

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.011

粗粒料颗粒形状对材料宏观力学性能的影响*

李存柱, 盛 俭, 周正华, 杨 泽

(南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 粗粒料的颗粒形状是影响材料宏观力学性能的重要因素, 大型三轴试验的局限性限制了粗粒料微观结构对力学性能影响的研究。基于二维颗粒流理论, 利用PFC2D建立4种不同形状的颗粒簇, 进行了双轴实验的颗粒流数值模拟, 建立形状与宏观力学性能和变形特征的相互关系。结果表明: 颗粒形状系数与材料内摩擦角近似呈线性关系, 随着形状系数的增加内摩擦角递减; 材料强度峰值和残余强度随着颗粒形状系数的增加而减小; 材料初始切线模量随着形状系数的增加而减小; 数值模型在加载过程中先出现剪缩效应, 后产生剪胀效应, 且同一形状颗粒的试样, 围压越大, 剪胀变形越明显; 不同形状颗粒的试样达到最终应变软化状态之前, 形状系数越小, 剪缩效应越不明显, 反之, 剪胀效应越明显。

关键词: 颗粒流; 形状系数; 强度特性; 变形特征; 内摩擦角

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0222-07

Influence of Particle Shape on the Macroscopic Mechanical Properties of Coarse Aggregate

LI Cunzhu, SHENG Jian, ZHOU Zhenghua, YANG Ze

(College of Transportation Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: The shape of coarse aggregate is an important impact factor that determines the macroscopic mechanical properties of materials. The limitation of large-scale triaxial tests restricts the study on the influence of microstructure on mechanical properties of the coarse aggregate. Based on two-dimensional particle flow theory, four different shapes of clumps are built by PFC2D, and biaxial tests are simulated. The relationships of macroscopic mechanical properties and deformation behaviour with coarse aggregate shape are established, respectively. The results of particle flow numerical simulation show that the relationship between the particle shape coefficient and the friction angle of material is approximately linear, and the internal friction angle decreases with the increment of shape coefficient. Both the peak strength and the residual strength of coarse aggregate decrease with the increment of particle shape coefficient, and the initial modulus shares the same law. The shear contraction appears firstly in the process of loading, and then the dilatancy effect is observed. For the samples with the same shape of particles, the greater the confining pressure is, the more obvious the shear dilatancy is. Before samples with different shapes reach the final states of strain softening, the smaller the shape co-

* 收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-05-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500400)资助

作者简介: 李存柱(1992-), 男, 硕士研究生。主要从事防波堤抗震研究。Email: 623542205@qq.com

通讯作者: 盛 俭(1979-), 男, 副研究员, 博士。主要从事地震工程研究。Email: sj2984@sina.com

efficient is, the more inconspicuous the shear contraction is. On the contrary, the shear dilatation is more significant.

Keywords: particle flow; shape coefficient; intensity characteristic; deformation characteristic; internal friction angle

引言

近年来,铁路路基沉降问题、堆石坝和抛石防波堤遭受地震发生失稳破坏的事故时有发生^[1-5],对生命财产安全造成巨大影响。为了提高铁路路基、堆石坝和抛石防波堤等构筑物的稳定性,工程设计对粗粒料的力学性质要求越来越高。大型三轴实验是研究粗粒料力学性质最常用的物理方法,国内外学者通过大型三轴实验对材料强度和变形特征做了大量研究^[6-14],研究内容包括材料的缩尺效应、孔隙率、颗粒最大粒径和试样最大尺寸、不同加载条件等对材料强度特性和变形的影响。大型三轴实验通常也有一些局限性,在实际操作中,实际材料尺寸和实验试样材料尺寸不能完全相同;同时,大型三轴实验耗时、耗力、费用昂贵,而且橡皮膜嵌入问题会影响主应力的反映^[7]。随着颗粒流技术的发展,颗粒流数值模拟能研究一些室内实验所不能反映的材料微观特性。通过颗粒流数值模拟双轴实验,使其结果与室内三轴实验结果进行对比分析是获取材料细观参数的有效方法^[15-16]。在已有研究中,已经证明颗粒流模拟三轴实验的可行性^[15-18]。颗粒流双轴实验数值模拟的研究内容包括微观参数、颗粒破碎、缩尺效应和异性材料等方面^[19-23]。

堆石料形状是影响其力学性能的重要因素之一^[24-25],目前材料形状和宏观力学参数之间的相互关系研究尚少。本文通过二维颗粒流软件PFC2D,引入正方形、正五边形、正六边形的颗粒簇和圆盘,将摩尔-库仑准则应用到细观颗粒中,把颗粒微观结构同宏观力学性质结合起来,对颗粒形状和粗粒料宏观力学参数的相互关系进行了研究,并就材料形状和变形特性及强度特性的相关性进行了分析。

1 颗粒流 PFC2D 基本原理

颗粒流软件用于数值仿真时作了如下假设:①在模型中颗粒视为刚度较大的球体,在每一时步中颗粒位移相对尺寸大小可忽略不计;②颗粒与颗粒

之间的接触发生在很小的范围内,近似为点接触;③颗粒与颗粒之间的接触为柔性接触;④在颗粒之间会发生很小的重叠量,接触力和叠合量之间的关系是通过力-位移关系建立的。颗粒间力-位移方程如下式所示^[26]:

$$F_n = k_n u_n \quad (1)$$

$$F_s = k_s u_s \quad (2)$$

式中, F_n 、 F_s 分别为法向接触力和切向接触力; k_n 、 k_s 分别为球体法向刚度和切向刚度; u_n 、 u_s 分别为颗粒间法向相对位移和切向相对位移。

颗粒流离散元求解方法是按有限差分法在计算机上进行时步迭代求解,即动态松弛法。整个求解过程是以牛顿第二定律和力-位移方程循环推进的,以力-位移定律为基础,不断更新接触力;继而以牛顿第二定律为基础,刷新颗粒与颗粒、颗粒与墙体的位置,从而不断调整颗粒和墙体之间的接触关系。二者交替进行,按时步迭代的方法遍历整个求解过程,最后达到平衡或者破坏状态,计算流程如图1所示^[26]。

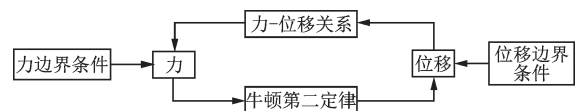


图1 PFC迭代过程示意

Fig.1 Schematic diagram of PFC iterative process

2 双轴实验数值模拟过程

2.1 接触模型的选择

颗粒之间的接触模型有两种:接触粘结模型和接触滑动模型。在已有研究中^[16-20],通常将颗粒简化为排列方式单一的球体以提高计算效率,为了利用颗粒间的粘结力替代不规则颗粒之间的相互镶嵌、咬合作用,需要采用接触粘结模型。这种简化,对于粒径较小、形状接近球体的砂、土等材料是合理的。但是对于形状各异、表面粗糙、棱角分明的粗粒料,其排列方式千变万化,导致颗粒间镶嵌咬合力很大,抗剪强度也随之提高。若仍采用圆形颗粒模拟粗粒料,必定会产生单一的排列方式,使得

颗粒间镶嵌咬合力远小于实际情况。在粗粒料模拟时必须考虑颗粒形状对颗粒间镶嵌咬合力所产生的影响,因此在模型颗粒选择时需要引入不同形状的颗粒簇,使模拟更接近实际颗粒间的镶嵌、咬合作用。此时,颗粒间镶嵌、咬合作用已经不需要使用粘结力替代,因此选择接触滑动模型。

2.2 PFC2D 双轴实验数值模拟实施过程

2.2.1 试样生成及参数选取

本文采用双轴实验模型的尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.8\text{ m}$, 试样中圆形颗粒直接用软件中的 ball 功能生成。正四边形、正五边形和六边形颗粒簇的生成方法: 首先用 CAD 创建正多边形的模板, 然后把正多边形模板导入 PFC2D 软件中, 最后通过命令流使大小不同的圆形颗粒重叠集合而成颗粒簇。考虑到模拟时为低围压状态, 颗粒破碎程度很小, 所以本文不考虑颗粒簇破碎情况。4 种不同形状的颗粒簇如图 2 所示。为了表征颗粒的不规则程度, 以便后文建立形状与材料力学性质之间的关系, 本文引入布拉斯谢克(Blaschke)形状系数 $s^{[27]}$, 形状系数越大越接近圆形, 其定义见下式:

$$s = \frac{32A}{(\pi P)^2} \quad (3)$$

式中, A 为多边形的面积; P 为多边形的周长。

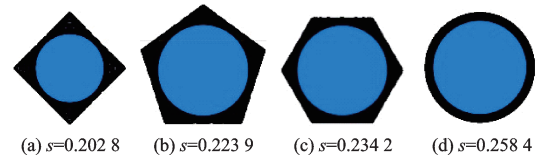


图 2 4 种不同形状颗粒簇

Fig.2 Four kinds of clumps with different shapes

每组试样在墙体内部按相同的孔隙率和颗粒级配生成颗粒簇, 然后进行时步迭代, 使其应力释放, 使试样达到一个较低且应力均匀的状态, 最后通过伺服控制原理, 使试样达到所需目标围压的应力状态。试样细观参数取自参考文献[17], 因为本文采用的模型为接触滑动模型, 故没有引用粘结参数。因为刚度及刚度比对材料强度影响较小^[19], 所以刚度取值比文献略大, 但也在前人研究粗粒料双轴实验的参数选取范围之内^[17,21]。详细参数见表 1。这里取墙体切向刚度为零。

表 1 模型细观参数

Table 1 Values of model micro parameters

细观参数	最大粒径与最小粒径比	试样孔隙率 n	颗粒法向刚度 $K_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	颗粒切向刚度 $K_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	模型上下墙体法向刚度 $K_n^{w1}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	模型左右墙体法向刚度 $K_n^{w2}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	摩擦系数 f
数值	2	0.1	9.8e6	8.5e6	1e7	1e6	2 600	0.8

注: 为了模拟柔性边界, 侧墙刚度取值为上下墙刚度的 1/10

2.2.2 PFC2D 双轴实验数值模拟工况

本文共进行了 4 组双轴实验数值模拟, 即每组实验中的模型试样分别用 4 种不同形状颗粒簇充填, 每组试样分别在围压为 100、200、300 kPa 下进行加载, 共进行了 12 个工况的模拟。实验中保证每组数值模拟的细观参数相同, 然后对上、下墙体进行加载, 加载速率为 0.008 m/s, 最终以轴向应变为 15% 时作为停止加载的条件, 具体 PFC2D 双轴实验工况见表 2。

表 2 PFC2D 双轴实验数值模拟工况

Table 2 Simulated working conditions of PFC2D biaxial tests

分组	工况	颗粒簇形状	Blaschke 形状系数	围压/kPa
1	1、2、3	四边形	0.202 8	100、200、300
2	4、5、6	五边形	0.223 9	100、200、300
3	7、8、9	六边形	0.234 2	100、200、300
4	10、11、12	圆形	0.258 4	100、200、300

3 双轴实验数值模拟结果分析

3.1 强度特征分析

同一形状颗粒试样在不同围压作用下, 强度特

性表现为相似的规律, 以第 1 组双轴实验数值模拟为例, 选取四边形颗粒的偏应力—应变曲线分析, 如图 3 所示。图中结果表明, 偏应力峰值强度随着围压的增大而增大。由于材料为离散介质, 具有不均匀性, 在强度达到峰值强度以后, 颗粒的排列方

式发生改变,而且颗粒与颗粒之间的滑动力克服了由摩擦系数以及相互咬合作用提供的抗剪强度,出现明显的应变软化现象,围压越大应变软化现象越明显。

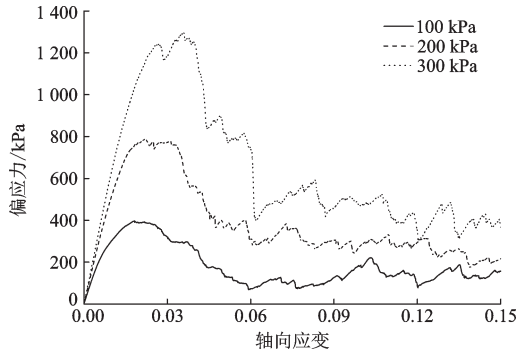


图3 不同围压下四边形颗粒偏应力—应变曲线

Fig.3 The deviatoric stress-strain curve of the quadrangular particles under different confining pressure

图4为围压200 kPa时不同形状颗粒的偏应力—应变曲线。结果显示,相同围压下,偏应力峰值随着形状系数的增加而减小,即颗粒形状越接近圆形,偏应力峰值越低。因为颗粒越接近圆形,表面越光滑,而不规则颗粒之间的接触面积比较大,摩擦系数在模型中发挥的作用越大,同时颗粒形状越不规则,颗粒与颗粒之间的镶嵌程度越深,咬合作用越明显,故在力学性质表现为材料的抗剪强度越大。同时,可以看出颗粒形状系数越小,材料初始模量越大。图5为材料偏应力峰值强度随形状系数的变化关系曲线。图中可以更加明显的看出,围压越大,峰值强度随形状系数减小的幅度越大。残余偏应力峰值强度随形状系数的变化规律跟初始强度峰值变化的规律相似。

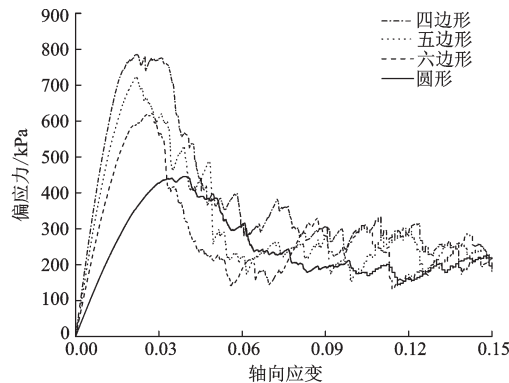


图4 围压200 kPa下不同形状颗粒偏应力—应变曲线

Fig.4 The deviatoric stress-strain curve of different shape particles under confining pressure of 200 kPa

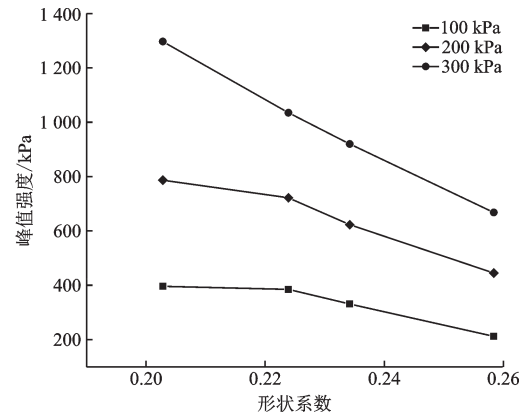


图5 偏应力峰值强度随形状系数变化关系

Fig.5 Variation of peak strength of deviatoric stress with shape coefficient

3.2 剪缩和剪胀特性分析

变形特性是材料最重要的性质之一,双轴实验数值模拟结果显示,不同形状颗粒的材料在相同围压下表现为相似的剪缩与剪胀特性,这里选取围压200 kPa下不同形状颗粒的体应变—轴向应变曲线(图6)来进行说明。由图可以看出,不同颗粒形状试样在加载过程中首先表现为剪缩效应,而且颗粒形状系数越大,剪缩效应越明显,随后表现为剪胀效应;反之,剪胀效应随着形状系数的增加越不明显。究其原因,颗粒越接近圆形,排列方式越单一,故在加载过程中,颗粒发生重新排列的可能性比较小;反之,颗粒在受力情况下,发生旋转、移动都会引起颗粒排列方式的千变万化。

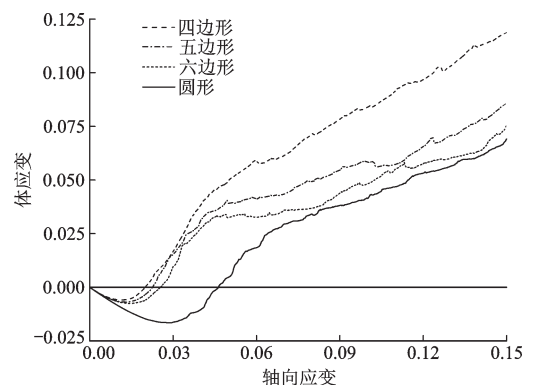


图6 围压200 kPa下体应变—轴向应变关系

Fig.6 Variation of volumetric strain as axial strain under confining pressure of 200 kPa

3.3 剪切带特征分析

室内实验无法观察剪切带的形成,而颗粒流双轴实验数值模拟可以通过位移矢量清楚地看到试

样剪切带的形成。本文选取围压为 300 kPa,从微观结构方面对颗粒位移和剪切带特征进行说明。图 7 所示为围压 300 kPa 下加载完成后颗粒位移矢量图。可以看出,四边形颗粒最终呈现 X 剪切,并且在剪切带内颗粒旋转比较明显,是因为四边形颗粒簇的布拉斯克斯形状系数最小,颗粒越不规则,所以与其它形状颗粒簇的剪切变形产生明显的不同,图 7(b~d)中,颗粒变形特征比较相似,X 型剪切出现在剪切带两端,但是没有四边形颗粒簇明显,剪切带内的颗粒位移、翻转比较杂乱,总体上剪切带比较容易观察。

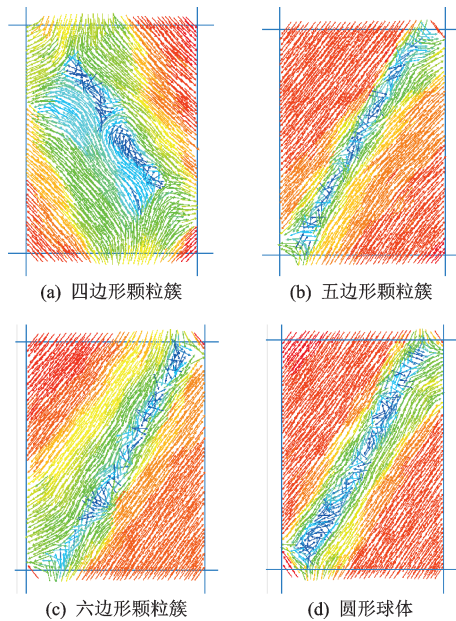


图 7 围压 300 kPa 下的位移矢量

Fig.7 Displacement vector graph under confining pressure of 300 kPa

3.4 宏观参数与形状系数的关系

双轴实验数值模拟与室内实验结果相匹配是最常用的标定参数的方法,本文在双轴实验数值模型中引入摩尔-库仑准则,分别作出不同形状颗粒簇的抗剪强度包络线(图 8),得出无粘性粗颗粒的

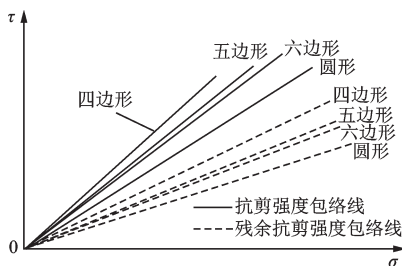


图 8 抗剪强度包络线

Fig.8 Shear strength envelope curve

宏观抗剪强度参数。可以看出,形状系数不同,抗剪强度包络线有明显不同。图 9 建立了内摩擦角 φ 与颗粒 Blaschke 形状系数 s 的关系。可以看出, φ 随着 s 的增加而减小,并且近似呈线性关系;同样,残余内摩擦角也随着 s 的增加而减小,但是它的线性关系较前者稍有不明显,总体上线性相关。

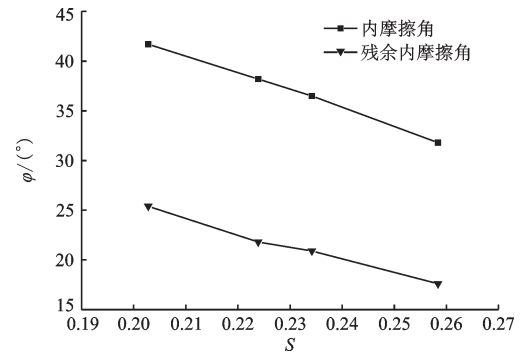


图 9 内摩擦角随形状系数的变化关系

Fig.9 The relationship between the internal friction angle and the shape coefficient

4 结 论

基于颗粒流理论,以 PFC2D 为平台建立了不同形状的颗粒簇,进行双轴实验的数值模拟,对粗粒料宏观力学性质进行分析,并且从微观结构上解释了试样内部颗粒的运动特征,最后引入摩尔-库仑准则,求取粗粒料宏观抗剪强度参数 φ 值,并建立内摩擦角与形状系数的关系,主要研究结果如下:

(1) 不同形状粗粒料的峰值强度随着形状系数的增加而减小,残余强度有着相似的规律,即形状越不规则其峰值强度越高,数值模型强度在达到峰值以后,出现明显的应变软化现象,而且围压越大,软化现象越明显。

(2) 粗粒料初始切线模量随着形状系数的增加而减小,即粗粒料形状越不规则初始模量越大,在加载过程中,粗粒材料先剪缩后剪胀,形状系数越小,剪缩效应越不明显;反之,剪胀发生时,形状系数越小,剪胀效应越明显。

(3) 四边形颗粒的粗粒料,剪切明显呈 X 型剪切,剪切带内颗粒旋转、位移比较明显,其它三种形状的颗粒材料在剪切带两端也有 X 型剪切,但没有四边形明显,剪切带内的颗粒有旋转、位移现象。

(4) 粗粒料内摩擦角随着形状系数的增加而减小,近似呈线性关系,残余内摩擦角随着形状系数

的增加而增加,整体呈线性关系。

总而言之,粗粒料形状对材料的宏观力学性质和变形特征有很大的影响。在工程设计中充分考虑粗粒料形状对工程力学性质的影响,能够提高设计精度。本文的结果说明粗粒料形状越不规则,其抗剪强度越大,所以工程实践中在条件允许的情况下,选择的材料形状应尽可能不规则,以提高构筑物强度。

参考文献:

- [1] 曲 微.基于事故案例分析的铁路行车安全评价[D].大连:大连交通大学,2014.
Qu W. Railway traffic safety evaluation based on accident case study[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [2] Liu J, Liu F, Kong X, et al. Large-scale shaking table model tests of aseismic measures for concrete faced rock-fill dams [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2014, 56(1): 152-163.
- [3] Yuan L, Liu X, Wang X, et al. Seismic performance of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by large-scale shaking table tests [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2014, 56(1): 1-12.
- [4] Iai S, Kameoka T. Finite element analysis of earthquake induced damage to anchored sheet pile quay walls [J]. Soils & Foundations, 2008, 33(1): 71-91.
- [5] Yksel Y, Isik N S, Cevik E. Seismic response of a rubble mound breakwater in Turkey [J]. Maritime Engineering, 2004, 157(4): 151-161.
- [6] Su H L, Lee S J, Park J G, et al. An experimental study on the characteristics of polyurethane-mixed coarse aggregates by large-scale triaxial test [J]. Construction & Building Materials, 2017, 145: 117-125.
- [7] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等.粗粒料大三轴试验研究进展[J].岩土力学,2002,23(2):217-221.
Liu M Ch, Gao Y F, Liu H L, et al. Development of study a large scale triaxial test of coarse-grained materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 217-221. (in Chinese)
- [8] 张 兵,高玉峰,毛金生,等.堆石料强度和变形性质的大型三轴试验及模型对比研究[J].防灾减灾工程学报,2008,28(1):122-126.
Zhang B, Gao Y F, Mao J Sh, et al. Comparative research on the strength and deformation characteristics of rockfill materials in large-scale triaxial experiments and models analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(1): 122-126. (in Chinese)
- [9] Indraratna B, Wijewardena L S S, Balasubramaniam A S. Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill [J]. Géotechnique, 1993, 43(1): 37-51.
- [10] 秦红玉,刘汉龙,高玉峰,等.粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J].岩土力学,2004,25(10):1575-1580.
Qin H Y, Liu H L, Gao Y F, et al. Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1575-1580. (in Chinese)
- [11] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等.堆石料变形与强度特性的大型三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(7):1104-1111.
Liu M Ch, Gao Y F, Liu H L, et al. Large-scale triaxial test study on deformation and strength characteristics of rock fill materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1104-1111. (in Chinese)
- [12] 蒋应军,李 颀,马庆伟,等.级配碎石力学性能影响因素的试验研究[J].交通科学与工程,2010,26(1):6-13.
Jiang Y J, Li D, Ma Q W, et al. Experimental research on influencing factors of strength properties for graded broken stone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26(1): 6-13. (in Chinese)
- [13] 武利强,朱 晟,章晓桦,等.粗粒料试验缩尺效应的分析研究[J].岩土力学,2016,37(8):2187-2197.
Wu L Q, Zhu Sh, Zhang X H, et al. Analysis of scale effect of coarse-grained materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2187-2197. (in Chinese)
- [14] 李 翀,何昌荣,王 琛,等.粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J].岩土力学,2008,29(增1):567-570.
Li Ch, He Ch R, Wang Ch, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup1): 567-570. (in Chinese)
- [15] 李坤蒙,李元辉,徐 帅,等.PFC~(2D)数值计算模型微观参数确定方法[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(4):563-567.
Li K M, Li Y H, Xu Sh, et al. Method to Determine Microscopic Parameters of PFC2D Numerical Model [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(4): 563-567. (in Chinese)
- [16] 蒋应军,任蛟龙,徐寅善,等.级配碎石力学性能的颗粒流数值模拟方法[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(5):699-704.
Jiang Y J, Ren J L, Xu Y Sh, et al. Simulation method of mechanical properties of graded broken stone based on particle flow code [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(5): 699-704. (in Chinese)

- [17] 邵磊,迟世春,贾宇峰.堆石料大三轴试验的细观模拟[J].岩土力学,2009,30(增1):239-243.
Shao L, Chi Sh Ch, Jia Y F. Meso-mechanical simulation of a large scale triaxial test of rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup1): 239-243. (in Chinese)
- [18] 杨贵,肖杨,高德清.粗粒料三维颗粒流数值模拟及其破坏准则研究[J].岩土力学,2010,31(增2):402-406.
Yang G, Xiao Y, Gao D Q. Study of three-dimensional particle flow numerical simulation and failure criterion for coarse-grained soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup2): 402-406. (in Chinese)
- [19] 周博,汪华斌,赵文锋,等.黏性材料细观与宏观力学参数相关性研究[J].岩土力学,2012,33(10):317-318.
Zhou B, Wang H B, Zhao W F, et al. Analysis of relationship between particle mesoscopic and macroscopic mechanical parameters of cohesive materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 317-318. (in Chinese)
- [20] 杨贵,许建宝,刘昆林.粗粒料颗粒破碎数值模拟研究[J].岩土力学,2015,36(11):3301-3306.
Yang G, Xu J B, Liu K L. Numerical simulation of particle breakage of coarse aggregates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3301-3306. (in Chinese)
- [21] 马刚,周伟,常晓林,等.堆石料缩尺效应的细观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2473-2482.
Ma G, Zhou W, Chang X L, et al. Mesoscopic mechanism study of scale effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2473-2482. (in Chinese)
- [22] 童朝霞,周敏,张连卫,等.各向异性颗粒材料双轴压缩试验的离散元数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增2):4227-4232.
Tong Zh X, Zhou M, Zhang L W, et al. Numerical modelling of biaxial compression tests for granular materials with inherent anisotropy using DEM [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup2): 4227-4232. (in Chinese)
- [23] Mahmood Z, Iwashita K. A simulation study of microstructure evolution inside the shear band in biaxial compression test [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(6): 652-667.
- [24] 蒋尧,杨贵,刘汉龙.堆石料双轴试验数值模拟研究[J].防灾减灾工程学报,2013,33(3):300-304.
Jiang Y, Yang G, Liu H L. Effect of particle on simulating particle breakage of rockfill by biaxial tests [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation on Engineering, 2013, 33(3): 300-304. (in Chinese)
- [25] 龚健,刘君.颗粒形状对散体材料剪切行为的影响 [C]//颗粒材料计算力学会议,兰州:兰州大学出版社,2014:68-73.
Gong J, Liu J. Effect of particle shape on shear behavior of bulk materials [C]//Proceedings of the conference on Computational Mechanics for granular materials, Lanzhou: Lanzhou University Press, 2014: 68-73. (in Chinese)
- [26] 石崇,徐卫亚.颗粒流数值模拟技巧与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
Shi Ch, Xu W Y. Technique and practice of numerical simulation of particle flow [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [27] 吴继敏.应用图像分析法评价花岗岩结构特征[J].河海大学学报(自然科学版),1998(4):1-7.
Wu J M. Estimation of granite texture characteristics by image analysis [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 1998(4): 1-7. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)