【土木建筑工程 / Architecture and Civil Engineering】

粗粒土大型直剪试验宏观细观研究与离散元模拟

王晓帅, 王子寒, 景晓昆, 肖成志

河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401

摘 要: 为研究粗粒土剪切试验过程中宏观力学特性与颗粒细观运动规律, 采用可视化大直剪仪对不同级配粗粒土进行剪切试验, 利用图像处理技术对宏观参数变化规律进行分析, 再通过离散元数值模拟研究试样内部颗粒运动规律. 研究发现, 剪应力-累计应变关系曲线属于剪切硬化型, 颗粒在剪切过程中的破碎形态以接触点侵蚀破碎为主; 对颗粒长轴定向、平面孔隙率和配位数的分析发现, 剪切过程中颗粒发生翻滚重排以及细粒填充作用; 直剪试验图像分析及离散元数值模拟均发现, 剪切带不是严格按照水平主剪切面发展, 而是与向上突起的弧形副剪切面共同形成拱形剪切带.

关键词: 土力学; 直剪试验; 剪切带; 离散元; 粗粒土; 可视化

中图分类号: TU43

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.03279

A macro-micro study and distinct element simulation on large-scale shear test of coarse-grained soil

WANG Xiaoshuai, WANG Zihan, JING Xiaokun, and XIAO Chengzhi

School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China

Abstract: In order to study the macro mechanical properties and particle micro motion law in the shear test of coarse-grained soil, we carry out the shear test of different gradations of coarse-grained soil by using the visualized large direct shear apparatus, and analyze the change law of macro and micro parameters by using the image processing technology, and then investigate the particle motion law in the sample by numerical simulation using the discrete element method (DEM). The results show that the relationship curve between shear stress and cumulative strain in shear tests of coarse-grained soil belongs to the type of shear hardening. The failure mode of particles during shearing process is mainly caused by erosion fracture of contact points. The analysis of rose diagrams, plane porosities and coordination number of particles shows that the particle rollover, rearrangement and fine grained filling occur during the shearing process. The image analyses of tests and the numerical simulation results of DEM show that shear zone in large shear tests is between horizontal main sliding surface and auxiliary surface of protuberant arc.

Key words: soil mechanics; direct shear test; shear zone; distinct element method; coarse-grained soil; visualization

目前中国大型交通、水利等民生工程的建设越来越多, 保证安全使用是重中之重. 作为主要填料

的粗粒土压实性好、抗剪强度高、承载能力高, 且在自然界广泛存在, 在工程中利用率很高. 国内外

Received: 2019-07-18; **Accepted:** 2019-12-22

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51808184); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2016202057)

Corresponding author: Associate professor WANG Zihan. E-mail: wangzihan@hebut.edu.cn

Citation: WANG Xiaoshuai, WANG Zihan, JING Xiaokun, et al. A macro-micro study and distinct element simulation on large-scale shear test of coarse-grained soil [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(3): 279-286. (in Chinese)

岩土工作者对粗粒土基本性质与颗粒破碎等进行了深入试验研究,取得了丰硕成果^[1-9].在数值计算方面,TEJCHMAN 等^[10]通过在二维有限元模型中嵌入破碎机制,模拟平面应变条件下粗粒土固定侧压力下的单向压缩实验,得到剪切带处颗粒变形破碎性质.WEI^[11]对堆石坝材料进行大三轴试验,总结了粗粒土的垮塌变形规律,并通过修正南水模型进行模拟.潘家军等^[12]通过真三轴试验与平面应变试验,在不同主应力的条件下分析粗粒土的应力变形规律,为研究本构模型奠定基础.徐晗等^[13]使用 ABAQUS 对试验进行三维模拟,分析侧壁摩擦系数与初始应力对模拟结果的影响.以上研究多侧重于大三轴试验与有限元模拟的结合,但粗粒土多棱角,常引起三轴仪橡皮膜破裂而导致试验失败,并且三轴仪不利于观察现象.同时,粗粒料堆体是由离散颗粒填筑而成,采用连续介质理论的有限元模拟和真实情况有差距.本研究通过在大直剪仪侧壁上开设透明窗口进行细观摄像,用图像处理程序^[14]对细观图像进行分析,不仅可以得到土体的常规力学参数,还能对剪切过程中颗粒的细观组构进行研究,最后利用离散元对直剪试验进行数值模拟,对试样整体的宏观表现和颗粒细观运动规律进行研究,进一步研究粗粒土剪切过程中的细观力学机制.

1 试验概况

1.1 试验仪器

试验所用的主要仪器是河北工业大学生产的大直剪仪,配合透明观测窗口的尺寸,在剪切箱内设置刚性隔板,使得整个剪切试样的侧面都能被观测到.设置隔板后试样尺寸(长×宽×高)为 400 mm×600 mm×210 mm,壁厚 25 mm;试验时上盒固定不动,拉动下盒进行剪切;最大垂直压力 500 kN,最大水平拉(推)力 300 kN;透明观测窗口尺寸(长×高)为 400 mm×210 mm,满足试验要求,试验中采用单反相机(Canon 350D)进行宏细观图像摄录.

1.2 试验材料及方法

试验材料选用天然石灰岩散体颗粒.为分析粒径 d 对试验的影响^[15-16],通过颗粒筛分对 3 组不同级配的试样进行剪切测试,级配曲线如图 1.实际粗粒土工程中土通常必须压密实,相对密实度约在 0.7~0.9.本研究通过控制试样干密度,使粗粒土

的最终压实度为 0.8,颗粒密度为 2.69 g/cm³.受剪切盒尺寸限制,级配试样的粒径范围为 0.025~5.000 cm.试样的相关物理特性指标见表 1.

图 1 粗粒土试样级配曲线

Fig. 1 (Color online) Grading curves of coarse-grained samples

表 1 试样的基本物理特性

Table 1 Physical properties of limestone samples

试样	干密度/(g·cm ⁻³)	不均匀系数	曲率系数
粒径 2~5 cm	1.905	1.652	0.962
粒径 1~2 cm	1.975	1.454	0.960
级配试样	2.080	3.273	8.182

土样分 4 层制备,每层压实至预定高度,装满后静置 24 h,使内部应力分布均匀.受壁厚 25 mm 限制,为防止剪切过程中颗粒掉落,在隔板外侧黏贴 20 mm 厚木板,使有效壁厚达到 45 mm.试验前将下盒由对齐位置反向推进 15 mm,再进行装样.当拉出极限位移 60 mm 时(应变 15%),保证不漏土,对刚性接触面涂抹凡士林来消除边界摩擦.试验先施加不同法向应力 δ_n (静力控制),分别为 100、200、300 和 400 kPa,待其稳定后施加切向拉力(位移控制),速度为 1 mm/min,拉出位移达到 30 mm 时结束试验.数据采样间隔为 1.0 s,摄像间隔为 10.0 s.

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

通过透明观测窗口可清晰看到粗粒土剪切破坏的全过程,剪切过程中没有明显观测到颗粒发生较大破碎的现象.由此可推断,直剪试验中绝大多数破碎以微小破碎为主,细观上表现为接触点侵蚀,造成接触刚度下降,因此粗粒土工程中应首要考虑颗粒接触点侵蚀特性,大块破碎是相对次要因素.

2.2 宏观力学特性分析

图2为剪应力与累计拉出应变曲线。由图2可见, 曲线变化规律基本相同, 都属于剪切硬化型。剪应力随着累计应变增加而增大, 每条曲线的峰值剪应力随着法向应力的增加而增大。剪切过程伴随着颗粒的翻滚、破碎和重排列, 导致曲线存在跳跃点, 并不十分平滑。级配试样曲线随法向应力的增加, 累计应变相同时所需剪应力差值比较均匀, 性

(a) 粒径2~5 cm

(b) 粒径1~2 cm

(c) 级配试样

图2 剪应力-累计应变关系曲线

Fig. 2 (Color online) Shear stress versus cumulative strain

质稳定。

试验中取峰值剪应力为抗剪强度, 将抗剪强度与法向应力的关系进行线性拟合, 得出粗粒土的强度参数如表2。由表2可见, 各组试验结果的离散性较小, 拟合度较大。级配试样工程性质最佳, 拟合得到的假性黏聚力很小, 仅5.92 kPa; 单一粒径范围试样拟合产生很大的假性黏聚力, 强度非线性特性明显增强, 工程性质不佳。

表2 各组试样强度参数

Table 2 Strength parameters of samples

试样	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	拟合度
粒径2~5 cm	65.27	52.3	0.984 2
粒径1~2 cm	46.33	46.4	0.981 1
级配试样	5.92	47.9	0.993 5

2.3 颗粒定向性分析

通过透明观测窗口, 利用分析程序 Geodip 对粗粒土剪切过程进行细观图像分析, 总结颗粒长轴定向、平面孔隙率和平均配位数等细观组构的演化规律, 揭示粗粒土剪切过程的细观机制。

各组试验图像分析结果显示, 颗粒细观参数的演化规律基本一致, 为了避免重复, 本研究仅列出现象最为明显的、粒径范围在2~5 cm的石灰岩粗粒土试样, 在法向应力为400 kPa时颗粒细观组构的演化规律。其他各组试验结果不再赘述。

颗粒的长轴方向排列直接影响粗粒土的宏观力学特性。长轴在各个方向上均匀分布, 则粗粒土的宏观表现为均质的各向同性, 若颗粒长轴在某个方向或者几个方向集中分布, 则表现为各向异性。利用 Geodip 对细观照片进行分析, 发现粒径在2~5 cm的石灰岩粗粒土试样, 在400 kPa法向应力下不同拉出应变时刻的颗粒长轴定向演化如图3。由图3可见, 剪切开始前, 颗粒长轴优选于水平方向(累计拉出应变为0); 随着剪切的进行, 颗粒开始逐步旋转, 颗粒长轴分布比较均匀, 但水平方向仍偏多(累计拉出应变为5%); 进一步剪切, 颗粒继续旋转, 颗粒长轴在竖直方向的分布明显增多(累计拉出应变为10%); 试验结束时颗粒长轴分布又趋于均匀(累计拉出应变为15%), 说明剪切造成颗粒翻滚后又重新排列, 达到新的平衡状态。

2.4 平面孔隙率与平均配位数

剪切过程中, 颗粒旋转和翻滚造成剪胀, 同时

图3 颗粒长轴定向玫瑰图

Fig. 3 (Color online) Rose diagrams of long-axis orientations

接触点破碎成为细小颗粒,不断地填充孔隙,造成孔隙率与颗粒接触点数(配位数)的改变.利用Geodip进行分析,粒径为2~5 cm的试样,在400 kPa法向应力下不同拉出应变时的平面孔隙率和平均配位数分别见图4和图5.其中,平面孔隙率是根据试验中摄录图像的孔隙面积与图像面积的比值确定的.孔隙率短暂增大后(累计应变为5%),随

<http://journal.szu.edu.cn>

着应变的继续增大而减小.平均配位数虽然在累计应变达5%以后,受剪胀作用影响增加趋势有所减缓,但仍随着应变的增大而增加;当累计应变达10%以后,细粒填充重新起主导作用,配位数显著增加.说明在试样的剪胀过程中一直存在颗粒破碎发生,而剪胀作用仅在试验前期对细观参数有显著影响.

图4 平面孔隙率随累计应变变化曲线

Fig. 4 Porosity versus cumulative strain

图5 平均配位数随累计应变变化曲线

Fig. 5 Coordination number versus cumulative strain

2.5 位移场分析

利用图像分析程序 GEODOG 对大直剪试验进行位移场分析,粒径为2~5 cm 试样在400 kPa 法向应力下的不同应变位移场云图如图6.

由图6可见,随着剪切的进行,上、下盒之间存在一条明显的水平主剪切面,在剪切过程中下盒的整体位移总是最大的.但是剪切破坏区域却不是始终沿着水平剪切缝发展.随着剪切的进行,在上盒中下部逐渐形成一条向上凸起的弧形副剪切面,土体发生剪切破坏的剪切带可认为是主、副剪切面之间的拱形区域.

3 离散元数值模拟

大直剪仪的观测区域只能研究土体剪切方向的

图6 位移场云图

Fig. 6 (Color online) The nephograms of displacement fields

侧表面, 不能对试样内部颗粒运动规律进行研究. 离散元数值模拟 (distinct element modeling, DEM) 是对大直剪试验的很好补充, 可对试样内部颗粒运动规律进行全面把握, 进一步研究粗粒土剪切过程中的细观力学机制.

3.1 数值模型的建立

建立模型先在目标位置生成相应的墙体, 尺寸 (长 × 宽 × 高) 与实际直剪试验完全一致, 为 400 mm × 600 mm × 210 mm (图 7). 粒径范围 2 ~ 5 cm 和 1 ~ 2 cm 试样的数值模拟与直剪试验对应, 在粒径范围内随机生成颗粒. 级配试样模拟生成小颗粒的数目过多, 超出计算机处理能力, 因此剔除粒径 1 cm 以下颗粒, 维持级配试样中 2 ~ 5 cm 与 1 ~ 2 cm 的颗粒比例与直剪试验中相同. 使颗粒填满整个剪切盒, 在重力加速度 g 下计算平衡.

参照文献[17]中采用的非线性接触模型, 经由试验测试得出的石灰岩颗粒及刚性墙体接触参数, 来模拟剪切过程中颗粒接触点的侵蚀过程, 法向和切向非线性接触刚度参数分别为

$$K_n^{[A]} = 12.6358 / X_n^{0.15} \quad (1)$$

$$K_n^{[B]} = 4.232 / X_n^{0.15} \quad (2)$$

$$K_s = 8.772 \times 10^{-2} \cdot F_n \cdot (X_s/5)^{-0.5} \quad (3)$$

其中, $K_n^{[A]}$ 、 $K_n^{[B]}$ 和 K_s 分别为石灰岩颗粒法向接触刚度、刚性墙体法向接触刚度和切向接触刚度; X_n 和 X_s 分别为法向和切向接触位移; F_n 为法向接触力. 直剪试验中在墙体表面涂抹凡士林, 因此数值模拟时不考虑刚性墙的切向刚度 (摩擦系数为 0). 颗粒与颗粒之间的摩擦系数设为 1.0. 将位于模型水平向和竖向中心线附近的颗粒染色, 以便于观察颗粒运动 (图 7 (b)).

图7 大直剪试验数值模型

Fig. 7 (Color online) Numerical model of large shear tests

3.2 数值模拟结果分析

图 8 为 3 组数值试验得出的剪应力-累计拉出应变关系曲线. 由图 8 可见, 数值模拟与物理试验结果较为吻合, 都属于剪切硬化型曲线. 粒径为 2~5 cm 的试样曲线在累计应变达到 5% 前, 剪应力增长缓慢, 笔者认为该组试验粒径较大, 竖向边界处颗粒数目较少, 边界效应明显, 而数值计算中颗粒不能如物理试验一样发生破碎, 未能形成整体受力骨

(a) 粒径为 2~5 cm

(b) 粒径为 1~2 cm

(c) 级配试样

图 8 数值计算剪应力-累计应变关系曲线

Fig. 8 (Color online) Shear stress versus cumulative strain in DEM

架; 后期累计应变增加, 颗粒绕关键点, 重新形成受力骨架, 剪应力又开始增大, 与物理试验变化规律重归吻合.

表 3 对比了数值计算和试验测试结果. 由表 3 可见, 粒径在 2~5 cm 和 1~2 cm 的试样数值计算出的抗剪强度和实测值相比, 相对误差明显较小, 最大误差率不足 6%; 而级配试样抗剪强度的相对误差在 14% 左右. 这是因为, 数值计算中无法采用与直剪试验完全一致的颗粒, 尤其是计算容量受限, 细小颗粒无法模拟, 造成一定计算误差. 数值模拟基本符合实测结果, 级配试样由于缺少细小颗粒填充, 计算误差相对较大.

表 3 数值计算与实测结果对比

Table 3 The comparison of the computed and the recorded results

试样	法向应力/kPa	实测抗剪强度/kPa	计算抗剪强度/kPa	相对误差/%
2~5 cm	100	174.23	183.60	5.38
	200	350.32	355.26	1.41
	300	444.88	455.25	2.33
	400	564.44	573.75	1.65
1~2 cm	100	142.88	150.26	5.61
	200	283.94	295.38	4.03
	300	423.24	431.54	1.96
	400	496.45	492.33	-0.83
级配试样	100	128.13	140.23	9.44
	200	240.56	271.40	12.82
	300	360.00	398.63	10.73
	400	489.28	558.61	14.17

各组试验剪切过程中颗粒细观运动的演化规律基本一致, 为了避免重复, 将现象最为明显、粒径范围在 2~5 cm 的数值试样, 在法向应力 400 kPa 时的颗粒速度场及剪切滑动带示于图 9. 由图 9 可见, 当累计应变达到 5% 时, 颗粒大都沿着弧形剪切面运动, 形成连续的剪切带; 此后颗粒沿着剪切带滑动, 逐渐趋于稳定. 数值上则表现为, 随着累计应变的增加, 剪应力的增长趋势减缓.

图9 颗粒速度场及剪切滑动带

Fig.9 (Color online) Particle velocity fields and shear zones

4 结 论

通过大型直剪试验与离散元数值模拟, 对粗粒土剪切特性进行宏观研究, 可知:

1) 粗粒土直剪试验过程中, 剪应力与累计应变关系曲线属于剪切硬化型, 剪应力随累计应变的增加而增大; 随着法向应力的增加, 峰值剪应力稳步增加; 通过图像观测推断, 颗粒破碎主要以棱角发生微小破碎为主, 大颗粒破碎成等大两块的现象相对少见。

2) 图像分析发现, 剪切过程中颗粒长轴从开始优选于水平方向转变为优选于竖直方向再逐渐趋于均匀分布, 表明伴随着颗粒滚动破碎, 颗粒重新排列形成新的稳定状态。细观参数的演变规律表明, 颗粒翻滚与细粒填充同时作用, 造成平面孔隙率先增加后减小, 配位数稳定增加。

3) 离散元数值模拟中, 计算结果与实测结果基本一致。单一粒径范围的试样数值计算结果较为理想, 抗剪强度计算误差较小。级配试样的计算误差略大, 主要是由于受目前计算机计算容量的限

制, 无法模拟更加细小的颗粒, 造成计算误差, 使得离散元应用受限。

4) 大直剪试验图像分析和离散元数值模拟中均发现, 粗粒土剪切过程中(上盒固定, 下盒剪切)剪切带的形成与发展并不是严格按照上下盒之间的剪切缝展开; 除了存在水平主剪切面外, 还存在一条向上突起的弧形副剪切面。剪切带是主、副剪切面之间的拱形区域。但是, 如何利用粗粒土剪切过程中形成的拱形剪切带, 对大型直剪试验进行强度参数修正, 仍值得进一步深入研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808184); 河北省自然科学基金资助项目(E2016202057)

作者简介: 王晓帅(1994—), 河北工业大学硕士研究生, 研究方向: 细观土力学。E-mail: 1300280490@qq.com

引文: 王晓帅, 王子寒, 景晓昆, 等. 粗粒土大型直剪试验宏观研究与离散元模拟[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(3): 279-286.

参考文献 / References:

- [1] 陈缪芬, 高庄平, 朱俊高, 等. 粗粒土级配及颗粒破碎分形特性[J]. 中南大学学报自然科学版, 2015, 46(9): 3446-3453.
CHEN Liufen, GAO Zhuangping, ZHU Jungao, et al. Gradation of coarse grained soil and fractal geometry character of particle breakage [J]. Journal of Central South University Science and Technology, 2015, 46(9): 3446-3453. (in Chinese)
- [2] 汪丁建, 唐辉明, 张雅慧, 等. 粗粒土试验与力学特性研究现状[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 943-954.
WANG Dingjian, TANG Huiming, ZHANG Yahui, et al. Research progress on mechanical tests and properties of coarse-grained soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 943-954. (in Chinese)
- [3] 褚福永, 朱俊高, 殷建华. 基于大三轴试验的粗粒土剪胀性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2249-2254.
CHU Fuyong, ZHU Jungao, YIN Jianhua. Study of dilatancy behaviors of coarse-grained soils in large-scale triaxial test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2249-2254. (in Chinese)
- [4] 徐肖峰, 魏厚振, 孟庆山, 等. 直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 728-733.
XU Xiaofeng, WEI Houzhen, MENG Qingshan, et al. Effects of shear rate on shear strength and deformation characteristics of coarse-grained soils in large-scale direct

- shear tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 728-733. (in Chinese)
- [5] FU W X, ZHENG X, LEI X Z, et al. Using a modified direct shear apparatus to explore gap and size effects on shear resistance of coarse-grained soil [J]. Particuology, 2015, 23: 82-89.
- [6] BONFELS B, BALLANTYNE G R, POWELL M S. Developments in incremental rock breakage testing methodologies and modelling [J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 152: 16-25.
- [7] 郭万里, 朱俊高, 钱彬, 等. 粗粒土的颗粒破碎演化模型及其试验验证[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1023-1029.
- GUO Wanli, ZHU Jungao, QIAN Bin, et al. Particle breakage evolution model of coarse-grained soil and its experimental verification [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 1023-1029. (in Chinese)
- [8] 徐永福. 考虑颗粒破碎影响的粗粒土的剪切强度理论[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1171-1179.
- XU Yongfu. Theory of shear strength of granular materials based on particle breakage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1171-1179. (in Chinese)
- [9] 徐永福. 基于颗粒破碎的粗粒土剪切强度的模拟分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1409-1414.
- XU Yongfu. PFC2D simulation of rockfill shear strength based on particle fragmentation [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1409-1414. (in Chinese)
- [10] TEJCHMAN J, GORSKI J, EINAV I. Effect of grain crushing on shear localization in granular bodies during plane strain compression [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, 36(18): 1909-1931.
- [11] WEI K. Study on collapse behaviors of coarse grained soils [J]. Periodica Polytechnica: Civil Engineering, 2012, 56(2): 245-252.
- [12] 潘家军, 程展林, 余挺, 等. 不同中主应力条件下粗粒土应力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2078-2084.
- PAN Jiajun, CHENG Zhanlin, YU Ting, et al. Experimental study on stress-strain characteristics of coarse-grained soil under different intermediate principal stresses [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 2078-2084. (in Chinese)
- [13] 徐晗, 程展林, 泰培, 等. 粗粒土的离心模型试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1322-1327.
- XU Han, CHENG Zhanlin, TAI Pei, et al. Centrifuge model test and numerical simulation of coarse-grained soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1322-1327. (in Chinese)
- [14] 周健, 余荣传, 贾敏才. 基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2047-2052.
- ZHOU Jian, YU Rongchuan, JIA Mincai. Measurement of microstructure parameters for granular soil model using digital image technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2047-2052. (in Chinese)
- [15] 刘建坤, 于钱米, 刘景宇, 等. 细粒土不均匀分布对粗粒土力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 562-572.
- LIU Jiankun, YU Qianmi, LIU Jingyu, et al. Influence of non-uniform distribution of fine soil on mechanical properties of coarse-grained soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 562-572. (in Chinese)
- [16] 凌华, 傅华, 韩华强. 粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增1): 12-16.
- LING Hua, FU Hua, HAN Huaqiang. Experimental study on effects of gradation on strength and deformation of coarse-grained soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Supply1): 12-16. (in Chinese)
- [17] 王子寒. 粗粒土接触力学特性及细观本构关系研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
- WANG Zihan. A study on contact behaviors and microscopic constitutive relations of coarse-grained soils [D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】