

文章编号: 1000-7598 (2013) 07-2043-08

# 基于微观力学的胶结岩土材料破损规律离散元模拟

蒋明镜<sup>1,2</sup>, 孙渝刚<sup>1,2</sup>, 张伏光<sup>1,2</sup>

(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)

**摘 要:** 采用离散元法 (DEM) 研究胶结岩土材料在不同加载条件下的结构破损规律。首先, 基于微观力学理论, 考虑胶结岩土材料颗粒间胶结特性, 给出表征结构性损伤的破损参数式。该式具有微观物理意义, 但不能直接用于建立宏观本构模型。其次, 采用二维离散元源程序 NS2D 模拟等向压缩、等应力比压缩以及双轴压缩试验, 分析破损参数在不同加载条件下随宏观力学变量 (体积应变和剪应变) 的演变规律。最后, 根据模拟结果提出破损参数数学表达式, 其为大主应变的函数。研究表明: 胶结强度、应力比以及围压均在一定程度上影响了数值试样的结构破损规律。在等向压缩和等应力比压缩试验中, 容易用函数式描述数值试样破损参数随体积应变或偏应变的演变规律; 而在双轴压缩条件下, 由于数值试样有剪胀特性, 破损参数随体积应变的演变规律则不易描述。建议的破损参数数学表达式能够较好地描述数值试样在不同加载条件下结构破损规律。

**关 键 词:** 胶结岩土材料; 破损; 本构模型; 微观理论; 离散元法

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

## Distinct element simulation of degradation evolution for bonded geomaterials based on micromechanics

JIANG Ming-jing<sup>1,2</sup>, SUN Yu-gang<sup>1,2</sup>, ZHANG Fu-guang<sup>1,2</sup>

(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)

**Abstract:** The degradation evolution of the bonded geomaterials under different loading conditions is investigated by using distinct element method (DEM). First, considering the bonding behavior at contacts between bonded geomaterials, an equation of degradation parameter, which is used to describe the degradation process in bonded geomaterials, is established based on the micromechanics theory. The equation has microscopic physical significance, which cannot be directly used to establish macroscopic constitutive model. Second, a series of isotropic, constant stress ratio and biaxial compression tests are performed on the numerical specimens by using a two-dimensional DEM code, NS2D; and the evolution of the degradation variable varying with macro variables, i.e. volumetric and shear strains, is investigated under the three loading conditions. Finally, a simple evolution equation for the degradation parameter is proposed; and it is a function of the major principal strain. It is shown that three variables, i.e. bond strength, constant stress ratio, and confining pressure, can influence the degradation evolution of the numerical specimens to a certain extent. The evolution of the parameter varying with the volumetric or deviatoric strains can be easily described by functions in the isotropic and constant stress ratio compression tests. The evolution of the parameter varying with the volumetric strain cannot be easily described due to the dilatancy in the specimens under biaxial compression tests. The equation proposed for the degradation parameter can well describe the degradation evolution observed in the three loading conditions.

**Key words:** bonded geomaterials; degradation; constitutive model; microscopic theory; DEM

## 1 引 言

胶结的存在使得胶结岩土材料力学特性不同于

无胶结岩土材料<sup>[1-4]</sup>。在外荷载作用下, 胶结岩土材料内部胶结逐步破损向无胶结状态转变。胶结岩土材料本构模型的功能是否强大取决于其能否较好

收稿日期: 2012-10-19

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (No. 51025932); 国家自然科学基金项目 (No. 51179128); 教育部博士点基金 (No. 20100072110048); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助 (No. IRT1029)。

第一作者简介: 蒋明镜, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 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: mingjingjiang@tongji.edu.cn

地描述胶结岩土材料的结构破损规律。

胶结岩土材料的结构性损伤是其微观结构破损与宏观力学特性的有机结合,因此,要提出合理的结构破损规律,需要从微观层面研究加载过程中材料的结构特性。而目前多数胶结岩土材料本构模型<sup>[5-10]</sup>所采用的结构破损规律是以宏观特性为基础提出的,尚缺少微观层面的验证。这是因为,目前从物理试验中得出研究对象的微观信息仍是一个很大的挑战<sup>[11]</sup>,尤其是与胶结岩土材料宏观力学特性密切相关的胶结破损信息的定量获取更是一个难点。李建红<sup>[12]</sup>基于微观层面定义了破损变量,利用能量平衡原理推导了破损变量的演化方程。

离散元法 (DEM) 是基于离散介质力学的数值模拟方法,该方法将土体视为离散颗粒材料集合,着眼于颗粒间的力学接触定律,分析颗粒在各种边界条件下的宏微观力学响应。该方法已被证明是研究分析颗粒材料宏微观力学响应的有效工具<sup>[13-15]</sup>。研究表明,采用 DEM 能够以无损方式监控数值试样内部应力和颗粒间胶结特性的演变过程,同时提供颗粒间胶结破损的微观信息。因此,采用 DEM 来研究胶结岩土材料的破损规律是一种切实可行的方法。

本文从微观力学和胶结颗粒间胶结特性出发,建立了具有微观物理意义的破损变量,并采用 DEM 研究分析该破损参数与宏观力学变量 (体积应变和剪应变) 的关系,结合已有研究成果<sup>[16]</sup>,提出新的描述胶结岩土材料破损演变规律的破损参数数学表达式。

## 2 胶结颗粒微观力学理论

在离散介质力学中,胶结岩土材料被当作离散颗粒的集合体,其应力通过颗粒间的接触进行传递,而应变则是由颗粒间的相对滑移产生,也即颗粒材料力学特性主要取决于颗粒间的接触特性。微观力学理论可以用来描述颗粒材料的力学特性<sup>[17-20]</sup>。该理论建立了宏观应力 (应变) 和颗粒间接触力 (相对位移) 的联系。

### 2.1 应力基本方程

任意形状代表性单元的平均应力张量  $\bar{\sigma}_{ij}$  可用颗粒间接触力表示<sup>[17]</sup>为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^N l_i^k f_j^k \quad (1)$$

式中:  $V$  为代表性单元的体积;  $N$  为颗粒间接触点的总数目;  $f_j^k$  为第  $k$  个接触点处接触力在  $j$  方向上

的分量;  $l_i^k$  为第  $k$  个接触点两端颗粒的质心连线矢量在  $i$  方向上的分量。

对于胶结岩土材料,代表性单元体积  $V$  和接触数目  $N$  可分为胶结部分 ( $V^{\text{in}}, N^{\text{in}}$ ) 和无胶结部分 ( $V^{\text{d}}, N^{\text{d}}$ ), 且  $V = V^{\text{in}} + V^{\text{d}}, N = N^{\text{in}} + N^{\text{d}}$ 。  $\bar{\sigma}_{ij}$  表示为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{V^{\text{in}}}{V} \cdot \frac{1}{V^{\text{in}}} \sum_{k=1}^{N^{\text{in}}} l_i^k f_j^k + \frac{V^{\text{d}}}{V} \cdot \frac{1}{V^{\text{d}}} \sum_{h=1}^{N^{\text{d}}} l_i^h f_j^h = (1-\lambda) \cdot \bar{\sigma}_{ij}^{\text{in}} + \lambda \cdot \bar{\sigma}_{ij}^{\text{d}} \quad (2)$$

式中:  $\lambda = V^{\text{d}}/V$ , 定义为体积破损率。  $\bar{\sigma}_{ij}^{\text{in}}$  和  $\bar{\sigma}_{ij}^{\text{d}}$  分别表示胶结部分和无胶结部分的平均应力张量:

$$\bar{\sigma}_{ij}^{\text{in}} = \frac{1}{V^{\text{in}}} \sum_{k=1}^{N^{\text{in}}} f_i^k l_j^k, \bar{\sigma}_{ij}^{\text{d}} = \frac{1}{V^{\text{d}}} \sum_{h=1}^{N^{\text{d}}} f_i^h l_j^h \quad (3)$$

作如下假设:

$$V^{\text{in}}/V = N^{\text{in}}/N, V^{\text{d}}/V = N^{\text{d}}/N \quad (4)$$

体积破损率  $\lambda$  可表示为

$$\lambda = V^{\text{d}}/V = N^{\text{d}}/N \quad (5)$$

### 2.2 应变基本方程

同理,根据颗粒间接触特性的差异,将代表性单元平均应变张量  $\bar{\epsilon}_{ij}$  分解为两部分<sup>[19]</sup>:

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2V} \sum_{k=1}^{N^{\text{in}}} (d_i^k \Delta u_j^k + d_j^k \Delta u_i^k) + \frac{1}{2V} \sum_{h=1}^{N^{\text{d}}} (d_i^h \Delta u_j^h + d_j^h \Delta u_i^h) \quad (6)$$

式中:  $d_i^k$  为互补面积矢量在  $i$  方向上的分量;  $\Delta u_j^k$  为第  $k$  个接触点处的相对滑动位移增量在  $j$  方向上的分量,其余符号同式 (2)。

单元内胶结部分和无胶结部分的平均应变张量分别为

$$\bar{\epsilon}_{ij}^{\text{in}} = \frac{1}{2V^{\text{in}}} \sum_{k=1}^{N^{\text{in}}} (d_i^k \Delta u_j^k + d_j^k \Delta u_i^k) \quad (7)$$

$$\bar{\epsilon}_{ij}^{\text{d}} = \frac{1}{2V^{\text{d}}} \sum_{h=1}^{N^{\text{d}}} (d_i^h \Delta u_j^h + d_j^h \Delta u_i^h) \quad (8)$$

将式 (7)、(8) 代入式 (6), 可得

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{V^{\text{in}}}{V} \bar{\epsilon}_{ij}^{\text{in}} + \frac{V^{\text{d}}}{V} \bar{\epsilon}_{ij}^{\text{d}} = (1-\lambda) \bar{\epsilon}_{ij}^{\text{in}} + \lambda \bar{\epsilon}_{ij}^{\text{d}} \quad (9)$$

构建具体的胶结岩土材料宏观本构模型时，需将上述应力和应变基本方程进行组合。

### 2.3 组合方程

将式(2)和式(9)进行组合的方式一般有两种：第1种以应变分担为基本关系式；第2种以应力分担为基本关系式。本文采用第1种方法。

定义代表性单元内局部应力系数  $c_\sigma$  如下：

$$c_\sigma = \bar{\sigma}_{ij}^{\text{in}} / \bar{\sigma}_{ij} \quad (10)$$

这里先考虑局部应力系数为标量的情况，令  $c_\sigma = \bar{\sigma}^{\text{in}} / \bar{\sigma}$ ，则由式(2)得

$$\bar{\sigma}^{\text{d}} = \frac{1 - (1 - \lambda)c_\sigma}{\lambda} \bar{\sigma} \quad (11)$$

假设代表性单元内胶结颗粒与无胶结颗粒的局部应力-应变关系满足下式：

$$\bar{\varepsilon}_{ij}^{\text{in}} = [D^{\text{in}}]^{-1} \bar{\sigma}_{ij}^{\text{in}}, \bar{\varepsilon}_{ij}^{\text{d}} = [D^{\text{d}}]^{-1} \bar{\sigma}_{ij}^{\text{d}} \quad (12)$$

式中： $[D^{\text{in}}]$ 、 $[D^{\text{d}}]$ 分别为胶结部分和无胶结部分的模量矩阵。

将式(10)、(11)、(12)代入式(9)可得

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = (1 - B)\bar{\varepsilon}_{ij}^{\text{in}} + B\bar{\varepsilon}_{ij}^{\text{d}} \quad (13)$$

式中： $B = 1 - (1 - \lambda)c_\sigma$ 为破损参数，是体积破损率 $\lambda$ 和局部应力系数 $c_\sigma$ 的函数； $\bar{\varepsilon}_{ij}^{\text{in}} = [D^{\text{in}}]^{-1} \bar{\sigma}_{ij}$ ， $\bar{\varepsilon}_{ij}^{\text{d}} = [D^{\text{d}}]^{-1} \bar{\sigma}_{ij}$ 。

由式(11)可得

$$B = \lambda \bar{\sigma}^{\text{d}} / \bar{\sigma} \quad (14)$$

由式(14)可知，破损参数 $B$ 的实质为代表性单元内无胶结颗粒所分担的应力与代表性单元平均应力的比值。本文采用平均球应力 $\bar{\sigma}_m$ 或偏应力 $\bar{\sigma}_s$ 表示式(14)中的应力张量 $\bar{\sigma}$ 。上述推导过程可见文献[21]。

## 3 离散元数值模拟分析

### 3.1 离散元程序

本文离散元模拟采用二维离散元程序(NS2D)，程序中胶结模型的强度包线为

$$F_{\text{nf}} = R_n, F_{\text{sf}} = R_t + F_n \tan \varphi_\mu \quad (15)$$

式中： $F_{\text{nf}}$ 和 $F_{\text{sf}}$ 分别为抗拉强度和峰值抗剪强度； $R_n$ 和 $R_t$ 分别为法向和切向胶结强度； $F_n$ 为法向接触力，以压为正； $\tan \varphi_\mu$ 为摩擦系数。需要注意的是， $F_n$ 为负时， $F_{\text{sf}} = R_t$ 。有关该胶结模型的详细信息可

参考文献[22]。

### 3.2 模拟试样参数及制备

离散元模拟中采用的试样颗粒级配如图1所示。试样最大粒径为9.0 mm，最小粒径为6.0 mm，平均粒径 $d_{50} = 7.6$  mm，不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10} = 1.3$ 。数值试样颗粒级配不同于室内试验试样真实级配，但经研究证实，该级配试样能够反映胶结颗粒的主要力学特性<sup>[22-24]</sup>。

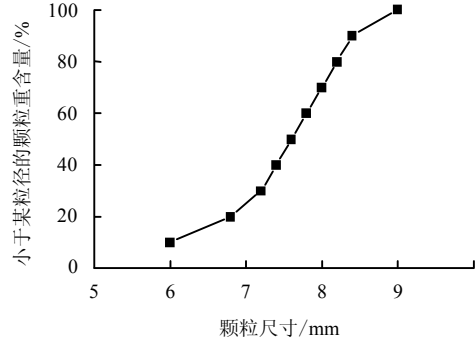


图1 模拟试样颗粒级配

Fig.1 Particle size distribution for specimen

离散元数值试样制备分为3个步骤：①采用分层欠压法<sup>[25]</sup>制备均匀且松散的无胶结试样，分5层制备，摩擦系数 $\mu = 1$ ，孔隙比 $e_0 = 0.28$ 。分层欠压法详见文献[25]。②试样制备后，摩擦系数 $\mu$ 设为0.5，在垂直压力12.5 kPa下对试样进行一维压缩，直到试样内部颗粒相互接触并达到平衡状态。③在所有接触点位置形成胶结，力学特性由胶结模型<sup>[22]</sup>控制。数值试样如图2所示，颗粒数目为5 000个，颗粒密度为2.65 g/cm<sup>3</sup>，初始平面孔隙比为0.28（松样）。图2中圆圈范围内的颗粒即为所选用的代表性单元。

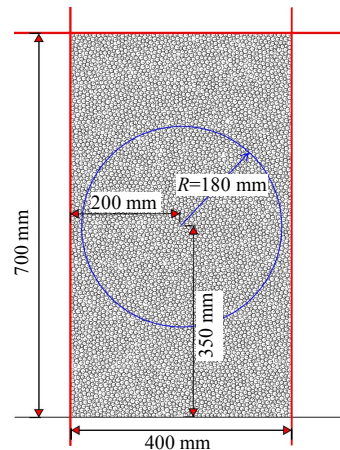


图2 数值试样

Fig.2 Numerical specimen

### 3.3 试验步骤

下面简要介绍所开展的 3 种离散元试验, 包括等向压缩、等应力比压缩以及双轴压缩试验。等向压缩试验中, 四面墙在相同压力下对试样进行等向压缩, 初始荷载为 25 kPa, 待试样稳定后施加下一级荷载, 共分 20 级加荷, 每级荷载值为上一级的 1.5 倍; 等应力比压缩试验中, 水平和垂直荷载的应力比保持为常数; 双轴压缩试验, 试样固结后, 轴向应变速率为 0.1%/min, 而水平向应力保持不变。

在试样压缩过程中, 边界条件采用刚性墙模拟, 其接触刚度与颗粒相同, 两者摩擦系数均设为 0, 而颗粒间摩擦系数设为 0.5。需要注意的是, 前两种试验中, 法向和切向接触刚度分别取为  $1.5 \times 10^{10}$ 、 $1.0 \times 10^{10}$  N/m; 而在双轴压缩试验中, 则分别取为  $1.5 \times 10^8$ 、 $1.0 \times 10^8$  N/m。不同的接触刚度是通过对比离散元模拟的宏观力学响应与人工胶结砂土的室内试验结果所确定的, 可参考文献[16, 22–23], 并于文献[16]中作出了解释说明。表 1 列出了 3 种加载条件下的试验参数。

### 3.4 数值模拟结果

许多研究者将破损参数表达为塑性体应变或塑性剪应变的函数<sup>[5, 7–8, 26–27]</sup>。然而, 在离散元模拟中, 很难将总应变分解为弹性部分和塑性部分。为便于分析, 本文离散元模拟忽略试验中试样的弹性应变部分。

鉴于以上分析, 本文采用 DEM 给出上述 3 种加载条件下破损参数  $B$  与体积应变  $\varepsilon_v$ 、剪应变  $\varepsilon_s$  的关系曲线。

表 1 离散元模拟的试验参数  
Table 1 Parameters for DEM tests

| 试验参数 | 胶结强度/(kN/m)     | 应力比                                            | 围压/kPa       |
|------|-----------------|------------------------------------------------|--------------|
| 等向压缩 | 1, 2, 5, 10, 20 |                                                |              |
| 等应力比 | 1, 2, 5, 10, 20 | 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6,<br>0.7, 0.8, 0.9, 1.0 |              |
| 双轴压缩 | 1, 2, 3         |                                                | 50, 100, 200 |

#### 3.4.1 等向压缩试验

在等向压缩试验中, 数值试样的偏应变为 0, 因此, 只给出不同胶结强度下破损参数  $B$  与体积应变  $\varepsilon_v$  的关系曲线, 如图 3 所示。模拟结果显示, 破损参数随体积应变的增大呈对数型增大, 易用函数式进行描述。胶结强度  $R_t \leq 5$  kN/m 时, 同一体积应变  $\varepsilon_v$  下破损参数  $B$  将随胶结强度的增大而减小; 而当  $R_t > 5$  kN/m 时, 破损参数  $B$  几乎不再随胶结强

度而变化。另外, 不同胶结强度条件下, 破损参数  $B$  在试样刚开始加载时增长较快, 而当体积应变  $\varepsilon_v \geq 0.035$  时则趋于常量。

#### 3.4.2 等应力比压缩试验

由该数值试验模拟结果可知, 破损参数的两种表达方式 (表达为平均球应力  $\bar{\sigma}_m$  或偏应力  $\bar{\sigma}_s$  的函数), 随体积应变和剪应变的变化规律基本相同。因此, 为简化数值模拟过程, 在等应力比压缩试验中, 取  $B = \lambda \bar{\sigma}_m^d / \bar{\sigma}_m$ 。

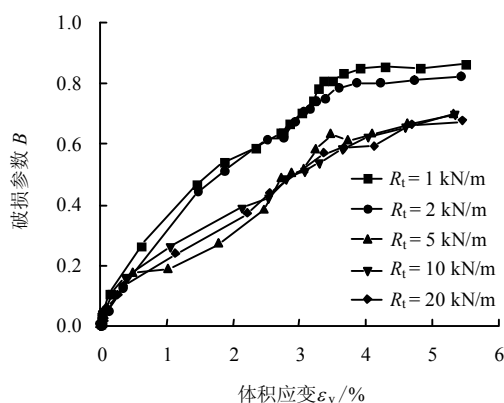


图 3 等向压缩试验破损参数与体积应变的关系  
Fig.3 Relationships between  $B$  and  $\varepsilon_v$  in isotropic compression tests

图 4 给出了破损参数  $B$  在不同胶结强度和应力比条件下与体积应变  $\varepsilon_v$  和剪应变  $\varepsilon_s$  的关系曲线。由图 4(a)和 4(c)可知, 同一体积应变下,  $B$  值随胶结强度 (应力比) 的增大而减小。由 4(b)和 4(d)可知, 同一剪应变下,  $B$  值随胶结强度的增大而减小, 随应力比的增大而增大, 应力比  $CSR \geq 0.7$  时, 破损参数在剪应变较小时很快达到最大值。同样, 在该加载条件下, 破损参数随体积应变和剪应变的增大呈对数型增大, 易用函数表达式进行描述。

将数值试样 ( $R_t=2$  kN/m) 在上述  $CSR$  值条件下的破损规律绘制在三维空间  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_s$ - $B$  中, 再通过曲面拟合得到破损参数的空间曲面, 如图 5 所示。空间曲面表达式为

$$B = 1 - \exp\left(-\sqrt{c_1^2 \varepsilon_v^2 + c_2^2 \varepsilon_s^2}\right) \quad (16)$$

式中:  $c_1$ 、 $c_2$  均为拟合参数,  $c_1=33.44$ ,  $c_2=6.85$ 。

#### 3.4.3 双轴压缩试验

与等应力比压缩试验相同, 双轴压缩试验中破损参数取  $B = \lambda \bar{\sigma}_m^d / \bar{\sigma}_m$ 。

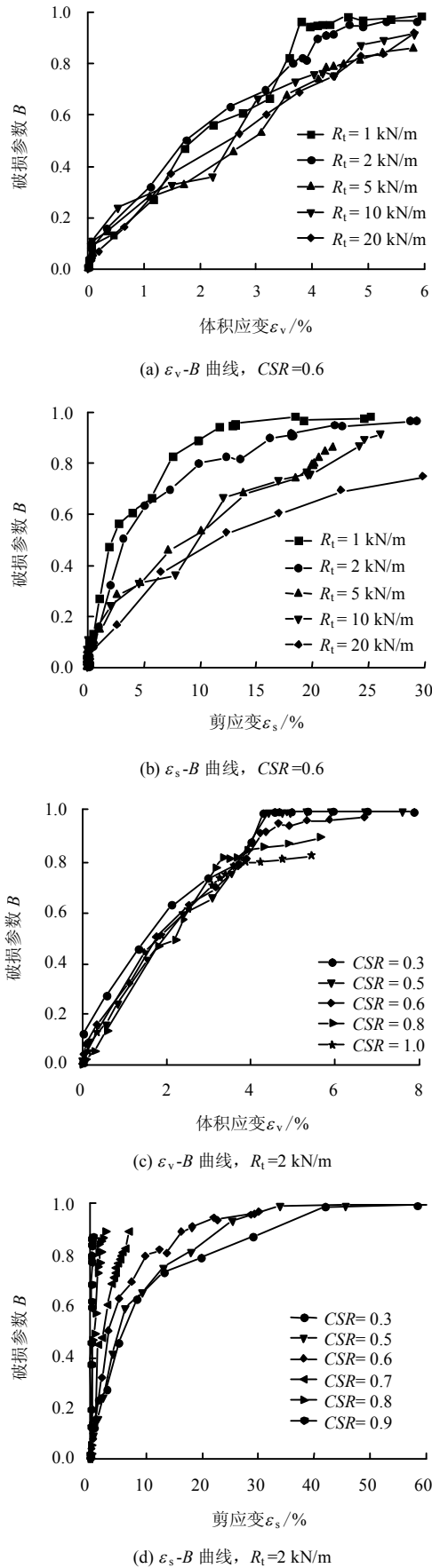


图4 等应力比压缩试验破损参数与体积应变(剪应变)的关系

Fig.4 Relationships between  $B$  and  $\varepsilon_v$  ( $\varepsilon_s$ ) in constant stress ratio compression tests

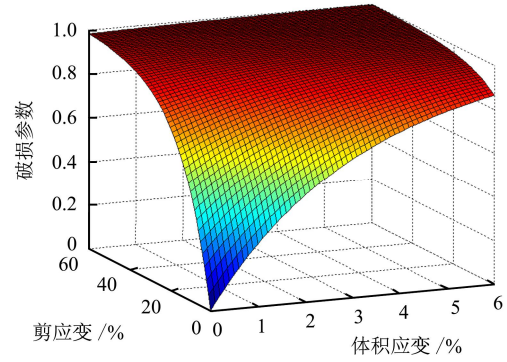


图5 不同CSR值下胶结强度为2 kN/m的试样在三维空间中破损参数的演变规律

Fig.5 Evolution of degradation parameter for specimens with a bond strength of 2 kN/m under different values of CSR in 3D space

图6给出破损参数 $B$ 在不同胶结强度和围压条件下与体积应变 $\varepsilon_v$ 和剪应变 $\varepsilon_s$ 的关系曲线。由图6(a)和6(c)可知,随胶结强度(围压)的增大,数值试样剪胀现象愈显著,而相应的破损参数 $B$ 的最终取值却愈小。由图6(b)可知,同一围压条件下,破损参数随胶结强度的增大而减小。由图6(d)可知,在同一胶结强度下,数值试样破损参数在围压50 kPa时的取值高于围压100 kPa和200 kPa。综上,在双轴压缩条件下,容易用函数式拟合破损参数与剪应变的关系曲线,而由于试样在试验中先剪缩后剪胀,使得破损参数随体积应变的演变规律不易用函数式描述。

### 3.5 破损参数表达式

文献[16]采用DEM对3个经典胶结岩土材料宏观本构模型中的破损规律<sup>[5,7-8]</sup>进行了验证,结果表明采用DEM无法验证一些破损参数表达式(表示成偏应变的函数)。另外,由于数值试样在双轴压缩试验中先剪缩后剪胀,使得另外一些破损参数表达式(表示成体积应变或偏应变的函数)不能较好地描述试验中破损参数随体积应变的演变规律。

鉴于以上分析,本文将破损参数表达为最大主应变 $\varepsilon_1$ 的函数,采用下式来统一描述不同加载条件下胶结岩土材料的破损规律:

$$B = 1 - \exp(-a\varepsilon_1) \quad (17)$$

式中: $a$ 为拟合参数。

下面将给出数值试样在不同加载条件下如等向压缩、等应力比压缩及双轴压缩试验的破损规律,以验证破损参数表达式(17)的适用性。通过数值模拟可知,破损参数演变规律在不同试验参数下大体相同,限于篇幅,这里只给出试样在胶结强度( $R_t=2$  kN/m)、应力比( $CSR=0.6$ )以及围压( $\sigma_2=100$  kPa)条件下的模拟结果,如图7所示。

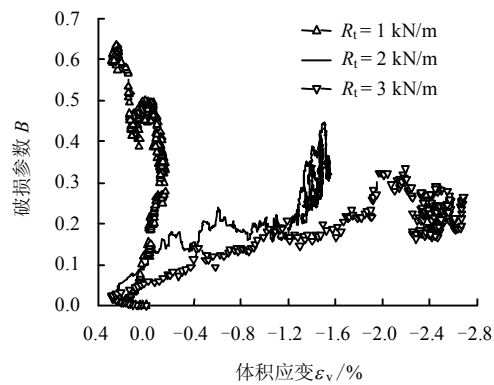
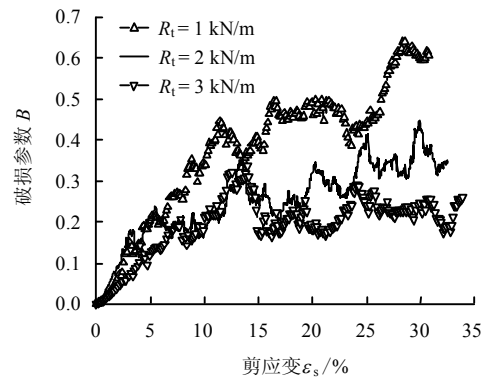
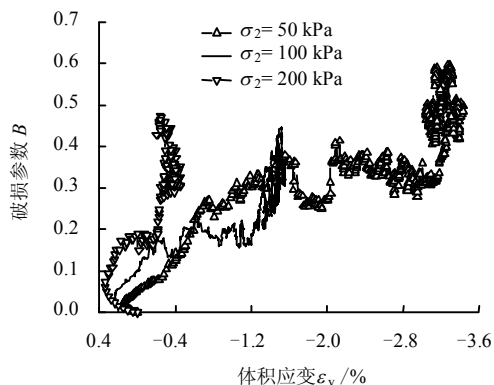
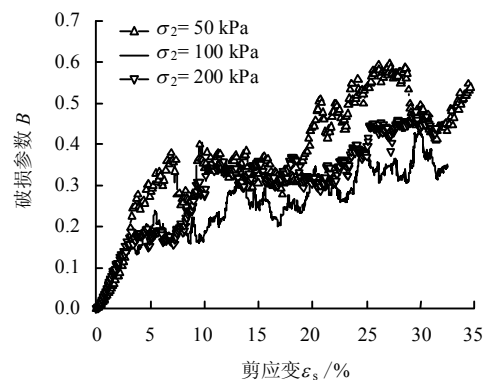
(a)  $\varepsilon_v$ - $B$  曲线,  $\sigma_2=100$  kPa(b)  $\varepsilon_s$ - $B$  曲线,  $\sigma_2=100$  kPa(c)  $\varepsilon_v$ - $B$  曲线,  $R_1=2$  kN/m(d)  $\varepsilon_s$ - $B$  曲线,  $R_1=2$  kN/m

图 6 双轴压缩试验破损参数与体积应变(剪应变)的关系  
Fig.6 Relationships between  $B$  and  $\varepsilon_v$  ( $\varepsilon_s$ ) in  
biaxial compression tests

图 7 给出了不同加载条件下式 (17) 所描述的破损参数演变规律与模拟试样的离散元模拟结果的对比情况。可见, 在不同加载条件下破损参数表达式 (17) 均能很好地描述离散元模拟结果中破损参数随最大主应变的变化规律, 其中以等向压缩和等应力比压缩试验的拟合程度最佳, 双轴压缩试验的拟合程度略次于前两者。然而, 采用式 (17) 对不同加载条件下的模拟结果进行拟合, 所得到的参数  $a$  值 (如图 7 所示) 是不同的, 即拟合参数  $a$  是一个与应力路径相关的量。

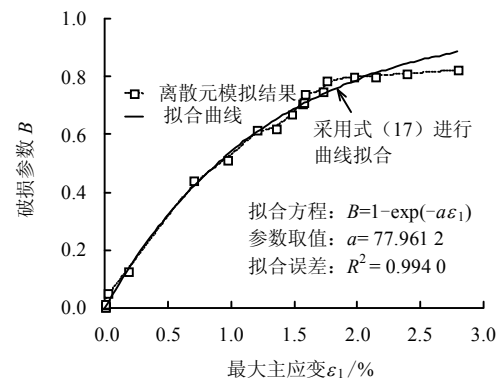
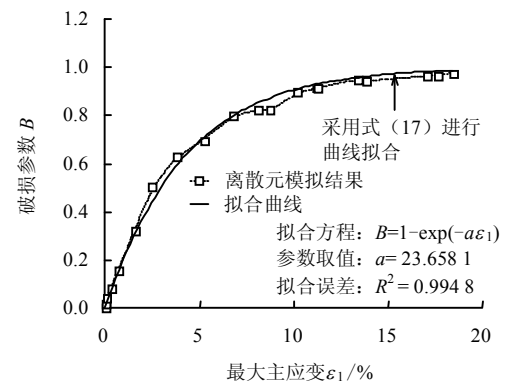
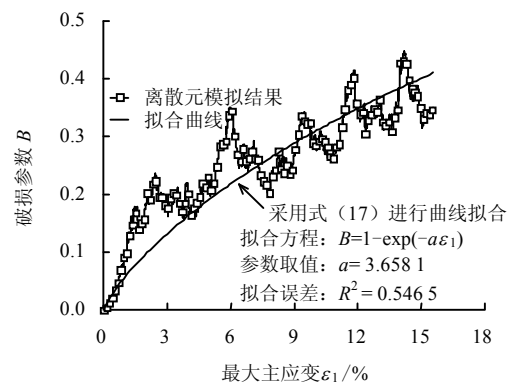
(a) 等向压缩试验,  $R_1=2$  kN/m(b) 等应力比压缩试验,  $CSR=0.6$ ,  $R_1=2$  kN/m(c) 双轴压缩试验,  $\sigma_2=100$  kPa,  $R_1=2$  kN/m

图 7 不同加载条件下破损参数与最大主应变的关系  
Fig.7 Relationships between  $B$  and  $\varepsilon_1$  under  
different loading conditions

下面将对图7中不同试验的模拟结果进行归一化处理,即将破损参数 $B$ 和最大主应变 $\varepsilon_1$ 分别除以其相应的最大值( $B^{\max}$ 、 $\varepsilon_1^{\max}$ ),归一化结果如图8所示。

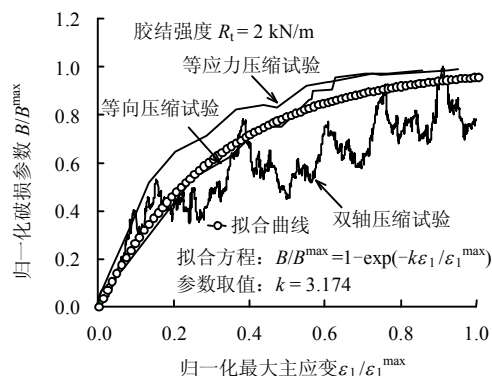


图8 不同加载条件下归一化破损参数与归一化最大主应变的关系

Fig.8 Relationships between  $B/B^{\max}$  and  $\varepsilon_1/\varepsilon_1^{\max}$  under different loading conditions

由图8可知,在不同加载条件下,归一化的破损参数随归一化的最大主应变的变化规律是大体相同的。因此,可近似用同一条拟合曲线进行描述,拟合曲线如图8所示,拟合方程如下:

$$B/B^{\max} = 1 - \exp(-k\varepsilon_1/\varepsilon_1^{\max}) \quad (18)$$

式中: $k$ 为拟合参数, $k=3.174$ 。需要注意的是,拟合参数 $k$ 与式(17)中拟合参数 $a$ 不同之处在于: $a$ 为与应力路径相关的参数,而 $k$ 与应力路径无关。式(17)、(18)在具体应用中(尤其是用于构建宏观本构模型)的优越性有待进一步研究确定。

## 4 结 论

(1) 在等向压缩试验中,胶结强度在一定范围内( $R_t \leq 5$  kN/m)对破损参数演变规律有影响,超过某值后影响趋于不明显。

(2) 在等应力比压缩试验中,同一应变下,破损参数随胶结强度(或应力比)的增大而减小;同一剪应变下, $B$ 值随胶结强度的增大而减小, $B$ 值基本随应力比的增大而增大,应力比 $CSR \geq 0.7$ 时,破损参数在剪应变值较小时很快达到最大值。

(3) 在双轴压缩试验中,增大胶结强度或围压,都会使得试样剪胀现象显著,而相应的破损参数的最终取值却较小。由破损参数与剪应变的关系可知,同一围压条件下,破损参数随胶结强度的增大而减小,而同一胶结强度下,围压50 kPa时破损参数 $B$ 的取值高于围压100 kPa和200 kPa。

(4) 在等向压缩和等应力比压缩试样中,破损参数随体积应变或偏应变的演变规律容易用函数进行描述,而由于双轴压缩试验中数值试样先剪缩后剪胀,则不易用函数式描述。

(5) 文中建议的破损参数表达式(17),能够较好地反映岩土材料在等向压缩、等应力比压缩和双轴压缩条件下数值试样结构破损规律,该表达式仅包含一个参数,且与应力路径相关。而归一化的破损参数表达式(18),仅包含一个参数,且该参数与应力路径无关。

## 参 考 文 献

- [1] LEROUÉIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3): 467—488.
- [2] BURLAND J B, RAMPELLO S, GEORGIANNOU V N, et al. A laboratory study of the strength of four stiff clays[J]. *Géotechnique*, 1996, 46(3): 491—514.
- [3] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21世纪土力学的核心问题[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(1): 95—97.
- [4] JIANG M J, PENG L C, ZHU H H, et al. Macro- and micro- properties of two natural marine clays in China[J]. *China Ocean Engineering*, 2009, 23(2): 329—344.
- [5] DESAI C S, TOTH J. Disturbed state constitutive modelling based on stress-strain and nondestructive behavior[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1996, 33(11): 1619—1650.
- [6] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形-强度的关系[J]. *水利学报*, 1999, (10): 1—6.  
XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHU Yuan-lin. Soil structure parameter and its relations to deformation and strength[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, (10): 1—6.
- [7] ASAKA A, NAKANO M, NODA T. Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior[J]. *Soils and Foundations*, 2000, 40(2): 99—110.
- [8] NOVA R, CASTELLANZA R, TAMAGNINI C. A constitutive model for bonded geomaterials subject to mechanical and/or chemical degradation[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003, 27(9): 705—732.
- [9] BAUDET B, STALLEBRASS S. A constitutive model for structured clays[J]. *Géotechnique*, 2004, 54(4): 269—278.

- [10] YAN W M, LI X S. A model for natural soil with bonds[J]. **Géotechnique**, 2011, 61(2): 95—106.
- [11] NG T-T. Particle shape effect on macro and micro-behaviors of monodisperse ellipsoids[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2009, 33: 511—527.
- [12] 李建红. 基于细观破损机理的胶结结构性土本构模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [13] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Géotechnique**, 1979, 29(1): 47—65.
- [14] THORNTON C. Numerical simulation of deviatoric shear deformation of granular media[J]. **Géotechnique**, 2000, 50(1): 43—53.
- [15] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. **Computers and Geotechnics**, 2005, 32(5): 340—357.
- [16] 蒋明镜, 张伏光, 孙渝刚. 3 种胶结岩土材料本构模型中破损规律的离散元验证[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 805—813.
- JIANG Ming-jing, ZHANG Fu-guang, SUN Yu-gang. Numerical evaluation of degradation evolutions in three constitutive models for bonded geomaterials by distinct element method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(5): 805—813.
- [17] CHRISTOFFERSEN J, MEHRABADI M M, NEMAT-NASSER S. A micromechanical description of granular material behavior[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1981, 48(2): 339—344.
- [18] KRUYT N P, ROTHENBURG L. Micromechanical definition of the strain tensor for granular materials[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1996, 63(3): 706—711.
- [19] BAGI K. Stress and strain in granular assemblies[J]. **Mechanics of Materials**, 1996, 22(3): 165—177.
- [20] LI X, YU H S, LI X S. Macro-micro relations in granular mechanics[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2009, 46(25—26): 4331—4341.
- [21] 沈珠江. 岩土破损力学: 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.
- [22] JIANG M J, YU H S, LEROUEIL S. A simple and efficient approach to capturing bonding effect in natural sands by discrete element method[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2007, 69(6): 1158—1193.
- [23] JIANG M J, YAN H B, ZHU H H, et al. Modeling shear behaviour and strain localization in cemented sands by two-dimensional distinct element method analyses[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38, (1): 14—29.
- [24] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, 30(8): 723—761.
- [25] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(7): 579—597.
- [26] 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.
- [27] 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, (3): 247—255.
- SHEN Zhu-jiang. A nonlinear damage model for structured clay[J]. **Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute**, 1993, (3): 247—255.