

DOI: 10.11779/CJGE2016S2001

# 考虑胶结强度正态分布下砂土力学特性离散元模拟

蒋明镜<sup>1, 2, 3</sup>, 廖优斌<sup>1, 3</sup>, 刘蔚<sup>2, 3</sup>, 谭亚飞鸥<sup>1, 3</sup>

(1. 上海理工大学土木工程系, 上海 200093; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 自密实混凝土在重力坝施工过程中受施工工艺、施工质量及施工环境等因素的影响, 砂土颗粒间的胶结强度可能各不相同。为研究不同胶结强度的胶结砂土的力学特性, 借助 PFC<sup>3D</sup>自带的微观胶结模型, 将胶结砂土中的胶结强度的分布定义为正态分布, 并系统地分析了在不同方差和胶结含量下胶结砂土的力学特性。研究表明, 胶结试样在数值试验中表现出应力应变软化特性及体变剪胀性, 且随着胶结含量的增大, 软化及剪胀程度提高; 当偏应力达到峰值时, 随着轴向应变的增大, 体变由剪缩变化为剪胀。在假定的胶结砂样的胶结强度服从正态分布的情况下, 峰值应力随着胶结含量成线性增大, 但正态分布方差的变化对胶结砂样强度的影响不大。

**关键词:** 胶结砂土; 离散单元法; 胶结强度; 力学特性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0001-06

**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微观试验、本构模型和数值分析研究。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn。

## DEM simulation of mechanical behaviour of cemented sand under normal distribution of cementation strength

JIANG Ming-jing<sup>1, 2, 3</sup>, LIAO You-bin<sup>1, 3</sup>, LIU Wei<sup>2, 3</sup>, TAN Ya-fei-ou<sup>1, 3</sup>

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Key

Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Dept of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Influenced by construction technology, quality and environment in the construction process of rock-fill concrete gravity dam, natural cementation sands may have different cementation strengths between the sand particles. By using the microscopic model BPM of PFC<sup>3D</sup>, the distribution of the bond strength in cemented sand is defined as the normal distribution to study the mechanical properties of cemented soil with different bond strengths. The mechanical properties of cemented sands under different contents and variances are analyzed. The results show the strain softening and shear dilatation characteristics. And with the increase of cement contents, softening and dilatancy increase. When the deviatoric stress reaches the peak value, with the increase of the axial strain, the change of the volume is reduced by the shear contraction. The volumetric strain is changed from the shear shrinkage to dilatancy. With the assumption that the cementing of sample under the normal distribution cementation strength, the peak stress linearly grows with cement content, but change of the normal distribution variances has a little influence on the cementation of strength.

**Key words:** cemented sand; distinct element method; cementation strength; mechanical behaviour

## 0 引言

随着西南地区加大基础设施建设的投入, 堆石混凝土重力坝技术 (rock-fill concrete, RFC Dam) 以其施工速度快、质量有保证、强度高、耐久性好以及造价相对较低的特点在大体积混凝土坝体工程中有广阔的应用前景。在此项技术中, 自密实混凝土利用新型高效减水剂的作用在不需要振捣的情况下就可以达到自密实的效果, 同时保证有足够的黏性以防止材料分离, 其高强、耐久的特性已经得到广泛的证实<sup>[1]</sup>。由

此可见, 胶结在岩土坝体材料中扮演了重要的角色; 胶结除了上述作用外, 在岩土工程的其它领域也有广泛的应用, 比如人工结构性砂土中颗粒之间的水泥<sup>[2]</sup>、砂岩灰岩裂缝中填充的胶结物质<sup>[3]</sup>以及深海能源土中赋存于颗粒接触点周围的水合物<sup>[4]</sup>等。胶结的存在使得胶结材料的力学特性不同于无胶结砂土, 如低围压

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (51025932)

收稿日期: 2016-05-19

下脆性破坏高围压下延性破坏等<sup>[5]</sup>。因此, 对其力学特性的研究也吸引了国内外越来越多的岩土工作者。沈珠江也指出土的结构性研究是 21 世纪土力学的重要研究课题<sup>[6]</sup>。Cuccovillo 等<sup>[7-8]</sup>对两种天然结构性砂土在小应变和大应变下的力学特性进行试验研究, 并分别探讨了“胶结”和“组构”对结构性砂土力学特性的影响。考虑到取样扰动等因素对天然胶结砂土的影响, 许多研究者通过制备人工胶结砂土来研究结构性砂土的力学特性。Ismail 等<sup>[9]</sup>通过三轴压缩试验研究了不同胶结物对胶结砂土力学特性的影响, Rotta 等<sup>[10]</sup>对不同胶结强度的人工胶结砂土等向压缩特性进行试验研究, 指出胶结物含量对胶结砂土的压缩特性影响显著。

随着计算机技术的快速发展, 数值模拟以其成本低可重复的优点被广泛采用。离散单元法作为连接材料宏观有效的方法, 它能通过捕捉数值模拟中颗粒和胶结的微观信息来揭示宏观破坏的微观机制, 并且能研究非连续的大变形问题。蒋明镜等<sup>[11]</sup>利用离散单元法, 通过对不同胶结强度和不同围压下胶结砂土的平面应变双轴压缩试验, 分析了理想胶结砂土的宏观力学特性及其剪切带的形成规律。发现胶结含量的变化对胶结砂土的力学特性有重要影响。但是以上研究中, 砂土颗粒间胶结物的强度相同, 而实际工程中的胶结砂土由于施工工艺、施工质量以及施工环境等因素的影响, 颗粒间的胶结物强度存在明显差异。

为了更加深入地探究堆石混凝土重力坝中胶结砂土的力学特性, 本文尝试将 PFC<sup>3D</sup>自带的微观胶结模型 (BPM) 模型用于胶结砂土的力学特性研究。开展了不同胶结含量的胶结试样在胶结强度服从正态分布下不同方差的三轴压缩试验模拟。通过分析试验结果, 分析了胶结强度服从正态分布时, 分布方差以及胶结含量对胶结试样力学特性的影响。

## 1 BPM 胶结接触力学模型

本文所采用的微观模型是 PFC3D 颗粒流商业软件自带的微观胶结模型 BPM (bond particle model), 模型的有效性验证可以参考 PFC3.10 软件说明, 以下作简要介绍:

图 1 (a) 为胶结模型的法向力学响应, 胶结模型的法向力学响应通过法向位移  $u_n$  (法向重叠量) 和法向接触力  $F_n$  来描述, 表现为弹脆性特征。法向压力  $F_n$  随着法向位移的增加线性增大; 胶结破坏前, 法向拉力  $F_n$  随着法向位移  $u_n$  的增加而线性增加, 胶结破坏后, 法向拉力  $F_n$  瞬间跌落为 0。

图 1 (b) 为胶结模型的切向力学响应, 模型的切

向力学响应通过切向位移  $u_s$  和接触力  $F_s$  来描述。胶结破坏前, 剪切力  $F_s$  随着切向位移  $u_s$  的增加而线性增加, 胶结破坏后, 切向力突然跌落至恒定值, 该恒定值由法向力和颗粒摩擦所决定。

图 1 (c) 为胶结模型的转动向力学响应。胶结破坏前, 扭矩  $M$  与相对转角  $\theta$  呈线性关系, 胶结破坏后, 模型的扭矩跌落至 0。

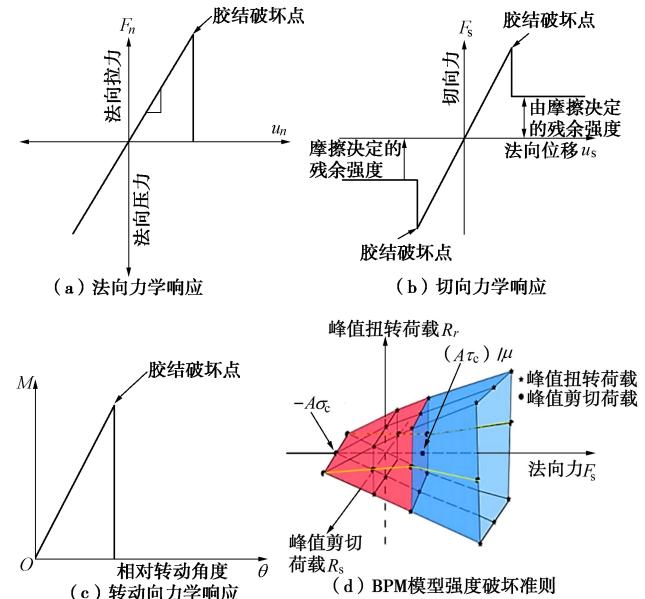


图 1 BPM 模型的力学响应及强度破坏准则

Fig. 1 Mechanical responses of BPM contact model and its strength failure criterion

图 1 (d) 为 BPM 胶结模型在三维力空间中 (剪切力-法向力-扭矩) 的峰值强度包线。其三维强度包线呈现出底面开口的四面体形状, 随着法向力的增加, 上下两侧的面线性扩张, 而前后面首先保持不变, 然后线性扩张。

## 2 三轴压缩试验数值建模

### 2.1 胶结试样微观参数

砂土试样尺寸为 779 mm × 779 mm × 785 mm, 如图 2 (a); 由 20 种直径共 45000 个颗粒组成, 试样级配如图示 2 (b)。最大粒径为 23.5 mm, 最小粒径为 6 mm, 平均粒径为 11.9 mm, 不均匀系数为 1.39。砂颗粒的法向和切向接触刚度分别为  $1.5 \times 10^6$  N/m 和  $1.0 \times 10^6$  N/m, 密度为  $2650 \text{ kg/m}^3$ , 详见表 1。为减小可能存在的边界效应, 设定墙面无摩擦。

试样制备分为 3 个步骤: ①采用蒋明镜等提出的分层次压法<sup>[12]</sup>生成均匀试样, 得到孔隙比为 0.8 的无胶结松样; ②在 12.5 kPa 的垂直压力下侧限固结, 使得颗粒充分接触; ③所有颗粒接触点形成胶结, 胶结特性由商业软件 PFC<sup>3D</sup>自带 BPM 接触模型控制。

表 1 离散元试样的参数

Table 1 Parameters for sample in DEM simulations

| 参数名称                          | 数值                |
|-------------------------------|-------------------|
| 颗粒总数                          | 45000             |
| 试样孔隙比                         | 0.8               |
| 颗粒干密度/(kg·m <sup>-3</sup> )   | 2650              |
| 颗粒法向接触刚度/(N·m <sup>-1</sup> ) | $1.5 \times 10^6$ |
| 颗粒切向接触刚度/(N·m <sup>-1</sup> ) | $1.0 \times 10^6$ |
| 颗粒间摩擦系数                       | 0.5               |

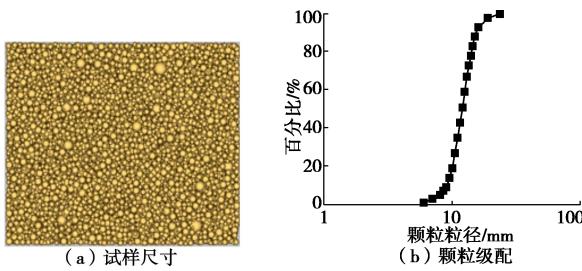


图 2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Sizes of sample and distribution of grain sizes

## 2.2 数值模拟工况

试样制备完成后, 在不同围压下进行三轴压缩试验, 压缩时控制侧向压力保持不变, 为保证准静态过程设定加载速率为轴向应变 5%/min, 颗粒间摩擦系数设为 0.5。胶结抗拉、抗剪强度均服从正态分布, 其均值为  $\mu=0.5 \times 10^6$ 。根据 BPM 模型可知, 胶结接触刚度  $k^{(pb)}$  与颗粒接触刚度  $k$  之间的关系如式 (1) 所示, 式中  $d$  为平均粒径,  $d=0.0119$  m, 通过换算得到不同胶结含量下的胶结接触刚度, 具体数值如表 2 所示。

$$k^{(pb)} = \frac{0.5k}{\pi(pb\_rad \times d)^2} \quad (1)$$

表 2 不同胶结含量下胶结接触刚度

Table 2 Cementation contact stiffness under different contents of cement

| 胶结含量 | 胶结半径    | 颗粒法向接触刚度          | 颗粒切向接触刚度          | 胶结法向接触刚度                | 胶结切向接触刚度              |
|------|---------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|
| 0    | 0       | $1.5 \times 10^6$ | $1.0 \times 10^6$ | 无                       | 无                     |
| 1.0% | 0.2969  | $1.5 \times 10^6$ | $1.0 \times 10^6$ | $1.9125 \times 10^{10}$ | $1.28 \times 10^{10}$ |
| 2.0% | 0.3526  | $1.5 \times 10^6$ | $1.0 \times 10^6$ | $1.356 \times 10^{10}$  | $9.04 \times 10^9$    |
| 3.0% | 0.38974 | $1.5 \times 10^6$ | $1.0 \times 10^6$ | $1.110 \times 10^{10}$  | $7.40 \times 10^9$    |

本文主要研究胶结含量和胶结分布方差对试验模拟结果的影响, 因此分别选取围压为 80 kPa 下, 3 种不同胶结含量 (cc% = 1.0%, 2.0%, 3.0%) 以及 3 种不同的方差 ( $\sigma^2 = 0.02\mu, 0.03\mu, 0.04\mu$ ) 进行了三轴压缩离散元模拟试验, 如表 3 所示。为了进一步研究胶结含量和胶结强度分布方差对峰值强度包线的影响, 增算 (50, 100 kPa) 两种共 18 种工况, 三种围压下总共 27 种工况。

表 3 数值模拟方案

Table 3 Numerical simulation schemes

(kPa)

| 围压/kPa | cc=1%                | cc=2%                | cc=3%                |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 80     | $\sigma^2 = 0.02\mu$ | $\sigma^2 = 0.02\mu$ | $\sigma^2 = 0.02\mu$ |
| 80     | $\sigma^2 = 0.03\mu$ | $\sigma^2 = 0.03\mu$ | $\sigma^2 = 0.03\mu$ |
| 80     | $\sigma^2 = 0.04\mu$ | $\sigma^2 = 0.04\mu$ | $\sigma^2 = 0.04\mu$ |

## 3 三轴压缩模拟结果

### 3.1 胶结含量和分布方差对硬化软化性的影响

在围压  $\sigma_3 = 80$  kPa 时, 胶结强度分布的不同方差 ( $\sigma^2 = 0.02\mu, 0.03\mu, 0.04\mu$ ) 试样和不同胶结含量 (cc% = 1.0%, 2.0%, 3.0%) 下三轴压缩试验一共 9 组, 其宏观力学响应如图 3 (a) 所示。由图 3 (a) 可知, 相同围压下不同胶结含量以及不同方差条件下胶结试样的应力应变曲线均呈现出软化现象, 且不同方差下的应力应变曲线变化不大。但无论对于哪一种条件, 应力应变曲线都可以被分为 3 个阶段: ①线弹性阶段。应力随着应变线性增加, 直到达到峰值应力。②应力跌落阶段: 当应力达到峰值后迅速跌落, 其速率略大于应力增加时的速率, 直到应力跌落至残余应力。③残余阶段: 随着应变的增大, 应力围绕残余应力线性波动, 变化不大。

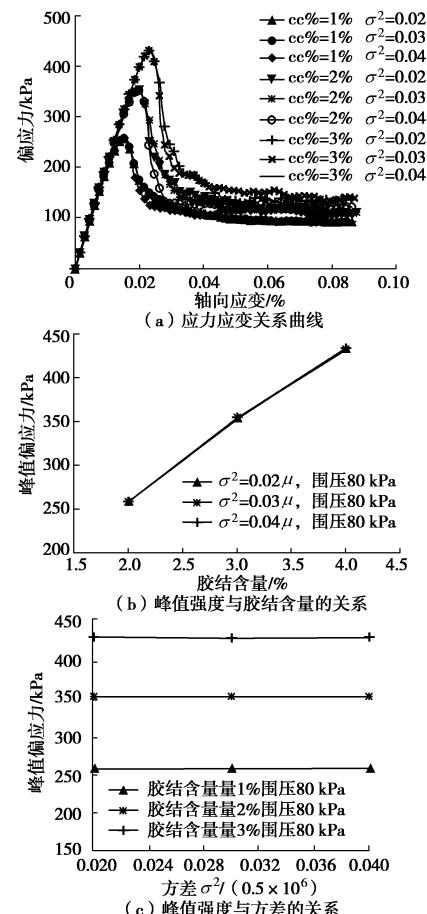


图 3 胶结含量和分布方差对偏应力的影响

Fig. 3 Influence of cement content and distribution variance on deviatoric stress

图 3 为胶结试样的峰值强度与方差、胶结含量以及围压的关系。从图 3 (b) 可以看出, 当方差和围压一定时, 峰值偏应力随着胶结含量的增加几乎呈线性增加, 且不同方差不同围压情况下, 线性增加的斜率几乎相等。由图 3 (c) 可以看出, 当胶结含量和围压相同时, 随着方差的变化, 峰值偏应力的变化非常小, 即方差对峰值偏应力的影响非常小。这一特征在图 3 (a) 中也可以明显看出。

### 3.2 胶结含量和分布方差对剪胀剪缩性的影响

图 4 为不同胶结含量不同方差下模型试样的体应变关系曲线。当胶结含量 1% 时, 模型数值试样只发生剪缩, 后期剪缩程度弱化; 胶结含量 2% 和 3% 时, 试样在压缩试验过程中都发生体积先剪缩后剪胀, 表现出明显的剪胀性。从图 4 (a)、(b)、(c) 纵向对比, 胶结含量逐步增大, 试样剪胀性越明显, 且其最大剪缩体变绝对值与胶结含量几乎呈线性增加, 如图 4 (d) 所示, 这与胶结含量对峰值强度的影响相似。

在相同围压和胶结含量的条件下, 在剪缩全过程与剪胀的前期, 体应变曲线在不同方差时出现大幅度的重合, 说明在此阶段胶结强度的分布方差对体应变几乎没有影响。但是在剪胀后期及残余阶段, 不同方差的体应变曲线出现一定偏差。具体地说, 胶结含量 1% 时, 方差对体变影响较小, 胶结含量 2% 时, 方差对体变的影响更加明显, 胶结含量 3% 时, 方差对体变的影响作用有所削弱。总体而言, 偏离幅度也很小, 说明方差在此阶段对体变的影响也较小。

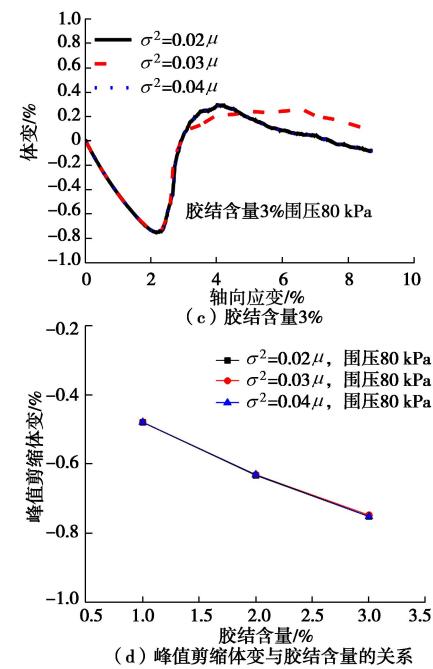
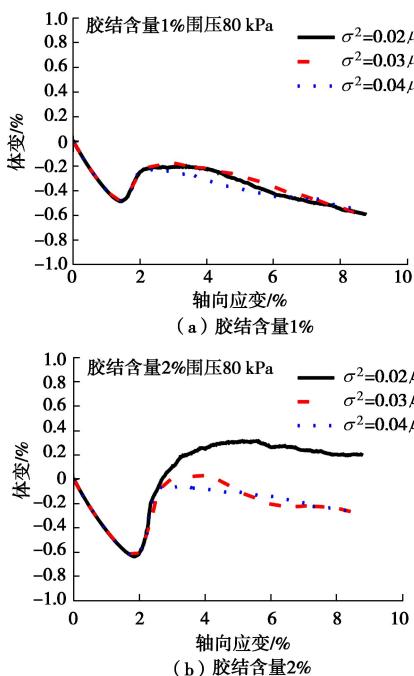


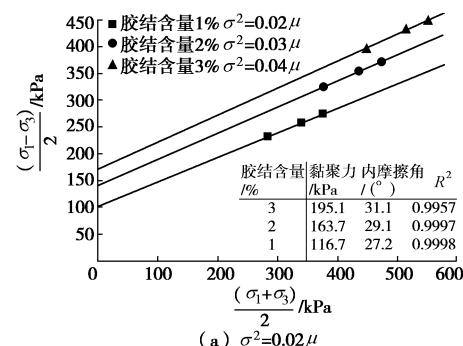
图 4 胶结含量和分布方差对体变的影响

Fig. 4 Influence of cement content and distribution variance on volumetric strain

### 3.3 胶结含量和分布方差对峰值强度包线的影响

通过 (50, 80, 100 kPa) 3 种围压, 由此可以绘制  $p - q$  曲线, 可以进一步研究胶结含量和胶结强度分布方差对峰值强度包线的影响, 具体表现可以转化为对黏聚力和内摩擦角的影响。

图 5 为不同方差不同胶结含量胶结试样的峰值强度包线。从得出的黏聚力与内摩擦角可以看出, 同一胶结含量的条件下, 黏聚力随着方差逐步减小, 内摩擦角随着方差逐步增大, 但变化的幅度都很小, 说明方差对胶结试样的强度影响有限。而在同一方差的情况下, 随着胶结含量的增加, 黏聚力和内摩擦角均增大, 但增大的幅度逐渐变小, 如图 5 (d) 所示。说明当胶结含量较小时, 其变化对试样的强度影响较大, 而当其增大到一定程度时, 其变化对试样强度的影响较小。



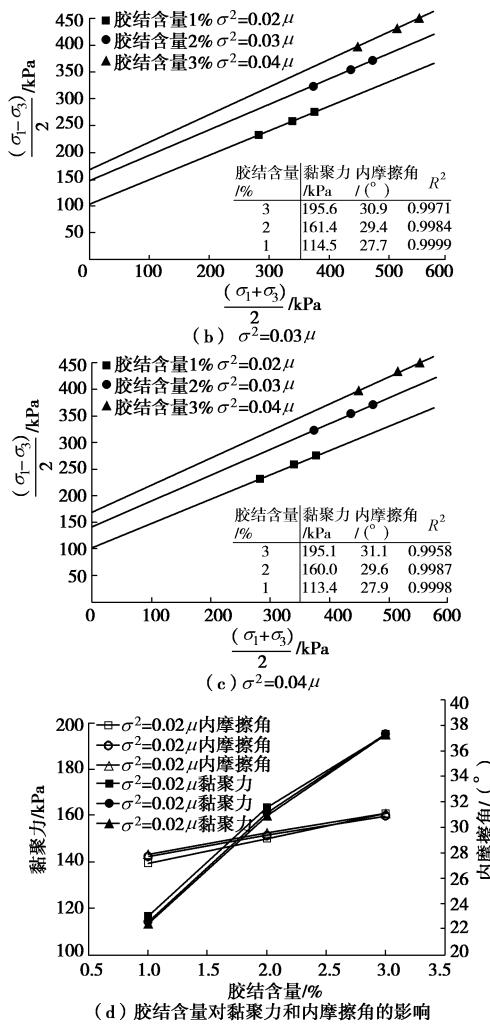


图 5 胶结含量和分布方差对峰值强度包络线的影响

Fig. 5 Influence of cement content and distribution variance on peak strength envelops

### 3.4 胶结含量和分布方差对残余强度包线的影响

图 6 为不同胶结含量下不同方差的胶结试样的残余强度包线。从图 6 (a)、(b)、(c) 拟合的直线都过原点中可以看出, 当胶结完全破坏时, 胶结试样成为无胶结试样, 黏聚力变为零。

对比不同胶结含量下的残余内摩擦角可以发现, 随着胶结含量增大, 残余内摩擦角略微增大, 如图 6 (d) 所示; 对比不同方差下的残余内摩擦角可以发现, 随着方差的增大, 内摩擦角围绕某个值波动, 变化很小。说明当胶结破坏之后, 胶结含量与胶结强度的分布对残余强度的影响不大。

从以上数值分析表明, 胶结分布方差对峰值应力、体变和强度影响都较小。原因可能是, 在该计算模式下, 使用该 BPM 模型且未形成剪切带时, 胶结在微观上的不均匀性一定程度上表现出宏观的均匀性。

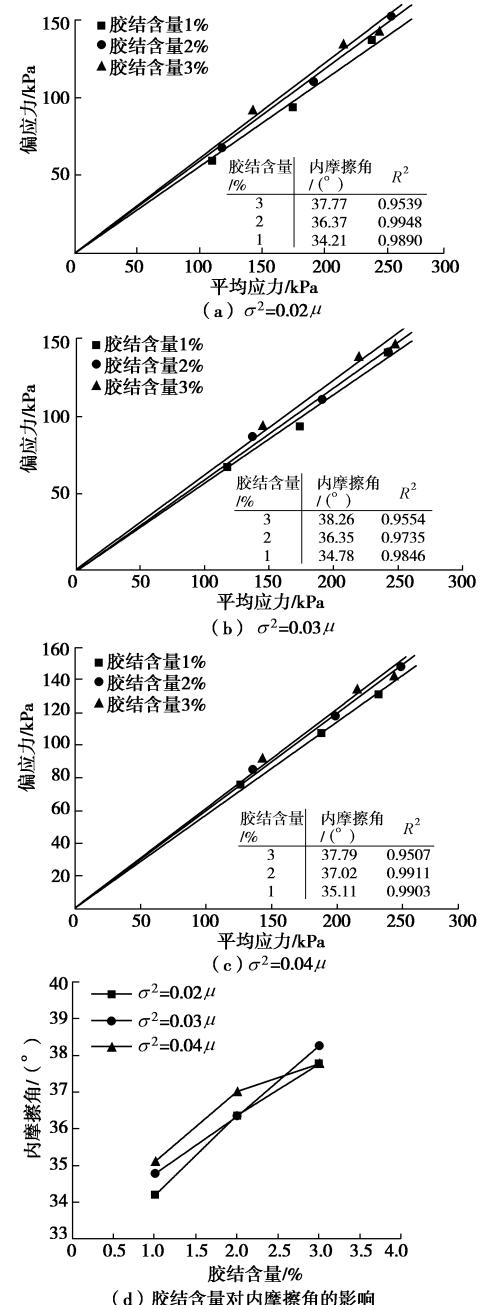


图 6 胶结含量和分布方差对残余强度包络线的影响

Fig. 6 Influence of cement content and distribution variance on residual strength envelops

## 4 结论与建议

本文基于离散元商业软件 PFC<sup>3D</sup>自带 BPM 模型, 选取了一系列的微观参数, 并假设胶结砂样的胶结强度 (包括胶结抗拉和抗剪强度) 服从正态分布, 对不同方差和不同胶结含量的胶结砂样进行了不同围压下三轴压缩单元试验模拟, 得出以下结论:

(1) 胶结试样在试验过程中表现出应力应变软化及体变剪胀性, 且随着胶结含量的增大, 软化及剪胀程度提高; 当偏应力达到峰值时, 随着轴向应变的

增大, 体变由剪缩变化为剪胀。

(2) 胶结含量越高, 峰值偏应力基本线性增长, 方差对峰值应力影响很小; 胶结含量越大, 体变越大; 但方差对体变影响能力有限。

(3) 在假定胶结砂样的胶结强度服从正态分布的情况下, 胶结破坏时, 黏聚力变为零, 随着方差的增大, 内摩擦角围绕某个值波动, 变化很小; 胶结破坏后, 胶结含量的变化和正态分布方差的变化对胶结砂样峰值强度、残余强度的影响都较小。

### 参考文献:

- [1] 黄棉松, 周虎, 安雪晖, 等. 堆石混凝土综合性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(2): 206 - 211. (HUANG Mian-song, ZHOU Hu, AN Xue-hui, et al. A pilot study on integrated properties of rock-filled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(2): 206 - 211. (in Chinese))
- [2] 刘恩龙, 沈珠江. 人工制备结构性土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 679 - 683. (LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Experimental study on mechanical properties of artificially structured soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 679 - 683. (in Chinese))
- [3] 蒋明镜, 白闰平, 刘静德, 等. 岩石微观颗粒接触特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1121 - 1128. (JIANG Ming-jing, BAI Run-ping, LIU Jing-de, et al. Experimental study of inter-granular particles bonding behaviors for rock microstructure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1121 - 1128. (in Chinese))
- [4] HYODO M, NAKATA Y, YOSHIMOTO N, et al. Basic research on the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture[J]. Soils and Foundations, 2005, 45(1): 75 - 85.
- [5] 蒋明镜, 孙渝刚, 李立青. 复杂应力下两种胶结颗粒微观力学模型的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 354 - 360. (JIANG Ming-jing, SUN Yu-gang, LI Li-qing. Experimental study on micro-mechanical model for two different bonded granules under complex stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 33(3): 354 - 360. (in Chinese))
- [6] 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. (SHEN Zhu-jiang. The mathematical model of soil structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 1996, 18(1): 95 - 97. (in Chinese))
- [7] CUCCOVILLO T, COOP M R. Yielding and pre-failure deformation of structured sands[J]. Géotechnique, 1997, 47(3): 491 - 508.
- [8] CUCCOVILLO T, COOP M R. On the mechanics of structured sands[J]. Géotechnique, 1999, 49(6): 741 - 760.
- [9] ISMAIL M A, JOER H A, SIM W H, et al. Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil[J]. International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(6): 520 - 529
- [10] ROTTA G V, CONSOLI N C, PRIETTO P D M, et al. Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress[J]. Géotechnique, 2003, 53(5): 493 - 501.
- [11] 蒋明镜, 张望城, 孙渝刚, 等. 理想胶结砂土力学特性及剪切带形成的离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 12(34): 2162 - 2169. (JIANG Ming-jing, ZHANG Wang-cheng, SUN Yu-gang, et al. Mechanical behavior and shear band formation in idealized cemented sands by DEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 12(34): 2162 - 2169. (in Chinese))
- [12] 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.

(责任编辑 黄贤沙)