

文章编号: 1000-7598(2013)11-3103-07

初始应力各向异性结构性土的二元介质模型

刘恩龙, 罗开泰, 张树祯

(四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘要:天然岩土材料具有结构性和各向异性。在岩土破坏力学的理论框架下,建立了初始应力各向异性结构性土的二元介质模型。岩土破坏力学把结构性岩土材料抽象成由胶结强的胶结块(胶结元)和无胶结的软弱带(摩擦元)组成的二元结构体,变形过程中胶结块逐步破损并向软弱带转化。假定胶结块为横观各向同性的理想弹脆性体,胶结块破损后转化成的软弱带为可用邓肯-张模型描述的非线性弹性体。通过引入考虑各向异性影响的破损率和局部应变系数,建立了初始应力各向异性结构性土的二元介质本构模型,并给出了模型参数的确定方法。最后给出了模型的表现,且通过人工制备初始应力各向异性结构性土的三轴压缩试验结果验证了模型的适用性。计算结果表明,所提出的本构模型可以较好地模拟初始应力各向异性结构性土的应力-应变和体积变形特性。

关键词:各向异性; 结构性土; 破坏力学; 二元介质模型

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Binary medium model for structured soils with initial stress-induced anisotropy

LIU En-long, LUO Kai-tai, ZHANG Shu-yi

(College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Natural soils are structured and anisotropic in the process of sedimentation. Within the theoretical framework of breakage mechanics for geomaterials, a new binary medium model (BMM) for structured soils with initial stress-induced anisotropy is formulated. Breakage mechanics for geomaterials idealizes the structured geomaterials as binary medium consisting of bonding blocks (the bonding element) with strong bonding and weakened bands (the frictional element) without bonding; and the bonding blocks will break and transfer to weakened bands gradually during the loading process. The bonding blocks are assumed as elastic-brittle constitutive model with transverse-isotropy; and the weakened bands transferred from the bonding blocks are assumed as nonlinear elastic Duncan-Chang model. By introducing the breakage ratios and local strain coefficients reflecting the influence of soil structure and anisotropy, the binary medium model for structured soils with initial stress-induced anisotropy is established; and the determination of model parameters in detail is given. Finally the capability of the new model to model the stress-strain properties of anisotropic structured soils is verified and compared with the triaxial tests of artificial structured soils with initial stress-induced anisotropy. The computational results demonstrate that the proposed constitutive model can simulate the mechanical properties, including stress-strain and volumetric deformation, of structured soils with initial stress-induced anisotropy.

Key words: anisotropy; structured soils; breakage mechanics; binary medium model (BMM)

1 引言

天然土在沉积过程中形成了结构性和初始应力各向异性^[1]。结构性的产生是由于沉积过程中颗粒之间的胶结作用及在土体内部形成的大孔隙组构分布。各向异性的产生是由于沉积过程中在竖直和水平方向所受的不相等的应力分布。天然土的结构性和各向异性使得其力学性质与重塑土的力学性质有

很大的区别,所以建立在室内重塑土试验基础上的本构模型不能很好地描述天然各向异性结构性土的应力-应变特性^[2]。当前,针对重塑土的试验结果建立了很多本构模型来考虑各向异性的影响^[3-5];针对结构性的试验结果也建立了一些本构模型来考虑结构性的影响^[6-8]。但已建立的考虑各向异性的结构性土本构模型还较少^[9-13],且参数较多,其适用性还有待于进一步验证。

收稿日期: 2013-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51009103)。

第一作者简介: 刘恩龙,男,1976年生,博士,副教授,博士生导师,主要从事岩土体本构关系与数值模拟方面的教学与科研工作。

E-mail: liuenlong@scu.edu.cn

岩土破坏力学是沈珠江^[14]在 2002 年提出来的针对结构性岩土材料的分析理论。岩土破坏力学把结构性岩土材料抽象成由胶结强的胶结块和无胶结的软弱带组成的二元结构体, 变形过程中胶结块逐步破损并向软弱带转化。基于岩土破坏力学, 沈珠江、陈铁林和刘恩龙等^[15-18]建立了初始各向同性结构性土的二元介质模型, 并与初始各向同性结构性土的试验结果做了对比验证。本文将在岩土破坏力学的理论框架下, 建立一个初始应力各向异性结构性土的增量形式的二元介质模型并验证其适用性。

2 二元介质模型关系式

二元介质材料是一种非均质材料, 取一个代表性体积单元 (RVE), 由均匀化理论, 经推导可以得到以下的应力-应变关系表达式^[17, 19], 推导过程如下:

取代表性单元 (RVE), 令局部应力和局部应变为 $\{\sigma\}_{\text{local}}$ 、 $\{\varepsilon\}_{\text{local}}$, 则平均应力和平均应变 $\{\sigma\}$ 、 $\{\varepsilon\}$ 可以表示为

$$\{\sigma\} = \frac{1}{v} \int \{\sigma\}_{\text{local}} dv \quad (1)$$

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{v} \int \{\varepsilon\}_{\text{local}} dv \quad (2)$$

定义 $\{\sigma\}_b$ 为胶结元应力, $\{\sigma\}_f$ 为摩擦元应力, 表达式分别为

$$\{\sigma\}_b = \frac{1}{v_b} \int \{\sigma\}_{\text{local}} dv_b \quad (3)$$

$$\{\sigma\}_f = \frac{1}{v_f} \int \{\sigma\}_{\text{local}} dv_f \quad (4)$$

式中: v_b 和 v_f 为胶结元和摩擦元所占体积。

则由式 (1) 可得

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= \frac{1}{v} \int \{\sigma\}_{\text{local}} dv = \frac{1}{v} \left[\int \{\sigma\}_{\text{local}} dv_b + \int \{\sigma\}_{\text{local}} dv_f \right] = \\ &= \frac{v_b}{v} \frac{1}{v_b} \int \{\sigma\}_{\text{local}} dv_b + \frac{v_f}{v} \frac{1}{v_f} \int \{\sigma\}_{\text{local}} dv_f = \\ &= \frac{v_b}{v} \{\sigma\}_b + \frac{v_f}{v} \{\sigma\}_f \end{aligned} \quad (5)$$

定义 $\{\varepsilon\}_b$ 为胶结元应变, $\{\varepsilon\}_f$ 为摩擦元应变, 表达式分别为

$$\{\varepsilon\}_b = \frac{1}{v_b} \int \{\varepsilon\}_{\text{local}} dv_b \quad (6)$$

$$\{\varepsilon\}_f = \frac{1}{v_f} \int \{\varepsilon\}_{\text{local}} dv_f \quad (7)$$

则由式 (2) 可得

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\} &= \frac{1}{v} \int \{\varepsilon\}_{\text{local}} dv = \frac{1}{v} \left[\int \{\varepsilon\}_{\text{local}} dv_b + \int \{\varepsilon\}_{\text{local}} dv_f \right] = \\ &= \frac{v_b}{v} \frac{1}{v_b} \int \{\varepsilon\}_{\text{local}} dv_b + \frac{v_f}{v} \frac{1}{v_f} \int \{\varepsilon\}_{\text{local}} dv_f = \frac{v_b}{v} \{\varepsilon\}_b + \frac{v_f}{v} \{\varepsilon\}_f \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{令} \quad \lambda = \frac{v_f}{v} \quad (9)$$

式中: λ 为破损率, 表示摩擦元所占的体积率 (简称体积破损率)。

则式 (5) 和式 (8) 可表示为

$$\{\sigma\} = (1 - \lambda) \{\sigma\}_b + \lambda \{\sigma\}_f \quad (10)$$

$$\{\varepsilon\} = (1 - \lambda) \{\varepsilon\}_b + \lambda \{\varepsilon\}_f \quad (11)$$

假定胶结元在破损转化为摩擦元以前具有的模量矩阵为 $[D]_b$, 而摩擦元的模量矩阵为 $[D]_f$ 。 $\{\sigma\}^0$ 、 $\{\varepsilon\}^0$ 、 $\{\sigma\}_b^0$ 、 $\{\varepsilon\}_b^0$ 、 $\{\sigma\}_f^0$ 、 $\{\varepsilon\}_f^0$ 分别代表现有的平均应力和平均应变及胶结元、摩擦元的局部应力和局部应变; $\{\Delta\sigma\}$ 、 $\{\Delta\varepsilon\}$ 、 $\{\Delta\sigma\}_b$ 、 $\{\Delta\varepsilon\}_b$ 、 $\{\Delta\sigma\}_f$ 、 $\{\Delta\varepsilon\}_f$ 分别为相应的应力增量和应变增量, 则 $\{\sigma\}^0 + \{\Delta\sigma\}$, $\{\varepsilon\}^0 + \{\Delta\varepsilon\}$, $\{\sigma\}_b^0 + \{\Delta\sigma\}_b$, $\{\varepsilon\}_b^0 + \{\Delta\varepsilon\}_b$, $\{\sigma\}_f^0 + \{\Delta\sigma\}_f$, $\{\varepsilon\}_f^0 + \{\Delta\varepsilon\}_f$ 分别代表增量完成后相应的应力和应变。

假定破损率为应变的函数, 即

$$\lambda = f(\{\varepsilon\}) \quad (12)$$

则由式 (10) 可得

$$\begin{aligned} \{\Delta\sigma\} &= (1 - \lambda^0) \{\Delta\sigma\}_b + \lambda^0 \{\Delta\sigma\}_f + \\ &\quad \Delta\lambda (\{\sigma\}_f^0 - \{\sigma\}_b^0) \end{aligned} \quad (13)$$

和由式 (11) 可得

$$\begin{aligned} \{\Delta\varepsilon\} &= (1 - \lambda^0) \{\Delta\varepsilon\}_b + \lambda^0 \{\Delta\varepsilon\}_f + \\ &\quad \Delta\lambda (\{\varepsilon\}_f^0 - \{\varepsilon\}_b^0) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: λ^0 为现有的破损率; $\Delta\lambda$ 为破损率增量。

对于胶结元有

$$\{\Delta\sigma\}_b = [D]_b \{\Delta\varepsilon\}_b \quad (15)$$

对于摩擦元有

$$\{\Delta\sigma\}_f = [D]_f \{\Delta\varepsilon\}_f \quad (16)$$

由式 (14) 可得

$$\begin{aligned} \{\Delta\varepsilon\}_f &= \frac{1}{\lambda^0} \{ \{\Delta\varepsilon\} - (1 - \lambda^0) \{\Delta\varepsilon\}_b - \\ &\quad \Delta\lambda (\{\varepsilon\}_f^0 - \{\varepsilon\}_b^0) \} \end{aligned} \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (16) 则, 有

$$\begin{aligned} \{\Delta\sigma\}_f &= \frac{1}{\lambda^0} [D]_f \{ \{\Delta\varepsilon\} - (1 - \lambda^0) \{\Delta\varepsilon\}_b - \\ &\quad \Delta\lambda (\{\varepsilon\}_f^0 - \{\varepsilon\}_b^0) \} \end{aligned} \quad (18)$$

将式 (18) 代入式 (13) 得下式:

$$\begin{aligned} \{\Delta\sigma\} &= (1 - \lambda^0) \{ [D]_b - [D]_f \} \{\Delta\varepsilon\}_b + [D]_f \{\Delta\varepsilon\} - \\ &\quad \Delta\lambda [D]_f \{ \{\varepsilon\}_f^0 - \{\varepsilon\}_b^0 \} + \Delta\lambda \{ \{\sigma\}_f^0 - \{\sigma\}_b^0 \} \end{aligned} \quad (19)$$

引入局部应变系数 $[C]$ ，它建立了胶结元的应变和代表性单元的应变之间的关系，且满足下式：

$$\{\varepsilon\}_b = [C]\{\varepsilon\} \quad (20)$$

则其增量形式为

$$\{\Delta\varepsilon\}_b = [C]^0\{\Delta\varepsilon\} + [\Delta C]\{\varepsilon\}^0 \quad (21)$$

式中： $[C]^0$ 为当前的局部应变系数矩阵； $[\Delta C]$ 为其增量。

将式(21)代入式(19)整理后可得

$$\begin{aligned} \{\Delta\sigma\} = & \{(1-\lambda^0)\{[D]_b - [D]_f\}[C]^0 + [D]_f\} \cdot \\ & \{\Delta\varepsilon\} - \Delta\lambda[D]_f\{\{\varepsilon\}_f^0 - \{\varepsilon\}_b^0\} + \\ & \Delta\lambda\{\{\sigma\}_f^0 - \{\sigma\}_b^0\} + (1-\lambda^0) \cdot \\ & \{[D]_b - [D]_f\}[\Delta C]\{\varepsilon\}^0 \end{aligned} \quad (22)$$

将式(10)变形可得

$$\{\sigma\}_f^0 = \frac{\{\sigma\}^0 - (1-\lambda^0)\{\sigma\}_b^0}{\lambda^0} \quad (23)$$

将式(11)变形可得

$$\{\varepsilon\}_f^0 = \frac{\{\varepsilon\}^0 - (1-\lambda^0)\{\varepsilon\}_b^0}{\lambda^0} \quad (24)$$

将式(23)、(24)代入式(22)，整理后得到一般应力状态下的应力增量的表达式为

$$\begin{aligned} \{\Delta\sigma\} = & \{(1-\lambda^0)\{[D]_b - [D]_f\}[C]^0 + [D]_f\} \{\Delta\varepsilon\} + \\ & (1-\lambda^0)\{[D]_b - [D]_f\}[\Delta C]\{\varepsilon\}^0 - \\ & \frac{\Delta\lambda}{\lambda^0}[D]_f\{\{\varepsilon\}^0 - \{\varepsilon\}_b^0\} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda^0}\{\{\sigma\}^0 - \{\sigma\}_b^0\} \end{aligned} \quad (25)$$

在加载的初始时刻， $\lambda^0 = 0$ ， $\{\varepsilon\}^0 = 0$ ， $\{\varepsilon\}_b^0 = 0$ 和 $\{\varepsilon\}_f^0 = 0$ 。将这些初始条件代入式(13)得到初始应力状态下的应力增量的表达式为

$$\begin{aligned} \{\Delta\sigma\} = & \{(1-\lambda^0)\{[D]_b - [D]_f\}[C]^0 + [D]_f\} \cdot \\ & \{\Delta\varepsilon\} + (1-\lambda^0)\{[D]_b - [D]_f\}[\Delta C]\{\varepsilon\}^0 \end{aligned} \quad (26)$$

3 初始应力各向异性结构性土二元介质模型

3.1 胶结元的本构特性

天然土往往是分层沉积形成的，在水平方向其力学性质是各向同性的，竖直方向的力学性质与水平方向不同，故可假定胶结块（胶结元）为横观各向同性弹脆性体，其应力-应变关系表达式为式(15)。

如果取 z 方向为对称轴， x 、 y 在水平面内，则式(15)可写为

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{yz} \\ \Delta\tau_{zx} \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix}_b = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{11} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{13} & D_{13} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D_{11}-D_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\varepsilon_{yz} \\ \Delta\varepsilon_{zx} \\ \Delta\varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}_b \quad (27)$$

式(27)中共有5个材料常数 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{13} 、 D_{33} 和 D_{44} ，其值可通过初始横观各向同性试样的实测初始加载段的应力应变关系确定。

3.2 摩擦元的本构特性

对于初始应力各向异性的结构性土，随着荷载的增加，颗粒之间的胶结逐渐破碎，更多的胶结元逐渐转化为摩擦元。摩擦元为胶结元破损后转化来的，其胶结强度已完全丧失。此时，假定摩擦元的应力-应变特性可用重塑土的应力-应变关系来描述，并认为摩擦元是各向同性的。此处采用非线性弹性 Duncan-Chang 模型，其应力-应变关系表达式为式(16)。模量矩阵 $[D]_f$ 可写为

$$[D]_f = \frac{E_f(1-\nu_f)}{(1+\nu_f)(1-2\nu_f)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu_f}{1-\nu_f} & \frac{\nu_f}{1-\nu_f} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_f}{1-\nu_f} & 1 & \frac{\nu_f}{1-\nu_f} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_f}{1-\nu_f} & \frac{\nu_f}{1-\nu_f} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu_f}{2(1-\nu_f)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu_f}{2(1-\nu_f)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu_f}{2(1-\nu_f)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\text{式中: } E_f = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2,$$

$$K、n、R_f、c \text{ 和 } \varphi \text{ 为材料常数, } p_a \text{ 为标准大气压;}$$

$$V_f = \frac{G - F \lg(\sigma_3 / p_a)}{\left\{ 1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]} \right\}^2},$$

$G、F$ 和 D 为材料常数。摩擦元的材料参数通过重塑试样的三轴压缩试验来确定。

3.3 破损率

破损率作为结构参数,其演化规律与土的类型、应力与应变水平、应力路径等因素密切相关。对于初始应力各向异性结构性土,加载初期主要由胶结元承担荷载,此时破损率很小;随着荷载的施加,胶结元逐渐破损转化为摩擦元,由胶结元和摩擦元共同分担荷载,此时破损率逐渐增大;当应变很大时,荷载主要由摩擦元承担,此时破损率很大,其值接近于 1.0。对于初始横观各向同性的结构性土样,当取 z 方向为对称轴, $x、y$ 为水平面时,可以假定破损率为如下函数关系:

$$\lambda = 1 - \exp \left[-\beta (\alpha \varepsilon_z + \varepsilon_x + \varepsilon_y)^\psi - (\xi \varepsilon_s)^\theta \right] \quad (29)$$

式中:剪应变 $\varepsilon_s = \sqrt{2e_{ij}e_{ij}}/3$, $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{kk}\delta_{ij}/3$, δ_{ij} 为 kronecker 符号; $\alpha、\beta、\xi、\psi$ 和 θ 为材料参数。

3.4 局部应变系数

局部应变系数建立了胶结元的应变和代表性单元的应变之间的关系,可以通过参数拟合的办法确定。局部应变系数表示为 C ,具体表达式如下:

$$C = \exp \left[-(t_c \varepsilon_s)^{r_c} \right] \quad (30)$$

式中: $t_c、r_c$ 为模型参数,通过曲线拟合确定。

破损率和局部应变系数都是内变量,理应从细观力学的角度建立其表达式。但对于结构性土来说,实测其细观参数很难实现,所以笔者采用了类似于塑性理论中的硬化参数或损伤力学中的损伤变量的确定方法。首先基于对结构性土破损机制的细观分析,给出他们宏观的表达式 (29)、(30),然后通过与试验结果的对比来确定其正确的表达式。

4 三轴应力状态下模型参数确定

常规三轴应力状态下,竖直方向定为 z 方向(对称轴),是大主应力方向,水平方向为相同的两小主应力方向且在各向同性面内。下面把以上推导的应

力-应变关系式简化到三轴应力状态并进行参数确定。

4.1 胶结元的参数确定

三轴应力状态时胶结元的应力-应变关系式 (27) 可表示为下式:

$$\begin{Bmatrix} \Delta \sigma_1 \\ \Delta \sigma_3 \end{Bmatrix}_b = \frac{E_{vb}}{(1 - \nu_{hbb})E_{vb} - 2\nu_{vbb}^2 E_{hb}} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_3 \end{Bmatrix}_b \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} (1 - \nu_{hbb})E_{vb} & 2\nu_{vbb}E_{hb} \\ \nu_{vbb}E_{hb} & E_{hb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_3 \end{Bmatrix}_b$$

式中: E_{vb} 和 E_{hb} 分别表示弹脆性元在竖直方向和水平面内的弹性模量; ν_{vbb} 和 ν_{hbb} 分别表示弹脆性元在竖直方向和水平面内的泊松比。由于 $\begin{Bmatrix} \Delta \sigma_1 \\ \Delta \sigma_3 \end{Bmatrix}_b$ 和 $\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_3 \end{Bmatrix}_b$ 都不能直接量测,也就不能直接确定出 E_{vb} 、 E_{hb} 、 ν_{vbb} 和 ν_{hbb} 。

考虑到在小应变条件下,破损率 λ 的数值很小,试样中弹脆性元所占的比例高,整个试样的应力-应变关系能较好地反映弹脆性元的力学特性。因此,认为 E_{vb} 、 E_{hb} 和 ν_{vbb} 、 ν_{hbb} 分别与结构性土在小应变条件下的弹性模量和泊松比有紧密的关联。本文采用轴向应变为 0.25% 时的 $\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix}$ 和 $\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix}$ 来间接确定 E_{vb} 、 E_{hb} 、 ν_{vbb} 和 ν_{hbb} 。

由式 (31) 只能求出 E_{vb} 和 ν_{vbb} 。我们知道初始各向同性结构性土属于特殊的横观各向同性材料, $E_{vb} = E_{hb}$, $\nu_{vbb} = \nu_{hbb}$ 。本文假定初始应力各向异性结构性土在水平面内的弹性模量 E_{hb} 和泊松比 ν_{vbb} 分别与初始各向同性结构性土在水平面内的弹性模量 E_{hb} 和泊松比 ν_{hbb} 相等(对应轴向应变为 0.25% 的值)。

4.2 摩擦元的参数确定

三轴应力状态时摩擦元的应力与应变关系式 (28) 可表示为下式:

$$\begin{Bmatrix} \Delta \sigma_1 \\ \Delta \sigma_3 \end{Bmatrix}_f = \frac{E_f(1 - \nu_f)}{(1 + \nu_f)(1 - 2\nu_f)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{2\nu_f}{1 - \nu_f} \\ \frac{\nu_f}{1 - \nu_f} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_1 \\ \Delta \varepsilon_3 \end{Bmatrix}_f \quad (32)$$

式中: E_f 和 ν_f 可以通过重塑土的常规三轴压缩试验测定,共有 8 个材料常数,具体见 Duncan-Chang 模型参数确定方法。

4.3 结构参数确定

破损率 λ 在三轴应力状态下的表达式可以简化为

$$\lambda = 1 - \exp \left\{ -\beta (\alpha \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3)^\psi - \left[\xi \frac{2}{3} (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \right]^\theta \right\} \quad (33)$$

式 (33) 中共有 5 个材料参数 α 、 β 、 ξ 、 ψ 和 θ 。

三轴应力状态下局部应变系数的具体表达式如下：

$$C = \exp \left\{ - \left[t_c \frac{2}{3} (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \right]^{r_c} \right\} \quad (34)$$

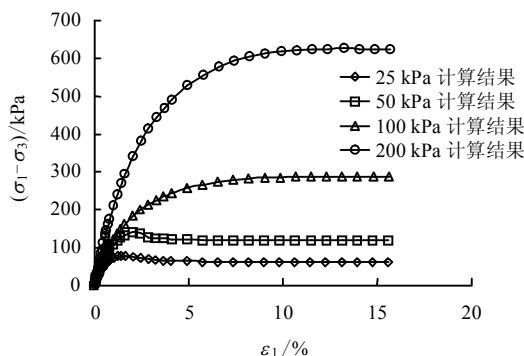
式 (34) 中共有 2 个材料参数 t_c 、 r_c 。

5 试验验证

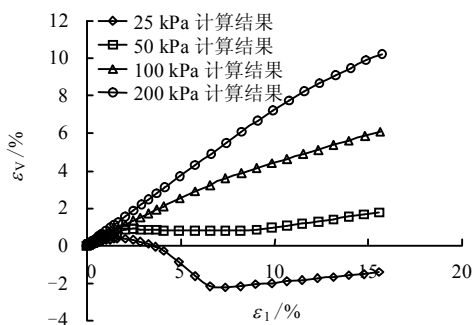
采用如表 1 所示的计算参数,得到的应力-应变关系如图 1 所示。由图 1 可见,提出的模型可以模拟初始应力各向异性结构性土在低围压下的应变软化和高围压下的应变硬化现象,且可以模拟低围压下的剪胀和高围压下的剪缩特性。

表 1 模型参数表

围压 /kPa	E_{vb} /MPa	E_{hb} /MPa	ν_{vhb}	ν_{hbb}	α	β	ξ	ψ	θ	t_c	r_c
25	20	15	0.15	0.10	75	1	650	1.5	0.15	20	8
50	20	15	0.15	0.10	55	1	500	1.5	0.23	45	8
100	20	15	0.15	0.10	35	1	350	1.5	0.39	170	8
200	20	15	0.15	0.10	8	1	60	1.5	0.75	420	8



(a) 应力-应变关系



(b) 体变-应变关系

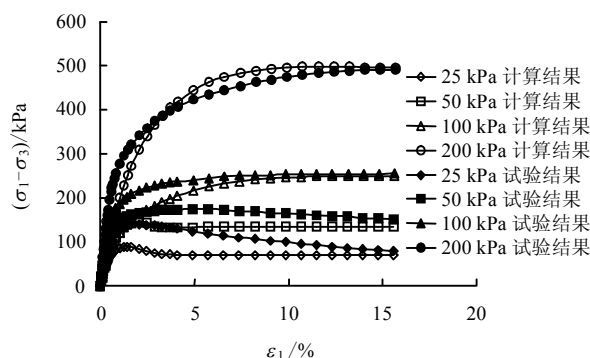
图 1 模型表现

Fig.1 Behavior of proposed model

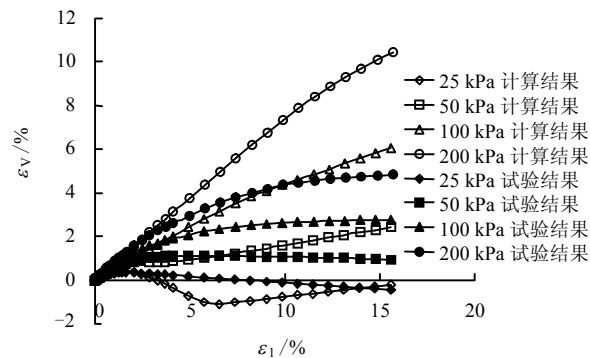
采用人工制备初始应力各向异性结构性土^[20-21]的常规三轴压缩试验结果进行验证。计算参数如表 2 所示。将计算结果和试验结果放置在同一坐标系下进行比较,如图 2 所示。

表 2 试验验证参数表

围压 /kPa	E_{vb} /kPa	E_{hb} /kPa	ν_{vhb}	ν_{hbb}	α	β	ξ	ψ	θ	t_c	r_c	
25	26 585.4	23 762	0.148	0.115	4	85	1	650	1.5	0.15	20	8
50	26 585.4	23 762	0.148	0.115	4	70	1	500	1.5	0.23	45	8
100	26 585.4	23 762	0.148	0.115	4	45	1	350	1.5	0.39	170	8
200	26 585.4	23 762	0.148	0.115	4	11	1	60	1.5	0.75	420	8



(a) 应力-应变关系



(b) 体变-应变关系

图 2 试验结果与计算结果的比较

Fig.2 Comparisons between tested and simulated results

从图 2 可以看出,该模型可以很好地反映初始应力各向异性结构性土在高围压下的应变硬化和低围压下的应变软化特性,也能在一定程度上反映出高围压下的剪缩和低围压下的剪胀特性。说明本文所构建的二元介质模型能够较好地反映出结构性和初始应力各向异性对结构性土的力学特性和变形特性的影响。但为了更好地模拟初始应力结构性土的体变特性还需对结构破损参数和局部应变系数做更深入地探讨。

结构性土由于颗粒之间的胶结和大孔隙分布的

存在,使得其在围压较低时表现为体胀和应变软化,而在围压较高时表现为体缩和应变硬化。结构性土的这一特殊的应力-应变特性使得建立能够合理描述其应力-应变特性的本构模型非常困难。初始应力各向异性又使得结构性土在竖直方向与水平方向的变形特性不同。此处建立的基于岩土破坏力学的初始应力各向异性结构性土的二元介质模型是解决这一难题的初步尝试,基本上可以较好地模拟初始应力各向异性结构性土的主要力学特性,但模拟结果还存在一定的误差,在模型的参数确定方面还需做进一步研究。

6 结 论

(1) 在岩土破坏力学的理论框架内,认为胶结元在破损以前的应力-应变特性可以用理想的弹脆性模型描述,胶结元破损后转化成的摩擦元的应力-应变特性可用非线性弹性 Duncan-Chang 模型来描述。通过引入反映破损过程的结构参数(破损率和局部应变系数),建议了初始应力各向异性结构性土的二元介质本构模型。

(2) 与人工制备初始应力各向异性结构性土在固结排水条件下的常规三轴压缩试验结果进行对比验证,表明所建议的模型可以较好的描述初始应力各向异性结构性的力学特性和变形特性。

参 考 文 献

- [1] 姚仰平, 侯伟. 土的基本力学特性及其弹塑性描述[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2881—2902.
- [2] 魏星, 黄茂松. 天然结构性黏土的各向异性边界面模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1225—1229.
- [3] SEKIGUCHI H, OHTA H. Induced anisotropy and time dependency in clays[C]//Proceedings of 9th ICSMFE. Tokyo: SSMFF, 1977: 229—238.
- [4] OKA F. Elasto-viscoplastic constitutive model for clay using a transformed stress tensor[J]. *Mechanics of Materials*, 1993, 16(1—2): 47—53.
- [5] 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.
- [6] SUN De-an, YAO Yang-ping, YIN Zong-ze. An elasto-plastic model for soil with initially stress-induced anisotropy[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(3): 222—226.
- [7] 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.
- [8] XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. A constitutive laws considering soil structural properties[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(4): 35—41.
- [9] LIU M D, CARTER J P. A structured cam-clay model[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(6): 1313—1332.
- [10] BAUDET B, STALLEBRASS S. A constitutive model for structured clays[J]. *Geotechnique*, 2004, 54(4): 269—278.
- [11] KAVVADS M, BELOKAS G. An anisotropic elasto-plastic constitutive model for natural soils[C]//Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam: A. A. Balkema, 2001: 335—340.
- [12] 王立忠, 沈恺伦. K_0 固结结构性软黏土的旋转硬化规律研究本构模型[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 864—872.
- [13] WANG Li-zhong, SHEN Kai-lun. Rotational hardening law of K_0 consolidated structured soft clays[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(6): 864—872.
- [14] 周成, 沈珠江, 陈生水, 等. 结构性土的次塑性扰动状态模型[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(7): 435—439.
- [15] ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang, CHEN Sheng-shui, et al. A hypoplastic disturbed state model for structured soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(7): 435—439.
- [16] HINCHBERGER S D, QU G, LO K Y. Constitutive approach for rate-sensitive anisotropic structured clays[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 34(17): 1797—1830.
- [17] 魏星, 黄茂松. 黏土的各向异性边界面模型[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 831—837.
- [18] WEI Xing, HUANG Mao-song. Anisotropic bounding surface model for clays[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(7): 831—837.
- [19] 沈珠江. 岩土破坏力学与双重介质模型[J]. 水利水运

- 工程学报, 2002, (4): 1—6.
- SHEN Zhu-jiang. Breakage mechanics and binary medium model for geological materials[J]. **Hydro-science and Engineering**, 2002, (4): 1—6.
- [15] 沈珠江. 岩土破坏力学: 理想脆弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 253—257.
- SHEN Zhu-jiang. Breakage mechanics for geomaterials: An ideal brittle-elastic-plastic model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 253—257.
- [16] 沈珠江, 刘恩龙, 陈铁林. 岩土二元介质模型的一般应力应变关系[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 489—494.
- SHEN Zhu-jiang, LIU En-long, CHEN Tie-lin. The generalized stress-strain relationship of binary-medium model for structured soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(5): 489—494.
- [17] 刘恩龙. 岩土结构块破坏机理与二元介质模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [18] 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 En-long, SHEN Zhu-jiang. Binary-medium model for structured soils [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2005, 36(4): 391—395.
- [19] WANG J G, LEUNG C F, ICHICAWA Y. A simplified homogenization method for composite soils[J]. **Computers and Geotechnics**, 2002, 29(6): 477—500.
- [20] 罗开泰. 初始应力各向异性结构性土的本构模型[D]. 成都: 四川大学, 2012.
- [21] 罗开泰, 聂青, 张树伟, 等. 人工制备初始应力各向异性结构性土方法探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2815—2820, 2834.
- LUO Kai-tai, NIE Qing, ZHANG Shu-yi, et al. Investigation on artificially structured soils with initial stress-induced anisotropy[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(10): 2815—2820, 2834.
-
- 上接第 3102 页
- [18] 金解放, 李夕兵, 殷志强, 等. 循环冲击下波阻抗定义岩石损伤变量的研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1385—1393, 1410.
- JIN Jie-fang, LI Xi-bing, YIN Zhi-qiang, et al. A method for defining rock damage variable by wave impedance under cyclic impact loadings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1385—1393, 1410.
- [19] 金解放, 李夕兵, 王观石, 等. 循环冲击荷载作用下砂岩破坏模式及其机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1453—1461.
- JIN Jie-fang, LI Xi-bing, WANG Guan-shi, et al. Failure modes and mechanisms of sandstone under cyclic impact loadings[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(4): 1453—1461.
- [20] 刘军忠, 许金余, 吕晓聪, 等. 冲击压缩荷载下角闪岩的动态力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2113—2120.
- LIU Jun-zhong, XU Jin-yu, LÜ Xiao-cong, et al. Experimental study of dynamic mechanical properties of amphibolites under impact compressive loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(10): 2113—2120.
- [21] 王泽东, 许金余, 吕晓聪, 等. 动静组合加载下岩石的吸能特性研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(增刊 1): 251—254.
- WANG Ze-dong, XU Jin-yu, LÜ Xiao-cong, et al. Research on energy absorption property of rock under dynamic and static loads[J]. **Acta Armamentarii**, 2010, 31(Supp.1): 251—254.
- [22] 金解放, 李夕兵, 钟海兵, 等. 三维静载与循环冲击组合作用下砂岩动态力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1358—1372.
- JIN Jie-fang, LI Xi-bing, ZHONG Hai-bing, et al. Study of dynamic mechanical characteristic of sandstone subjected to three-dimensional coupled static-cyclic impact loadings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(7): 1358—1372.