

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.04.014

堆石料强度及变形特性缩尺效应试验

褚福永¹, 朱俊高², 翁厚洋³, 叶洋帆⁴

(1. 丽水学院土木工程系, 浙江 丽水 323000; 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. 宏润建设集团有限公司, 浙江 宁波 315700; 4. 浙江省工程物探勘察院, 浙江 杭州 310005)

摘要: 对某原型级配堆石料, 采用混合法根据规范要求缩尺, 获得3条模拟级配曲线, 相应的最大颗粒粒径分别为20 mm、40 mm和60 mm。对缩尺后的堆石料, 采用同一相对密度作为制样标准, 利用大型和中型三轴剪切仪分别进行不同围压下各向等压固结排水剪切试验, 探讨堆石料强度和变形特性的缩尺效应。结果表明: 堆石料的非线性强度指标 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 均随试样最大粒径 $d_{\max}$ 的增加呈对数函数增大; 通过研究粒径和围压对粗粒土变形性质的影响, 发现初始弹性模量 E_i 和体积切线模量 B_t 均随 $d_{\max}$ 的增加而线性增大, 初始泊松比 ν_i 随 $d_{\max}$ 的增大逐渐减小(两者之间存在良好的幂函数关系); 此外, 总结出 E_i 、 ν_i 和 B_t 与 $d_{\max}$ 及围压 σ_3 之间的关系式, 据此可初步估计 $d_{\max}$ 对 E_i 、 ν_i 和 B_t 的影响。

关键词: 堆石料; 三轴试验; 缩尺效应; 最大粒径; 材料强度; 变形特性

中图分类号: TV41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)04-0381-06

Experimental study of scale effect on strength and deformation characteristics of rock-fill materials

CHU Fuyong¹, ZHU Jungao², WENG Houyang³, YE Yangfan⁴

(1. School of Civil Engineering, Lishui University, Lishui 323000, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geo-mechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Hongrun Construction Group Co., Ltd., Ningbo 315700, China;
4. Zhejiang Engineering Geophysical Prospecting Academy Institute of Geotechnical Engineering, Hangzhou 310005, China)

Abstract: The hybrid method was adopted to model the original gradation of a rock-fill material according to the code, and three simulated gradations of rock-fill material have been obtained. By the same token, their equivalent particle diameters are 20 mm, 40 mm, and 60 mm, respectively. With samples prepared under the criterion of a same relative density, the scale effect on strength and deformation characteristics of the rock-fill material were studied by large/medium-scale and consolidated-drained triaxial compression tests. The results show that the nonlinear strength indexes, φ_0 and $\Delta\varphi$, have an increasing trend of a logarithm function with the maximum grain diameter $d_{\max}$ of rock-fill material. Through analyzing the influences of particle size and confining pressure on the axial strains and volumetric strains, some useful conclusion can be drawn as: both the initial elastic modulus E_i and the tangent volumetric modulus B_t increase with the maximum grain size $d_{\max}$, and there is a good linear relationships between the initial elastic modulus and the maximum grain size as well as that between the tangent volume modulus and the maximum grain size; the initial Poisson's ratio ν_i decreases with the maximum grain size $d_{\max}$, and there is a good exponential relationship between the initial Poisson's ratio and the maximum grain size. Meanwhile, formulas considering the initial elastic modulus, the initial Poisson's ratio, the tangent volume modulus, the maximum grain

基金项目: 水利部堤防安全与病害防治工程技术中心开放基金(2015004); 丽水市高层次人才项目(2015RC16)
作者简介: 褚福永(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事堆石料工程特性及本构关系研究。E-mail: cfy1976@hhu.edu.cn
引用本文: 褚福永, 朱俊高, 翁厚洋, 等. 堆石料强度及变形特性缩尺效应试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 381-386.
CHU Fuyong, ZHU Jungao, WENG Houyang, et al. Experimental study of scale effect on strength and deformation characteristics of rock-fill materials[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(4): 381-386.

size and the confining pressure were obtained, which can roughly estimate the effect of maximum grain size on the initial elastic modulus, the tangent volumetric modulus and the initial Poisson's ratio.

Key words: rock-fill material; triaxial test; scale effect; maximum grain size; material strength; deformation characteristics

土石坝是一种重要的坝型,因其能适应较复杂的地质条件而被广泛采用。在我国现有的水库中,大型水库的大坝 70% 以上是土石坝,而中小型水库的大坝 90% 以上是土石坝^[1]。近年来,随着设计水平的提高以及大型碾压设备的广泛采用,国内土石坝越建越高,已达到 200 m 级,甚至向着 300 m 级高度发展。目前,在实际土石坝筑坝工程中广泛采用的堆石料颗粒粒径为 600 ~ 800 mm^[2],甚至一些坝中的堆石最大粒径达到 800 ~ 1 600 mm^[3]。

对于高土石坝设计以及坝体数值模型建立,其关键问题之一是获取精确的坝体填筑堆石料工程特性参数。近年来,国内很多学者采用大型三轴剪切试验对堆石料强度和变形特性进行了大量研究^[4-8]。然而,目前常用大型三轴剪切仪的试样,其直径为 300 mm,高度为 600 ~ 750 mm,允许最大粒径为 60 mm,与现场实际最大粒径 600 ~ 1 600 mm 相差甚远,这就不得不对超粒径进行缩尺,使原型级配缩小至实验设备的允许范围内。但是,利用缩尺后的试验土料得到的试验结果通常与原型土料真实性质之间存在一定的差异,即存在缩尺效应。

迄今为止,国内外一些学者对堆石料强度及变形的缩尺效应进行了大量研究,并取得一定的成果^[9-19]。然而,不同制样标准下堆石料强度的缩尺效应往往存在差异性,甚至有些结论是完全相反的。如 Marsal^[9]认为同一干密度下,堆石料颗粒尺寸越大,抗剪强度越低;Marachi 等^[10]通过对 3 种堆石料不同尺寸下的大型三轴排水剪切试验成果分析发现,同一干密度下,颗粒尺寸越大,峰值内摩擦角越小;郇能惠等^[11]认为制样标准为同一相对密度时,随着颗粒最大粒径的增大,抗剪强度增大。

实际上,采用同一干密度作为制样标准存在诸多困难,如现场原型级配下压实到某一密度,在室内试验时试验料很难达到。再如,由于室内试验堆石料级配等因素的变化,也很难用同一干密度评价不同堆石料的压实程度。而采用同一相对密度作为制样标准,各试样的密实度相同,也就消除了密实度这一重要因素的影响。在采用相同缩尺方法缩尺的情况下,试样抗剪强度的差异性即可认为主要是颗粒最大粒径的不同引起的。因此,有必要开展更多的三轴试验,对同一相对密度下堆石料强度的缩尺效应进行深入研究。

另一方面,与研究抗剪强度相比,针对堆石料变形特性的缩尺效应的研究成果很少。为此,本文针对某堆石料,利用混合法根据规范将原型级配缩尺成 3 种模拟级配,对应的最大颗粒粒径 $d_{\max}$ 分别为 20 mm、40 mm 和 60 mm。采用同一相对密度作为制样标准,利用大型和中型三轴剪切仪进行 4 种不同围压下的等压固结排水剪切三轴试验。在试验成果的基础上,探讨堆石料强度及变形特性的缩尺效应。

1 试验土料与试验方案

对某堆石料进行固结排水剪切试验:对缩尺后 $d_{\max} = 60$ mm 和 $d_{\max} = 40$ mm 的试样采用大型三轴剪切仪,其试样直径为 300 mm,高度为 600 mm,限制粒径为 60 mm;对缩尺后 $d_{\max} = 20$ mm 的试样采用中型三轴剪切仪,其试样直径为 101 mm,高度为 200 mm。限制粒径为 20 mm。

堆石料的母岩性质为花岗岩, $d_{\max} = 600$ mm,不均匀系数 $C_u = 19.8$,曲率系数 $C_c = 1.4$ 。采用混合法对原型级配进行缩尺,原型平均设计级配曲线及缩尺后不同最大粒径的替代级配曲线见图 1。

依据规程^[20],采用松填法测出缩尺后级配土料的最小干密度 $\rho_{d\min}$,采用振动台法测出其最大干密度 $\rho_{d\max}$,每个试验均进行 2 组平行试验,土料编号及试验结果见表 1。

表 1 中同时列出了缩尺后各级配土料的 C_u 和 C_c 。采用同一相对密度作为制样标准,即相对密度均为 0.9。采用分层击实法制取试样,分 5 层装料击实。试样采用抽气和水头饱和相结合的方法进行饱和,加载阶段采用应变控制式加载。

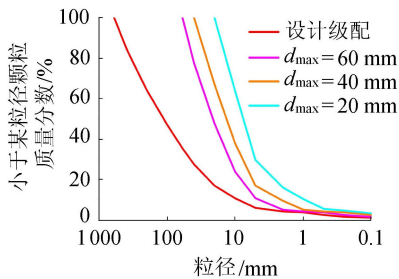


图 1 堆石料级配曲线
Fig.1 Size grading curve of coarse-grained soil

表 1 最大、最小干密度缩尺效应试验结果
Table 1 Scale-effect test results of the maximum density and the minimum density

土料 编号	$d_{\max}/$ mm	C_u	C_c	$\rho_{d\max}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\rho_{d\min}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
SJK1	60	6.3	1.2	2.10	1.60
SJK2	40	7.8	1.6	2.08	1.60
SJK3	20	10.2	3.0	2.03	1.56

大型三轴试验在 4 种不同试验围压下进行,即 500 kPa、800 kPa、1 200 kPa 和 1 800 kPa,而中型三轴试验的围压为 200 kPa、500 kPa、800 kPa 和 1 200 kPa。破坏标准采用剪应力的最大值或轴向应变达到 15% 的剪应力值。

2 试验结果分析

2.1 强度特性

3 种堆石料不同围压下剪切破坏时的峰值强度见表 2。表 2 可以看出,3 种堆石料破坏时的峰值强度均随围压 σ_3 的增加而增大。表 2 还可以看出,相同围压下,SJK1 料破坏时的峰值强度均小于 SJK2 料的相应值,围压为 500 kPa、800 kPa、1 200 kPa 和 1 800 kPa 时的增幅分别为 5.62%、11.09%、4.02% 和 1.57%。

表 2 3 种堆石料各围压下破坏时的峰值强度

Table 2 Peak strengths of three kinds of rock-fill material under different confining pressures

$d_{\max}/\text{mm}$	峰值强度/kPa				
	$\sigma_3=200\text{ kPa}$	$\sigma_3=500\text{ kPa}$	$\sigma_3=800\text{ kPa}$	$\sigma_3=1\,200\text{ kPa}$	$\sigma_3=1\,800\text{ kPa}$
20	924.5	2 178.5	3 561.1	4 539.6	
40		2 268.8	3 034.0	4 288.3	6 242.0
60		2 396.4	3 370.4	4 461.0	6 339.8

表 2 同时显示:SJK3 料破坏时的峰值强度,在围压为 500 kPa 时较 SJK1 料和 SJK2 料的相应值小。在围压为 800 kPa 和 1 200 kPa 时较 SJK1 料和 SJK2 料的相应值大。3 种堆石料的密实度相同,影响粗粒料破坏时的峰值强度主要因素是颗粒级配和颗粒破碎。由图 1 可知,SJK3 料细料较多,充填密实,而 SJK1 料和 SJK2 料的细粒含量较少,SJK1 料的细粒含量仅为 11%,颗粒之间孔隙不能够填充密实。另一方面,高围压(800 kPa 和 1 200 kPa)下,伴随着颗粒破碎的加剧,SJK1 料和 SJK2 料的主应力比分别从 500 kPa 的 5.8 和 5.5 减少到 4.8 和 4.7,而 SJK3 料的主应力比从 500 kPa 的 5.4 减少到 4.8。

整理试验数据,得到 3 种堆石料对应的非线性强度指标 φ_0 分别为 51.86°、51.24°、49.8°, $\Delta\varphi$ 分别为 11.3°、10.9°、7.8°。可以看出, φ_0 和 $\Delta\varphi$ 均随 $d_{\max}$ 的增大而增大。其中,SJK1 料的 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 值较 SJK2 料的相应值增大 0.62°和 0.4°,而 SJK2 料的 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 值较 SJK3 料的相应值增大 1.44°和 3.1°。

进一步分析可以发现, φ_0 和 $\Delta\varphi$ 与土料的 $d_{\max}$ 之间的关系均可以用对数形式来表示,即

$$\varphi_0 = a \lg d_{\max} + b \tag{1}$$

$$\Delta\varphi = c \lg d_{\max} + d \tag{2}$$

式中: a 、 b 、 c 、 d ——拟合参数。

对于本文试验数据进行拟合,得到的 a 、 b 、 c 和 d 分别为 4.37、44.15、7.66 和 -1.94。为表明式(1)和式(2)的合理性,整理试验数据,并点绘出 $\varphi_0 \sim \lg d_{\max}$ 和 $\Delta\varphi \sim \lg d_{\max}$ 关系,如图 2 所示。图 2 表明它们的线性关系均较好。

2.2 体积变形特性

不同最大粒径的堆石料级配不同,其变形性质必然不同。为此,有必要对不同最大粒径试样的初始弹性模量 E_i 、初始泊松比 ν_i 及切线体积模量 B_3 进行分析,研究缩尺对堆石料变形性质的影响。

整理试验数据,点绘出 3 种堆石料初始弹性模量 E_i 与围压 σ_3 的关系,如图 3 所示(其中 p_a 为大气压)。发现 $E_i \sim \sigma_3$ 呈良好的线性关系,可用直线($E_i = A_1 \sigma_3 + B_1$)拟合。进一步整理发现,斜率 A_1 及截距 B_1 随 $d_{\max}$ 而变化,故点绘 $A_1 \sim d_{\max}$ 和 $B_1 \sim d_{\max}$ 关系,如图 4 所示,可以看出它们之间呈良好的幂函数关系。 E_i 随 $d_{\max}$ 变化可近似用式(3)表示:

$$E_i = (a_1 d_{\max}^{b_1} + c_1) \sigma_3 + d_1 d_{\max}^{e_1} + f_1 \tag{3}$$

式中,参数 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 和 f_1 分别为 0.759、0.101、-0.857、478.952、0.153 和 -747.812。由式(3)可以得到, $d_{\max}$ 每增大 10 mm,其初始弹性模量 E_i 增大 $0.958\sigma_3 + 681$ 。对应围压为 200 kPa、500 kPa、800 kPa、1 200 kPa、

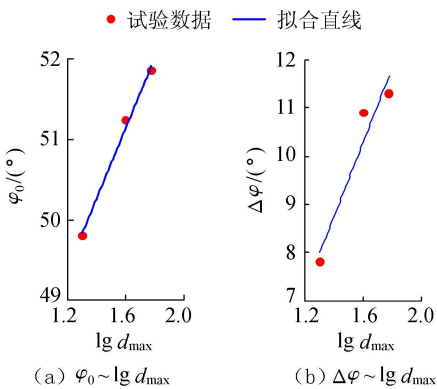


图 2 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 与 $\lg d_{\max}$ 关系

Fig.2 Relationship of φ_0 and $\Delta\varphi$ vs. $\lg d_{\max}$

1 800 kPa 时, $d_{\max}$ 每增大 10 mm, E_i 分别相应地增大 887 kPa、1 174 kPa、1 469 kPa、1 863 kPa、24 541 kPa。利用式(3)也可推求出给定 $d_{\max}$ 、不同围压下的 E_i 。例如, $d_{\max}=1\ 000$ mm 时, σ_3 为 500 kPa、800 kPa、1 200 kPa、1 800 kPa 时的 E_i 分别为 562 kPa、762 kPa、1 029 kPa、1 430 kPa。

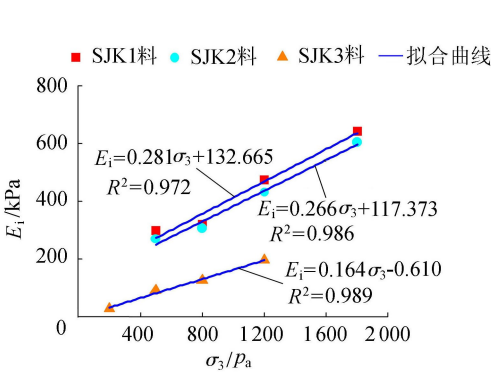


图3 E_i 与 σ_3 的关系

Fig. 3 Relationship of E_i vs. σ_3

图5给出了3种堆石料的初始泊松比 ν_i 与 σ_3/p_a 的关系。从图5可以看出, $\nu_i \sim \sigma_3/p_a$ 呈良好的幂函数关系, 可用幂函数表达($\nu_i = A_2 (\sigma_3/p_a)^{B_2}$)拟合。进一步研究发现, 参数 A_2 及 B_2 随最大粒径 $d_{\max}$ 而变化, 故点绘 $A_2 \sim d_{\max}$ 和 $B_2 \sim d_{\max}$ 关系如图6所示, 可以看出它们之间呈良好的线性关系。 ν_i 随 $d_{\max}$ 变化可近似用式(4)表示:

$$\nu_i = (a_2 d_{\max} + b_2) \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{c_2 d_{\max} + d_2} \tag{4}$$

式中, 参数 a_2 、 b_2 、 c_2 和 d_2 分别为 0.019、-0.054、-0.006 和 -0.124。 $d_{\max}=600$ mm 时, $\sigma_3=500$ kPa、800 kPa、1 200 kPa、1 800 kPa 时的 ν_i 分别为 0.028 3、0.004 92、0.001 09、0.000 240。

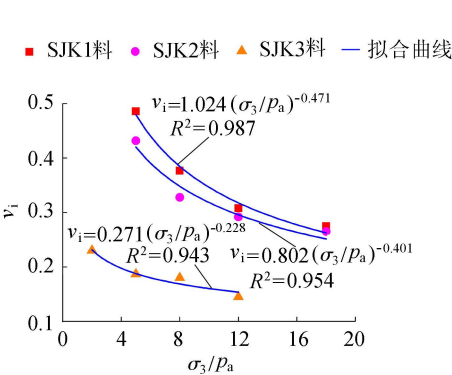


图5 ν_i 与 σ_3/p_a 的关系

Fig. 5 Relationship of ν_i vs. σ_3/p_a

为较全面地分析缩尺效应对堆石料变形性质的影响, 对所试验的堆石料切线体积模量 B_t 进行研究, B_t 定义为应力水平 $s=0.7$ 时的主应力差与 3 倍体积应变 ε_v 的比值, 即 $B_t = (\sigma_1 - \sigma_3)_{s=0.7} / (3\varepsilon_v)_{s=0.7}$ 。整理试验数据, 点绘出 B_t 与 σ_3 的关系如图7所示。

从图7可以看出, 3种堆石料的 B_t 与 σ_3 之间均存在良好的线性关系 ($B_t = A_3 \sigma_3 + B_3$)。需要指出的是, SJK1 料拟合直线的斜率为负, 可能是由于该料剪缩性较强、而偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 引起的体应变会显著增大造成的。

进一步整理发现, 斜率 A_3 及截距 B_3 随 $d_{\max}$ 而变化, 点绘 $A_3 \sim d_{\max}$ 和 $B_3 \sim d_{\max}$ 关系如图8所示, 可以看出它们之间呈良好线性关系。 B_t 随 $d_{\max}$ 变化可近似用式(5)表示:

$$B_t = (a_3 d_{\max} + b_3) \sigma_3 + c_3 d_{\max} + d_3 \tag{5}$$

式中, 参数 a_3 、 b_3 、 c_3 和 d_3 分别为 -0.729、37.696、1 578.094 和 -10 429.494。由式(5)可知, $d_{\max}$ 每增大 10 mm, 其切线体积模量增大 $-7.29\sigma_3 + 15\ 780.94$ 。则对应围压为 200 kPa、500 kPa、800 kPa、1 200 kPa、1 800 kPa, $d_{\max}$ 每增大 10 mm, B_t 分别增大 14 323 kPa、12 136 kPa、9 949 kPa、7 033 kPa、2 659 kPa。同样, 利用式(5)亦可推

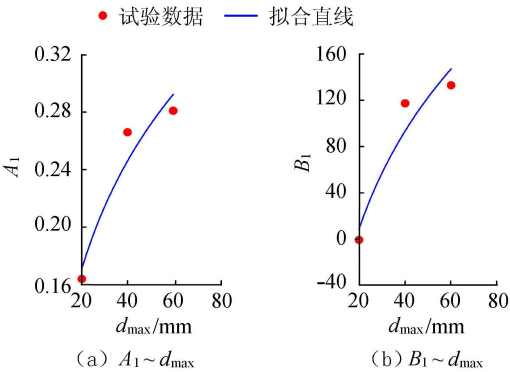


图4 A_1 、 B_1 与 $d_{\max}$ 的关系

Fig. 4 Relationship of A_1 and B_1 vs. $d_{\max}$

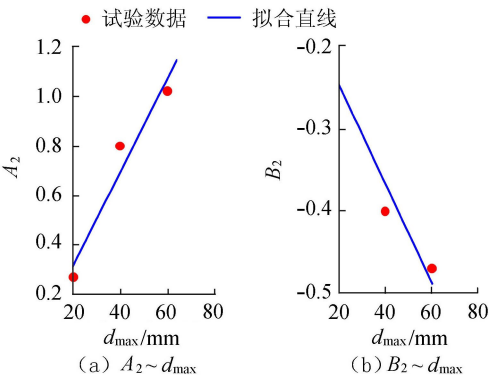


图6 A_2 、 B_2 与 $d_{\max}$ 的关系

Fig. 6 Relationship of A_2 and B_2 vs. $d_{\max}$

求出给定 $d_{\max}$ 不同围压下的切线体积模量。

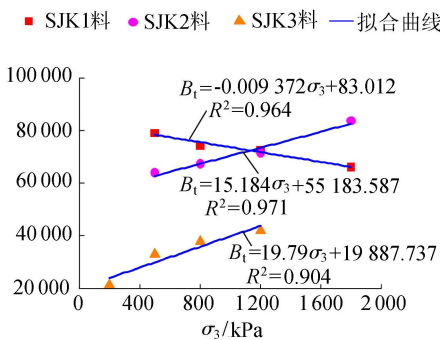


图 7 B_t 与 σ_3 的关系
Fig.7 Relationship of B_t vs. σ_3

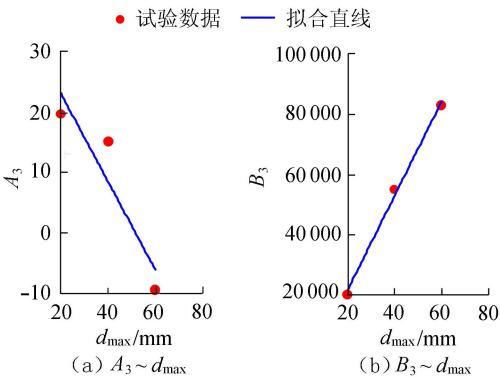


图 8 A_3 、 B_3 与 $d_{\max}$ 的关系
Fig.8 Relationship of A_3 and B_3 vs. $d_{\max}$

3 结 语

对某原型级配堆石料,用混合法根据规范要求缩尺,获得 3 条模拟级配曲线,相应的最大颗粒粒径分别为 20 mm、40 mm 和 60 mm。对缩尺后的堆石料采用同一相对密度作为制样标准,利用大型和中型三轴剪切仪分别进行不同围压下各向等压固结排水剪切试验,探讨堆石料强度和变形特性的缩尺效应,得到主要结论如下:

- a. 堆石料的非线性强度指标 φ_0 和 $\Delta\varphi$ 随最大粒径 $d_{\max}$ 的增加呈对数函数增大。试验得到的 SJK1 料的 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 值较 SJK2 料的相应值增大 0.62°和 0.4°,而试验得到 SJK2 料的 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 值较 SJK3 料的相应值增大 1.44°和 3.1°。
- b. 粒径对粗粒土变形性质影响显著:初始弹性模量 E_i 和切线体积模量 B_t 均随 $d_{\max}$ 的增大而增大,且存在良好的线性关系;初始泊松比 ν_i 随 $d_{\max}$ 的增大而逐渐减小,且两者之间存在一定的幂函数关系。其中,对应围压为 200 kPa、500 kPa、800 kPa、1 200 kPa、1 800 kPa 时, $d_{\max}$ 每增大 10 mm, E_i 分别增大 887 kPa、1 174 kPa、1 469 kPa、1 863 kPa、24 541 kPa;对应围压为 200 kPa、500 kPa、800 kPa、1 200 kPa、1 800 kPa 时, $d_{\max}$ 每增大 10 mm, B_t 分别增大 14 323 kPa、12 136 kPa、9 949 kPa、7 033 kPa、2 659 kPa。
- c. 利用本文建立的 $E_i \sim d_{\max}$ 、 $\nu_i \sim d_{\max}$ 和 $B_t \sim d_{\max}$ 关系,可以初步估计 $d_{\max}$ 对初始变形模量、初始泊松比和切线体积模量的影响。

参考文献:

[1] 郦能惠. 土石坝安全监测分析评价预报系统[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[2] 郭庆国. 堆石料的工程特性及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[3] 郦能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[4] 杨杰,蔡新,宋小波. 基于大三轴试验的胶凝堆石料力学特性[J]. 水利水电科技进展,2014,34(4):24-28. (YANG Jie, CAI Xin, SONG Xiaobo. Mechanical properties of CSG material based on large triaxial tests[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4): 24-28. (in Chinese))

[5] 杨杰,蔡新,郭兴文. 基于强度试验的胶凝堆石材料破坏准则[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):47-50. (YANG Jie, CAI Xin, GUO Xingwen. Experimental study of scale effect on strength of rockfill material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(2): 47-50. (in Chinese))

[6] 蔡新,宋小波,明宇,等. 胶凝堆石料大三轴试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(5):424-428. (CAI Xin, SONG Xiaobo, MING Yu, et al. Large-scale triaxial tests for CSG materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(5): 424-428. (in Chinese))

[7] 徐志华,孙大伟,张国栋. 堆石料应力-应变特性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学,2017,41(5):1565-1572. (XU Zhihua, SUN Dawei, ZHANG Guodong. Study on stress-strain behavior of rockfill using large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,41(5): 1565-1572. (in Chinese))

[8] 朱晟,宁志远,钟春欣,等. 考虑级配效应的堆石料颗粒破碎与变形特性研究[J]. 水利学报,2018,49(7):849-857.

- (ZHU Sheng, NING Zhiyuan, ZHONG Chunxin, et al. Study on particle crush and deformation characteristics considering rockfill gradation effect[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(7): 849-857. (in Chinese))
- [9] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill embankment dam engineering [M]. New York:John Wiley, 1973: 109-200.
- [10] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill mechanicals[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations, Division, ASCE, 1972, 98(1): 95-114.
- [11] 郇能惠,朱铁,米占宽. 小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J]. 水电能源科学, 2001, 19(2): 40-43. (LI Nenghui, ZHU Tie, MI Zhankuan. Experimental study of compact density of scaled coarse-grained soil[J]. Water Resources and Power,2001,19(2):40-43. (in Chinese))
- [12] 花俊杰,周伟,常晓林,等. 堆石体应力变形的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(2):328-335. (HUA Junjie, ZHOU Wei, CHANG Xiaolin, et al. Study of scale effect on stress and deformation of rockfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(2):328-335. (in Chinese))
- [13] 王继庄. 堆石料的变形特性和缩尺效应[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4):89-95. (WANG Jizhuang. Deformation behaviour and scale effects of coarse-grained materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994,16(4): 89-95. (in Chinese))
- [14] 翁厚洋,朱俊高,余挺,等. 堆石料缩尺效应研究现状与趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009,37(4):426-429. (WENG Houyang, ZHU Jungao, YU Ting, et al. Status quo and tendency of studies on scale effect of coarse-grained soil materials[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2009, 37(4): 426-429. (in Chinese))
- [15] 翁厚洋. 堆石料缩尺效应试验研究[D]. 南京:河海大学, 2008.
- [16] 凌华,殷宗泽,朱俊高,等. 堆石料强度的缩尺效应试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011,39(5):540-544. (LING Hua, YIN Zongze, ZHU Jungao, et al. Experimental study of scale effect on strength of rockfill material[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011, 39(5):540-544. (in Chinese))
- [17] 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(增刊1):563-566. (LI Chong, HE Changrong, WANG Chen, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup1): 563-566. (in Chinese))
- [18] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALAM K, et al. Testing and modeling two rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(3): 206-218.
- [19] 饶锡保,何晓民,刘鸣. 粗粒含量对砾质土工程性质的影响的研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(11): 21-25. (RAO Xibao, HE Xiaomin, LIU Ming. Influence of coarse-grained content on engineering properties of gravelly soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(11): 21-25. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程:SL 237—1999[M]. 北京:中国水利水电出版,1999.

(收稿日期:2018-12-20 编辑:高建群)