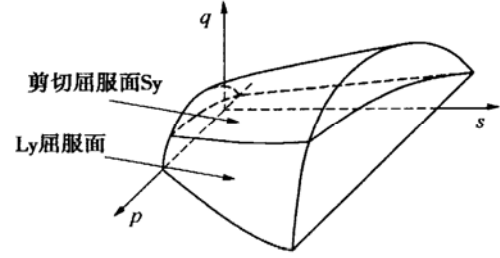


图1 改进的膨胀土 G-A 模型的屈服面图

Fig. 1 The yield surfaces of the improved G-A constitutive model of expansive soil

模型采用关联流动法则,剪切屈服面 S_y 的硬化参数为塑性偏应变 ϵ_s^p , Ly 屈服面的硬化规律为

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{v}{\lambda(0) - k} d\epsilon_s^p. \quad (12)$$

1.2 相对完整土体的应力应变关系

相对完整的膨胀土受力后变形较小,本文采用非饱和土增量非线性弹性模型描述^[9],膨胀土的湿胀变形仍采用膨胀函数 f_d 反映。

膨胀土切线杨氏模量的表达式为^[10]

$$E_t = p_{atm} \left| 1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2(c' + \tan \phi) \cos \phi + 2(\sigma_3 - u_a) \sin \phi} \right|^2 \times (k^0 + m_1 s) \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{p_{atm}} \right)^m. \quad (13)$$

式中 R_f 为破坏比; c', ϕ, ϕ' 分别为膨胀土的有效凝聚力、有效内摩擦角和反映吸力对凝聚力影响的参数。 k^0, m, m_1 都是土性参数,其物理意义如下:根据膨胀土三轴剪切试验结果^[11],归一化的初始杨氏模量 $\log(E_i/p_{atm})$ 和归一化的净平均应力 $\log(\sigma_3 - u_a)/p_{atm}$ 的关系是直线,可表达为

$$E_i = k p_{atm} \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{p_{atm}} \right)^m, \quad (14)$$

其中, k 与归一化的吸力 $\frac{s}{p_{atm}}$ 也呈线性关系,即

$$k = k^0 + m_1 \left(\frac{s}{p_{atm}} \right). \quad (15)$$

南阳膨胀土在不同吸力及不同净室压力情况下的切线泊松比 μ_t 的变化不大,近似地可视为常数。

1.3 结构损伤演化方程

根据南阳原状膨胀土在三轴剪切试验过程中的 CT 扫描结果^[12], 得到了指数函数形式的剪切损伤演化方程:

$$D = D_0 + \exp\left|\frac{p_{c0}}{p}\xi_s\left(\frac{s}{p_{atm}}\right)\right| - 1, (D \leq 1). \quad (16)$$

式中 D_0 为土样的初始损伤值; p_{c0} 和 p_{atm} 分别为原状膨胀土的前期固结压力和大气压力。吸力较低时 (小于大气压力) s 取大气压力, 这样低吸力时曲线仍为指数函数形式。

除了剪切引起的损伤演化外, 反复的湿胀干缩也会引起膨胀土的裂隙损伤演化, 文献[13]根据干湿循环条件下膨胀土裂隙演化的 CT 试验结果, 得到了干湿循环过程中裂隙损伤演化方程为

$$D = \exp(A\xi^Z). \quad (17)$$

式中 A 为反映膨胀土的膨胀性强弱的系数; Z 为曲线形状参数; ξ 为干湿循环过程中累计干缩体变。

总的损伤演化方程为

$$D = D_0 + \exp\left|\frac{p_{c0}}{p}\xi_s\left(\frac{s}{p_{atm}}\right)\right| - 1 + \exp(A\xi^Z), \quad (18)$$

增量形式为

$$dD = \{L_1\}\{d\xi\} + L_2 ds, \quad (19)$$

式中

$$\{L_1\} = \frac{\partial p_{c0}}{9p_{atm}p}\xi_s^{(p_{c0}/p-2)}\exp\left|\frac{p_{c0}}{p}\xi_s\left(\frac{s}{p_{atm}}\right)\right| \times [4\xi - 2\xi - 2\xi - 4\xi - 2\xi - 2\xi - 4\xi - 2\xi - 2\xi - 3\xi_{xy} - 3\xi_{yz} - 3\xi_{xz}], \quad (20)$$

$$L_2 = AZ\xi^{(Z-1)}\exp(A\xi^Z)\frac{k_s}{v(s+p_{atm})}. \quad (21)$$

1.4 膨胀土总体的应力应变关系

根据复合体损伤理论,

$$\{d\sigma\}^a = (1-D)\{d\sigma\}^i + D\{d\sigma\}^d + dD\{\sigma\}^r, \quad (22)$$

其中,

$$\{\sigma\}^r = \{\sigma\}^d - \{\sigma\}^i. \quad (23)$$

式(22)中, 左边为土体总的应力增量, 右边第一项为相对完整土体的应力增量, 右边第二项为相对破碎土体的应力增量, 右边第三项为相对完整土体转化为相对破碎土体引起的应力差值。

相对破碎土体采用弹塑性模型, 土的变形包括弹性和塑性两部分。在非饱和土中, 除了净平均应力外, 吸力对这两部分变形也有贡献, 可得到下面的基本方程^[14]:

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\xi\} + \{F_{sep}\}ds. \quad (24)$$

式中

$$\begin{aligned} [D_{ep}] &= [D_e] - \frac{[D_e]\left(\left|\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right| + \frac{1}{3}\{m\}\frac{\partial f}{\partial s}\right)\left|\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right|^T [D_e]}{\left(-F'\left|\frac{\partial H}{\partial \xi^p}\right|^T + \left|\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right|^T [D_e]\right)\left(\left|\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right| + \frac{1}{3}\{m\}\frac{\partial f}{\partial s}\right)}; \quad (25) \\ \{F_{sep}\} &= -[D_e]\{D_{es}\}^{-1} - \frac{[D_e]\left(\left|\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right| + \frac{1}{3}\{m\}\frac{\partial f}{\partial s}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial s} - \left|\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right|^T [D_e]\{D_{es}\}^{-1}\right)}{\left(-F'\left|\frac{\partial H}{\partial \xi^p}\right|^T + \left|\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right|^T [D_e]\right)\left(\left|\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right| + \frac{1}{3}\{m\}\frac{\partial f}{\partial s}\right)}. \quad (26) \end{aligned}$$

式中 f 为屈服准则; $F' = \frac{df}{dH}$, H 为硬化参数; $\{m\} = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T$ 。若屈服发生在 Ly 屈服面, f 取屈服函数 f_1 , H 为塑性体变 ξ^p ; 若发生 Sy 屈服, f 取屈服函数 f_2 , H 为塑性剪应变 ξ^s 。若 Ly 和 Sy 同时屈服, 则

$$\{d\xi^p\} = \{d\xi^p\}^{Ly} + \{d\xi^p\}^{Sy}. \quad (27)$$

相应地,

$$\begin{aligned} [D_{ep}] &= [D_e] - [D_e]\{d_1\}\frac{\{b_1\}^T a_{22} - \{b_2\}^T a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} - \\ &[D_e]\{d_2\}\frac{\{b_2\}^T a_{11} - \{b_1\}^T a_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \quad (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{F_{sep}\} &= -[D_e]\{D_{es}\}^{-1} - [D_e]\{d_1\}\frac{c_1 a_{22} - c_2 a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} - \\ &[D_e]\{d_2\}\frac{c_2 a_{11} - c_1 a_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}. \quad (29) \end{aligned}$$

式中 $\{b_1\}^T = \left|\frac{\partial f_1}{\partial \sigma}\right|^T [D_e]$, $\{b_2\}^T = \left|\frac{\partial f_2}{\partial \sigma}\right|^T [D_e]$; $c_1 = \frac{\partial f_1}{\partial s} - \left|\frac{\partial f_1}{\partial \sigma}\right|^T [D_e][D_{es}]^{-1}$; $c_2 = \frac{\partial f_2}{\partial s} - \left|\frac{\partial f_2}{\partial \sigma}\right|^T [D_e][D_{es}]^{-1}$; $a_{11} = A_1 + \{b_1\}^T \left|\frac{\partial f_1}{\partial \sigma}\right| + \frac{1}{3}\{m\}\frac{\partial f_1}{\partial s}$, $a_{22} = A_2 + \{b_2\}^T \left|\frac{\partial f_2}{\partial \sigma}\right| + \frac{1}{3}\{m\}\frac{\partial f_2}{\partial s}$, $a_{12} = \{b_1\}^T \left|\frac{\partial f_2}{\partial \sigma}\right| + \frac{1}{3}\{m\}\frac{\partial f_2}{\partial s}$, $a_{21} = \{b_2\}^T \left|\frac{\partial f_1}{\partial \sigma}\right| + \frac{1}{3}\{m\}\frac{\partial f_1}{\partial s}$; $A_1 = -\frac{\partial f_1}{\partial H_1} \left|\frac{\partial H_1}{\partial \xi^p}\right|^T$, $A_2 = -\frac{\partial f_2}{\partial H_2} \left|\frac{\partial H_2}{\partial \xi^p}\right|^T \left|\frac{\partial f_2}{\partial \sigma}\right| + \frac{1}{3}\{m\}\frac{\partial f_2}{\partial s}$, 其中的 H_1 和 H_2 分别为 ξ^p 和 ξ^s 。

相对完整土体采用增量非线性弹性模型,

$$\{d\sigma\} = [D_e]\{d\xi\} + \{F_{se}\}ds, \quad (30)$$

$$\text{其中 } \{F_{se}\} = -[D_e]\{D_{es}\}^{-1}. \quad (31)$$

将相对破碎土体的应力增量, 相对完整土体的应力增量和损伤增量表达式代入式(22), 即得到土体总的应力增量表达式:

$$\{d\sigma\}^a = (1-\bar{D})\{d\sigma\}^i + \bar{D}\{d\sigma\}^d + d\bar{D}\{\sigma\}^r. \quad (32)$$

为了和弹性劲度矩阵 $[D]$ 区别起见, 损伤变量 D 在此处改记为 $\bar{D}$ 。式中上标 a, i 和 d 分别代表总的土体、相对完整土体和相对破碎土体。假设整个土体单元中相对完整土和相对破碎土在受力过程中的应变和吸力协调变化, 则得到

$$\{d\epsilon\} = [D]^{\text{dmg}}\{d\epsilon\} + \{F_s\}^{\text{dmg}}ds。 \quad (33)$$

式中 $[D]^{\text{dmg}}$ 为与应变相关的弹塑性损伤劲度矩阵; $\{F_s\}^{\text{dmg}}$ 为与吸力相关的弹塑性损伤劲度矩阵。

2 模型参数及其确定

- 模型参数归纳为以下三类。
- a) 相对破碎膨胀土: Ly 屈服面参数 $k, \lambda(0), r, \beta, p_c, M, \kappa, G$; 剪切屈服面 Sy 参数 a 和 M_2 ; 与吸力变化相关的参数 k_s, t_d 和 n 。
 - b) 相对完整膨胀土 $c', \phi', \phi^0, k^0, m, m_1, \mu_1, R_f, k_s, t_d$ 和 n 。
 - c) 损伤演化参数: A 和 Z 。

模型参数共计 23 个。如果不考虑膨胀土的结构损伤特性, 则模型退化为膨胀土的非饱和和弹塑性模型 (13 个参数) 或膨胀土的非饱和增量非线性弹性模型 (11 个参数)。若再不考虑土的膨胀性, 模型即为一般非饱和土的弹塑性模型 (11 个参数) 或增量非线性弹性模型 (9 个参数)。

确定模型的全部参数需做 4 种非饱和三轴试验:

- ①控制吸力的各向同性压缩试验, 由不同吸力下的 $v - \lg p$ 曲线斜率及屈服净平均应力 $p_0(s)$ 得到参数 $k, \lambda(0), r, \beta$ 和 p_c 。
- ②控制净平均应力的三轴收缩试验, 由不同净平均应力下收缩试验的 $v - \lg(s + p_{\text{atm}})$ 曲线得到 k_s 值。
- ③控制净平均应力的膨胀试验, 其体积变化结果可得到 t_d 和 n 。
- ④同时控制吸力和净室压力的三轴排水剪切试验, 整理后可得到 $p - q - s$ 空间屈服面的 M, κ 和 G 三个参数值。其余模型参数如下: 与剪切屈服面相关的参数 M_2 取值比 M 略大, a 根据膨胀土剪胀性强弱确定; 损伤演化参数 A 和 Z 由膨胀土的 CT 试验数据确定; 由相对较完整膨胀土的三轴收缩试验和三轴排水剪切试验可得到 $c', \phi', \phi^0, k^0, m, m_1, \mu_1$ 和 R_f 参数^[11]。

3 模型初步验证

采用膨胀土损伤模型的本构方程式 (33), 对文献 [6] 中的 6 个原状膨胀土试样的剪切试验进行计算, 从而对模型做初步的验证。参考文献 [8, 11, 12, 13] 中的试验结果, 确定的模型参数列于表 1。

表 1 模型参数

Table 1 The parameters of model

k	$\lambda(0)$	r	β	p_c/kPa	M	κ	G/kPa
0.003	0.013	0.85	0.0125	30	1.1	0.35	4980
a	M_2	k_s	t_d	n	A	Z	
0.2	1.1	0.008	1.5	4	3.9	2.6	
c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$	$\phi^0(^{\circ})$	k^0/kPa	m	m_1	μ_1	R_f
22.7	17.3	10.6	203.5	0.1	32.8	0.35	0.6

初始参数 p_0^*, ϵ_s^0, D_0 分别为 200 kPa, 0.5% 和 0.3。

图 2 是 6 个原状膨胀土试样剪切过程中 $\epsilon_v - \epsilon_s$ 的试验结果。为计算方便采用多项式进行拟合, 最后按拟合曲线方程可将试样的 $\epsilon_v - \epsilon_s$ 曲线细分为若干个应变增量。

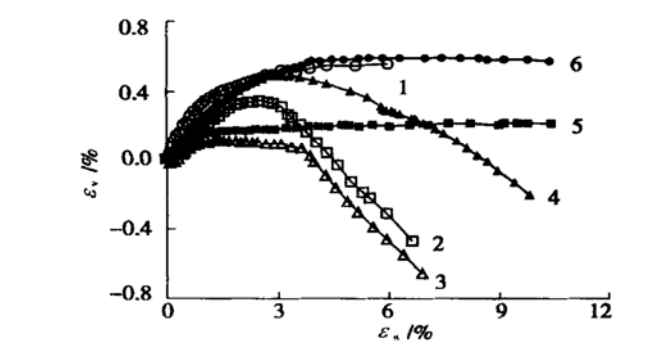


图 2 原状膨胀土剪切试验的 $\epsilon_v - \epsilon_s$ 曲线

Fig. 2 ϵ_v vs ϵ_s curves of natural expansive soil during shearing

计算按应变增量 ϵ_v 和 ϵ_s 逐级加荷; 对每一级应变增量, 先假定相对完整土体和相对破碎土体均为弹性, 按弹性损伤矩阵 $[D]_e^{\text{dmg}}$ 计算出应力增量; 再判断相对破碎土体是否发生屈服以及屈服发生在哪个屈服面, 若发生屈服则按弹塑性损伤矩阵 $[D]_p^{\text{dmg}}$ 重新计算应力增量; 然后按损伤增量累计损伤变量值, 对相对破碎土体按硬化规律计算硬化变量值, 最后进入下一级应变增量。

图 3 中无标记曲线为模型计算结果, 试样 1、试样 2 和试样 3 剪切前的净平均应力分别为 100, 50, 25 kPa。可见, 损伤模型计算结果反映了原状膨胀土三轴剪切时的软化; 相同吸力下最大剪应力值随围压而增大及随围压增大试样的软化特性逐渐减弱等力学特性。图 4 中试样 4、试样 5 和试样 6 剪切前的净平均应力分别为 25, 50, 100 kPa。同样地, 模型计算结果反映了原状膨胀土的软化特性, 相同吸力下最大剪应力值随围压而增大及随围压增大试样的软化特性逐渐减弱。和图 3 相比, 图 4 中吸力较高的一组试样的最大剪应力值较高, 且软化不明显, 这表明模型反映了吸力增大对膨胀土剪切特性的影响。

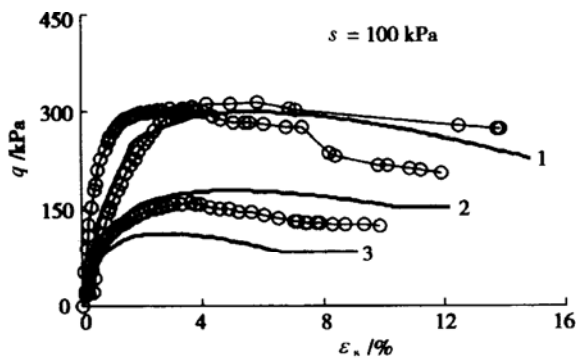


图3 三轴剪切试验结果和模型计算结果比较

Fig. 3 The comparison between the test result and the model prediction of triaxial shear test

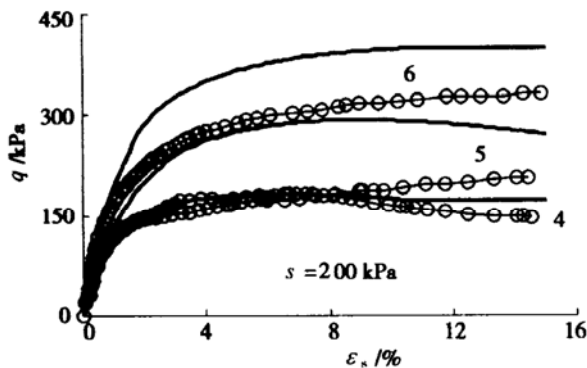


图4 三轴剪切试验结果和模型计算结果比较

Fig. 4 The comparison between the test result and the model prediction of triaxial shear test

4 结 语

本文所提的非饱和和原状膨胀土的弹塑性损伤本构模型可反映原状膨胀土的三个主要特征(胀缩性、裂隙性和超固结)造成的独特的力学特性,即,低围压情况下的软化和剪胀特性,围压较高时的硬化和剪缩特性以及干湿变化时的反复胀缩性。模型共包含 23 个参数,都可由试验测定。在特殊条件下,该模型可退化为膨胀土的非饱和弹塑性模型或非饱和增量非线性弹性模型以及一般非饱和土的弹塑性模型或增量非线性弹

性模型。但模型的参数较多,也没有考虑两种土体变形的相互影响,这两个问题尚待今后改进。

参考文献:

- [1] Gens A, Alonso E E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays[J]. Canadian Geotechnique Journal, 1992, 29: 1013- 1032.
- [2] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 21- 28.
- [3] 沈珠江. 结构性黏土的非线性损伤力学模型[J]. 水利水电科学, 1993, (4): 247- 255.
- [4] Desai C S, Basaran C, Zhang W. Numerical algorithms and mesh dependence in the disturbed state concept[J]. Int J Num Meth Engrg, 1997, 40: 3059- 3083.
- [5] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的 CT 机配套及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 387- 392.
- [6] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 原状膨胀土损伤演化的三轴 CT 试验研究[J]. 水利学报, 2002, (6): 106- 112.
- [7] 卢再华, 李 刚. 对膨胀土 G-A 弹塑性本构模型的探讨[J]. 后勤工程学院学报, 2001, 17(2): 64- 69.
- [8] 卢再华, 陈正汉, 曹继东. 原状膨胀土的强度变形特性及其本构模型研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 339- 342.
- [9] 陈正汉, 周海清, Fredlund D G. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 603- 608.
- [10] 陈正汉. 膨胀土渠坡渗水- 渗气- 变形的非线性分析[A]. 南水北调膨胀土渠坡稳定和滑动早期预报研究论文集[C]. 武汉: 长江科学院, 1998. 68- 78.
- [11] 孙树国, 陈正汉, 卢再华. 重塑非饱和膨胀土强度及变形特性的试验研究[A]. 南水北调膨胀土渠坡稳定和滑动早期预报研究论文集[C]. 武汉: 长江科学院, 1998. 128- 136.
- [12] 卢再华, 陈正汉, 王权民, 等. 膨胀土裂隙损伤演化的 CT 试验研究[A]. 第七届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 2001. 369- 376.
- [13] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的 CT 试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 417- 422.
- [14] 卢再华. 非饱和膨胀土的弹塑性损伤本构模型及其在土坡多场耦合分析中的应用[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2001.