

文章编号:1007-9629(2021)02-0427-06

不同粒度粗粒的极限孔隙比和破碎特征

戴仁辉¹, 李明东^{1,2}, 陈士军¹, 易进翔¹, 高玉峰²

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 为了研究以石英砂为主要成分的粗粒土压实过程, 分别利用量筒倒转法和振动击实试验, 测定了不同粒度粗粒的极限孔隙比, 分析了极限孔隙比随粒径变化的规律; 采用压实容量表征粗粒孔隙比变化范围, 探究了压实容量与粒径的关系; 开展了不同粒度粗粒和原料土的颗粒破碎特征试验, 分析了击实过程中的颗粒破碎特征和演变过程。结果表明: 粗粒最大孔隙比随着粒径的增大先快速减小后缓慢增大, 最小孔隙比随着粒径的增大线性减小; 粗粒土压实容量随着粒径的增大先减小后增大; 粗粒土在击实过程中的颗粒破碎量随着粒径的增大线性增大; 颗粒破碎使粗粒土向着级配连续的方向发展, 粗粒土逐渐趋于均匀化。

关键词: 粒度; 石英砂; 粗粒; 孔隙比; 击实; 颗粒破碎

中图分类号: TU441⁺.5

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.028

Ultimate Void Ratios of Coarse Particles of Different Sizes and Its Particle Breakage Characteristics

DAI Renhui¹, LI Mingdong^{1,2}, CHEN Shijun¹, YI Jinxiang¹, GAO Yufeng²

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: To study the compaction of coarse-particle soil with quartz sand as the main component, the ultimate void ratios of coarse particle of different sizes were determined by measuring cylinder rotation method and the vibration compaction test respectively. Compaction capacity was used to express the variation range of the void ratio of coarse-particle soil. The relationship between compaction capacity and particle size was explored. Particle breakage characteristics of coarse particle and raw soil of different particle sizes were tested, and the characteristics and evolution process of particle breakage during compaction was analyzed. The results show that the maximum void ratio decreases rapidly with the increase of particle size at first and then increases slowly. The minimum void ratio decreases linearly with the increase of particle size. The compaction capacity decreases with the increase of particle size and then increases. The particle breakage of coarse-particle soil increases linearly with the increase of particle size during the compaction process, and the coarse-particle soil gradually tends to be uniform. The research results have guiding significance for compaction of coarse-particle soil with quartz sand as the main component.

Key words: particle size; quartz sand; coarse particle; void ratio; compaction; particle breakage

收稿日期:2019-10-08; 修订日期:2019-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51609093);江苏省博士后基金科研资助计划(1601007A);东华理工大学研究生创新基金(DHYC-201931)

第一作者:戴仁辉(1994—),男,安徽黄山人,东华理工大学硕士生. E-mail:pe_dairenhui@126.com

通讯作者:李明东(1981—),男,山东临沂人,东华理工大学教授,硕士生导师,博士. E-mail:ytlimd@163.com

粗粒土越密实,强度越高、压缩性越小、渗透性越低,工程性能越好。文献[1-2]对于地基和填土的评价具有极高的指导价值,至今仍是最主要的评价指标^[3-4]。工程中常采用击实方法来提高粗粒土密实度,而击实过程会导致粗粒破碎,改变粗粒土的颗粒组成,继而影响粗粒土的工程性能^[1]。最大孔隙比和最小孔隙比是确定相对密度的关键参数,测定最大孔隙比的方法有量筒倒转法、漏斗法及松砂器法,测定最小孔隙比的方法有锤击法和振动法^[5]。对于砂土,量筒倒转法的测定结果普遍优于漏斗法及松砂器法^[6-6],其最大孔隙比随细粒掺量的增大而减小^[7]。当黏粒掺量不大于30%时,最小孔隙比随细粒掺量的增大而减小^[6]。细粒掺量对极限孔隙比的影响机制相同^[8-11]。颗粒形状也会影响到极限孔隙比,理想浑圆颗粒的最大、最小孔隙比分别为0.90986和0.35407^[7],最大孔隙比随颗粒球度的减小而增大,最小孔隙比则相反^[12]。颗粒级配对压实的影响机制为不同粒径颗粒的相互填充效应、颗粒的悬浮效应和小颗粒的虚填效应^[13]。颗粒破碎方面,研究发现贝壳砂颗粒破碎受试样尺寸、围压、土粒比重的影响^[14],其颗粒破碎程度随试样尺寸及围压的增大而增大。随着颗粒破碎程度加深,土粒均会从初始分布逐渐趋向自相似的分形分布^[15-16]。对颗粒破碎的定量分析以Hardin相对破碎率为主,砂土多发生棱角破碎,且多棱角颗粒的试样变形大于浑

圆颗粒试样^[17-18]。因此,探明颗粒粒径对极限孔隙比及颗粒破碎的影响,对于土体压实及土颗粒破碎有着重要的意义。

本文采用量筒倒转法、振动锤击法测定了不同粒径粗粒的极限孔隙比,分析了孔隙比变化范围与粒度的关系,研究了粗粒的破碎特征。

1 试验

1.1 试验材料

1.1.1 原料土

原料土取自南昌市赣江中下游左岸秋水广场处(北纬N28°41'9.59",东经E115°51'27.14"),主要成分为石英砂,其基本物理性能如表1所示。表中: G_s 为相对密度; d_{60} 、 d_{30} 和 d_{10} 分别表示小于该粒径的土颗粒质量占土颗粒总质量的60%、30%及10%; C_u 、 C_c 分别表示土的不均匀系数及曲率系数。

表1 原料土的基本性质
Table 1 Basic properties of raw soil

$w(\text{water})/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G_s	d_{60}/mm	d_{30}/mm	d_{10}/mm	C_u	C_c
8.2	1.68	2.65	1.30	0.46	0.23	5.65	0.71

1.1.2 不同粒度粗粒

将原料土沥水风干,然后进行筛分。各粒度粗粒均准备4 kg,编号分别为1#~7#,如图1所示。将各粒度粗粒分为2等份,进行平行试验。

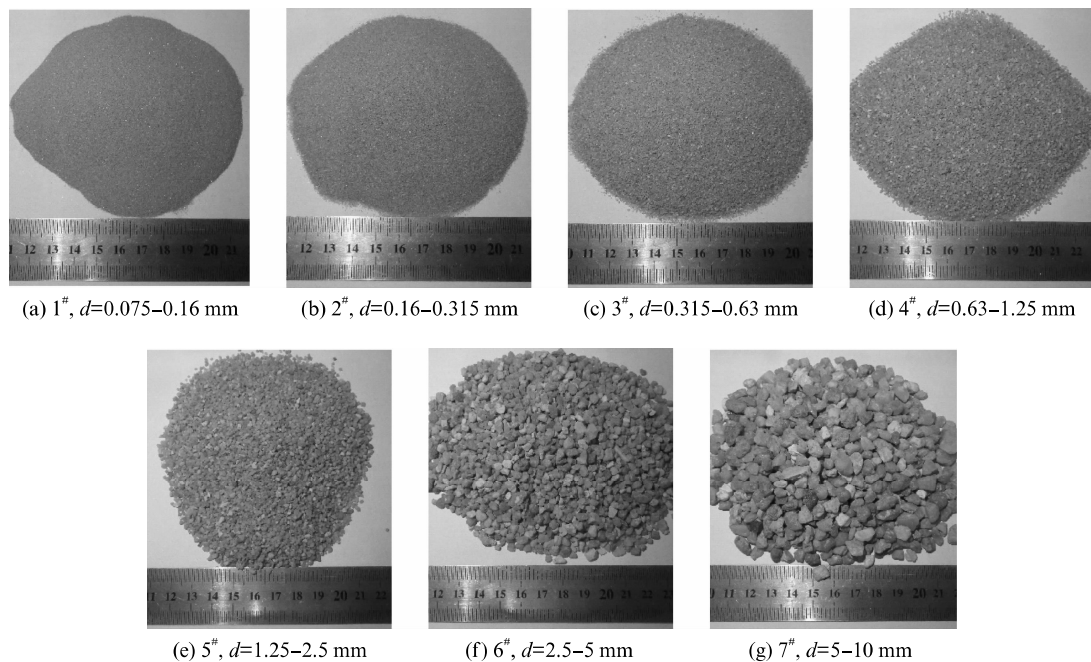


图1 不同粒度的粗粒

Fig. 1 Different particle size of coarse particle

1.2 极限孔隙比试验

1.2.1 最大孔隙比

采用量筒倒转法测定粗粒的最小干密度 ρ_{dmin} , 其中量筒容积为 1 000 mL, 利用式(2)计算粗粒的最大孔隙比 e_{max} .

$$e_{max} = (G_s \rho / \rho_{dmin}) - 1 \quad (2)$$

1.2.2 最小孔隙比

采用室内锤击法测定各粒度粗粒的最大干密度 ρ_{dmax} , 利用式(3)计算各粒度粗粒最小孔隙比 e_{min} . 锤击工具选用 JDM-2 型电动相对密度仪, 金属圆筒体积为 250 mL, 内径为 5 cm, 长度为 12.7 cm, 锤体质量为 1.25 kg, 直径为 5 cm, 下落高度为 15 cm. 粗粒分 3 次倒入金属圆筒进行锤击, 每次粗粒为金属圆筒的 1/3, 锤击 32 次/min, 直至粗粒体积不变为止.

$$e_{min} = (G_s \rho / \rho_{dmax}) - 1 \quad (3)$$

1.3 颗粒破碎试验

1.3.1 不同粒度粗粒的颗粒破碎试验

将最大干密度试验击实后的各粒度粗粒进行颗粒分析, 获得各粒度粗粒击实后的粒度构成, 分析各粒度粗粒在击实过程中的颗粒破碎特征.

1.3.2 原料土的颗粒破碎试验

取 4 份原料土进行击实试验, 击实次数分别为 96、192、288、384 次, 对击实后的土样进行颗粒分析试验, 分别测定各试验组的粒度构成, 分析原料土在不同击实次数下的颗粒破碎特征.

2 不同粒度粗粒的极限孔隙比

2.1 最大孔隙比

不同粒度粗粒的 e_{max} 与 d 的关系如图 2 所示. 由图 2 可见: e_{max} 与 d 在半对数坐标系上呈非线性关系, 它随粒径的增大先快速减小后缓慢增大, 存在 1 个最小值; 在砂粒范围内, 即 d 从 0.075 mm 逐渐增大到 2 mm 时, e_{max} 逐渐减小, 与李珊珊等^[6]的结论一致; 当 d 从 2 mm 逐渐增大到 10 mm 时, e_{max} 逐渐增大; e_{max} 的最小值为 1, 大于理论上假定土颗粒为均匀圆球所推导的 $e_{max} = 0.90986^{[7]}$, 原因在于实际粗粒并非圆球形, 粒间孔隙量更大.

2.2 最小孔隙比

不同粒度粗粒的 e_{min} 与 d 的关系如图 3 所示. 由图 3 可见, e_{min} 与 d 在半对数坐标系上呈线性关系, 它随着粒径的增大而逐渐减小. 由此可得 e_{min} 与 d 的关系如式(4)所示.

$$e_{min} = a \lg d + b \quad (4)$$

式中: a 为曲线的斜率, 表示 d 每变化 1 个对数周(10 倍)所引起的 e_{min} 的变化量, 即 $a = -(\Delta e_{min} / \Delta \lg d)$; b

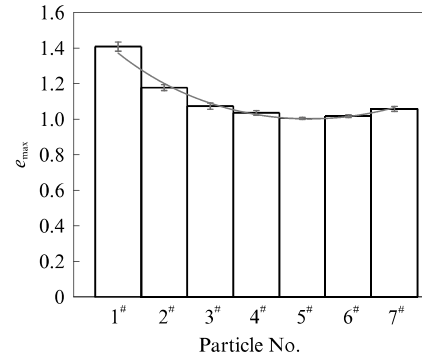


图 2 各粒度粗粒 e_{max} 与 d 的关系

Fig. 2 Relationship of maximum void ratio versus particle size of coarse particle

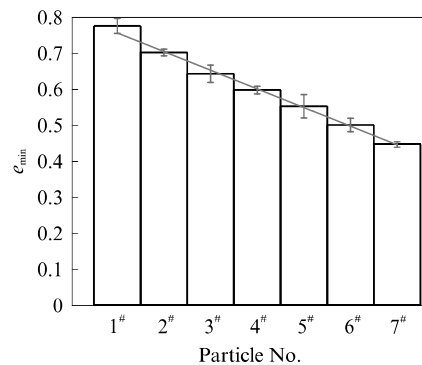


图 3 各粒度粗粒 e_{min} 与 d 的关系

Fig. 3 Relationship of minimum void ratio versus particle size of coarse particle

为曲线在纵轴的截距, 表示 $d = 1$ mm 时, e_{min} 的值. 这与王新志等^[8]发现的当 d 从 0.5 mm 逐渐增加到 5 mm 时, 钙质砂 ρ_{dmax} 逐渐增大结论一致.

2.3 压实容量

随着粒径的增大, 不同粒度粗粒 e_{min} 线性减小, e_{max} 先快速减小后缓慢增大. 针对不同粒度粗粒这一特性, 提出压实容量 e_{cap} , 如式(5)所示. e_{cap} 越小, 表明粗粒的可压实性越小, 反映出粗粒的压实性能.

$$e_{cap} = e_{max} - e_{min} \quad (5)$$

图 4 为粗粒 e_{cap} 与 d 的关系曲线. 图 5 为 e_{cap} 与平均粒度(D_{50})的关系曲线. 由图 4 可见: e_{cap} 与 d 在半对数坐标系上呈非线性关系, 它随粒径的增大先逐渐减小后逐渐增大, 存在一个最小值.

由图 5 可见, 当 d 从 0.075 mm 逐渐增大到 0.8 mm 时, e_{cap} 逐渐减小, 与 Cubrinovski^[7]发现的不同细粒含量砂土 e_{cap} 随 D_{50} 的增大而增大的结论一致. 当 d 从 0.8 mm 逐渐增大到 10 mm 时, e_{cap} 逐渐增大. Cubrinovski 认为在砾粒范围内, 即 d 从 2 mm 逐渐增大到 10 mm 时, e_{cap} 会随着 d 的增大而逐渐减小, 并拟合其关系如式(6)所示. 在砾粒范围内, e_{cap} 并无明显减小趋势, 而随粒径的增大略有增

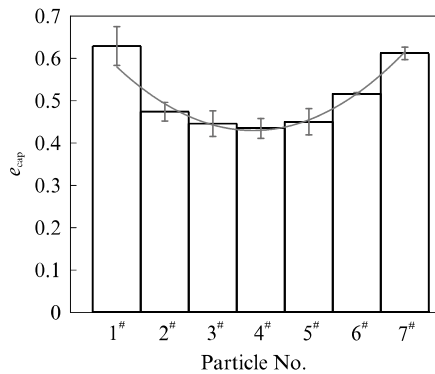
图4 粗粒 e_{cap} 与 d 的关系曲线

Fig. 4 Curve of compaction capacity versus the particle size of coarse particle

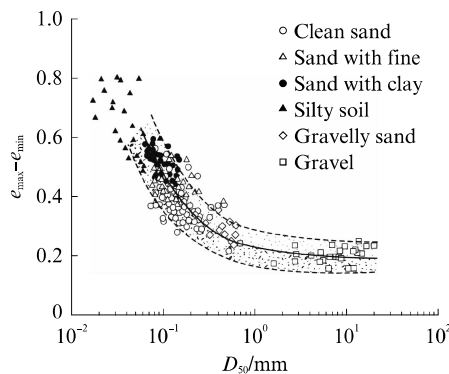
图5 不同材料 e_{cap} 与 D_{50} 的关系曲线

Fig. 5 Curves of compaction capacity versus the mean particle size of different material (Ref. [7])

大,其试验结果更符合图4.由图4可见, e_{cap} 与 $\lg(d/d_0)$ 呈双曲线关系,可用式(7)表达.由式(4)、(5)、(7)可得 e_{max} 与 d 的关系如式(8)所示.

$$e_{\text{max}} - e_{\text{min}} = 0.23 + 0.06/D_{50} \quad (6)$$

$$e_{\text{cap}} = c[\lg(d/d_0)]^2 + e_{\text{cap}}^{\text{min}} \quad (7)$$

$$e_{\text{max}} = e_{\text{min}} + e_{\text{cap}} = a\lg d + b + c[\lg(d/d_0)]^2 + e_{\text{cap}}^{\text{min}} \quad (8)$$

式中: d_0 为界限粒径,mm,即 $d < d_0$ 时, e_{cap} 随着 d 的增大而减小, $d > d_0$ 时, e_{cap} 随着 d 的增大而增大; $e_{\text{cap}}^{\text{min}}$ 为界限粒径处粗粒的压实容量; c 能反映 e_{cap} 减小或增大的速率大小, c 值越大, d 每变化1个对数周(10倍)所引起的 e_{cap} 的变化速率越大.

3 颗粒破碎特征

3.1 不同粒度粗粒的颗粒破碎

不同粒度粗粒的颗粒破碎情况与粒径的关系如图6、7所示.由图6可见:各粒度粗粒在击实后均有不同程度的破碎,其中1#粒度粗粒破碎量为5.7%, d 从0.075 mm逐渐增大到10 mm时,各粒度粗粒破碎量在半对数坐标系上随着粒径的增大

呈线性增加;颗粒粒径对颗粒破碎影响很大,可能的原因是粒径越大,在击实作用下越容易产生应力集中,造成颗粒的破碎.与王新志等^[8]发现南海钙质砂在砂粒范围内即 d 从0.075 mm逐渐增大到2 mm时,颗粒破碎量随粒径的增大而增加的结论一致.

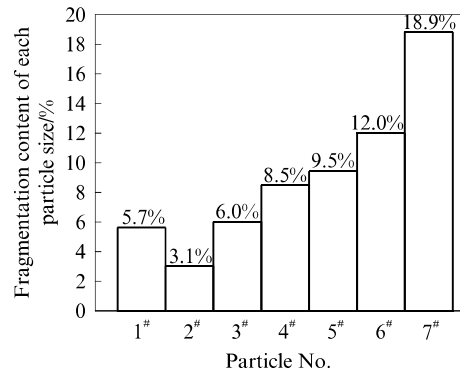


图6 各粒度粗粒颗粒破碎量

Fig. 6 Fragmentation content versus particle size of coarse particle

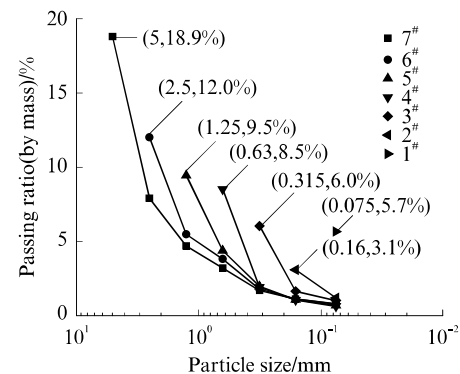


图7 各粒度粗粒击碎颗粒的粒径分布

Fig. 7 Particle size distribution after soil compaction of coarse particle soil

由图7可见,各粒度曲线斜率随着粒径减小均表现出不同程度的减小,说明本等级粒度粗粒被击碎到更小等级粒度粗粒的趋势随着粒度的减小而逐渐减小.

各粒度粗粒在击实过程中,粒径较大的颗粒更容易被击碎并填充于大颗粒的孔隙中,这也使得 e_{min} 的测定结果偏小.随着粒度的减小,粗粒颗粒破碎量逐渐减小,破碎颗粒的填充作用也逐渐减小.这与 e_{min} 随着 d 增大而逐渐减小的结论一致.

3.2 原料土颗粒破碎特征

原料土在不同击实次数下的颗粒破碎特征如图8所示.由图8可见,原料土在击实过程中同样存在颗粒破碎现象,但随着击实次数的增加,单位击实功

引起的颗粒破碎量减少,击实对原料土的颗粒破碎作用是有限的。

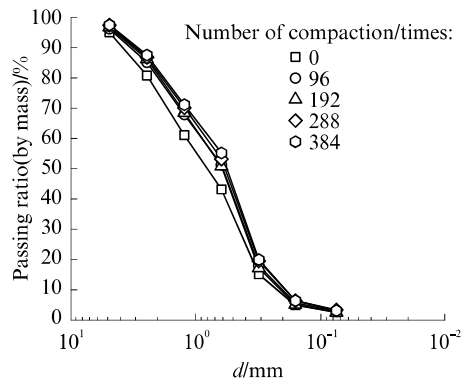


图 8 不同击实次数粗粒的颗粒分布曲线
Fig. 8 Plot of particle size distribution in different compaction times of coarse particle

原料土在不同击实次数下的不均匀系数 C_u 与曲率系数 C_c 如表 2 所示。由表 2 可见,随着击实次数的增加, C_c 由 0.71 逐渐线性增大到 1.03, C_u 由 5.65 逐渐减小到 4.10。说明增加击实次数可以有效提高原料土的连续性,但原料土会逐渐趋于均匀化。土体在击实过程中的应力集中现象逐渐减弱,这正解释了随着击实次数的增加,单位击实功引起的颗粒破碎量减少的现象。

表 2 不同击实次数时原料土级配参数
Table 2 Parameters of raw soil gradation in different hitting times

Number of compaction/times	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{60}/mm	C_c	C_u
0	0.23	0.46	1.30	0.71	5.65
96	0.21	0.41	0.90	0.89	4.29
192	0.22	0.42	0.90	0.89	4.09
288	0.19	0.39	0.84	0.95	4.42
384	0.19	0.39	0.78	1.03	4.10

4 结论

(1)不同粒度石英砂粗粒的最小孔隙比 $e_{\min}$ 随着粒径 d 的增大线性减小, $e_{\min}$ 与 d 的关系为 $e_{\min} = a \lg d + b$ 。

(2)压实容量 e_{cap} 与 d 的定量关系可表达为 $e_{\text{cap}} = c[\lg(d/d_0)]^2 + e_{\text{cap}}^{\min}$,当 $d = d_0$ 时, e_{cap} 出现最小值 $e_{\text{cap}}^{\min}$ 。

(3)不同粒度石英砂粗粒的最大孔隙比 $e_{\max}$ 与 d 的定量关系可表达为 $e_{\text{cap}} = a \lg d + b + c[\lg(d/d_0)]^2 + e_{\text{cap}}^{\min}$ 。

(4)原料土在击实过程中存在颗粒破碎。不同粒

度石英砂粗粒的颗粒破碎量随粒径的增大线性增大;击实对原料土颗粒破碎作用是有限的,增加击实次数可以有效提高原料土的连续性,但原料土会逐渐趋于均匀化。

参考文献:

- [1] BURMISTERDM. The importance and practical use of the relative density in soil mechanics [J]. The American Society for Testing and Materials, 1948, 48: 1249-1268.
- [2] TAVENASF, ROCHELLE P. Accuracy of relative density measurements [J]. Géotechnique, 1972, 22(4): 549-562.
- [3] DAS B, SOBHAN K. Principles of geotechnical engineering [M]. New York: Cengage Learning, 2010: 51-72.
- [4] MIAO G, AIREY D. Breakage and ultimate states for a carbonatesand [J]. Géotechnique, 2013, 63(14): 1221-1229.
- [5] 侯龙清, 黎剑华. 土力学试验 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 39-60.
- [6] HOU Longqing, LI Jianhua. Soil mechanics tests [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2012: 39-60. (in Chinese)
- [7] 李珊珊, 李大勇, 高玉峰. 砂土最大最小孔隙比测定及其影响因素分析 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 554-561.
- [8] LI Shanshan, LI Dayong, GAO Yufeng. Determination of maximum and minimum void ratios of sands and their influence factors [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 554-561. (in Chinese)
- [9] CUBRINOVSKI M. Maximum and minimum void ratio characteristics of sand [J]. Japanese Geotechnical Society, 2002, 42(6): 65-78.
- [10] 王新志, 王星, 翁贻令. 钙质砂的干密度特征及其试验方法研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 316-322.
- [11] WANG Xinzhi, WANG Xing, WENG Yiling. Characteristics of dry density of calcareous sand and its testing methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (Suppl 2): 316-322. (in Chinese)
- [12] CHANG C S, WANG J Y, GE L. Maximum and minimum void ratios for sand-silt mixtures [J]. Engineering Geology, 2016, 211: 7-18.
- [13] CHANG C S, WANG J Y, GE L. Modeling of minimum void ratio for sand-silt mixtures [J]. Engineering Geology, 2015, 196: 293-304.
- [14] CUBRINOVSKI M, ISHISARA K. Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils [J]. Soil and Foundations, 1999, 39(5): 61-71.
- [15] 王蕴嘉, 宋二祥. 堆石料颗粒形状对堆积密度及强度影响的离散元分析 [J]. 岩土力学, 2019(6): 2416-2426.
- [16] WANG Yunjia, SONG Erxiang. DEM analysis of the particle shape effect on packing density and strength of rockfills [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019(6): 2416-2426. (in Chinese)
- [17] 高成雷, 严战友, 李建军, 等. 颗粒级配对无粘性土压实性的影响分析 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(2): 227-232.

(下转第 439 页)