

人工胶结球状颗粒材料的三轴试验研究

牛丽思, 刘奉银, 王松鹤, 张 昭

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 采用蜡和膨润土混合作为胶结材料, 分别以玻璃珠和钢珠为颗粒, 制备 4 种胶结材料体积比的人工试样, 尝试通过常规三轴试验, 揭示骨架颗粒材料和含蜡率等对人工胶结试样特性的影响。结果表明: ①同一含蜡率下, 试样的强度随围压升高而增大; 较低围压下, 钢珠试样强度较高, 围压为 200 kPa 时, 纯蜡胶结钢珠试样强度高于玻璃珠, 其余含蜡率下钢珠试样强度略低; ②同一围压下, 试样强度随含蜡率减小而增大, 胶结试样的强度主要取决于膨润土的量, 其中含蜡率在 66.7% 到 50% 之间时, 强度增长较缓; ③试样的黏聚力随含蜡率的变化存在最小值, 同一含蜡率下, 钢珠试样黏聚力较大, 内摩擦角一般较小, 且含蜡率对玻璃珠试样内摩擦角的影响比钢珠大。

关键词: 球状颗粒; 人工胶结; 三轴试验; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)01-0068-06

Triaxial tests on artificial cemented soil with spherical granular materials

NIU Lisi, LIU Fengyin, WANG Songhe, ZHANG Zhao

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper attempts to reveal the influence of skeleton granular materials and wax content on the property of artificial cemented specimens by means of conventional triaxial tests. The glass and steel balls are selected as granular materials with each of the material specimens is remolded under 4 kinds of cementation material volume ratios of the mixture of wax and bentonite. The results show that: ① The strength increases with confining pressure in the same wax content, and steel balls' strength is higher than that of glass balls in the lower confining pressure; in the case of confining pressure of 200 kPa, steel balls' strength exceeds glass balls' with pure wax as cementation; the strength of steel balls' specimens is slightly less under other wax contents. ② In the same confining pressure, the strength of specimens increases with the decrease of wax content, so the strength of cementation specimens depends largely on the amount of bentonite, of which the strength slowly grows from 66.7% to 50% of wax content. ③ There seems a minimum cohesion value in the wax content. The cohesion of specimens with steel balls is larger, with a lower internal friction angle, under the same wax content. The effect of wax content on internal friction angle of glass balls is greater than that of steel balls.

Key words: spherical granular; artificial cementation; triaxial test; cohesion; internal friction angle

研究表明: 结构性土颗粒间的胶结作用是影响土强度的关键因素之一。基础建设中, 水泥土、干粉砂浆及水泥砂浆等混和胶结材料已广泛应用于岩土工程^[1-4], 骨架颗粒与胶结材料的联结强度及其产生的改良、加固效果也是研究的焦点之一。

粒间胶结的研究方法主要有三类: 一是细观室

内模型试验研究, 即在自行研制的模型装置基础上进行试验研究, 模拟胶结砂土颗粒间的胶结作用, 如 Delenne^[5] 将二维空间下胶结颗粒理想化为特定胶结位置的两根铝棒, 测得拉伸、压缩和剪切简单应力路径下的强度参数, 实现了胶结颗粒细观作用的宏观试验研究; Brockel^[6] 等设计了一套测试双颗粒粒

收稿日期: 2016-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372304, 51679198); 国家自然科学基金青年资助项目(51408486)

作者简介: 牛丽思, 女, 硕士生, 研究方向为黄土力学与工程。E-mail: lisi_niu@sohu.com

通讯作者: 刘奉银, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为非饱和土力学与黄土力学。E-mail: liufy@xaut.edu.cn

间胶结物拉伸的试验装置;在其基础上,蒋明镜等^[7-12]研制了一套胶结颗粒成型模板和实现复杂应力下力学特性的测试装置,探讨了法向压力、胶结厚度和宽度以及胶结材料等因素的影响,为了使模拟更贴近现实,设计了三维空间下半球形理想颗粒胶结成型及其加载设备,得到了水泥胶结颗粒三维空间下的峰值强度包线。

二是人工胶结土试验研究,即在土(砂)中加入石灰、水泥或矿物材料等胶结材料制备人工胶结土(砂),模拟土(砂)的胶结特性。王庶懋等^[13]提出在砂土中掺入水泥和聚苯乙烯(EPS)颗粒制备轻质土,发现水泥和EPS颗粒含量是影响人工制备土结构性的重要因素;蒋明镜和沈珠江^[14]将硅酸盐水泥和冰粒加到粉质黏土和粉状高龄土的混合料中,利用X射线衍射与扫描电子显微镜揭示了人工制备方法能实现胶结效应和大孔隙组构,并通过等向固结、单向压缩和三轴压缩试验分析其力学性状与规律;谢定义和齐吉琳^[15]在土颗粒中掺入水泥、石膏胶结剂和一定粒度的冰粒分别实现联结和排列特性;刘恩龙等^[16]在重塑土中加入水泥和盐粒形成大孔隙组构的胶结颗粒,模拟天然黏土的结构性,其三轴试验表明,低围压下试样变形受胶结强度的影响较大;王绪民等^[17]选用高纯度石英砂和氧化钙经过二次掺水制备胶结砂样,进行三轴试验和碳酸钙定量化学试验,提出化学指标 β ,进而修正了摩尔-库伦强度公式;韩学辉等^[18]提出了骨料依次包裹胶结剂和黏土的骨料覆膜制样原理,该方法可保证胶结材料的均匀性且无多余胶结料对试验的影响;王来贵等^[19]通过激光共焦显微镜,对不同粒径砂粒与水泥胶结样进行细观观测,并结合单轴压缩试验下力学响应,得出多边形胶结颗粒接触模型。

三是数值模拟研究。Christian等^[20]基于Particle Flow Code(PFC)自身的胶结模型,将其扩展为胶结颗粒渐进破坏的Discrete Element Method(DEM)模型,模拟了花岗岩的单轴压缩试验;蒋明镜^[21,22]通过类比法构造出抗转动无厚度的水泥微

观胶结模型,将其植入到Particle Flow Code in 2 Dimensions(PFC 2D)中,通过模拟结果与岩石的单轴压缩和单轴拉伸试验类比,确定了平行粘结模型微观参数的范围,并针对该微观参数不能满足岩石宏观抗压强度和抗拉强度的问题,分析并提出了相应的改进方法。

采用球状颗粒模拟土颗粒,来探究土的力学性质已有一定基础。董启朋等^[23]用钢珠和玻璃珠模拟粗粒土的三轴试验,探究粒径、孔隙比和围压对强度和变形的影响;孔德志等^[24]用钢珠模拟堆石料的三轴排水试验,探究了不破碎堆石体颗粒滑移变形机理及其对强度特性的影响,表明在出现峰值强度之后,修正的Rowe剪胀方程适用性更强;张成朋等^[25]通过动三轴试验表明用玻璃珠可以很好地模拟堆石料的动弹性模量变化规律;魏巍等^[26]通过人工制备粒径为2cm、不同水泥含量的球颗粒试样进行三轴试验,表明堆石料颗粒破碎的分形维数能较好地表征试样级配情况。

本文采用钢珠和玻璃珠作为骨架颗粒,分别以蜡和膨润土两种材料按一定体积比例混合作为胶结材料制备试样,进行常规三轴试验,探究不同骨架材料、胶结材料和围压等对胶结试样强度和变形特性的影响。

1 试验材料及试验方法

试验采用钢珠和玻璃珠两种材料作为骨架颗粒,将蜡和膨润土作为颗粒间的胶结材料,模拟结构性土中的胶结,进行常规三轴试验。试样直径 $D=39.1\text{ mm}$,允许骨架颗粒粒径 $d<0.1D$,本文所用骨架颗粒粒径均为3 mm;试验所用蜡为常温固态白蜡,熔点 $45\sim55\text{ }^{\circ}\text{C}$;本文试验用膨润土产自山东,是以蒙脱石为主要矿物成分的黏性土。由于膨润土中黏粒含量高,土的比表面积大,亲水性大的矿物含量高,黏性强,同时吸湿性很强,具有吸水膨胀失水干缩的性质。试样中各材料的基本物理指标如表1所示。

表1 制样材料基本物理指标
Tab.1 Physical property of component material

颗粒粒径 d/mm	理论颗粒 孔隙比 e_1	孔隙 填充率 P	固态蜡 密度 $\rho /$ (g/cm^3)	膨润土				
				干密度 $\rho_d /$ (g/cm^3)	初始 含水率 $w/\%$	塑限 含水率 $w_p/\%$	液限 含水率 $w_L/\%$	塑性指数 I_P
3	1.2	0.9	0.963	1.522	9.67	34.68	103.87	69.19

表1中,试样理论颗粒孔隙比指试样中骨架颗粒的孔隙体积占骨架颗粒体积的比值,考虑到试样制备难易且便于胶结,经多次试制,试样理论颗粒孔

隙比 e_1 通常为 $1.2\sim1.5$,常规三轴试样体积为 96.06 cm^3 ,通过 $e_1=1.2$ 确定骨架颗粒数量为3 089颗,进一步可知骨架的孔隙体积为 52.395 cm^3 。孔

隙填充率 P 为胶结材料体积占孔隙体积的比值,试验中由 $P = 0.9$ 确定所需胶结材料的体积为 47.2 cm^3 。

以蜡和膨润土两种胶结材料的不同体积比例混合制备试样,两种胶结材料体积比 ($V_L:V_P$) 分别取 1:0、2:1、1:1 和 1:2,其中胶结材料体积比为 1:0 时即为纯蜡。膨润土提前过筛烘干备好,根据胶结材料体积比得出对应比例下所需蜡和膨润土的体积,称出两种材料对应质量,将称好的固态蜡先放入烘箱进行融化,待熔为蜡液后取出,并将称好的膨润土和颗粒倒入,均匀搅拌混合,常温下自然冷却到可塑态时,分五层压样。同骨架颗粒材料,同一体积比下各制备三组试样,分别在 50 kPa、100 kPa 和 200 kPa 低围压下进行固结试验,试验固结时间统一为 1.5 h,剪切速率为 0.08 mm/min。

2 试验结果及分析

2.1 应力-应变曲线

当应力应变曲线有峰值时,将峰值强度作为破坏强度;当曲线无峰值时,则选取轴应变为 15% 时相应的强度作为破坏强度。图 1 和图 2 为相同含蜡率 (V_L/V)、不同围压下,试验得到的应力-应变曲线。其中含蜡率指试样中蜡体积占胶结材料总体积的百分比, ε_1 为轴应变, $\sigma_1 - \sigma_3$ 为主应力差。由图可以看出,在同一含蜡率 V_L/V 下,玻璃珠和钢珠试样的峰值强度都随着围压 σ_3 增加而增大。 V_L/V 分别为 100%、66.7% 和 50% 时,随围压的变化,强度曲线为软化和弱硬化型;而 V_L/V 为 33.3% 时,曲线均为软化型。

对比图 1 和图 2 可知,当 $V_L/V = 100\%$ (即单纯蜡),同一围压下,钢珠试样强度比玻璃珠大;当 V_L/V 分别为 66.7%、50% 和 33.3% 时, $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$ 和 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 下的钢珠试样强度比玻璃珠大,而 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ 时则相反。相同含蜡率下,玻璃珠试样在 $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$ 和 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 下的强度相近,在 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ 时强度明显增大。此现象可能是由于玻璃珠颗粒相对密度与胶结材料的差异小,而钢珠颗粒相对密度与胶结材料的差异大。低围压下,颗粒相对密度差异越小,钢珠试样峰值强度就越大;当 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ 时,玻璃珠试样强度增加幅度较大。

此外,从图 1、图 2 可见,强度曲线会有上下波动的现象,这可能是由于在剪切过程中,剪切带上存在一定的主抗颗粒(即对强度起关键作用的颗粒)。试样主要是依靠主抗颗粒之间的相互摩擦、滚动、错位、重新排列来抵抗剪切应力。剪切过程中,一旦主抗颗

粒间产生较大滑移或滚动,应力转移,抗力会减小,随着剪切继续,颗粒滚动重新排列,再次形成新的主抗颗粒,抗力增加,此过程在试样内部反复循环,因此,试样在剪切过程中,应力-应变曲线会发生上下波动。

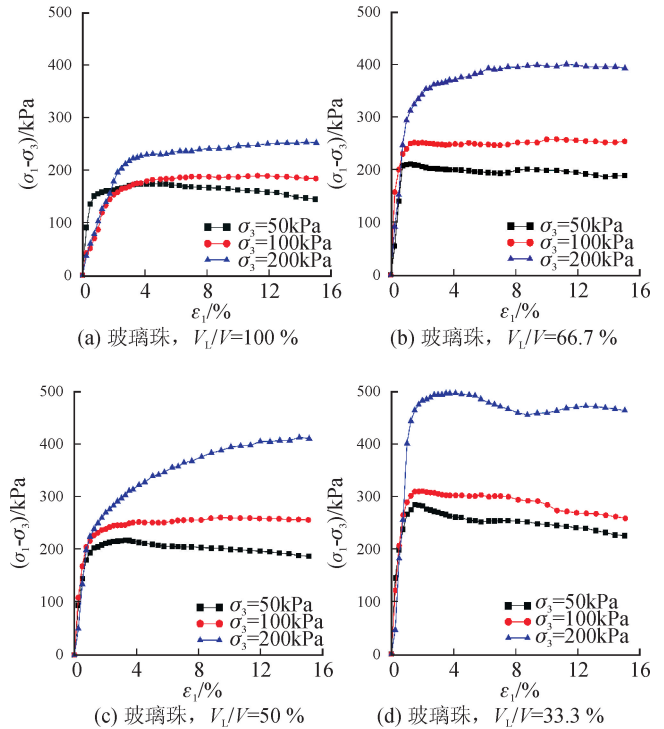


图 1 不同围压下玻璃珠试样的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of glass balls specimen under different confining pressures

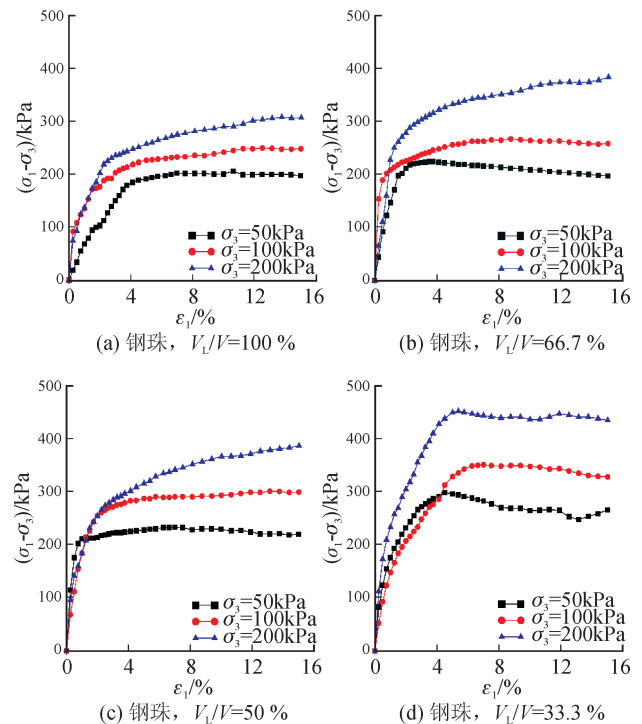


图 2 不同围压下钢珠试样的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of steel balls specimen under different confining pressures

2.2 含蜡率对强度的影响

图3为不同围压下试样的强度和含蜡率的关系。由图3可知,在相同围压下,玻璃珠和钢珠试样的强度随含蜡率 V_L/V 的减小即膨润土含量的增加而增大,粘结强度增加,试样的整体稳定性提高,所以试样的强度增大。

比较图3(a)和(b)可知,不同围压下,玻璃珠在含蜡率为66.7%和100%时的强度比值为1.2~1.6,而钢珠的只有1~1.25,由此可知,在纯蜡中掺入膨润土后,玻璃珠比钢珠的强度增加幅度大。

相同颗粒材料和围压下, $V_L/V=66.7\%$ 和 $V_L/V=50\%$ 时的强度相差不大,在比率为50%的基础上,再增加胶结材料蜡的掺量,对混合试样强度影响不大,或者说对颗粒材料强度影响最大的是膨润土。

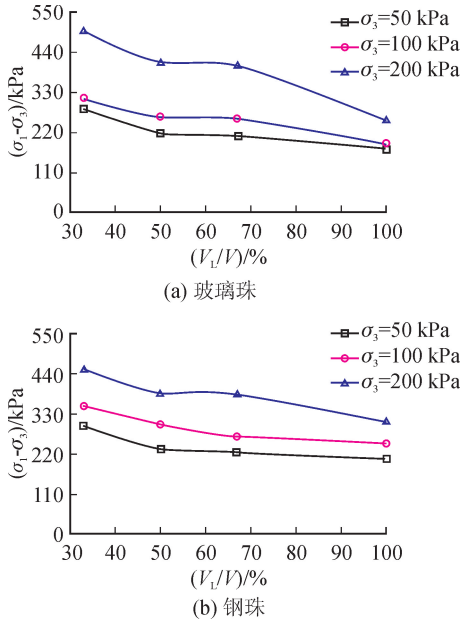


图3 强度和含蜡率的关系
Fig. 3 Relationships between strength and wax content

2.3 含蜡率对强度参数的影响

通过不同体积比、不同围压下试验得到的峰值主应力差,计算平均应力 $p=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ 和广义剪应力 $q=(\sigma_1-\sigma_3)/2$,绘制在 p - q 平面,得到不同条件下的 K_f 线,如图4所示。

由图4可知,含蜡率 V_L/V 分别为66.7%、50%和33.3%时,玻璃珠(或者钢珠)试样的三条 K_f 线几乎平行,随着含蜡率的减小, K_f 线向右上方移动,说明胶结材料中膨润土量的增加使材料强度增大,内摩擦角变化很小;当含蜡率 $V_L/V=100\%$ 时, K_f 线的斜率明显降低,表明其内摩擦角降低。由此证实,蜡在胶结材料中主要起粘结作用,而且还会增加颗粒之间的光滑性,降低试样的内摩擦角。此外,

V_L/V 为66.7%和50%的直线几乎重合,故如前文所述,在 $V_L/V=50\%$ 的基础上增加蜡的掺量对强度影响不大。

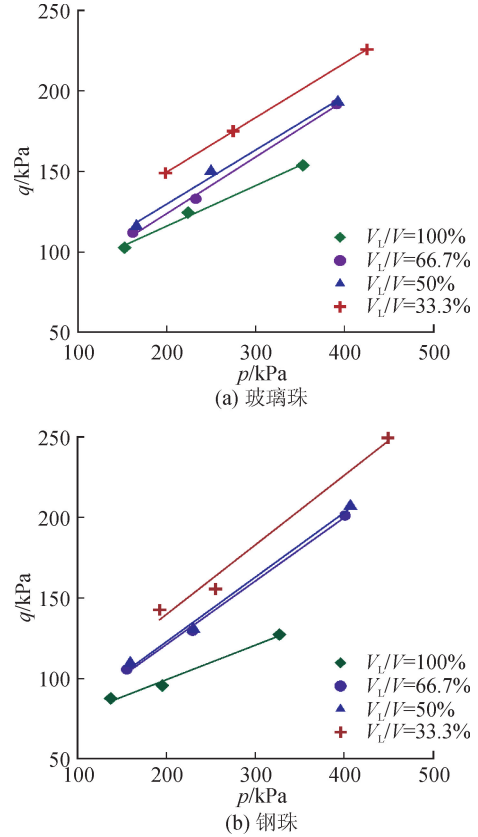


图4 p - q 平面内的 K_f 线
Fig. 4 K_f lines on p - q plane

由图4可知,相同含蜡率下的试验结果在 p - q 坐标平面上近似为一条直线 K_f (即极限应力圆顶点的连线),其与纵坐标的截距为 a ,倾角为 θ ,由土的极限平衡理论得知,当试样破坏时有:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f = c \cos \varphi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \quad (1)$$

式中, σ_1 为大主应力; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为破坏剪应力; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

K_f 线的表达式:

$$q = a + p \tan \theta \quad (2)$$

比较两式可得:

$$\varphi = \arcsin(\tan \theta) \quad (3)$$

$$c = \frac{a}{\cos \varphi} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)确定的强度参数值绘制成图5,在同一含蜡率下,钢珠试样的黏聚力比玻璃珠大。由图5(a)可知,钢珠和玻璃珠试样的黏聚力随含蜡率的增大而减小,但在含蜡率为50%和66.7%时变化较小,纯蜡试样的黏聚力仅次于含蜡率为33.3%时的试样;由图5(b)可知,含蜡率对玻璃珠试样内

摩擦角的影响比钢珠试样大。

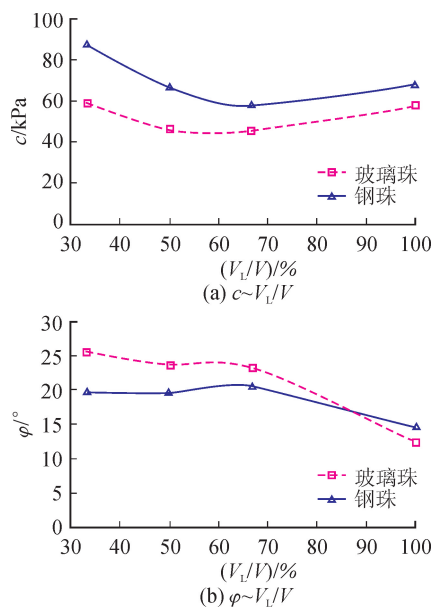


图5 含蜡率与强度参数的关系

Fig. 5 Relationships between wax content and strength parameters

3 结 论

1) 相同含蜡率下,玻璃珠和钢珠试样的强度都随围压的增大而增大,较低围压下钢珠试样强度较高,围压为 200 kPa 情况下,纯蜡胶结钢珠试样强度高于玻璃珠试样,其余含蜡率下钢珠试样强度略低。

2) 相同围压下,玻璃珠和钢珠试样强度都随含蜡率的减小而增大,胶结试样的强度主要取决于膨润土的量,其中含蜡率在 66.7% 到 50% 之间时,强度增长较缓。

3) 试样的黏聚力随含蜡率的增大先减小后增大,且随含蜡率的变化存在最小值,同一含蜡率下,钢珠试样黏聚力较大,内摩擦角一般较小,且含蜡率对玻璃珠试样内摩擦角的影响比钢珠试样大。

参考文献:

- [1] 马国庆. 击实水泥土的工程特性及其微观结构研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2006.
MA Guoqing. Research on the engineering characteristics and microstructure of compacted cement-soil [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2006.
- [2] 赵焕起. 建筑垃圾再生骨料干粉砂浆的制备和性能研究 [D]. 济南: 济南大学, 2014.
ZHAO Huanqi. The preparation and performance research of construction waste recycled aggregate dry-mixed mortar [D]. Jinan: University of Jinan, 2014.
- [3] 王小艳. 干混砂浆的研制及性能研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.

WANG Xiaoyan. Study on preparation and performance of dry-mixed mortar [D]. Nanjing: HoHai University, 2006.

- [4] 范晓秋, 洪宝宁, 胡昕, 等. 水泥砂浆固化土物理力学特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 605-610.
FAN Xiaoqiu, HONG Baoning, HU Xin, et al. Physico-mechanical properties of soils stabilized by cement mortar [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 605-610.
- [5] DELENNE J Y, YOUSOUFI 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.
- [6] BROCKEL U, WAHL M, KIRSCH R, et al. Formation and growth of crystal bridges in bulk solids [J]. Chemical Engineering and Technology, 2010, 29(6): 691-695.
- [7] 蒋明镜, 孙渝刚, 李立青. 胶结颗粒接触力学特性测试装置研制 [J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 309-315.
JIANG Mingjing, SUN Yugang, LI Liqing. Development of experimental apparatus for contact behaviour of bonded granules [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 309-315.
- [8] 蒋明镜, 肖俞, 孙渝刚, 等. 水泥胶结颗粒的微观力学模型试验 [J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1293-1299.
JIANG Mingjing, XIAO Yu, SUN Yugang, et al. Experimental investigation on micromechanical model of cement-bonded particles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1293-1299.
- [9] JIANG M J, SUN Y G, LI L Q, et al. Contact behavior of idealized granules bonded in two different interparticle distances: an experimental investigation [J]. Mechanics of Materials, 2012, 55(14): 1-15.
- [10] JIANG M J, SUN Y G, XIAO Y. An experimental investigation on the contact behavior between cemented granules [J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(5): 1-13.
- [11] 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 Mingjing, ZHANG Ning, JIN Shulou. Experimental study of mechanical behaviors of bonded granules with different bond widths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 928-936.
- [12] 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 Mingjing, JIN Shulou, LIU Wei, et al. Three-

- dimensional experimental study of mechanical behaviors of bonded granules [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S1): 9-13.
- [13] 王庶懋, 高玉峰. 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LS-ES)细观结构的 CT 研究 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(12): 2137-2142.
- WANG Shumao, GAO Yufeng. Research on meso-structure of lightweight sand-EPS beads soil(LSES) using CT [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2137-2142.
- [14] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性粘土试样人工制备方法研究 [J]. *水利学报*, 1997, (1): 56-61.
- JIANG Mingjing, SHEN Zhujiang. A method of artificial preparation of structured clay samples [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, (1): 56-61.
- [15] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量参数研究的新途径 [J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(6): 651-656.
- XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 651-656.
- [16] 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 Enlong, SHEN Zhujiang. Experimental study on mechanical properties of artificially structured soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4): 679-683.
- [17] 王绪民, 赵灿, 陈善雄, 等. 人工胶结砂物理力学特性试验研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3134-3140.
- WANG Xumin, ZHAO Can, CHEN Shanxiong, et al. Experimental study of physico-mechanical properties of artificially cemented sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 3134-3140.
- [18] 韩学辉, 杨龙, 侯庆宇, 等. 一种分散泥质胶结疏松砂岩的人工岩样制作新方法 [J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(6): 2944-2949.
- HAN Xuehui, YANG Long, HOU Qingyu, et al. A new method for making artificial rock of unconsolidated sandstone cemented by dispersed shale [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(6): 2944-2949.
- [19] 王来贵, 习彦会, 刘向峰, 等. 不同粒径砂粒水泥胶结体物理力学性质研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(1): 61-67.
- WANG Laigui, XI Yanhui, LIU Xiangfeng, et al. Physical and mechanical properties of cemented body of sand grains with different diameter [J]. *Bulletin of Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(1): 61-67.
- [20] ERGENZINGER C, SEIFRIED R, EBERHARD P. A discrete element model to describe failure of strong rock in uniaxial compression [J]. *Granular Matter*, 2011, 13(4): 341-364.
- [21] 蒋明镜, 陈贺, 刘芳. 岩石微观胶结模型及离散元数值仿真方法初探 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1): 15-23.
- JIANG Mingjing, CHEN He, LIU Fang. A microscopic bond model for rock and preliminary study of numerical simulation method by distinct element method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1): 15-23.
- [22] 蒋明镜, 方威, 司马军. 模拟岩石的平行粘结模型微观参数标定 [J]. *山东大学学报(工学版)*, 2015, 45(4): 50-56.
- JIANG Mingjing, FANG Wei, SIMA Jun. Calibration of micro-parameters of parallel bonded model for rocks [J]. *Journal of Shandong University(Engineering Science)*, 2015, 45(4): 50-56.
- [23] 董启朋, 姚海林, 詹永祥. 钢珠和玻璃珠模拟粗粒土的三轴试验研究 [J]. *人民长江*, 2016, 47(8): 88-93.
- DONG Qipeng, YAO Hailin, ZHAN Yongxiang. Tri-axial test on simulated coarse-grained soil of steel balls and glass balls [J]. *Yangtze River*, 2016, 47(8): 88-93.
- [24] 孔德志, 张丙印, 孙逊. 钢珠模拟堆石料三轴试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2010, 29(2): 210-215.
- KONG Dezhi, ZHANG Bingyin, SUN Xun. Triaxial tests on artificial rockfill materials of steel balls [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(2): 210-215.
- [25] 张成朋, 杨贵, 刘汉龙, 等. 玻璃球动弹性模量特性试验和数值模拟研究 [J]. *防震减灾工程学报*, 2014, 34(1): 34-39.
- ZHANG Chengpeng, YANG Gui, LIU Hanlong, et al. Experimental and numerical simulation of dynamic elastic modulus properties of crystal ball [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2014, 34(1): 34-39.
- [26] 魏巍, 姜程程, 覃燕林, 等. 人工模拟堆石料颗粒破碎的分形特性 [J]. *人民黄河*, 2014, 36(12): 126-129.
- WEI Wei, JIANG Chengcheng, QIN Yanlin, et al. Fractal behavior in crushing of artificial rockfill materials [J]. *Yellow River*, 2014, 36(12): 126-129.

(责任编辑 周 蓓)