

DOI: 10.11779/CJGE2018S2003

# 不同胶结半径的粒间胶结拉伸和压缩试验研究

蒋明镜<sup>1, 2, 3</sup>, 李晨辉<sup>1, 2, 3</sup>, 刘蔚<sup>1, 2, 3</sup>, 张安<sup>1, 2, 3</sup>, 张学文<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 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. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 为在三维离散元模型中建立考虑胶结半径的胶结破坏准则, 在已有 10 mm 胶结半径的三维铝球胶结试验的基础上, 继续对胶结半径为 8, 12, 14 mm 的胶结铝球进行拉伸和压缩试验。结合 10 mm 胶结半径的试验数据, 总结出不同胶结半径的胶结铝球拉伸与压缩的强度规律。试验结果表明: 高铝水泥试样的拉伸强度与压缩强度随着胶结半径的增大而非线性增大; 位移曲线在拉伸荷载下表现为脆性破坏, 在压缩荷载下表现脆塑性和塑性破坏, 并且压缩荷载下发生脆塑性破坏的概率随着胶结半径的减小而增大。

**关键词:** 胶结颗粒; 三维接触试验; 胶结强度; 胶结半径

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S2-0012-05

**作者简介:** 蒋明镜(1965-)男, 博士, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 主要从事太空土、深海能源土、天然结构性黏土、砂土、非饱和土的宏微观试验、本构模型和数值分析研究。E-mail:mingjing.jiang@tongji.edu.cn。

## Extension and compression tests mechanical behaviors of bonded granules with different bond widths

JIANG Ming-jing<sup>1, 2, 3</sup>, LI Chen-hui<sup>1, 2, 3</sup>, LIU Wei<sup>1, 2, 3</sup>, ZHANG An<sup>1, 2, 3</sup>, ZHANG Xue-wen<sup>1, 2, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to establish a new bond failure criterion considering different bonded widths to be used in three-dimensional distinct element modelling, another three kinds of bond widths (i.e., 8, 12 and 14 mm) between granules are investigated based on the previous work. Then, a series of extension and compression tests are carried out on cemented aluminum balls with three different bond widths, from which the bond failure criteria are obtained considering different bonded widths under tension and compression. The test results show that the tensile and compressive strengths both increase non-linearly with the bond width. The curves of the relationship between the tension and normal displacement exhibit elastic brittle failure. However, those between the compression and normal displacement are influenced by the bond width. The curves more probably show plastic failure if the bond width is larger, while those of the specimens with smaller bond width more probably show brittle-plastic failure.

**Key words:** bonded granule; 3D contact experiment; bond strength; bond width

## 0 引言

天然砂土由于沉积环境和应力历史的作用, 通常表现出结构性。结构性是组构和胶结的统一, 而胶结对宏观力学特性的作用近年来得到岩土工作者们的广泛关注。Cuccovillo 等<sup>[1]</sup>、Coop 等<sup>[2]</sup>根据胶结程度确定了强胶结砂土和弱胶结砂土的力学特性。Huang 等<sup>[3]</sup>通过等向压缩和常规三轴压缩试验对不同初始干密度和不同胶结含量的人工结构性砂土进行了研究, 发现屈服前胶结作用对压缩力学特性影响显著。

计算机的快速发展, 使得数值模拟成为目前研究

土体的重要方法, 很多学者试图建立土体宏观特性与微观特性之间的关系。离散单元法由于在模拟大变形问题以及在研究微观特性方面具有的优势, 近年来被越来越多的学者所采用。Cundall 等<sup>[4]</sup>首次提出了离散单元法, 并将其用于模拟净砂的宏观力学特性。Potyondy 等<sup>[5]</sup>、Obermayr 等<sup>[6]</sup>和 Jiang 等<sup>[7]</sup>将建立的胶

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579178); 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题(SLDRCE14-A-04); 国家重点基础研究发展计划("973")项目(2014CB046901)

收稿日期: 2018-07-22

结接触模型导入离散元中, 取得比较好的效果。

为得到天然结构性砂土的微观接触特性, 大量学者进行了室内的微观胶结接触试验。Delenn 等<sup>[8]</sup>利用环氧树脂胶结的铝棒进行二维的胶结砂土室内试验, 研究了在简单加载试验下的胶结特性。Muller 等<sup>[9]</sup>利用实验室成粒装置在球形颗粒间添加液体胶结剂使之形成四面体颗粒团簇, 通过压缩试验研究了四面体团簇的压缩破坏特性。蒋明镜等<sup>[10-12]</sup>利用自主设计的胶结颗粒成型装置和试验加载装置, 对不同胶结宽度和不同胶结厚度的铝棒进行一系列力学试验, 随后将试验实测结果引入离散元胶结接触模型, 探究了由二维平面应变情况下粒间接触力学测试实测结果抽象而来的接触模型的合理性。蒋明镜等<sup>[13]</sup>在前人研究的基础上, 设计了一套用于三维情况下半球形理想颗粒胶结成型及辅助加载装置, 用于进行三维胶结半球形颗粒的胶结力学特性试验。

本文利用蒋明镜等<sup>[13]</sup>设计的辅助加载装置以及胶结成型装置, 对不同胶结半径的高铝水泥胶结铝球进行拉伸和压缩试验, 研究颗粒间的胶结接触力学效应, 以促进离散元微观接触模型的研究。

## 1 试验设计

### 1.1 试验装置

本文主要的加载装置为同济大学岩石双轴流变仪, 此装置能够提供水平向和竖直向的压缩荷载, 通过位移控制或者力控制的方法施加。图 1 为蒋明镜等<sup>[13]</sup>设计的辅助加载装置以测试胶结物的力学特性。

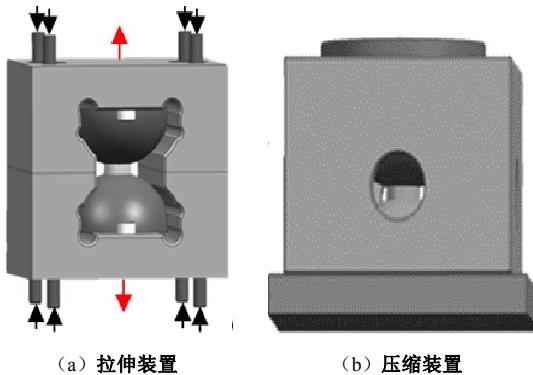


图 1 辅助加载装置

Fig. 1 Auxiliary loading devices

图 2 为蒋明镜等<sup>[13]</sup>设计的胶结成型装置, 包括压板模块、成型模块以及承台模块。制备过程中通过压板模块的挤压、定型作用, 获得特定几何尺寸的胶结物。

### 1.2 试样制备

首先, 用丙酮擦拭清洗铝半球, 组装好成型模块, 在胶结成型处涂抹凡士林。之后, 将环氧树脂 AB 胶

涂抹于水泥与铝球的接触面处以提高接触面强度, 将铝球放置于凹槽。最后, 快速在胶结形成孔中填注适量的流动性的高铝水泥, 养护后对成型的试样进行标号。

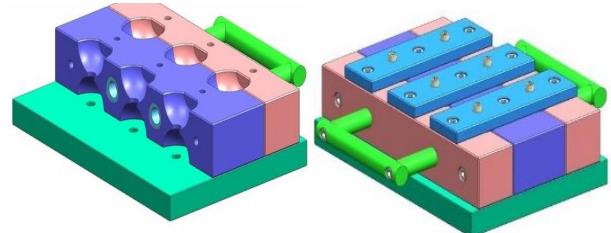


图 2 胶结试样成型装置

Fig. 2 Devices for preparation of bonded specimens

### 1.3 试验设计

对厚度为 2 mm 胶结半径为 8, 12, 14 mm 的试样养护 28 d 后, 进行拉伸和压缩试验。每个工况进行 6 组平行试验。

## 2 试验结果分析

### 2.1 拉伸结果分析

图 3 为不同胶结半径  $D_b$  的高铝水泥试样典型的拉伸破坏形态。从图 3 可以看出, 胶结试样从胶结物中间断开, 表现出内部脆性破坏的特征。



图 3 高铝水泥试样拉伸破坏形态

Fig. 3 Failure forms of cement bond with different bond widths in extension tests

图 4 为不同胶结半径的高铝水泥试样的拉伸荷载与位移变化关系图。从图 4 可以看出, 拉伸荷载 - 位移关系曲线可以分为两个阶段: ①线性变化阶段, 该阶段内铝球间的胶结物所受的拉伸荷载逐渐增大, 位移也随之逐渐增大, 其拉伸荷载 - 位移曲线表现为线性增加; ②脆性破坏阶段, 随着拉伸荷载逐渐增大并达到胶结物所能承受的峰值拉伸荷载, 拉伸荷载也急剧减少为 0, 荷载 - 位移曲线表现为弹脆性。

二维接触铝棒试验结果<sup>[15]</sup>和三维离散元模拟结果<sup>[16]</sup>均表明, 拉伸强度随着胶结物宽度  $D_b$  和胶结物厚度  $H_b$  的变化关系可用胶结物的宽高比 ( $D_b / H_b$ ) 以及颗粒的宽度与胶结物宽度比 ( $D_s / D_b$ ) 来描述。于是, 引入一尺寸因子  $\chi_t$  表征胶结物形状对核心受拉

面积的影响, 定义

$$A_t = \pi \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 \cdot \chi_t = \pi \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 \cdot \alpha \cdot \left( \frac{D_s}{D_b} \right)^\beta \cdot e^{\gamma(H_b/D_b)}, \quad (1)$$

式中,  $A_t$  为核心受拉面积,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  均为拟合参数,  $D_s$  和  $D_b$  分别为颗粒和胶结物的直径,  $H_b$  为胶结物的最小厚度。本试验中,  $D_s=40$  mm,  $H_b=2$  mm。于是, 胶结物的微观拉伸强度  $R_{nt}$  与胶结物直径  $D_b$  之间的关系可表示为如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} R_{nt} &= \sigma_t \cdot A_t = \sigma_t \cdot \pi \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 \cdot \alpha \left( \frac{40}{D_b} \right)^\beta \cdot e^{\gamma(2/D_b)}, \\ A_t &= R_{nt} / \sigma_t, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_t$  为室内试验得到的水泥胶结材料的宏观拉伸强度, 此处为 9 MPa。由公式 (2) 即可由拉伸试验结果得到不同胶结半径对应的核心受拉面积。

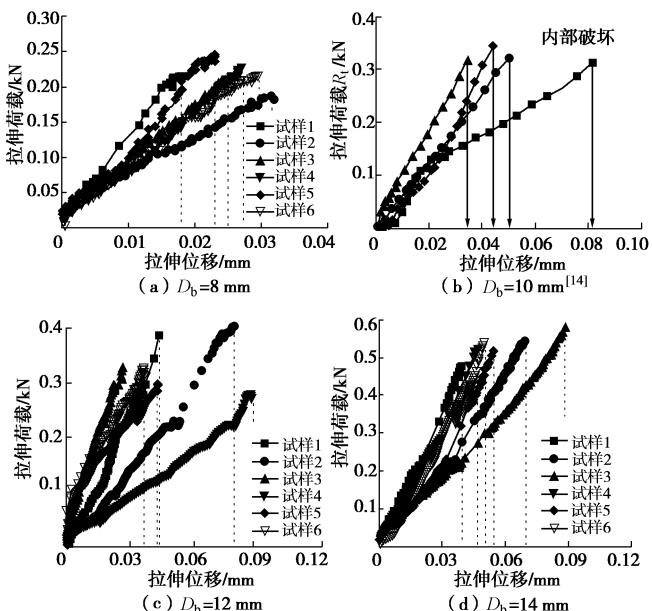


图 4 拉伸试验结果

Fig. 4 Results of extension tests

用公式 (1) 进行拟合, 可得到核心受拉面积  $A_t$  与胶结物直径  $D_b$  的关系, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 胶结物核心受拉面积随着胶结直径的增大非线性增大, 公式 (1) 能很好地反映二者之间的变化关系。得到的拟合参数  $\alpha$  为 0.72741,  $\beta$  为 -3.427,  $\gamma$  为 20.58307。于是得到了胶结物微观拉伸强度  $R_{nt}$  与胶结直径  $D_b$  的计算关系式如下:

$$R_{nt} = \sigma_t \cdot \pi \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 0.727 \left( \frac{D_s}{D_b} \right)^{-3.427} \cdot e^{20.58(H_b/D_b)} \quad (3)$$

## 2.2 压缩结果分析

图 6 为  $D_b=12$  mm 高铝水泥胶结试样压缩试验破坏形态图。从图 7 (a) 和 (b) 均可以看出, 当内部和外部的胶结物在极短的时间内绝大部分都被压碎而无法承担荷载, 整个受力系统崩坏, 试验结束, 此种

破坏模式的胶结破坏形态如图 7 (b) 所示, 本文将这种破坏模式称作脆塑性破坏形态。当胶结物只是外部发生破坏而剥落, 核心受压区的胶结物被压得异常密实, 最内层的胶结物未发生破坏, 此时胶结物还能传递荷载但不能发生变形位移, 铝球颗粒将发生位移变形, 整个受力系统不会崩坏, 此种破坏模式胶结的破坏形态如图 7 (a) 所示, 本文将其称为塑性破坏形态。

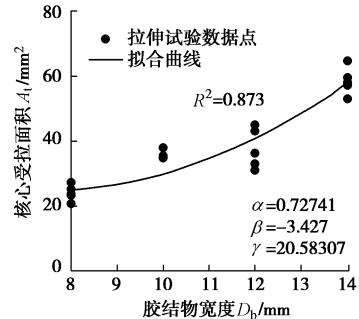


图 5 核心受拉面积与胶结宽度关系图

Fig. 5 Curves of relationship between assumed stress concentration area and bond width



(a) (b)

图 6 高铝水泥胶结试样压缩破坏形态

Fig. 6 Failure forms of cement bond in compression tests

图 7 为不同胶结半径的高铝水泥试样的压缩荷载与压缩位移图。从图中可以看出, 压缩荷载位移曲线存在以下 4 个明显的阶段: ①线性加载阶段。当压缩荷载为 0 至 100 N 时, 荷载随位移非线性增大, 这是由于试验设备与辅助装置各个地方接触不均匀导致两个传感器测得的法向位移偏差较大; 随着压缩荷载的增大, 试验设备与辅助加载装置逐渐接触均匀, 整个接触面上各点的法向位移大致相等, 此时压缩荷载随着法向位移线性增大直至峰值。②塑性软化阶段。压缩荷载达到峰值后, 胶结物外部出现明显的竖向裂纹, 并且逐渐被挤出, 压缩荷载迅速跌落。③残余阶段。压缩荷载跌落至某一值后随着位移的增加变化不大。胶结物碎渣不断被挤出, 核心受压区胶结物不断压密。④颗粒变形阶段。随着外部胶结物碎渣的不断挤出, 两铝球颗粒通过核心受压区的密实胶结物再次接触, 压缩荷载随位移线性增大。

每种胶结半径压缩试验都有脆塑性破坏和塑性破坏两种模式发生, 但可以看出, 胶结半径越小, 发

生脆塑性破坏的频率越大。这是由于胶结半径较小时, 随着外部胶结物质的不断破坏挤出, 核心受压区的胶结物不足以承受当前荷载, 因而受力系统崩坏; 而当胶结半径较大时, 尽管外部胶结物质也会破坏挤出, 但是核心受压区域依然有足够的胶结物质来承担当前所受到的荷载, 受力系统不会崩坏。同样还可以看出的是, 峰值压缩荷载随着胶结半径的增大而增大。值得注意的是, 图 7(a) 中试样 1 的压缩荷载 - 位移曲线出现小段数据缺失, 这是由于胶结物质破碎被挤出以及核心受压区形成过程中, 压缩装置与压缩辅助装置间在极短的时间内脱离接触, 因而这小段位移对应的荷载未被记录。

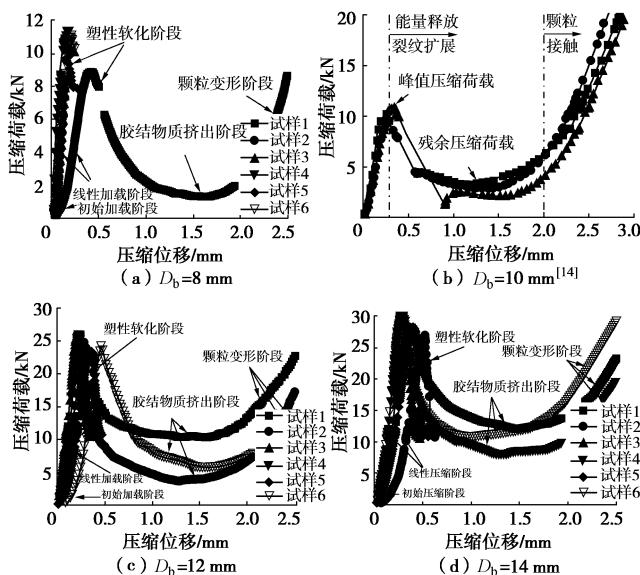


图 7 压缩试验结果

Fig. 7 Results of compression tests

二维铝棒试验结果<sup>[15]</sup>和三维离散元模拟结果<sup>[16]</sup>表明, 胶结试样的压缩强度随着胶结半径  $D_b$  和胶结物厚度  $H_b$  的变化关系同样可用胶结物的宽高比 ( $D_b/H_b$ ) 以及颗粒的宽度与胶结物宽度比 ( $D_s/D_b$ ) 来表示。与拉伸试验类似, 引入一尺寸因子  $\chi_c$  表征胶结物形状对拉伸强度的影响, 定义

$$A_c = \pi \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 \cdot \chi_c = \pi \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 \cdot \alpha \cdot \left( \frac{D_s}{D_b} \right)^\beta \cdot e^{\gamma(H_b/D_b)}, \quad (4)$$

式中,  $A_c$  为胶结物核心受压面积,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  均为拟合参数,  $D_s$  和  $D_b$  分别为颗粒和胶结物的直径,  $H_b$  为胶结物的最小厚度。本试验中,  $D_s=40 \text{ mm}$ ,  $H_b=2 \text{ mm}$ 。于是, 胶结物的微观压缩强度  $R_{nc}$  与胶结物直径  $D_b$  之间的关系即可表示为

$$\left. \begin{aligned} R_{nc} &= \sigma_c \cdot A_c = \sigma_c \cdot \pi \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 \cdot \alpha \cdot \left( \frac{40}{D_b} \right)^\beta \cdot e^{\gamma(2/D_b)}, \\ A_c &= R_{nc} / \sigma_c, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_c$  为室内试验得到的水泥胶结材料的圆柱体的

宏观压缩强度, 此处为 82 MPa, 代入公式 (5) 中, 即可得到不同胶结半径下的核心受压面积, 然后用公式 (4) 对其进行拟合, 结果如图 8 所示。

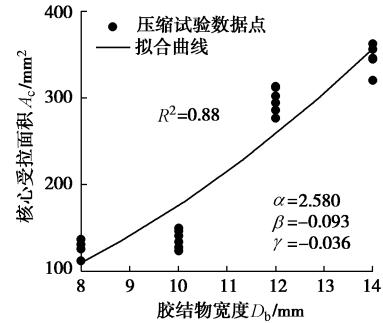


图 8 核心受拉面积与胶结宽度关系图

Fig. 8 Curves of relationship between assumed stress concentration area and bond width

从图 8 可以看出, 胶结物的核心受压面积随着胶结半径的增大非线性增大且并不是平方关系。得到的拟合参数  $\alpha$  为 2.581,  $\beta$  为 -0.093,  $\gamma$  为 -0.036。于是得到胶结物微观压缩强度  $R_{nc}$  与胶结半径  $D_b$  的关系式如下:

$$R_{nc} = \sigma_c \cdot \pi \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 \times 2.581 \left( \frac{D_s}{D_b} \right)^{-0.093} \cdot e^{-0.036(H_b/D_b)}. \quad (6)$$

### 3 结 论

利用自行设计的辅助加载装置胶结半径分别为 8, 12, 14 mm 的胶结试样进行拉伸和压缩试验, 结合已有的 10 mm 胶结试样的结果, 可以得出如下结论:

(1) 拉伸荷载随着拉伸位移的增加表现为线性增大, 试样相应为脆性破坏, 即拉伸荷载在试样破坏的瞬间减小为 0; 压缩荷载随着压缩位移的增加表现为四个阶段, 试样破坏时反映为脆性破坏和脆塑性破坏, 并且发生脆塑性破坏的概率随着胶结半径的减小而变大。

(2) 可以用核心受拉与核心受压面积来表征强度与胶结半径之间的关系。核心受拉面积与核心受压面积随着胶结半径的增大而非线性增大。

### 参考文献:

- [1] CUCCOVILLO T, COOP M. On the mechanics of structured sands[J]. Géotechnique, 1999, 49(6): 741 - 760.
- [2] COOP M R, ATKINSON J H. The mechanics of cemented carbonate sands[J]. Géotechnique, 1993, 43(1): 53 - 67.
- [3] HUANG J T, AIREY D W. Properties of artificially cemented carbonate sand[J]. Journal of Geotechnical and

- Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(6): 492 – 499.
- [4] CUNDALL P A, STRACK O D L. The distinct numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, **29**(1): 47 – 65.
- [5] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(8): 1329 – 1364.
- [6] OBERMAYR M, DRESSLER K, VRETTOS C, et al. A bonded-particle model for cemented sand[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **49**(49): 299 – 313.
- [7] 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, 2010, **30**(8): 723 – 761.
- [8] DELENNE J Y, YOUSSEFI M S E, CHERBLANC F, et al. Mechanical behaviour and failure of cohesive granular materials[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, **28**(15): 1577 – 1594.
- [9] MULLER P, TOMAS J. Investigation on the compression behavior of tetrahedral agglomerates[J]. ChemieIngenieurTechnik, 2015, **87**(7): 966 – 975.
- [10] 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 Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 354 – 360. (in Chinese))
- [11] 蒋明镜, 周雅萍, 陈 贺. 不同胶结厚度下粒间胶结力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1264 – 1273.
- [12] 蒋明镜, 张 宁, 金树楼. 不同胶结宽度粒间胶结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(4): 928 – 936. (JIANG Ming-jing, ZHANG Ning, JIN Shu-lou. Experimental study of mechanical behaviors of bonded granules with different bond widths[J]. Rock & Soil Mechanics, 2015, **36**(4): 928 – 936. (in Chinese))
- [13] 蒋明镜, 金树楼, 刘 蔚, 等. 粒间胶结接触力学特性的三维试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 1): 9 – 13. (JIANG Ming-jing, JIN Shu-lou, LIU Wei, et al. three-dimensional experimental study of mechanical behaviors of bonded granules[J]. Rock & Soil Mechanics, 2015, **36**(S1): 9 – 13. (in Chinese))
- [14] 金树楼. 结构性砂土三维微观接触力学试验及离散元数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2016. (JIN Shu-lou. Three dimension experimental and numerical study on micro-and macro- mechanical behavior of structural sands[D]. Shanghai: Tongji University, 2016. (in Chinese))
- [15] 张 宁. 岩石化学风化微观机理及岩质边坡稳定性的离散元分析[D]. 上海: 同济大学, 2014. (ZHANG Ning. DEM analysis of the micro-mechanical behavior of chemical weathering on the rock and stability of rock slope[D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese))
- [16] 申志福. 深海能源土力学特性三维多尺度数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2016. (SHEN Zhi-fu. Three-dimensional muti-scale numerical simulations of the mechanical behavior of methane hydrate bearing sediments[D]. Shanghai: Tongji University, 2016. (in Chinese))

(本文责编 明经平)