

DOI: 10.11779/CJGE201406001

荷载和水作用下结构性黄土破坏规律的离散元分析

蒋明镜^{1, 2}, 胡海军³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用离散元法 (DEM) 分析了增减荷和增湿作用下结构性黄土的破坏规律。首先, 给出了定义在离散介质上的破坏参数表达式并介绍了已有代表性结构性土本构模型中破坏参数的函数形式; 其次, 根据离散元微观测试技术获得了增减荷和增湿数值试验中破坏参数的变化规律, 检验了已有代表结构性土本构模型中破坏规律的函数形式, 给出了其与宏观量如应力和应变的函数关系, 最后建议了多种应力路径和增湿路径下破坏参数的计算公式, 这些公式中参数较少, 并且能较好地反映荷载和水作用下结构性黄土破坏参数的变化规律。

关键词: 黄土; 破坏; 本构模型; 微观理论; 离散元

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)06-0989-09

作者简介: 蒋明镜(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏观微观试验、本构模型和数值分析研究。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn。

Numerical analysis of degradation evolution of structured loess under loading, unloading and wetting by discrete element method

JIANG Ming-jing^{1, 2}, HU Hai-jun³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Water Resources and

Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The breakage parameter evaluation is analyzed for structured loess under loading, unloading and wetting by distinct element method (DEM). First, the breakage parameter is defined based on the discrete medium, and the expressions for breakage parameter in representative models for structured soils are introduced. Then the evaluation of breakage parameter for structured loess under loading, unloading and wetting is measured by the micro measurement technique of discrete element method. The relation between the breakage parameter and the macroscopic parameter such as strain or stress is presented, and the forms of formulas for the breakage parameter in representative models for structured soils are examined. Finally the formulas for calculating the breakage parameter under different stress paths and wetting paths are proposed. The parameters in these formulas are few and the formulas can predict the evaluation of breakage parameter for structured loess under loading and wetting well.

Key words: loess; breakage; constitutive model; microscopic theory; DEM

0 引言

结构性土被视为原状土 (胶结元) 和重塑土 (摩擦元) 的组合体^[1]。基于结构性土的结构破坏是原状土逐渐向重塑土 (损伤土) 变化的过程, 沈珠江先后建立了损伤力学模型^[1]、弹塑性损伤力学模型^[2]、非线性损伤力学模型^[3-5]、广义吸力模型^[6]、堆砌体模型^[7]和二元介质模型^[8-12]。模型中描述结构逐渐破坏的参数名称有损伤比、损伤参数和破坏参数, 这里统一称为破坏参数。由于目前室内测试技术不能测定试样的

破坏参数, 通常假定其为应力或应变的函数, 并用拟合室内单元试验结果的方法获取函数表达式中的参数。离散元法 (DEM) 能够实时获取试样的应力、应变、胶结点数和胶结元承担的应力比例, 并且已经用于测试结构性土的破坏参数, 来验证现有模型中破坏参数表达式的合理性^[13]。本文在此基础上尝试应用

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (51025932); 国家自然科学基金项目 (51179128); 教育部博士点基金项目 (20100072110048); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT1029)

收稿日期: 2013-03-28

离散元生成结构性黄土离散元试样, 对其进行增减荷和增湿的数值试验, 获取试样破损参数的变化规律, 检验已有代表结构性土本构模型中破损参数的函数形式, 给出了增减荷和增湿作用下破损参数的计算方法。

1 结构性黄土离散元数值试验

1.1 试样制备

黄土离散元试样粒径范围在 0.011~0.05 mm, 中值粒径为 0.020 mm (在通常黄土 0.016~0.049 mm 之间), 试样颗粒总数为 4960 个, 平面孔隙比 0.28 (对应三维孔隙比为 0.935), 宽 0.90 mm, 高宽比接近 2。颗粒间胶结模型采用蒋明镜等^[14]提出的胶结模型。结构性黄土离散元试样制备分为 2 个步骤: ①采用分层欠压法分 5 层制备均匀且松散的无胶结试样, 生成过程中摩擦系数为 1; ②试样制备后, 将摩擦系数更改为 0.5, 在垂直压力 12.5 kPa 下对试样进行一维压缩, 在接触点处形成胶结, 直至试样内部颗粒相互接触并达到平衡状态。通过设置颗粒间不同胶结强度得到不同含水率试样。通过离散试样和天然结构性黄土试样结构屈服应力相等效的原则得到。胶结强度与含水率的关系为

$$\frac{R}{I \cdot p_a} = 0.0079 \times 10^{\frac{1}{1-2.89w}} + 1 \times 10^{-5}, \quad (1)$$

式中, R 为胶结强度 (N), I 为 1 m², p_a 为 1 个标准大气压, 用于消除方程的量纲。

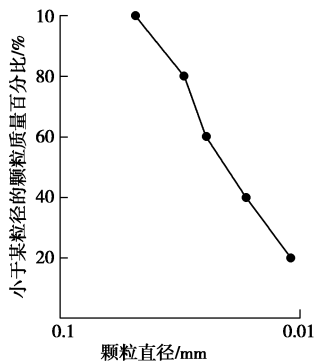


图 1 黄土离散元试样颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution of loess sample in DEM analysis

1.2 数值试验方案

为了获取增减荷和增湿作用下结构性黄土破损参数的演变规律, 对生成的不同含水率结构性黄土离散元试样进行一维压缩、位移控制的常规双轴压缩和应力控制的等应力比双轴压缩数值试验 (这里双轴试验类似于室内的平面应变试验); 对一种含水率结构性黄土离散元试样进行应力控制的常规双轴压缩、等 p 双轴压缩、减 p 双轴压缩数值试验和不同应力水平下 $R_s = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (式中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为抗剪强度) 的双轴湿陷试验。

2 离散元中破损参数的获取

2.1 离散元中破损参数的定义

试样的应力和应变由胶结元和摩擦元两部分承担, 定义在微观上的应力和应变表达式为^[13, 15]

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{V^b}{V} \bar{\sigma}_{ij}^b + \frac{V^f}{V} \bar{\sigma}_{ij}^f = (1 - \lambda) \bar{\sigma}_{ij}^b + \lambda \bar{\sigma}_{ij}^f \quad (i, j = 1, 2), \quad (2a)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{V^b}{V} \bar{\varepsilon}_{ij}^b + \frac{V^f}{V} \bar{\varepsilon}_{ij}^f = (1 - \lambda) \bar{\varepsilon}_{ij}^b + \lambda \bar{\varepsilon}_{ij}^f \quad (i, j = 1, 2), \quad (2b)$$

式中, $\bar{\sigma}_{ij}^b$, $\bar{\sigma}_{ij}^f$, $\bar{\varepsilon}_{ij}^b$ 和 $\bar{\varepsilon}_{ij}^f$ 分别为胶结元和摩擦元的局部应力和局部应变, $\lambda = V^f / V$ 。

基于应力分担和应变分担的本构方程为

$$\bar{\sigma}_{ij} = (1 - b) \sigma_{ij}^b + b \sigma_{ij}^f, \quad (3a)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = (1 - B) \varepsilon_{ij}^b + B \varepsilon_{ij}^f. \quad (3b)$$

式中 σ_{ij}^b 和 ε_{ij}^b 为与试样相同应变下胶结元和摩擦元的应力, 与式 (2a) 中的局部应力不同; ε_{ij}^b 和 ε_{ij}^f 为与试样相同应力下胶结元和摩擦元的应变, 与式 (2b) 中的局部应变不同; 破损参数 b 和 B 定义为^[9, 12-13]

$$b = 1 - (1 - \lambda) c_\varepsilon = \lambda \bar{\varepsilon}_{ij}^f / \bar{\varepsilon}_{ij}, \quad (4a)$$

$$B = 1 - (1 - \lambda) c_\sigma = \lambda \bar{\sigma}_{ij}^f / \bar{\sigma}_{ij}. \quad (4b)$$

对于破损参数, λ 为体积破损率, 在离散介质中的计算式为^[13, 15]

$$\lambda = N_c^f / N_c = 1 - N_c^b / N_c, \quad (5)$$

式中, N_c , N_c^f , N_c^b 为总接触点数目, 摩擦接触点数目和胶结接触点数目。

二维离散元中, 应力^[16-17]、胶结元应力^[13, 15]和摩擦元应力^[13, 15]计算式分别为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{c \in S \& c \in c_b} F_i^c l_j^c = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{N_c} F_i^k l_j^k \quad (i, j = 1, 2), \quad (6a)$$

$$\bar{\sigma}_{ij}^b = \frac{1}{V^b} \sum_{c \in S \& c \in c_b} F_i^c l_j^c = \frac{1}{V^b} \sum_{m=1}^{N_c^b} F_i^m l_j^m \quad (i, j = 1, 2), \quad (6b)$$

$$\bar{\sigma}_{ij}^f = \frac{1}{V^f} \sum_{c \in S \& c \in c_f} F_i^c l_j^c = \frac{1}{V^f} \sum_{n=1}^{N_c^f} F_i^n l_j^n \quad (i, j = 1, 2). \quad (6c)$$

式中 c , c_b 和 c_f 分别代表接触点、胶结点和摩擦点, S 代表完全在测量圆内的颗粒集合体外边界; V , V^b 和 V^f 分别代表代表性单元的体积、胶结元体积和摩擦元体积, 采用集合体边界上接触点距离测量圆圆心距离的平均值作为 V 的半径; N_c , N_c^b 和 N_c^f 为外边界颗粒间接触点的总数、胶结接触点数目和摩擦接触点数目; F_i^k 为第 k 个接触点处接触力在 i 方向上的分量; l_j^k 为第 k 个接触点与测量圆连线矢量在 j 方向上的分

量。分别为集合体边界 S 上。

二维离散元中, 应变的定义用到平均位移梯度张量^[17]:

$$\bar{\alpha}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{N_c} d_i^k \Delta u_j^k \quad (i, j=1, 2), \quad (7)$$

式中, d_i^k 为互补面积矢量在 i 方向上的分量, 用以表征第 k 个颗粒间接触点附近的局部几何特征, 详细定义可参考文献[17], Δu_j^k 为第 k 个颗粒间接触点处的相对位移在 j 方向上的分量, 其余符号同式(6a)、(6b)、(6c)。

应变^[17]、胶结元应变^[13, 15]和摩擦元应变^[13, 15]计算式为

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\bar{\alpha}_{ij} + \bar{\alpha}_{ji}) = \frac{1}{2V} \sum_{k=1}^N (d_i^k \Delta u_j^k + d_j^k \Delta u_i^k) \quad (i, j=1, 2), \quad (8a)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij}^b = \frac{1}{2V^b} \sum_{m=1}^{N_c^b} (d_i^m \Delta u_j^m + d_j^m \Delta u_i^m) \quad (i, j=1, 2), \quad (8b)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij}^f = \frac{1}{2V^f} \sum_{n=1}^{N_c^f} (d_i^n \Delta u_j^n + d_j^n \Delta u_i^n) \quad (i, j=1, 2)。 \quad (8c)$$

鉴于离散元中应变的计算存在一定难度和争议, 因此在计算 b 时假定摩擦元和胶结元的局部应变相等, 该假定为非线性损伤模型^[3-5]采用, 计算 B 时采用严谨的式(4b)。

2.2 代表模型中破损参数的函数形式

本文检验破损参数函数形式的模型有损伤力学模型^[1]、弹塑性损伤力学模型^[2]、非线性损伤力学模型^[3-5]、堆砌体模型^[7]和二元介质模型^[9-10], 下面介绍各宏观本构模型中破损参数的函数表达式, 并根据本构方程按应力为两种介质应力组成时破损参数与 b 对应和应变为两种介质应变组成时与 B 对应的原则, 给出了各模型破损参数与 b 和 B 的对应关系。

损伤力学模型^[1]中加载过程中的破损参数与宏观应力和应变相关:

$$B = \omega_\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} \right)^n + \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} \right)^n \right] \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right); \quad (9a)$$

增湿过程中的破损, 较简单的表达式仅与含水率有关:

$$B = \omega = \left(\frac{w - w_i}{w_s - w_i} \right)^n; \quad (9b)$$

较全面反映加载和增湿影响的破损参数与宏观应力、宏观应变和含水率相关:

$$B = \omega = \omega_\varepsilon + (1 - \omega_\varepsilon) \left(\frac{w - w_i}{w_s - w_i} \right)^n。 \quad (9c)$$

式中 ω_ε 为加载过程中的损伤; σ 为压应力; σ_f 为引起结构破坏的压应力; γ 为剪应变; γ_0 为参考剪应变; ω 为湿陷试验中的损伤; w_i 为初始含水率; w_s 为饱和含水率; n 为拟合参数。

对弹塑性损伤力学模型^[2], 加载过程中所采用的破损参数与宏观应变相关:

$$B = \omega = 1 - \exp(-c_a \varepsilon_v - c_b \varepsilon_s) \quad (10)$$

式中, c_a , c_b 为拟合参数。

对非线性损伤力学模型^[3-5], 加载过程中所采用的破损参数与宏观应变相关:

$$b = \omega = 1 - \exp(-c_a \varepsilon_v - c_b \varepsilon_s^m) \quad (11a)$$

$$b = \omega = 1 - \exp(-c_0 - c_a \varepsilon_v^{n_1} - c_b \varepsilon_s^{n_2})。 \quad (11b)$$

增湿过程中所采用的破损参数与宏观应变和含水率相关:

$$b = \omega = 1 - \exp \left(-c_a \varepsilon_v^{n_1} - c_b \varepsilon_s^{n_2} - c_w \frac{w - w_0}{w_s - w} \right), \quad (11c)$$

$$b = \omega = 1 - \exp \left(-c_a \varepsilon_1 - c_b \frac{w - w_0}{w_s - w} \right)。 \quad (11d)$$

式中 c_0 , c_a , c_b , c_w , n_1 和 n_2 均为拟合参数; σ_3 为最小主应力; p_a 为大气压力; w_0 为原状土的含水率, w_s 为饱和土的含水率。

对堆砌体模型^[7], 加载过程中所采用的破损参数与宏观应力相关:

$$B = d = 1 - \frac{1}{\exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{q - q_0}{q_m - q_0} \right)^2 \right]} \quad (12)$$

式中, p_d 为 $p - q$ 空间损伤屈服面与 p 轴的右交点(下文称为等效损伤应力), p_0 为损伤应力的门槛值, q_m 为一维压缩曲线下坡度最大处对应的 p_d 值。

对应力分担的二元介质模型^[9-10], 加载过程中所采用的破损参数与宏观应变相关:

$$b = \begin{cases} 0 & (\bar{\varepsilon} < \bar{\varepsilon}_1) \\ 1 & (\bar{\varepsilon} \geq \bar{\varepsilon}_1) \end{cases}, \quad (13a)$$

$$b = \frac{\bar{\varepsilon}_f - \bar{\varepsilon}_1}{\bar{\varepsilon}_f - \bar{\varepsilon}_1} \left(1 - \frac{\bar{\varepsilon}_1}{\bar{\varepsilon}} \right), \quad (13b)$$

$$b = (1 + c_a) \frac{\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_1}{\bar{\varepsilon}_f - \bar{\varepsilon}_1} - c_a \left(\frac{\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_1}{\bar{\varepsilon}_f - \bar{\varepsilon}_1} \right)^2。 \quad (13c)$$

增湿过程中所采用的破损参数仅与宏观应变应变相关, 含水率引起的破损反映在胶结元模量降低引起的应变造成结构破损上:

$$b = 1 - (1 + c_b \bar{\varepsilon}) \exp(-c_b \bar{\varepsilon})。 \quad (13d)$$

式中 c_a 和 c_b 为拟合参数; $\bar{\varepsilon}$ 为当量应变, 一般取主应变 ε_1 ; $\bar{\varepsilon}_1$ 和 $\bar{\varepsilon}_f$ 分别为 $b=0$ 和 $b=1$ 的第一和第二门槛当量应变。

3 数值试验中破损参数的演变规律

本节应用离散元微观测试技术获得破损参数 b 和 B 的变化规律, 并建立其与宏观应变和应力的关系。从数值试验获得的 b 和 B 变化规律类似, 可用同一类

型函数表示，本文只给出 b 的变化规律。

3.1 一维压缩试验

图 2 给出了一维压缩试验中破损参数随轴向应变或竖向应力的变化。对于此试验 $\varepsilon_v = \varepsilon_s = \varepsilon_1$ ，图 3 给出了现有结构性模型中破损参数随轴向应变或等效损伤应力（即 $p-q$ 空间损伤屈服面与 p 轴的右交点处 p 值）的变化关系，这些结构破损变量表达式中的参数取值均来自相应文献。对比图 2，3 可见，除非线性损伤模型^[3-5]未考虑破损门槛应变或破损门槛应力外，其他模型均有考虑，其中弹塑性损伤模型是通过对原状土加入初始屈服面进行考虑的，但破损参数在初始屈服面处存在不连续现象，即刚进入初始屈服面，破损参数为非 0 值。另外类似弹塑性损伤模型，文献[18]未引入原状土的屈服函数，直接在损伤表达式加入初始损伤体应变和剪应变：

$$\omega = 1 - e^{-[c_a(\varepsilon_v - \varepsilon_{v0}) + c_b(\varepsilon_s - \varepsilon_{s0})]} \quad (14)$$

保证了破损参数的连续性。式中， ε_{v0} 和 ε_{s0} 分别为结构性土的初始损伤体应变和偏应变， c_a 和 c_b 为拟合参数。

破损参数随轴向应变的变化以式（13c）、（13d）表示能较好地反映不同含水率试样结构破损随轴向应变的变化，由图 2 可知，对各含水率试样，不同模型中的破损参数函数均不能用一套参数模拟，这些函数中的参数随着含水率的变化而变化。

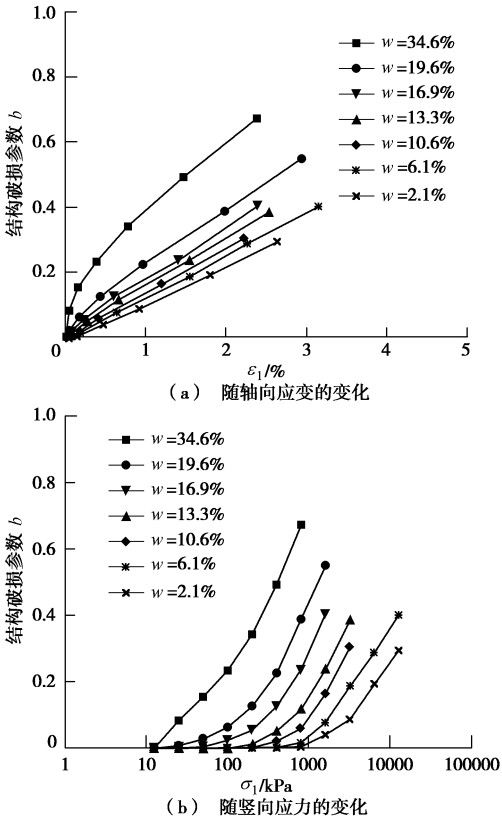


图 2 一维压缩试验中破损参数 b 的变化规律

Fig. 2 Evaluation of breakage parameter b in one-dimension compression tests

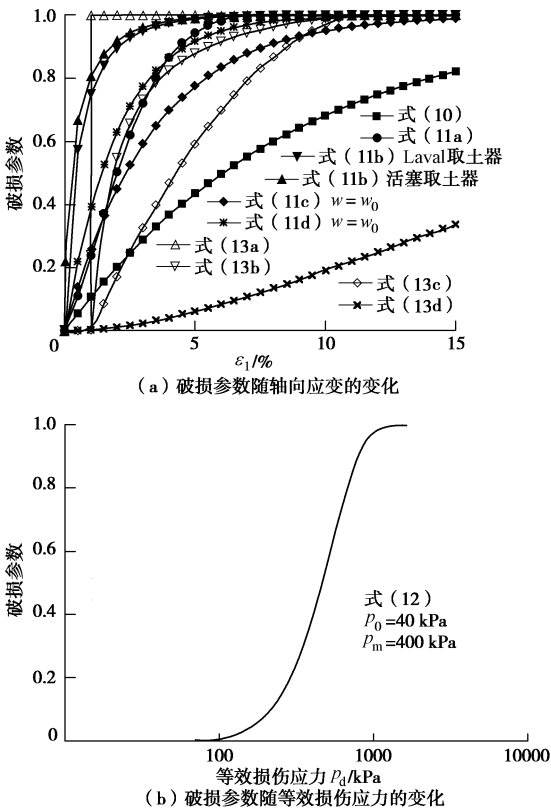


图 3 一维压缩试验中现有模型破损参数的变化规律

Fig. 3 Breakage parameter evaluation of existing models in one dimension compression tests

对比图 2（b）、3（b）可见，堆砌体模型中的破损参数与等效损伤应力 p_d 的关系曲线和破损参数与竖向应力的关系很类似，因此可用该函数形式描述破损参数的变化规律。为了得到更简洁的公式，根据小于结构屈服应力 σ_y 时，结构破损为 0，在大于结构屈服应力之后，与竖向应力的对数基本呈线性关系且各含水率试样斜率接近相同：

$$b = \begin{cases} 0 & (\sigma_1 < \sigma_y) \\ c_1 \ln\left(\frac{p_a \sigma_1}{\sigma_y p_a}\right) & (\sigma_1 \geq \sigma_y) \end{cases} \quad (15)$$

其中， σ_y 是含水率的函数，其函数形式表示为^[14]

$$\sigma_y / p_a = c_2 \times 10^{\frac{-c_3}{1-S_r}} + c_4 \quad (16)$$

式中， c_1 ， c_2 ， c_3 ， c_4 为拟合参数， S_r 为试样的初始饱和和度。

3.2 应变控制常规双轴压缩试验

如图 4 所示，双轴压缩试验中破损由固结部分破损和剪切部分破损两部分组成，固结压力及含水率越大，固结部分引起的破损越大。应用式(14)对 $w=21.3\%$ 试样剪切过程中的破损进行拟合，结果如表 1 所示。可见该函数形式中的参数随固结压力变化而变化。

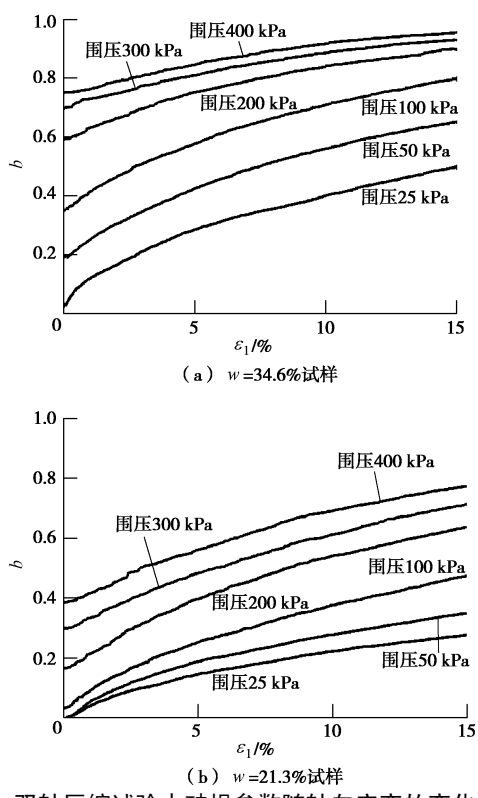


图 4 双轴压缩试验中破损参数随轴向应变的变化规律

Fig. 4 Evaluation of breakage parameter in biaxial compression tests

表 1 $w=21.3\%$ 试样破损参数按式 (13) 的拟合结果

Table 1 The simulation results of breakage parameter for samples with $w=21.3\%$ by formula No. 13

围压/kPa	拟合结果	相关系数 R^2
25	$b = 1 - e^{0.1035(\varepsilon_v - 0.083) - 0.0072(\varepsilon_s - 0.515)}$	0.980
50	$b = 1 - e^{-0.3201(\varepsilon_v - 0.137) - 0.0078(\varepsilon_s - 0.403)}$	0.957
100	$b = 0.033 + 1 - e^{-0.0982\varepsilon_v - 0.0131\varepsilon_s}$	0.999
200	$b = 0.166 + 1 - e^{-0.0429\varepsilon_v - 0.0162\varepsilon_s}$	1.000
300	$b = 0.296 + 1 - e^{-0.0512\varepsilon_v - 0.0159\varepsilon_s}$	0.999
400	$b = 0.385 + 1 - e^{-0.0473\varepsilon_v - 0.0153\varepsilon_s}$	0.996

注：应变单位为%。

另外对不同含水率试样拟合发现破损参数随含水率变化而变化。为了建立归一化的函数形式，提出

$$b/b_{\max} = b_c + (1 - b_c)b_{\text{归一化}}, \quad (17)$$

式中， b_c 为固结过程引起的破损，如图 5 (a) 所示，其与围压及结构屈服应力的关系可用类似式 (15) 的函数形式表示：

$$b_c = \begin{cases} 0 & (\sigma_c < p_y) \\ c_1 \ln\left(\frac{p_a \sigma_c}{p_y p_a}\right) & (\sigma_c \geq p_y) \end{cases}, \quad (18)$$

其中， p_y 与含水率的关系为

$$\frac{p_y}{p_a} = c_2 \times 10^{-\frac{1}{1-2.89w}} + c_3, \quad (19)$$

式中， $(1 - b_c)$ 为固结后原状土剩余的破损量， $b_{\text{归一化}}$

为归一化剪切过程的破损参数，该值从最初 0 变化到剪切破坏时的 1，考虑体胀和体缩均会产生破损，在破损参数随应变发展规律上，宜采用主应变 ε_1 或 ε_s 来表达破损参数的变化，在单纯等向固结试验中 $\varepsilon_s = 0$ 而破损参数一直增加，故采用 ε_1 来表达，如图 5 (b) 所示不同固结压力下的 $b_{\text{归一化}}$ 可用一个函数表示：

$$b_{\text{归一化}} = 1 - \exp[-c_4(\varepsilon_1 - \varepsilon_y)] \quad (20)$$

针对不同含水率试样，对式 (18) 和 (20) 中的参数取平均，得到不同含水率试样破损参数的最终表达式为

$$\frac{b}{b_{\max}} = \begin{cases} 1 - \exp[-14.9(\varepsilon_1 - \varepsilon_y)] & (\sigma_c < \sigma_y) \\ 0.307 \ln\left[\frac{\sigma_c}{(307 \times 10^{-\frac{1}{1-2.89w}} + 0.191)p_a}\right] + \left[1 - 0.307 \ln\left(\frac{\sigma_c}{(307 \times 10^{-\frac{1}{1-2.89w}} + 0.191)p_a}\right)\right][1 - \exp(-14.9\varepsilon_1)] & (\sigma_c \geq \sigma_y) \end{cases} \quad (21)$$

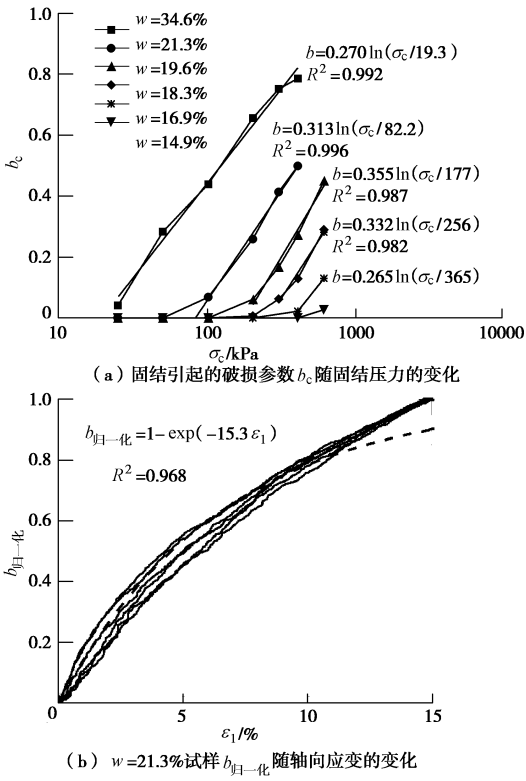


图 5 破损参数 b_c 和 $b_{\text{归一化}}$ 的变化规律

Fig. 5 Evaluation of breakage parameter b_c and $b_{\text{normalized}}$

在 $p - q$ 空间，破损参数 b 的等值面如图 6 所示，该面与堆砌体模型的损伤面^[7]形状相近，可采用类似的函数形式，表达式为

$$p_c = \frac{p}{1 - (\eta^*/1.2/\eta_m^*)^n / (1 + n)}, \quad (22)$$

式中， p_c 为 $p - q$ 空间中破损参数 b 的等值面与 p 轴右交点处的 p 值， $\eta^* = (\sigma_1 - \sigma_2)/(\sigma_1 + \sigma_2)$ ， n 为屈服面的形状参数， $\eta_m^* = \sin\phi$ 。

破损参数随 p_c 的变化也即破损参数随固结压力的变化，结果表明其函数形式与式 (18)、(19) 相同，

仅需将式 (18) 中 σ_c 改为 p_c , 即

$$b = \begin{cases} 0 & (p_c \leq p_{ci}) \\ c_1 \ln\left(\frac{p_c}{p_{ci}}\right) & (p_c > p_{ci}) \end{cases} \quad (23)$$

相比式 (21), 如果再考虑 b_{\max} 与含水率和固结压力的函数关系, 采用应力表示的函数则参数少很多。需要说明的是对于应变软化情况, 在软化阶段如按破损参数等值面计算, 会出现随剪切发展破损参数降低, 对此情况可采用初始破损面和轴向应变 ε_1 联合表示。

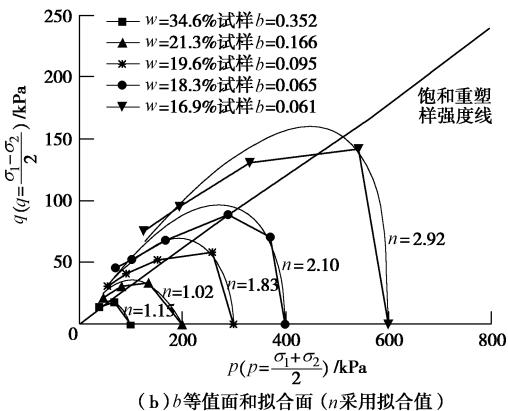
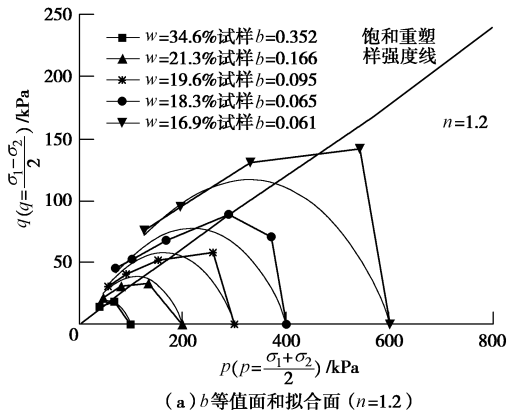


图 6 破损参数 b 在 $p-q$ 空间的等值面和拟合面

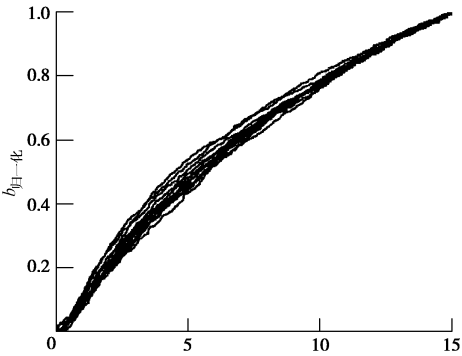
Fig. 6 Isosurface and fitting surface of breakage parameter

3.3 应力控制常规、等 p 和减 p 双轴压缩试验

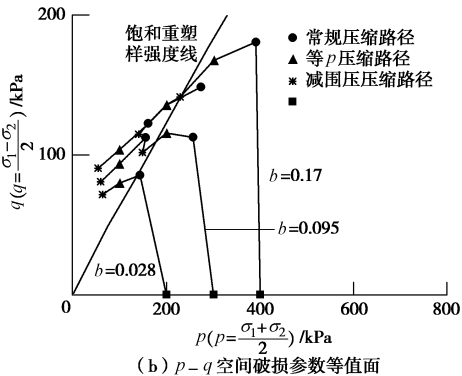
应力控制围压 100, 200, 300, 400 kPa 下常规、等 p 和减 p 双轴压缩试验剪切过程中 $b_{\text{归一化}}$ 和 $p-q$ 空间等破损参数面如图 7 所示。可见剪切过程中存在与应力路径和围压无关的 $b_{\text{归一化}}$, 另外在 $p-q$ 空间存在破损参数等直面。

3.4 等应力比试验

图 8 给出了等应力比双轴压缩试验剪切过程中破损参数 b 随轴向应变的变化关系和破损参数等值面, 从结果可看出破损参数与轴向应变的关系不能用 $b_{\text{归一化}}$ 表示, 与上述 3 种应力路径下的 q/p 存在一定梯度变化不同, 此试验中 q/p 恒定, 特别对于等向固结试验, 同样的轴向应变引起较大的破损。 $p-q$ 空间的破损参数等值面形状与图 6 类似, 因此对等应力比试验, 宜用应力的函数表示, 而不宜用应变的函数表示。



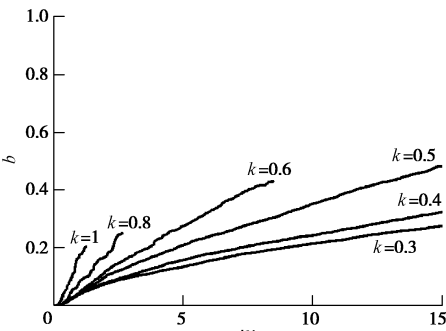
(a) $b_{\text{归一化}}$ 随轴向应变的变化



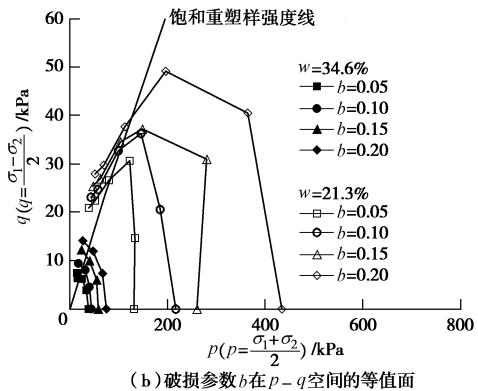
(b) $p-q$ 空间破损参数等值面

图 7 不同应力路径下 $b_{\text{归一化}}$ 和破损参数等值面

Fig. 7 $b_{\text{normalized}}$ and isosurface of breakage parameter under different loading paths



(a) $w=21.3\%$ 试样破损参数 b 随轴向应变的发展



(b) 破损参数 b 在 $p-q$ 空间的等值面

图 8 等应力比路径下破损参数 b 的变化规律

Fig. 8 Evaluation of breakage parameter b in constant stress ratio tests

3.5 一维湿陷试验

根据一维压缩试验双线法整理出破损参数如随含

水率和固结压力的变化如图 9 (a) 所示, 文献[1, 4, 5]建议的破损参数随含水率变化的表达式(9b)、(9c)、(11c)、(11d)所示, 在增湿到饱和时, 破损值均达到 1, 离散元测试结果表明最终破损量与压力相关, 压力越大, 破损参数越接近 1。破损参数 b 随含水率变化的归一化公式化为

$$b/b_{\max} = \begin{cases} 0 & (w < w_i) \\ 1 - \exp\left(-c_1 \frac{w - w_i}{w_s - w}\right) & (w \geq w_i) \end{cases} \quad (24)$$

按照式 (24) 所得归一化关系如图 9 (b) 所示, 可见此函数形式拟合效果较好, 但式 (24) 含有 b_{\max} 其是压力的函数, 因此总体上参数较多。采用破损参数为应力的函数, 应用式 (16)、(17) 取 $c_1=0.307$, $c_2=158.9$, $c_3=1$, $c_4=0.958$ 得到一维湿陷增湿过程中破损参数的变化规律如图 10 所示, 与图 9 (a) 对比可见该公式也能较好地表达增湿过程中的结构破损规律。

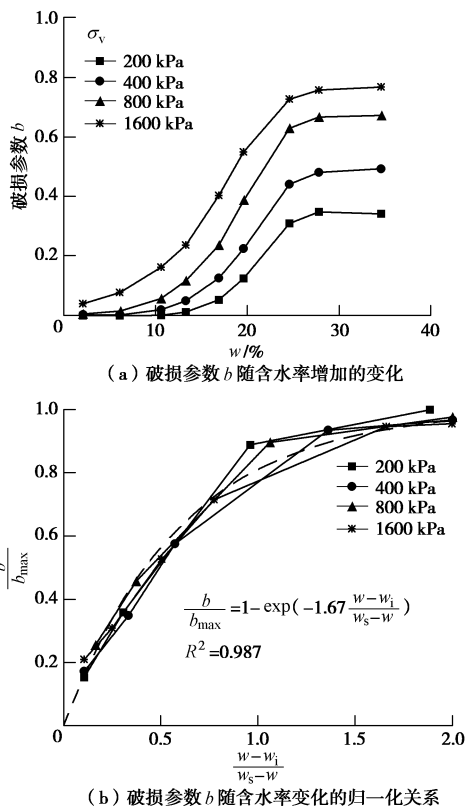


图 9 一维湿陷双线法所得破损参数 b 的变化规律

Fig. 9 Evaluation of breakage parameter b in double-oedometer tests

3.6 双轴湿陷试验

图 11 给出了双轴湿陷试验不同应力水平下破损参数随含水率的变化关系。离散元分析结果表明最终破损量与剪应力水平和固结围压相关, 固结围压和剪应力水平越高, 破损参数越接近 1, 这与文献[1, 4, 5]中湿到饱和时破损均达到 1 不同。破损参数 b 随含水率的变化可归一化为

$$b = b_p + (b_{\max} - b_p) \left[1 - \exp\left(c_5 \frac{w - w_0}{w_s - w}\right) \right] \quad (25)$$

式中 b_p 为湿陷前加载引起的结构破损; w_s 为饱和含水率; w_0 为初始含水率; b_{\max} 为增湿到饱和时的结构破损。采用破损参数为应力的函数, 应用式(22)、(23)、(20)进行计算, 取 $c_1=0.307$, $c_2=307$, $c_3=1$, $c_4=0.191$, $n=2$, 对双轴增湿过程中破损参数的预测如图 11 所示, 对比图 11, 12, 可见该公式能较好地表达增湿过程中破损参数的变化规律, 相比式 (25) 参数较少。按照式 (25) 所得归一化关系如图 11 (b) 所示, 可见此函数形式拟合效果较好, 但式 (25) 含有 b_{\max} , 而其为固结围压和剪应力的函数, 因此总体上参数较多。

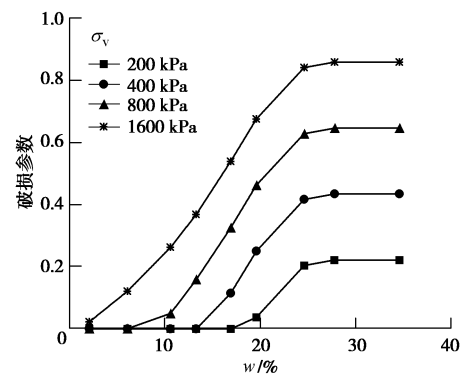


图 10 式 (14) 预测破损参数随含水率的变化

Fig. 10 Relation between breakage parameter b and water content predicted by formula No. 14

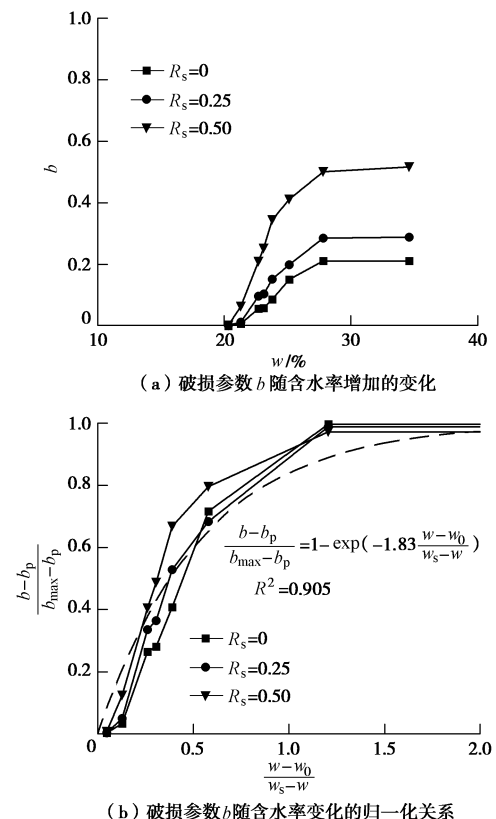


图 11 双轴湿陷中破损参数随含水率的变化

Fig. 11 Evaluation of breakage parameter b in biaxial wetting tests

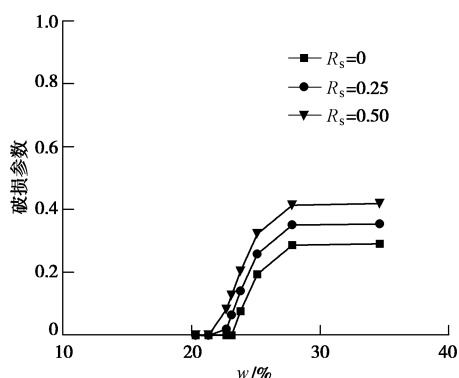


图 12 式 (23) 预测破损参数随含水率的变化

Fig. 10 Relation between breakage parameter b and water content predicted by formula No. 23

3.7 不同应力路径下破损参数变化规律的计算公式

由于不同加减荷路径和增湿路径, 破损参数随应力和应变变化较为复杂, 本文分别针对一维压缩和增湿试验, 双轴压缩应变硬化情况及双轴湿陷试验和双轴压缩试验应变软化情况提出的计算公式如下。

对一维压缩和一维湿陷试验, 采用竖向应力和含水率的函数表示, 即式 (15)、(16), 该关系式能较好地考虑由于应力引起破损参数的增加和含水率导致结构屈服应力减少, 从而引起破损参数的增加。

对双轴压缩应变硬化情况及双轴湿陷试验, 采用应力和含水率的函数表示, 即式 (22)、(23), 与式 (15)、(16) 类似该式能较好考虑由于应力引起破损参数的增加和含水率导致结构屈服应力减少, 从而引起破损参数的增加。

对双轴压缩试验应变软化情况, 可用 $p-q$ 空间初始破损面 (b 或 $B=0$) 和轴向应变 ε_1 联合表示, 应力状态在初始破损面内时无破损, 初始破损面可用式 (22) 表示, 在初始破损面外采用轴向应变的函数如式 (20) 表示破损参数。

综合以上分析, 对于应变硬化情况, 采用应力和含水率的函数计算破损参数; 对应变软化情况, 采用应力、应变和含水率的函数来计算。

4 结 论

本文对结构性黄土离散元试样进行增减荷和增湿试验, 应用微观测试技术获得了定义在离散介质上的破损参数 b 和 B , 检验了已有宏观本构模型中破损参数的函数形式, 并建议了多种应力路径下和增湿路径下的计算方法。得到以下 3 点结论。

(1) 对一维压缩和一维湿陷试验, 建议破损参数采用竖向应力和含水率的函数表示, 即式 (15)、(16)。

(2) 对双轴压缩应变硬化情况及双轴湿陷试验, 建议破损参数采用应力和含水率的函数表示, 即式

(22)、(23)。

(3) 对双轴压缩试验应变软化情况, 可用 $p-q$ 空间初始破损面 (b 或 $B=0$) 和轴向应变 ε_1 联合表示, 即式 (22)、(20)。

需要说明的是, 式 (22) 所表达的破损参数等值面, 在低含水率低压力下呈偏转的椭圆状, 在高压力下呈非偏转的椭圆状。为用较少的参数描述, 本文未对该面的形状参数随含水率和围压的变化进行探索, 而采用同一个形状参数, 更为准确地描述等值面形状变化的函数形式有待进一步探求。另外, 不同应力路径下破损参数不能很好地用同一种函数形式表示可能与试样的各向异性有关, 本文中的各向异性仅包含了胶结点和接触点在生成时竖直方向较水平方向多, 而未包含胶结强度并不随方向而改变, 关于各向异性的研究还有待进一步开展。

参考文献:

- [1] 沈珠江, 章为民. 损伤力学在土力学中的应用[C]// 第三届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集. 珠海, 1988: 47 - 51. (SHEN Zhu-jiang, ZHANG Wei-min. Application of damage mechanics in the soil mechanics[C]// Proceeding of the 3th conference on the numerical analysis and analytic method of soil mechanics. Zhuhai, 1988: 595 - 610. (in Chinese))
- [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. (SHEN Zhu-jiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 21 - 28. (in Chinese))
- [3] 沈珠江. 结构性黏土的非线性损伤力学模型[J]. 水利水运科学研究, 1993, 15(3): 247 - 255. (SHEN Zhu-jiang. A nonlinear damage model for structured clay[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1993, 15(4): 247 - 255. (in Chinese))
- [4] 沈珠江. 土体变形特性的损伤力学模型[C]// 第五届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会. 重庆, 1994. (SHEN Zhu-jiang. Deformation characteristics of damage mechanics model[C]// The 5th symposium of numerical analysis and analytical method in rock and soil mechanics. Chongqing, 1994. (in Chinese))
- [5] 沈珠江. 黄土的损伤力学模型探索[C]// 第七届土力学及基础工程学术会议论文集. 西安, 1994: 145 - 149. (SHEN Zhu-jiang. Approach to damage mechanic model of loess[C]// Conference of 7th Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Xi'an, 1994. (in Chinese))

- [6] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(2): 1 - 9. (SHEN Zhu-jiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(2): 1 - 9. (in Chinese))
- [7] 沈珠江. 结构性黏土的堆砌体模型[J]. 岩土力学, 2000, **21**(1): 1 - 4. (SHEN Zhu-jiang. A masonry model for structured clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(1): 1 - 4. (in Chinese))
- [8] 沈珠江, 陈铁林. 岩土破坏力学: 基本概念、目标和任务[C]// 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会. 西安, 2002: 9 - 12. (Breakage mechanics for geological materials basic concepts, goal and task[C]// Proceedings of 7th conference on rock mechanics and project. Xi'an, 2002: 9 - 12. (in Chinese))
- [9] 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 geological materials: an ideal brittle-elasto-plastic model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 253 - 257. (in Chinese))
- [10] 沈珠江, 胡再强. 黄土的二元介质模型[J]. 水利学报, 2003, **34**(7): 1 - 6. (SHEN Zhu-jiang, HU Zai-qiang. Binary medium model for loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **34**(7): 1 - 6. (in Chinese))
- [11] 沈珠江. 二元介质模型在黄土增湿变形分析中的应用[J]. 水利学报, 2005, **36**(2): 129 - 134. (SHEN Zhu-jiang, Application of binary medium model in deformation analysis of loess during wetting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, **36**(2): 129 - 134. (in Chinese))
- [12] 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. Generalized stress-strain relationship of binary medium model for geological materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 489 - 495. (in Chinese))
- [13] 孙渝刚. 结构性砂土宏微观力学特性的试验研究与数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2012. (SUN Yu-gang. Experimental and numerical investigation on macro- and micro- mechanical behaviors of structural sands[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese))
- [14] 蒋明镜, 胡海军, 彭建兵. 结构性黄土一维湿陷特性的离散元数值模拟[J]. 岩土力学, 2013, **34**(3): 1121 - 1130. (JIANG Ming-jing, HU Hai-jun, PENG Jian-bing. Simulation of collapsible behavior of structural loess under one-dimensional condition by discrete element method (DEM)[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(3): 1121 - 1130. (in Chinese))
- [15] 李建红. 基于细观破坏机理的胶结结构性土本构模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2008. (LI Jian-hong. A Constitutive model of bonded soil based on the micro-mechanism of bonding-breakage[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese))
- [16] CUNDALL P A, Strack O D L. The distinct element method as a tool for research in granular media, Part I [R]. Minnesota: University of Minnesota, 1978: 1 - 97.
- [17] BAGI K. Stress and strain in granular assemblies[J]. Mechanics of Materials, 1996, **22**(3): 165 - 177.
- [18] 熊传祥, 龚晓南. 一种改进的软土结构性弹塑性损伤模型[J]. 岩土力学, 2006, **27**(3): 395 - 397, 403. (XIONG Chuan-xiang, GONG Xiao-nan. An updated elastoplastic damage model for structural soft-clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(3): 395 - 397, 403. (in Chinese))