

# 粗粒含量对砾类土直剪过程中强度与变形特性影响的离散元模拟研究\*

徐肖峰<sup>①</sup> 魏厚振<sup>①</sup> 孟庆山<sup>①</sup> 韦昌富<sup>①</sup> 李永和<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

(<sup>②</sup>浙江省水利河口研究院 杭州 310020)

**摘要** 粗粒含量对砾类土的工程力学特性具有重要的影响。本文对4组不同粗粒含量的强风化玄武岩砾类土进行了大型直剪试验,并获取相关的强度与变形参数。基于离散单元法颗粒流理论,采用粒间作用为平行黏结模型的圆球模拟土颗粒,建立了4种不同粗粒含量砾类土直剪的离散单元模拟的计算模型,并进一步校正了颗粒单元细观参数,模拟了不同粗粒含量砾类土100kPa垂直压力时的应力应变关系、垂直变形以及剪切带上的土颗粒运动与颗粒间作用力传递的影响特性,分析了粗粒含量对砾类土宏观及细观力学性质的影响机理。结果表明:砾类土表现出的粗粒含量越大强度越高的本质是由于随粗粒含量增加时,土颗粒间平均刚度增加及颗粒间的咬合作用使得摩擦系数增加,采用平行黏结模型能较好的拟合峰值前剪应力-剪位移曲线,但是峰后曲线段尤其对软化现象的适应性不是十分理想;垂直位移-剪位移模拟值与试验值存在一定的偏差;随着粗粒含量的增加,最大剪应力时粗颗粒对力链的控制表现得愈明显,相应的剪切带厚度约为剪切盒高度的1/3~1/5,并随粗粒含量增加而增大。

**关键词** 大型直剪 粗粒含量 PFC<sup>2D</sup> 砾类土

中图分类号: O319.56 文献标识码: A

## DEM SIMULATION ON EFFECT OF COARSE GRAVEL CONTENT TO DIRECT SHEAR STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF COARSE-GRAINED SOIL

XU Xiaofeng<sup>①</sup> WEI Houzhen<sup>①</sup> MENG Qingshan<sup>①</sup> WEI Changfu<sup>①</sup> LI Yonghe<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>China State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

(<sup>②</sup>Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020)

**Abstract** Mechanical behaves of coarse grained soil is greatly influenced by the content of coarse gravels. The shear characteristics of four groups of strong weathered basalt coarse grained soils are investigated under different coarse gravel contents on large-scale direct shear apparatus to obtain the strength and deformation parameters in this paper. Based on the theory of discrete element method( DEM) ,four direct shear samples under vertical pressure of 100kPa are carried out using the parallel bond model( PBM) with multiplicity coarse gravel content. The parameters

\* 收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-22.

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目资助(2009318802074),浙江省重大科技专项(2009C13010)和国家自然科学基金项目(19872211)资助.

第一作者简介: 徐肖峰,主要从事岩土力学试验方面的工作. Email: xu\_xiaofeng@live.cn

are calibrated. Then we simulate the relationship among shear stress, shear deformation and vertical deformation. The simulation also simultaneously analyzes the particle movement and force in order to settle the mechanism for the fact that coarse content affects shearing properties. Results show that the inheritance for shear strength increasing with the increase of coarse gravel content at the same vertical stress is due to the increase of particle stiffness and the increase of friction coefficient. The peak of stress-strain curve can be well simulated by the PBM. But the soften segment cannot be well fitted. Simulation of shear-vertical displacement curve does not fit perfectly to the testing value. The effects of coarse particles on the peak force chains were significantly evident than those of fine particles during the shearing process. It is considered that the vortex area is the thickness of shear band, approximately  $1/3 - 1/5$  of the height of shear box.

**Key words** Large-scale direct shear, Content of coarse gravel, PFC<sup>2D</sup>, Coarse grained soils

## 1 引言

随着西南丘陵山区道路等基础设施建设的蓬勃发展,人工高切坡的稳定性越来越成为岩土工作者所热衷的问题。由于差异风化的作用,造成开挖前不同埋深处岩土体颗粒级配的显著差异<sup>[1]</sup>。郭庆国<sup>[2]</sup>提出以5mm为粗细粒的分界线,并将粗料含量30%及70%作为两个特征点。岩土体的内摩擦角和咬合力是决定边坡稳定性的主要参数。为揭示不同粗粒含量土体剪切的力学特性,诸多学者围绕不同性质的土样展开了粗粒含量对强度等指标影响的直剪试验,得出咬合力、内摩擦角、颗粒破碎、压实性、渗透性等均与粗粒含量相关<sup>[3~6]</sup>。但是,由于砾类土的现场与室内试验成本昂贵、耗时,且试验数据易受外界因素影响。因此,开展粗粒土土工试验的数值模拟作为试验的补充,同时揭示细观力学特性是十分必要的<sup>[7]</sup>。离散元是一种适用于模拟散体材料数值方法,自1979年Cundall<sup>[8]</sup>提出后取得了可观的成果。基于二维DEM方法,Liu等<sup>[9,10]</sup>、Thornton等<sup>[11]</sup>、蒋明镜等<sup>[12]</sup>对直剪进行模拟,分析颗粒群的微观运动并修正了剪切盒内壁摩擦对剪切强度造成的影响。但鉴于二维孔隙率与试样真实孔隙率间存在一定的差别等因素<sup>[13]</sup>,Fu<sup>[14]</sup>、Johanns等<sup>[15]</sup>、贾学明等<sup>[16]</sup>、Sadek等<sup>[17]</sup>采用DEM方法对直剪试验进行三维仿真,试图更加真实地反映出颗粒在剪切过程中的力学及物理现象。

上述工作多通过宏观参数反推细观参数,根据颗粒级配考虑不同粗粒含量对试样强度的影响尚属少见。贾学明等<sup>[16]</sup>将10mm作为粗细颗粒分界进行三维离散元分析,但普遍的是采用郭庆国<sup>[2]</sup>的建议,在PFC<sup>3D</sup>中建立粒径5mm大型直剪试样颗粒数多达14万之多,运行极为耗时。故本文在采用大型

直剪试验获得砾类土宏观力学参数的基础上,根据试验结果采用PFC<sup>2D</sup>进行数值分析,着重研究以下几个关键问题:(1)在不考虑颗粒破碎的假设条件下,建立该种砾类土在100kPa垂直压力时宏观与细观力学参数的联系,分析剪应力-垂直位移-剪位移之间的关系;(2)揭示剪切过程中的不同粗粒含量试样颗粒受力及运动情况。

## 2 室内试验研究

### 2.1 试验设备

试验用的直剪仪由剪切盒、垂直和水平加载装置、液压系统、机架、计算机控制与数据采集系统等部分组成,两个方形刚性剪切盒的尺寸均为长×宽×高=500mm×500mm×200mm(剪切缝10mm)。垂直方向施加刚性荷载后水平方向采用应变控制,上剪切盒向右、下剪切盒向左移动,保持上下剪切盒的剪切速率一致从而保证垂直压力在试样的中心,系统自动采集推力、水平和垂直位移等数据。

### 2.2 试验方案及过程

为了获得不同粗粒含量条件下砾类土的抗剪强度指标,下文按文献[2]约定粒径5mm为粗细粒分界线,配制 $P_5$ (粒径>5mm颗粒的质量百分数)分别为0%、30%、50%、70%共计4组试样。为消除尺寸效应,规范<sup>[18]</sup>规定 $D/d_{\max}=8\sim 12$ , $H/d_{\max}=4\sim 8$ ( $D$ 为剪切盒长; $H$ 为剪切盒高; $d_{\max}$ 为最大试样粒径尺寸)。本次试验选用的最大粒径为40mm,各组试样级配曲线见图1。试验土平均比重2.79,控制试样干密度 $1.73\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,试验时含水率5%。每组试样垂直压力分别为100kPa、200kPa、400kPa、800kPa。配料搅拌均匀后薄膜闷料24h,剪切前分3层填装进直剪盒,层间刨毛,装样完毕后施加垂直压

力,垂直压力控制在 125s 内施加完毕,然后采用快剪控制上下剪切盒的剪切速率均为  $5\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,剪应变达到 15% (即剪位移为 75mm) 时停止剪切。由试验获得的抗剪强度咬合力  $C$  及内摩擦角  $\varphi$  指标列于表 1。

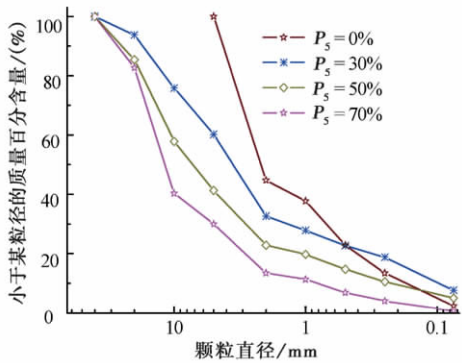


图 1 试验砾类土级配曲线

Fig. 1 Grading curves of granular soils of tested

### 3 离散元模拟

#### 3.1 模拟系统的建立

结合室内试验情况,本次 PFC<sup>2D</sup> 模拟剪切盒尺寸为宽 × 高 = 500mm × 400mm,采用 8 个墙体模拟剪切盒边界,设置墙体的刚度远大于颗粒刚度。然后在墙体区域内按试验测得的砾类土颗粒级配采用圆球代替土颗粒,模拟时球的最大直径  $d_{\max} = 40\text{mm}$ ,最小直径  $d_{\min} = 1\text{mm}$ ,并假设颗粒为刚性的。将细颗粒视作有黏性的填充材料,颗粒间采用平行黏结模型,该模型球包含 8 个球参数分别为球的法向和切向刚度 ( $K^n$  和  $K^s$ ),球的摩擦系数 ( $\mu$ ),黏结法向和切向刚度 ( $\bar{k}^n$  和  $\bar{k}^s$ ),黏结法向和切向强度 ( $\bar{\sigma}_c$  和  $\bar{\tau}_c$ ) 及黏结半径 ( $\bar{R}$ ) 其机理如图 2 所示,总接触力  $\bar{F}_i$  和力矩  $\bar{M}_3$  表示平行黏结在颗粒 B 上的作用。当黏结形成时, $\bar{F}_i$  和  $\bar{M}_3$  均初始化为零,之后在黏结处由位移增量和旋转增量引起的弹性力和力矩增量

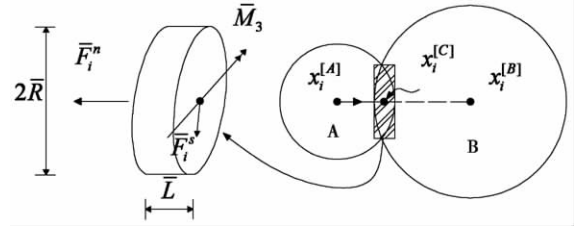


图 2 平行黏结模型受力示意图

Fig. 2 Diagram showing the PFC<sup>2D</sup> parallel bond model

叠加在当前值中。当颗粒间法向应力超过黏结法向强度或者剪切应力超过黏结切向强度,即造成黏结模型失效。试验时,用伺服加载保持垂直压力恒定,垂直压力施加后典型的直剪模型如图 3 所示。

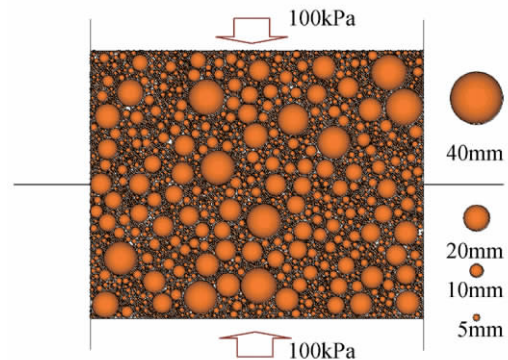


图 3 粗粒含量 50% 直剪的 PFC<sup>2D</sup> 模型

Fig. 3 PFC<sup>2D</sup> model of large-scale direct shear with  $P_s = 50\%$

#### 3.2 微观参数的确定

模拟时,需要确定其中的一部分参数然后用以校正其他参数。根据前人的经验,由于剪切盒内壁光滑,故忽略墙的摩擦系数,并假设球的参数满足:  $K^n/K^s = 1, \bar{k}^n/\bar{k}^s = 1, \bar{\sigma}_c = C \cot \varphi, \bar{\tau}_c = C^{[16-17]}$ 。式中  $C, \varphi$  分别为室内试验获得的咬合力和内摩擦角。考虑粗颗粒间的咬合作用,假设粗粒含量大的试样摩擦系数相应增加,经过大量试算,本次模拟采用具体参数见表 1,由试算发现在垂直压力较高的情况

表 1 模型中圆球的基本参数

Table 1 Parameters for balls in the model

粗粒含量/ (%)	颗粒数/ 个	墙体参数		颗粒参数						
		刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	黏结 半径	黏结法向 强度/kPa	黏结切向 强度/kPa	摩擦 系数	颗粒刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	黏结刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	咬合力/ kPa	内摩擦角/ (°)
0	13155	$1 \times 10^9$	0.50	133.44	62.99	0.35	$4 \times 10^6$	$8.5 \times 10^5$	60.70	22.86
30	10120	$1 \times 10^9$	0.50	115.77	55.89	0.50	$5 \times 10^6$	$8 \times 10^5$	53.04	25.70
50	7070	$1 \times 10^9$	0.50	89.60	50.84	0.60	$6 \times 10^6$	$7 \times 10^5$	45.44	29.86
70	4566	$1 \times 10^9$	0.50	154.22	86.44	0.70	$8 \times 10^6$	$4 \times 10^5$	77.91	29.84

下模拟的剪应力-剪位移曲线与试验值符合不良,故本次分析仅限于垂直压力为 100kPa 粗粒含量 0%~70% 的 4 个试样。从表中参数可见,由于不同粗粒含量砾类土颗粒级配的显著差异及不同粒径颗粒刚度的不一致造成了粗粒含量小的试样平均刚度比粗粒含量大的试样明显偏小。而细颗粒的填充也提高了试样的黏结强度。

## 4 试验与模拟结果分析

### 4.1 剪应力-剪位移关系

垂直压力 100kPa 不同粗粒含量试验及模拟的剪应力-剪应变曲线如图 4 所示。可以看出,试验曲线呈现出明显的应变软化,采用离散元方法 PBM 模型模拟得到的结果能较好的模拟峰值剪应力及峰值剪应力出现时的剪位移,但是对于峰后曲线段的适应性不是十分理想,存在一定的偏差。

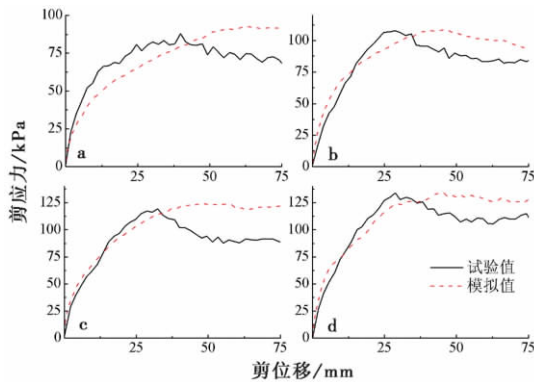


图 4 垂直压力 100kPa 时试验及模拟剪应力-剪位移曲线  
Fig. 4 Experimental and simulation of shear stress vs. shear displacement curve under pressure of 100kPa  
a. 粗粒含量 0%; b. 粗粒含量 30%;  
c. 粗粒含量 50%; d. 粗粒含量 70%

### 4.2 垂直位移-剪位移关系

在对试验结果分析后发现,在垂直压力 100kPa 时,除完全由细颗粒组成的试样在剪切过程中持续剪缩外,其他试样均先剪胀后剪缩,对模拟时上下两墙体位移进行监控,获得模拟剪切过程中垂直位移-剪位移的关系与试验进行对比(图 5),文中约定剪胀为负剪缩为正。

模拟获得的垂直位移-剪位移曲线与试验值之间仍然存在较大的差异。室内试验获得的垂直位移在剪切后期趋于稳定值,而模拟垂直位移在剪位移为 30mm 后与试验曲线出现明显偏差,并随着剪位

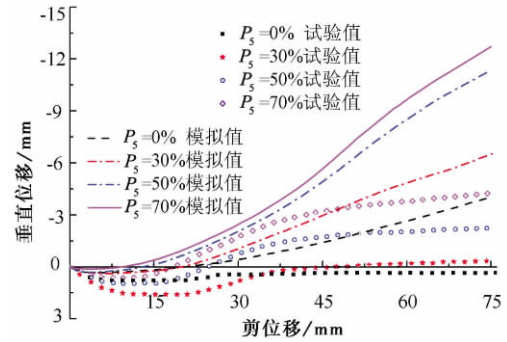


图 5 垂直压力 100kPa 时试验及模拟垂直位移-剪位移曲线  
Fig. 5 Experimental and simulation of vertical displacement vs. shear displacement curve under pressure of 100kPa

移的增加垂直剪胀更加明显。剪位移 75mm 时,粗粒含量为 70% 试样的偏差达到了 8.48mm,粗粒含量为 50% 试样达到了 9.01mm。经过分析,其原因之一是模拟时假设土颗粒是刚性圆球,这与砾类土颗粒真实形状存在差异,真实土体由于颗粒间咬合造成细粒土不能很好的填充粗颗粒破损不规则部分的空隙,从而造成在数值试样施加垂直压力后达到平衡时的孔隙率比室内真实试样小,即试样更为密实,故在剪切过程的剪胀更为明显;其二是室内试验由于剪切面附近颗粒破碎,造成减缩量增加;其三是为了防止模拟剪切时颗粒在剪切临空区的溢出,在两侧设置了两个横向墙体,与试验剪切盒临空且有部分颗粒掉出的情况不完全相符。

### 4.3 颗粒运动及受力分析

为了揭示剪切过程中土颗粒在直剪盒内运动情况,对剪切过程中瞬时速度进行分析,图 6a~d 为不同粗粒含量试样剪应力达到最大值时的颗粒运动的瞬时速度,其中上剪切盒中部以上区域内土颗粒向右近于水平运动,下剪切盒中部以下土颗粒近于向左水平运动,这与试验中上剪切盒向右下剪切盒向左的运动趋势是一致的,而其余的颗粒表现出涡状的速度场(椭圆标注的部分),即在剪切面附近既存在颗粒的水平运动亦有明显的翻滚,笔者将涡状速度场区域视作剪切带区域,其厚度约为剪切盒高度的 1/3~1/5,并明显可见随着粗粒含量的增大,涡状区的范围也越大,说明粗粒含量对砾类土在剪切过程中局部剪切带具有显著影响。

图 7a~d 为粗粒含量 0%~70% 砾类土在 100kPa 垂直压力作用下剪切过程中达到最大剪应力时剪切盒内的力链分布情况,可以看出在剪切过

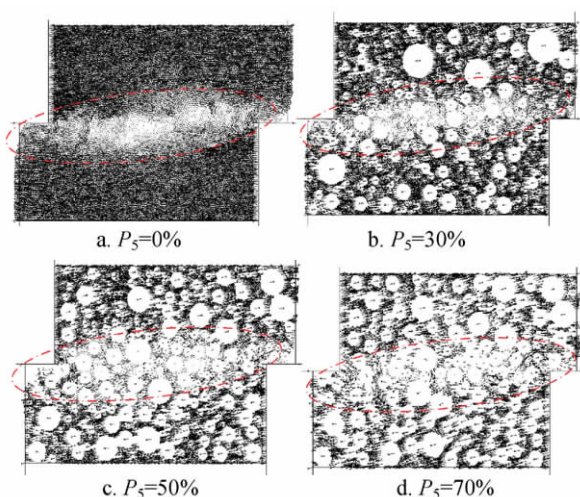


图6 不同  $P_5$  砾类土在 100kPa 垂直压力剪应力达到最大值时颗粒瞬时速度场

Fig. 6 Particle instantaneous velocity field while shear stress reaches the maximum value at vertical pressure of 100kPa with different  $P_5$

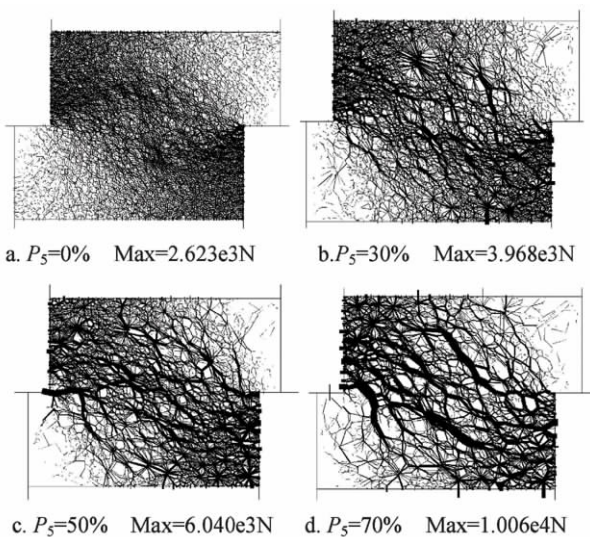


图7 不同  $P_5$  砾类土在 100kPa 垂直压力时剪应力达到最大值时力链

Fig. 7 Peak force chains while shear stress reaches the maximum value at vertical pressure of 100kPa with different  $P_5$

程中应力方向发生明显的偏转,在达到最大剪应力时近乎平行于上剪切盒左侧与下剪切盒右侧的连线方向。上剪切盒右上角及下剪切盒左下角力的作用微弱。随着粗粒含量从 0% 增加到 70%,力链中最大力值不断增加,分别为 2623N、3968N、6040N 和 10060N,表明粗颗粒对剪切过程的剪应力值有控制作用,而且粗颗粒的颗粒刚度较细颗粒大,从而造成

剪切过程中剪胀更为明显。另外,细颗粒试样在剪切过程中力的传递比较均匀,但是粗颗粒组成的试样对粗颗粒土本身的强度依赖比较明显。随着造成的颗粒破碎亦会明显高于细颗粒组成的试样,其主要原因是随着粗颗粒的增加颗粒的平均配位数减小造成接触力增加。

## 5 结 论

通过不同粗粒含量强风化玄武岩砾类土的试验结果,并对 100kPa 垂直压力下的土样的直剪过程中的土样宏观应力应变以及土颗粒细观受力与运动的离散元模拟分析,主要得出了以下结论:

(1) 砾类土表现出的粗粒含量越大强度越高的本质是由于随粗粒含量增加时,土颗粒间平均刚度增加及颗粒间的咬合作用造成摩擦系数的增加,采用平行黏结模型能较好的拟合峰值前剪应力-剪位移曲线,但是峰后曲线段尤其对软化现象的适应性不是十分理想。

(2) 垂直位移-剪位移模拟值与试验值存在一定的偏差,表现为在剪位移 30mm 之后模拟值出现持续剪胀,而试验垂直位移趋于稳定值,其主要原因是颗粒刚性假设及剪切后剪切盒未临空与试验情况的差别。

(3) 随着粗粒含量的增加,最大剪应力时粗颗粒对力链的控制表现得愈明显,其原由是粗粒含量增加时颗粒的平均配位数减小。将速度场涡状区域视作直剪剪切时的剪切带,其厚度约为剪切盒高度的  $1/3 \sim 1/5$ ,并随粗粒含量增加而增大。

## 参 考 文 献

- [1] 韩刚,赵其华,彭社琴. 峨眉山玄武岩岸坡深部差异风化岩体特征及成因[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1547 ~ 1553.  
Han Gang, Zhao Qihua, Peng Sheqin. Characteristics and formation mechanism of deep differential weathering rock mass in Emei mountain basalt canyon slope. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1547 ~ 1553.
- [2] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.  
Guo Qingguo. The engineering properties and application of coarse granined soil. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1998.
- [3] 饶锡保,何晓民,刘鸣. 粗粒含量对砾质土工程性质影响的研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(1): 21 ~ 25.

- Rao Xibao, He Xiaomin, Liu Ming. Influence of coarse-grained content on engineering properties of gravelly soil. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, **16**(1): 21 ~ 25.
- [4] 刘松玉, 童立元, 邱钰, 等. 煤矸石颗粒破碎及其对工程力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 505 ~ 510.
- Liu Songyu, Tong Liyuan, Qiu Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 505 ~ 510.
- [5] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 48 ~ 51.
- Wei Houzhen, Wang Ren, Hu Mingjian, et al. Strength behavior of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou ravine. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 48 ~ 51.
- [6] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒含量对散体岩土颗粒破碎及强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3649 ~ 3654.
- Wang Guangjin, Yang Chunhe, Zhang Chao, et al. Experimental research on particle breakage and strength characteristics of rock and soil materials with different coarse-grain contents. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3649 ~ 3654.
- [7] 周凤玺, 赖远明. 冻结砂土力学性质的离散元模拟[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 4016 ~ 4020.
- Zhou Fengxi, Lai Yuanming. Simulation of mechanical behavior for frozen sand clay by discrete element method. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 4016 ~ 4020.
- [8] Cundall PA, Strack ODL. A discrete numerical model for granular assemblies. Géotechnique, 1979, **29**(1): 47 ~ 65.
- [9] 刘斯宏, 徐永福. 粒状体直剪试验的数值模拟与微观考察[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(3): 288 ~ 292.
- Liu Sihong, Xu Yongfu. Numerical simulation for a direct box shear test on granular material and microscopic consideration. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(3): 288 ~ 292.
- [10] Liu SH, Matsuoka H. Microscopic interpretation on a stress-dilatancy relationship of granular materials [J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(3): 73 ~ 84.
- [11] Thornton C, Zhang L. Numerical simulations of the direct shear test [J]. Chemical Engineering and technology, 2003, **26**(2): 153 ~ 156.
- [12] 蒋明镜, 王富周, 朱合华, 等. 密实散粒体宏观特性的直剪试验离散元数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, **38**(5): 538 ~ 544.
- Jiang Mingjing, Wang Fuzhou, Zhu Hehua, et al. Dem simulation of macro-micro mechanical properties of dense granular materials in the direct shear test. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, **38**(5): 538 ~ 544.
- [13] 张刚. 管涌现象微观机理的模型试验与颗粒流数值模拟研究(博士学位论文)[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- Zhang Gang. Researches on Meso-Scale Mechanism of Piping Failure by Means of Model Test and Pfc Numerical Simulation. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [14] Fu Y. Experimental Quantification and DEM Simulation of Micro-Macro Behaviors of Granular Materials Using X-Ray Tomography Imaging [D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2005.
- [15] Härtl J, Ooi J Y. Experiments and simulations of direct shear tests: Porosity, contact friction and bulk friction [J]. Granular Matter, 2008, **10**(4): 263 ~ 271.
- [16] 贾学明, 柴贺军, 郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2695 ~ 2703.
- Jia Xueming, Chai Hejun, Zheng Yingren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2695 ~ 2703.
- [17] Sadek M A, Chen Y, Liu J. Simulating shear behavior of a sandy soil under different soil conditions [J]. Journal of Terramechanics, 2011, **48**(6): 451 ~ 458.
- [18] 中华人民共和国水利部. SL237 ~ 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL237 ~ 1999 Specification of soil test. Beijing: China Planning Press, 1999.