

基于连续级配方程的粗粒料压实密度缩尺效应 试验研究

褚福永¹, 朱俊高², 许凯³, 翁厚洋⁴

(1. 温州职业技术学院建筑工程学院, 浙江温州 325058; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川成都 610000; 4. 宏润集团建设有限公司, 浙江宁波 315000)

摘要:根据双江口心墙堆石坝堆石料的原型平均设计级配曲线,采用剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法等4种不同缩尺方法得到室内最大干密度试验成果。结合土的连续级配方程,采用级配面积与小于5 mm的颗粒质量分数 P_5 构建的函数式作为级配量化指标,拟合出最大干密度与试验前级配曲线面积、 P_5 及最大粒径之间的关系,据此可推求出原型级配的最大干密度。通过分析得到试验前后级配量化指标之间的拟合公式,并利用试验前后级配量化指标的相对变化量 B_w 作为颗粒破碎的定量指标,探讨了缩尺方法对压实过程粗粒料颗粒破碎的影响。结果表明,采用等量替代法缩尺, B_w 随粒径的增大呈减小趋势;而采用剔除法、相似级配法和混合法缩尺, B_w 随粒径增大呈增大趋势。

关键词:粗粒料;连续级配方程;最大干密度;缩尺效应;颗粒破碎

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)03-0034-05

Experimental study on scaling effect of compaction density of coarse-grained soil based on gradation equation// CHU Fuyong¹, ZHU Jungao², XU Kai³, WENG Houyang⁴ (1. School of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou Polytechnic, Wenzhou 325058, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 4. Hongrun Construction Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: Four different scaling methods, including scalping method, equal-weight replacement method, similar grading method and mixing method were used to obtain the maximum dry density in laboratory according to the original average design gradation curve of rockfill in the Shuangjiangkou core-wall rockfill dam. Based on the test results and gradation equation of soil, a quantitative index of gradation composed of grading area and the content of grains smaller than 5 mm (P_5) was adopted. The relationship of dry density versus grading area before tests, P_5 and maximum particle size was fitted. According to the relationship, the maximum dry density of the real gradation can be determined. The fitting formula between the quantified index of gradation before and after the test was obtained, and the relative change B_w of the quantified index of gradation before and after the test was used as the quantitative index of particle breakage to discuss the influence of scaling method on the particle breakage of coarse particles during the compaction process. The results show that B_w decreases with the increase of particle size for equal-weight replacement method, but B_w increases with the increase of particle size for scalping method, similar grading method and mixing method.

Key words: coarse-grained soil; gradation equation; maximum dry density; scaling effect; particle breakage

200 m 及以上超高土石坝的建设对变形控制的要求日益提高,这不仅仅是工程正常运行要求,还涉及工程安全问题。土石坝工程如果变形过大或者变形不协调,往往会导致防渗系统破坏,从而造成重

大的工程事故,因而准确了解主要筑坝材料堆石等粗粒料的力学性质非常重要。实际土石坝工程中,筑坝堆石料的最大粒径通常在 1 m 以上,而室内试验土料的最大粒径一般为 60 mm,故对现场堆石料

基金项目:四川省城市特殊岩土工程技术研究中心科技研发计划项目(SC-TSYT-2023-01);国家重点研发计划项目(2017YFC0404801);国家自然科学基金委员会-雅砻江流域水电开发有限公司雅砻江联合基金(U1865104)

作者简介:褚福永(1976—),男,副教授,博士,主要从事粗粒土基本特性及本构关系研究。E-mail: cfy1976@126.com

级配缩尺后才能进行相应的室内试验。但是,将原级配堆石料按照一定方法缩尺之后,替代料的试验结果与原级配料真实性质之间存在一定的差异,这种差异称为缩尺效应。近年来,国内外许多学者从多个角度对粗粒料的缩尺效应进行了研究^[1-7]。

粗粒料缩尺效应研究首先遇到的问题是替代料密实度的控制问题,目前粗粒料密实度多采用孔隙比、孔隙率及相对密度等控制指标来描述,但上述无论哪种指标都需要准确获得最大干密度。因此,同一压实功能下最大干密度与级配关系及据此推求现场最大干密度的研究近年来成为诸多学者关注的焦点^[8-12]。例如:左永振等^[8-9]利用室内压实试验,研究了最大干密度与不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 和最大粒径 d_{max} 之间的关系,但这些级配参数与级配之间并不是一一对应的关系;朱晟等^[10-12]针对最大干密度与分形维数之间的关系展开研究,但分形维数的获得是基于小于某粒径的颗粒质量分数与粒径在双对数坐标系中为线性关系的结论,故仅适用于级配曲线为双曲线的情况;朱俊高等^[13]提出了一种能够描述双曲线、反 S 形和近似直线这 3 种典型曲线的土体颗粒级配方程,并由该级配方程推导出级配曲线面积作为量化粗粒料级配的指标,拟合出了最大干密度与级配及最大粒径之间的关系,据此推求现场原型级配料的干密度。然而,实际上同一级配曲线面积可对应同一最大粒径下多个不同的小于 5 mm 颗粒质量分数的级配。因此,利用室内试验成果推求现场原型级配料密度时,选用量化粗粒料级配的指标应综合考虑小于 5 mm 的颗粒质量分数的影响。同时,筑坝粗粒料在压实过程存在明显的颗粒破碎现象,从而改变了物理力学性质,目前这方面研究报道极少,因此,有必要对压实过程中的粗粒料颗粒破碎规律进行深入研究。

为此,本文选取双江口堆石坝筑坝堆石料为试验用料,利用 4 种不同缩尺方法得到替代料进行最大干密度试验,基于连续级配方程并采用级配曲线面积与小于 5 mm 的颗粒质量分数构建的函数式作为级配量化指标,探讨粗粒料的最大干密度与级配粒径之间的关系,并分析粗粒料在压实过程中的颗粒破碎规律及缩尺方法对压实过程粒料颗粒破碎的影响。

1 试验仪器与方案

粗粒料的最大干密度试验采用表面振动压实法,试验仪器为 Y5070 型振动台试验机,其振动频率和时间分别为 50 Hz 和 8 min。试验用料为双江口心墙堆石坝坝壳堆石料(以下简称双江口料),其母

岩为似斑状黑云母钾长花岗岩,最大粒径为 600 mm,设计颗粒级配曲线如图 1 所示(图中 P 和 d 分别为小于某粒径的颗粒质量分数和粒径)。

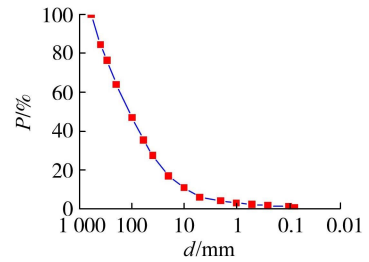


图 1 设计颗粒级配曲线

采用剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法(分别编号为 TT、DD、XX 和 HH) 4 种方法依据 SL237—1999《土工试验规程》对原型级配进行缩尺。为便于区分,将最大粒径作为土料编号下标,土料编号及最大干密度试验成果见表 1。

为量化粗粒料的级配,本文采用基于朱俊高等^[13]提出的级配方程推导出的级配曲线面积 S 和小于 5 mm 的颗粒质量分数 P_5 构成的函数式作为级配量化指标,令 $\lambda = S \lg(100P_5)$,则级配曲线面积的计算公式^[14]为

$$S = \frac{\ln(1 - kn) - \ln(1 - n)}{mn \ln 10} \quad (1)$$

其中
$$k = \frac{1}{(1 - n) (d_{max}/d_{min})^m + n}$$

式中: S 为级配曲线与横坐标、最大粒径线和最小粒径线围成的面积; d_{max} 为最大粒径; d_{min} 为最小粒径; m 、 n 为参数。

当 $n=0$ 时,式(1)可表示为

$$S = \frac{1 - k}{m \ln 10} \quad (2)$$

利用式(1)、式(2)可计算出压实前后的级配曲线面积 S_1 和 S_2 ,见表 1。同时,由试验数据整理出各试样压实前的 λ ,列于表 1 中。为分析压实后粗粒料的颗粒破碎情况,整理出各试样压实后小于 5 mm 的颗粒质量分数 P'_5 及所对应的 λ' ,见表 1。

2 最大干密度拟合公式

2.1 最大干密度与级配粒径的关系

利用表 1 中的数据整理出双江口料的最大干密度 ρ_{dmax} 与 λ 之间关系,如图 2 所示, R^2 为相关性系数。由图 2 可以看出, d_{max} 分别为 60、40、20 mm 时,双江口料的 ρ_{dmax} 随 λ 的增大非线性增大,进一步分析发现, ρ_{dmax} 与 λ 之间关系可采用二次多项式拟合:

$$\rho_{dmax} = A\lambda^2 + B\lambda + C \quad (3)$$

表 1 粗粒料缩尺后最大干密度试验成果

土料编号	$\rho_{dmax}/(g/cm^3)$	n_1	m_1	n_2	m_2	S_1	S_2	$P_5/\%$	$P'_5/\%$	λ	λ'
TT ₆₀	2.13	0.207	0.773	0.141	0.599	0.528	0.594	16.9	25.6	0.648	0.836
TT ₄₀	2.11	0.173	0.780	0.219	0.686	0.481	0.526	21.82	27.44	0.644	0.757
TT ₂₀	2.10	0.600	1.240	0.356	0.871	0.396	0.402	35.29	39.8383	0.613	0.643
DD ₆₀	2.10	0.398	1.110	0.584	1.174	0.459	0.509	6	15.63	0.357	0.608
DD ₄₀	2.07	0.193	1.036	-0.507	0.558	0.406	0.459	6	19.71	0.316	0.594
DD ₂₀	1.99	0.918	3.796	0.539	1.320	0.305	0.368	6	29.32	0.237	0.540
XX ₆₀	2.20	0.358	0.578	-4.226	0.083	0.669	0.719	32	35.63	1.007	1.116
XX ₄₀	2.18	0.374	0.573	0.665	0.731	0.611	0.655	41	45.35	0.985	1.085
XX ₂₀	2.16	0.326	0.542	0.577	0.690	0.465	0.479	57	59.59	0.816	0.850
HH ₆₀	2.10	0.556	1.160	0.381	0.788	0.501	0.573	11	26.51	0.522	0.816
HH ₄₀	2.08	0.556	1.160			0.493		17		0.607	
HH ₂₀	2.03	0.736	1.650	0.827	1.669	0.387	0.430	30	38.87	0.572	0.683

注： n_1, n_2 分别对应压实前后的参数 n ； m_1, m_2 分别对应压实前后的参数 m 。

式中 A, B, C 为拟合参数。对于双江口料, 当 d_{max} 为 60、40、20 mm 时, A 分别为 0.190、0.230 和 0.402, B 分别为 -0.102、-0.133 和 -0.122, C 分别为 2.109、2.088 和 1.995。

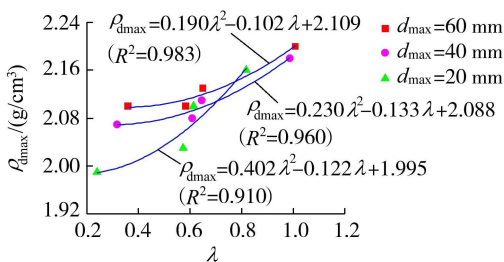


图 2 ρ_{dmax} 与 λ 的关系

同时, 褚福永等^[12]研究表明, 粗粒料的 ρ_{dmax} 与 λ 之间存在良好的线性关系。利用表 1 中的数据整理出双江口料的 ρ_{dmax} 与 d_{max} 关系, 得到了相似的规律性(图 3)。从图 3 可以看出, 不同缩尺方法缩尺后替代料的 ρ_{dmax} 与 lgd_{max} 均呈良好的线性关系, 可近似用下式拟合:

$$\rho_{dmax} = a \lg d_{max} + b \quad (4)$$

式中 a, b 均为拟合参数。对于双江口料, d_{max} 为 60、40、20 mm 时, a 分别为 0.191、0.230、0.191, b 分别为 -0.102、2.088、-0.102。

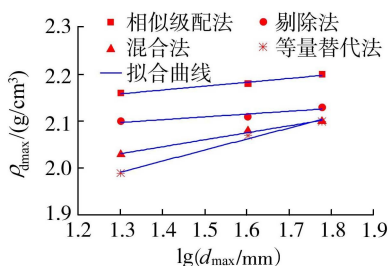


图 3 ρ_{dmax} 与 d_{max} 的关系

2.2 最大干密度拟合公式的建立

综合上述分析可知, ρ_{dmax}, λ 与 lgd_{max} 之间关系可用下式进行拟合:

$$\rho_{dmax} = (a_1 \lg d_{max} + b_1) \lambda^2 + (a_2 \lg d_{max} + b_2) \lambda + a_3 \lg d_{max} + b_3 \quad (5)$$

式中 $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ 均为拟合参数。对于双江口料, 式(5)中 $a_1=0.022, b_1=-0.469, a_2=-0.469, b_2=0.647, a_3=0.360, b_3=1.498, R^2$ 为 0.928。

对于双江口料的原型级配料, 其最大粒径为 600 mm, $S_1=0.880, P_5=6\%$ (对应 $\lambda=0.68$), 代入式(5)可得实验室压实条件下原型级配料最大干密度为 2.177 g/cm³, 与现场碾压试验得到的原型级配料最大干密度(2.187 g/cm³) 基本吻合。

为进一步验证式(5)的合理性, 利用文献[14]中采用级配曲线面积作为级配量化指标的计算公式(式(6))对原型级配料最大干密度进行预测, 并将式(6)预测结果与式(5)预测结果进行对比。

$$\rho_{dmax} = (a_1 \lg d_{max} + b_1) S^2 + (a_2 \lg d_{max} + b_2) S + a_3 \lg d_{max} + b_3 \quad (6)$$

对于双江口料, 式(6)中 $a_1=4.147, b_1=-6.596, a_2=-4.578, b_2=7.818, a_3=1.133, b_3=0.054, R^2$ 为 0.879。

将 $S_1=0.880$ 和 $d_{max}=600$ mm 代入到式(6)中, 得到原型级配料的最大干密度为 2.137 g/cm³, 与现场碾压试验得到的原型级配料的最大干密度的相对误差为 2.28%, 较式(5)计算结果的相对误差增幅为 384.78%, 进一步验证了式(5)的合理性。

2.3 最大干密度拟合公式的验证

式(5)的合理性需要更多试验数据来验证, 为此, 选取文献[10]中砂卵砾石料的最大干密度试验成果来验证, 试验土料为西藏某心墙堆石坝坝壳堆石料(以下简称西藏料), 原型级配料 $d_{max}=200$ mm, 采用剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法 4 种缩尺方法进行了缩尺, 最大干密度试验采用振动台法进行。

利用式(5)拟合得到西藏料的 ρ_{dmax}, λ 与 lgd_{max}

之间关系,其中拟合参数 $a_1 = 0.28, a_2 = -0.91, a_3 = 0.67, b_1 = -0.48, b_2 = 1.91, b_3 = 0.72, R^2 = 0.979$, 平均相对误差仅为 0.72%, 而利用式(6)拟合得到的 R^2 为 0.862, 平均相对误差为 2.23%。式(5)拟合得到的平均相对误差较式(6)的减幅为 209.7%。

将西藏料的 $d_{\max} = 200 \text{ mm}, S_1 = 0.682, P_5 = 6\%$ (对应 $\lambda = 0.616$) 代入式(5)可得实验室压实条件下原型级配配料最大干密度为 2.213 g/cm^3 , 与现场碾压试验得到的原型级配配料最大干密度 (2.180 g/cm^3) 基本吻合。

为进一步展示式(5)的预测效果,给出西藏料压实密度实测值与预测值的对比,如图4所示。由图4可以看出,对比数据均在实测值与预测值相等参考线附近,说明式(5)可对不同级配粗粒料的压实密度进行预测。

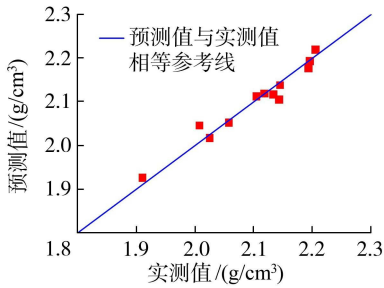


图4 西藏料最大干密度实测值与预测值

为进一步验证式(5)的合理性,同时选取文献[14]中大石峡心墙堆石坝的堆石料(以下简称大石峡料)最大干密度试验成果来验证。利用式(5)拟合大石峡料的试验数据,结果见图5。拟合参数 $a_1 = -1.94, a_2 = 3.30, a_3 = -1.13, b_1 = 2.87, b_2 = -4.89, b_3 = 3.85, R^2 = 0.922$, 平均相对误差仅为 0.77%。而利用式(6)拟合得到的 $R^2 = 0.920$, 但平均相对误差为 1.02%, 可见式(5)的拟合精度略高于式(6)。

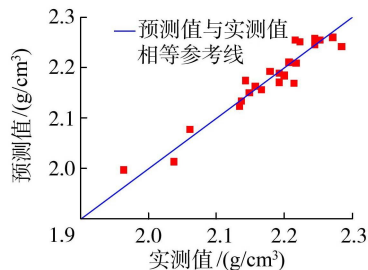


图5 大石峡料最大干密度实测值与预测值

3 粗粒料的颗粒破碎规律

3.1 颗粒破碎的定量描述

为研究压实前后级配度量指标 λ 和 λ' 之间的关系,利用表1中数据整理出双江口料 λ 和 λ' 之间

的关系,结果如图6所示,可见 λ 和 λ' 呈线性关系:

$$\lambda' = c_1 \lambda + c_2 \quad (7)$$

式中 c_1, c_2 均为拟合参数。对于双江口料, $c_1 = 0.703, c_2 = 0.0912$ 。据式(7)可推求出原型级配配料的级配面积 S_2 。

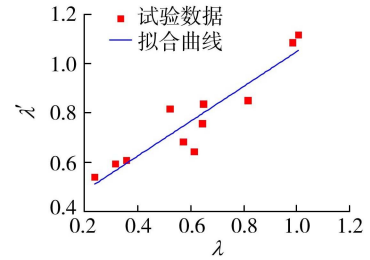


图6 λ 与 λ' 的关系

为定量分析粗粒料在压实过程中的颗粒破碎情况,采用压实前后级配指标的相对变化量 B_w 作为颗粒破碎的量化指标:

$$B_w = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} \times 100\% \quad (8)$$

对于双江口料,将 $\lambda = 0.685$ 代入式(7)可推求出原型级配配料试验后级配曲线面积 λ' ,再由式(8)可得 B_w 为 19.71%,据此可初步估计原型级配配料压实过程中的颗粒破碎情况。式(7)和式(8)的合理性有待更多试验数据的验证。

3.2 缩尺方法对颗粒破碎的影响

为研究缩尺方法对压实过程中粗粒料颗粒破碎的影响,利用试验数据整理出不同缩尺方法缩尺后替代料的 B_w 与 d_{\max} 关系,如图7所示。由图7可以看出,等量替代法缩尺后替代料的 B_w 随着 d_{\max} 的增大呈逐渐减小趋势,等量替代法缩尺后 $d_{\max} = 60 \text{ mm}$ 的替代料的 B_w ,较 d_{\max} 为 40、20 mm 的替代料的减幅为 25.13% 和 81.84%。由图7还可以看出,采用剔除法和混合法缩尺后的替代料的 B_w 随着 d_{\max} 的增大呈逐渐增大趋势。采用剔除法、相似级配法和混合法缩尺后 $d_{\max} = 60 \text{ mm}$ 的替代料的 B_w ,较 d_{\max} 为 20 mm 的替代料的增幅分别为 492.82%、159.78% 和 190.24%。

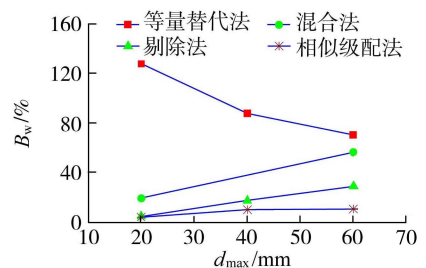


图7 B_w 与 d_{\max} 的关系

4 结论

a. 采用级配曲线面积与 P_5 的函数式作为级配

的量化指标,拟合出最大干密度与级配 P_5 及最大粒径之间的关系,据此可推求出原型级配料的最大干密度。利用此式拟合得到文献[10]和文献[14]中粗粒料的 R^2 分别为0.979和0.920。平均相对误差分别为0.72%和0.77%,验证了公式的合理性。

b. 总结出试验前后级配度量参数 λ 和 λ' 之间的关系式,并利用两者的相对变化量 B_w 作为颗粒破碎指标,据此可定量估计出原型级配料的颗粒破碎情况。

c. 通过分析不同缩尺方法缩尺后替代料试验前后的 B_w 与 d_{max} 关系发现,等量替代法缩尺后替代料的 B_w 随着 d_{max} 的增大呈逐渐减小趋势;剔除法、相似级配法和混合法缩尺后的替代料的 B_w 随着 d_{max} 的增大呈逐渐增大趋势。

参考文献:

[1] OVALLE C, FROSSARD E, DAN O, et al. The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data [J]. *Acta Mechanica*, 2014, 225(8): 2199-2216.

[2] MAROLO C, ALFARO J A, BLATZ W F, et al. Evaluating shear mobilization in rockfill columns used for riverbank stabilization [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(8): 976-986.

[3] NAKATA Y, KATO Y, HYODO M, et al. One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength [J]. *Soils and Foundations*, 2001, 41(2): 39-51.

[4] 朱晟,王京,钟春欣,等.堆石料干密度缩尺效应与制样标准研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2019, 38(5): 1073-1080. (ZHU Sheng, WANG Jing, ZHONG Chunxin, et al. Experimental study on scale effect of the dry density of rockfill material [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(5): 1073-1080. (in Chinese))

[5] 魏浩,沈超敏,刘斯宏,等.考虑级配影响的粗粒料压缩破碎特性试验[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 182-188. (WEI Hao, SHEN Chaomin, LIU Sihong, et al. Experimental study on compression and crushing characteristics of coarse granular materials considering influence of gradations [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(2): 182-188. (in Chinese))

[6] 杨少博,邱珍锋,王爱国,等.考虑缩尺效应对颗粒破碎影响的堆石料临界状态研究[J].*长江科学院院报*, 2022, 39(2): 122-128. (YANG Shaobo, QIU Zhenfeng, WANG Aiguo, et al. Critical state of rockfill in consideration of scale effect on particle breakage [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(2): 122-128. (in Chinese))

[7] 曹敏,范逸峰,武利强.粗粒料干密度缩尺效应规律及影响因素分析[J].*水电能源科学*, 2017, 35(10): 120-122. (CAO Min, FAN Yifeng, WU Liqiang. Analysis of laws and influencing factor of scale effect of dry density of coarse-grained materials [J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(10): 120-122. (in Chinese))

[8] 左永振,张伟,潘家军,等.粗粒料级配缩尺方法对其最大干密度的影响研究[J].*岩土力学*, 2015, 36(增刊1): 417-422. (ZUO Yongzhen, ZHANG Wei, PAN Jiajun, et al. Effects of gradation scale method on maximum dry density of coarse-grained soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36 (Supl): 417-422. (in Chinese))

[9] 朱俊高,翁厚洋,吴晓铭,等.粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J].*岩土力学*, 2010, 31(8): 563-566. (ZHU Jungao, WENG Houyang, WU Xiaoming, et al. Experimental study of compact density of scaled coarse-grained soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(8): 563-566. (in Chinese))

[10] 朱晟,王永明,翁厚洋.粗粒筑坝材料密实度的缩尺效应研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 348-357. (ZHU Sheng, WANG Yongming, WENG Houyang. Study of scale effect of density of coarse-grained dam materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 348-357. (in Chinese))

[11] 赵娜,左永振,王占彬,等.基于分形理论的粗粒料级配缩尺方法研究[J].*岩土力学*, 2016, 37(12): 3513-3519. (ZHAO Na, ZUO Yongzhen, WANG Zhanbin, et al. Grading scale method for coarse-grained soils based on fractal theory [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3513-3519. (in Chinese))

[12] 褚福永,朱俊高,翁厚洋,等.粗粒料级配缩尺后最大干密度试验研究[J].*岩土力学*, 2020, 41(5): 1231-1236. (CHU Fuyong, ZHU Jungao, WENG Houyang, et al. Experimental study on maximum dry density of scaled coarse-grained soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(5): 1231-1236. (in Chinese))

[13] 朱俊高,郭万里,王元龙,等.连续级配土的级配方程及其适用性研究[J].*岩土工程学报*, 2015, 37(10): 1931-1936. (ZHU Jungao, GUO Wanli, WANG Yuanlong, et al. Equation for soil gradation curve and its applicability [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(10): 1931-1936. (in Chinese))

[14] 吴二鲁,朱俊高,郭万里,等.缩尺效应对粗粒料压实密度影响的试验研究[J].*岩土力学*, 2019, 41(9): 1767-1772. (WU Erlu, ZHU Jungao, GUO Wanli, et al. Experimental study on effect of scaling on compact density of coarse-grained soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(9): 1767-1772. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-31 编辑:骆超)