

DOI: 10.11779/CJGE2020S2025

# 堆石料力学特性缩尺效应试验研究

武利强<sup>1,2</sup>, 叶飞<sup>3</sup>, 林万青<sup>3</sup>

(1. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省水利防灾减灾重点实验室, 浙江 杭州 310020;

3. 浙江省水利水电工程质量与安全中心, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 针对近年来堆石料力学特性缩尺效应试验研究成果较少的现状, 开展了系列不同级配、不同最大粒径料的大三轴试验。试验料最大颗粒粒径分别为 20, 40, 60 mm, 级配采用同一分形维数控制, 分别为 2.3, 2.6 和 2.7, 代表了粗料、中间料和细料, 共 9 组级配。制样标准采用同一相对密实度控制。研究表明: 采用同一分形维数级配设计和同一相对密实度制样, 堆石料内摩擦角、初始切线模量、体积模量总体上表现出随着颗粒最大粒径增大而增大的规律。但与变形模量相比, 抗剪强度缩尺效应较小。

**关键词:** 堆石料; 力学特性; 分形维数; 缩尺效应; 制样标准

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)S2-0141-05

**作者简介:** 武利强(1985—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事土石坝筑坝材料工程特性及数值仿真计算研究。E-mail: wulq@zjwater.gov.cn。

## Experimental study on scale effect of mechanical properties of rockfill materials

WU Li-qiang<sup>1,2</sup>, YE Fei<sup>3</sup>, LIN Wan-qing<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310020, China; 2. Zhejiang

Provincial Key Laboratory of Hydraulic Disaster Prevention and Mitigation, Hangzhou 310020, China; 3. Zhejiang Water Conservancy and

Hydropower Engineering Quality and Safety Management Center, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Due to few experimental achievements on scale effect of mechanical properties of rockfill materials, series of triaxial tests are made with different gradations and maximum diameters. The maximum diameters are 20, 40 and 60 mm. The 9 groups of gradations are designed with the same fractal dimensions under different maximum diameters. The values of fractal dimensions are 2.3, 2.6 and 2.7, respectively, which represents coarse materials, medial materials and fine materials. The sample preparation standard is designed under the same relative density. The results show that the internal friction angles, initial tangent moduli and bulk moduli increase with the increase of the maximum diameters.

**Key words:** rockfill material; mechanical property; fractal dimension; scale effect; sample preparation standard

## 0 引言

堆石料缩尺效应是指室内缩尺级配料物理、力学特性与现场原级配料之间的差异, 表现出与颗粒粒径大小相关的尺寸效应。武利强等<sup>[1]</sup>从密实度和力学特性两个方面系统总结了粗粒料的缩尺效应规律, 并对缩尺效应产生的原因和机理进行了探讨。周伟等<sup>[2]</sup>系统总结了堆石体缩尺效应研究进展, 对缩尺效应影响因素、研究进展及未来研究方向进行了详细阐述。关于缩尺效应研究成果大致可分为以下三类: ①室内物理试验。通过研制大尺寸试验仪器, 尽可能延长缩尺级配料最大允许粒径。大连理工大学孔宪京团队于 2016 年成功研制了国内第一台超大型静动两用三轴仪, 试样直径可达 1000 mm<sup>[3]</sup>, 并取得了初步研究成

果<sup>[4]</sup>。②数值模拟试验。目前粗粒料大三轴试验试样直径多以 300 mm 为主, 允许颗粒最大粒径仅 60 mm。虽然已研制成功超大型试验仪器, 但试验精度控制、试验成本等均大大增加, 短时间内难以大范围应用。数值试验能够克服室内试验的尺寸限制、边界条件控制与内部结构变化的测定等局限性, 近年来许多研究者采用。武汉大学周伟团队建立了随机颗粒不连续变形模型, 在堆石体缩尺效应细观机制、蠕变尺寸效应、缩尺效应分形特性等方面取得了系列成果<sup>[5-8]</sup>。河海大学朱晟课题组采用颗粒流程序(PFC), 并结合物理试验, 引入分形理论, 对堆石料密实度缩尺效应、力学

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51609215)

收稿日期: 2020-08-10

特性缩尺效应及大坝填筑标准进行了深入研究<sup>[9-11]</sup>。

③现场试验。缩尺效应研究的最终目的是准确评价现场原级配料的力学性质，理论上现场试验是最可靠、准确的试验方法。然而，现有的试验技术无法进行足尺度的三轴试验，无法直接获取相关力学参数。

已有的研究成果力学特性方面对抗剪强度研究较多，变形特性研究相对较少，且多采用数值试验手段。数值试验中颗粒形状、颗粒破碎等技术目前尚不十分成熟，模拟结果和实际试验结果还有一定差距。基于此，本文对堆石料最大粒径分别为 20，40，60 mm 的试样进行了大三轴试验，详细研究了抗剪强度、应力应变行为、切线模量及体积模量的缩尺效应规律。

1 试验方案

1.1 试验级配

试验采用片麻岩堆石料，为中硬岩。试验级配采用符合 Talbot 曲线的级配曲线，采用式（1）计算得到：

$$p_i = 100 \left( \frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D}, \quad (1)$$

式中， $p_i$  为粒径  $d < d_i$  时质量分数， $D$  为级配分形维数。

试验级配料分形维数分别为 2.3，2.6，2.7，分别代表了粗级配料、中间级配料和细级配料。级配最大粒径分别为 20，40，60 mm，不同最大粒径级配保持相似，级配曲线见图 1。

1.2 制样标准

常用制样标准包括同一干密度（或孔隙率）和同一相对密实度。同一干密度标准的优点是可直接与现场碾压干密度对应，缺点是密实度受级配影响较大。相对密实度指标则可以克服级配影响的缺点，保证不同级配料密实程度一致，故采用同一相对密实度制样，相对密实度取 0.85。

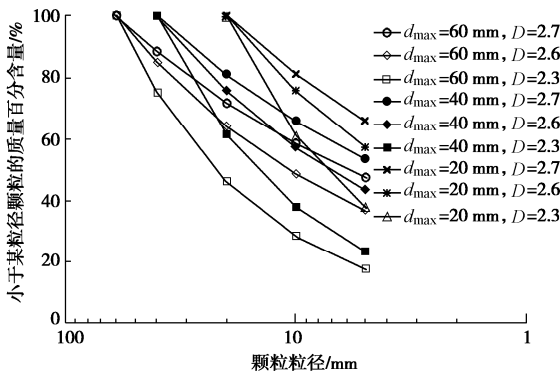


图 1 级配曲线

Fig. 1 Gradation curve

首先进行相对密实度试验，测定其最大和最小干密度。最小干密度试验采用人工法，对于大颗粒用手轻轻放下，不引起对周围颗粒的挤压，细颗粒则用铲靠着试样慢慢的均匀地撒开。最大干密度试验采用振动法。试样表面静载为 14 kPa，振动频率为 40 Hz。试样分层铺装，振动历时 10 min。试样筒表面用环刀找平，然后根据颗粒总量、剩余量及试样体积计算试样的最大、最小干密度。试验结果见表 1。

表 1 相对密实度试验成果及制样干密度

Table 1 Minimal densities, maximal densities and sample densities

级配	最小干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	制样干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
60-2.3	1.60	2.20	2.08
60-2.6	1.74	2.26	2.16
60-2.7	1.77	2.24	2.15
40-2.3	1.57	2.18	2.06
40-2.6	1.70	2.23	2.13
40-2.7	1.75	2.22	2.13
20-2.3	1.52	2.14	2.02
20-2.6	1.65	2.18	2.08
20-2.7	1.67	2.15	2.06

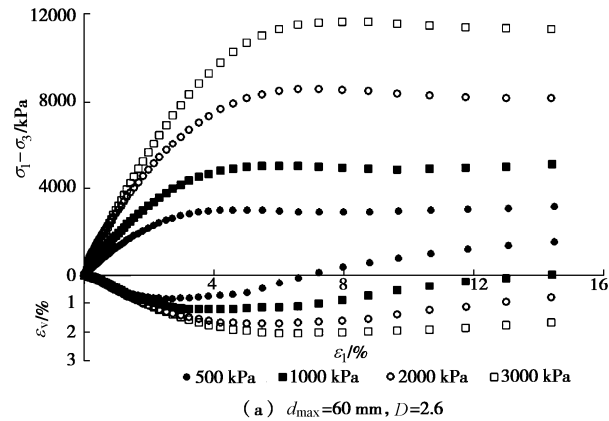
1.3 试验过程

本次三轴压缩试验在 GCTS 大型三轴压缩试验仪上进行。该仪器主要技术参数：最大轴向静荷载 1500 kN；最大轴向动荷载 800 kN；最大静态围压 3 MPa；最大动态围压 3 MPa；振动频率 0~20 Hz；试样尺寸 Φ300 mm×700 mm。围压分为 500，1000，2000，3000 kPa 4 个级别。

2 试验结果分析

2.1 应力应变曲线

本次试验共 9 组级配料，每组 4 个围压，应力应变曲线见图 2，限于篇幅，仅列出了  $D=2.6$ ，最大粒径分别为 20，40，60 mm 的级配料应力应变曲线。



(a)  $d_{\max}=60$  mm,  $D=2.6$

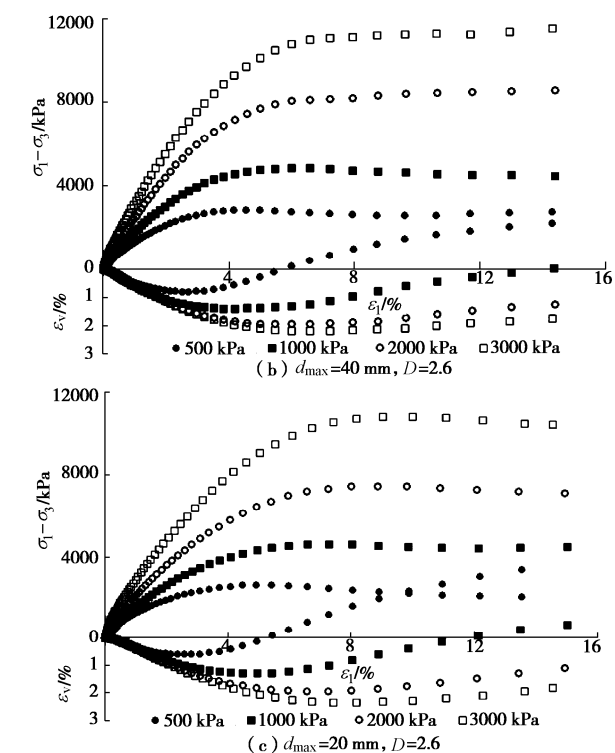


图 2 应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves

2.2 抗剪强度

堆石料抗剪强度是随着围压增加而降低的, 常用式 (2) 模型来反映:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \frac{\sigma_3}{p_a}, \tag{2}$$

式中  $p_a$  为 1 个标准大气压力;  $\varphi_0$  为  $\sigma_3 = p_a$  时的  $\varphi$  值;  $\Delta\varphi$  为反映  $\varphi$  随围压增大而降低的参数。

整理了不同分形维数, 不同围压下, 内摩擦角随颗粒最大粒径的变化情况, 见图 3。由图 3 可见, 采用同一相对密实度制样标准时, 无论何种级配, 内摩擦角均表现出随着最大粒径增大而增大的规律。这和郇能惠等<sup>[12]</sup>研究结论是一致的。但与同一干密度制样标准相比, 内摩擦角缩尺效应较小, 最大值与最小值差值介于 1.2%~7.6%, 平均值 4.8%。缩尺效应大小与级配相关。

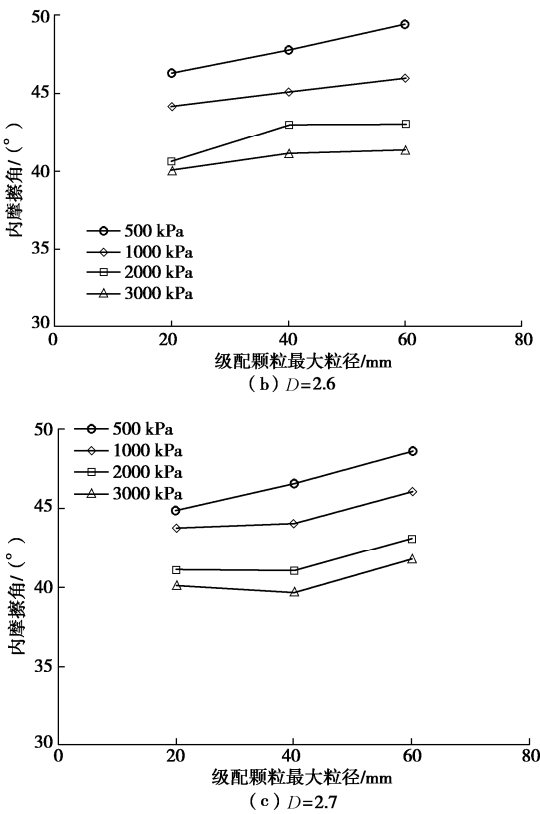
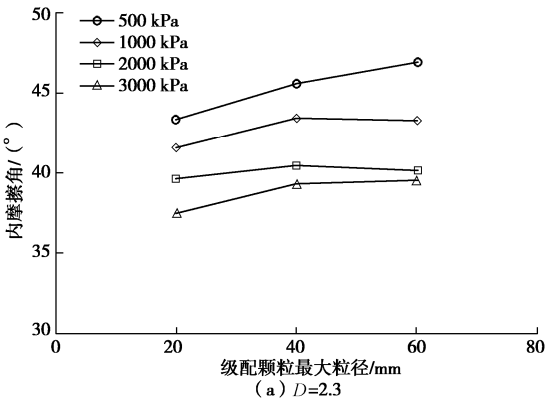


图 3 内摩擦角与最大粒径关系曲线

Fig. 3 Relationship between internal friction angle and maximal particle size

2.3 邓肯模型参数

为进一步了解堆石料应力变形本构行为, 根据应力应变曲线拟合了邓肯  $E-B$  模型参数, 见表 2。

表 2 邓肯  $E-B$  模型参数汇总表

级配	参数				
	$R_f$	$K$	$n$	$K_b$	$m$
60-2.3	0.805	841	0.498	606	0.086
60-2.6	0.763	921	0.500	1015	0.192
60-2.7	0.708	855	0.495	1389	0.123
40-2.3	0.817	841	0.500	544	0.134
40-2.6	0.805	1044	0.500	946	0.158
40-2.7	0.756	829	0.500	1497	0.094
20-2.3	0.798	671	0.498	617	0.045
20-2.6	0.726	689	0.500	1451	0.018
20-2.7	0.737	722	0.500	1435	0.037

2.4 初始切线模量

初始切线模量按式 (3) 计算得到:

$$E_i = K p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n, \tag{3}$$

式中,  $K$ ,  $n$  为邓肯模型参数, 见表 2。

整理了  $E_i$  随颗粒最大粒径的变化情况, 见图 4。总体上, 初始切线模量表现出随着最大粒径增大而增大的趋势。最大值与最小值差值介于 14.1%~34.0%, 平均 23.0%。与抗剪强度缩尺效应相比, 初始切线模量缩尺效应显著增大。

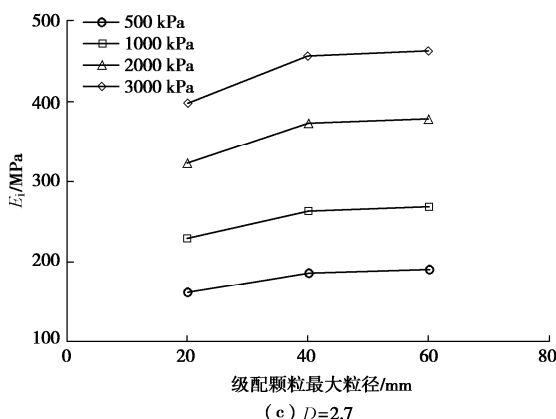
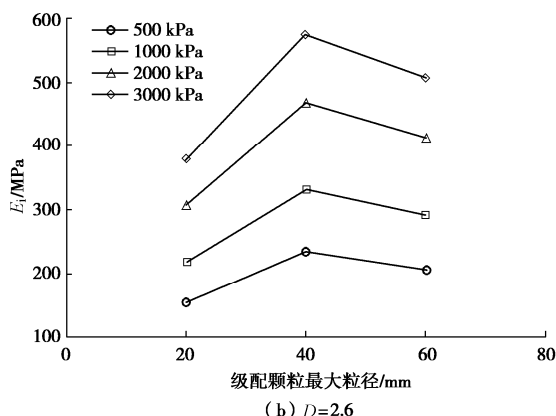
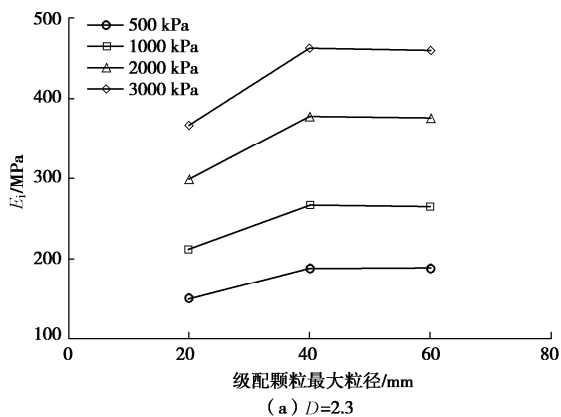


图4 初始切线模量与最大粒径关系曲线

Fig. 4 Relationship between initial tangent modulus and maximal particle size

## 2.5 体积模量

体积模量按式(4)计算得到:

$$B_t = K_b p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m, \quad (4)$$

式中,  $K_b$ ,  $m$  为邓肯模型参数, 见表2。

整理了  $B_t$  随颗粒最大粒径变化情况, 见图5。总体上, 体积模量表现出随着最大粒径增大而增大的规律。最大值与最小值差值介于 4.6%~22.8%, 平均值 15.1%。可见, 体积模量缩尺效应程度虽小于初始切线模量, 但仍大于抗剪强度缩尺效应。

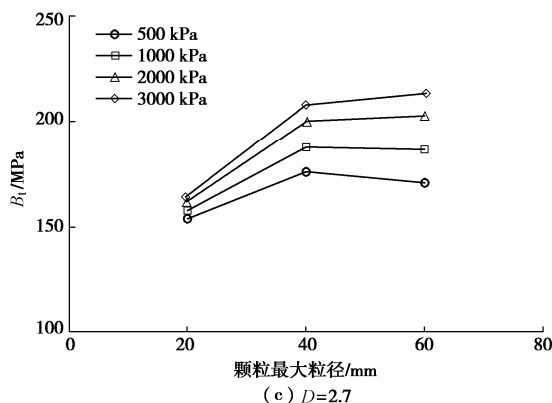
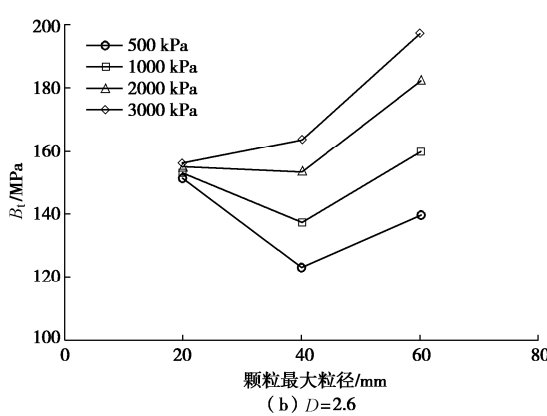
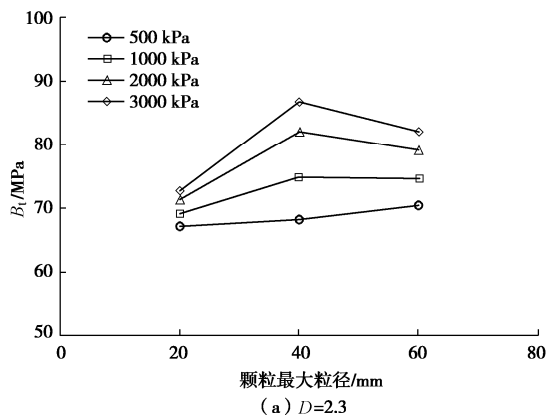


图5 体积模量与最大粒径关系曲线

Fig. 5 Relationship between bulk modulus and maximal particle size

## 3 结 论

(1) 采用同一分形维数级配设计和同一相对密实度制样, 堆石料内摩擦角、初始切线模量、体积模量总体上表现出随着颗粒最大粒径增大而增大的规律。但与变形模量相比, 抗剪强度缩尺效应较小。

(2) 同一分形维数级配设计保证了不同最大粒径级配料级配结构几何相似, 同一相对密实度制样标准保证了不同级配料密实度一致, 有效排除了级配结构等因素影响, 更有利于探讨堆石料力学特性缩尺效应深层次规律和机理。

(3) 限于试验仪器尺寸, 本文仅研究了最大粒径为 20, 40, 60 mm 级配料的力学特性缩尺效应。得到的结论尚需通过更大粒径系列的验证。条件成熟时, 将继续开展更大粒径系列的试验研究工作。

(4) 相对密实度指标理论上更能准确反映筑坝材料密实度, 有利于堆石坝不同分区变形协调控制。后续的研究应将重点放在如何准确确定现场原型级配料的最大干密度上。

#### 参考文献:

- [1] 武利强, 朱 晟, 章晓桦, 等. 粗粒料试验缩尺效应的分析研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(8): 2187 - 2197. (WU Li-qiang, ZHU Sheng, ZHANG Xiao-hua, et al. Analysis of scale effect of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(8): 2187 - 2197. (in Chinese))
- [2] 周 伟, 常晓林, 马 刚, 等. 堆石体缩尺效应研究进展分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, **3**(1): 17 - 23. (ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, MA Gang, et al. Analysis on the research development of rockfill scale effect[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, **3**(1): 17 - 23. (in Chinese))
- [3] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高. 堆石料尺寸效应研究面临的问题及多尺度三轴试验平台[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(11): 1941 - 1947. (KONG Xian-jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao. Scale effect of rockfill and multiple-scale triaxial test platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(11): 1941 - 1947. (in Chinese))
- [4] 孔宪京, 宁凡伟, 刘京茂, 等. 基于超大型三轴仪的堆石料缩尺效应研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(2): 255 - 261. (KONG Xian-jing, NING Fan-wei, LIU Jing-mao, et al. Scale effect of rockfill materials using super-large triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(2): 255 - 261. (in Chinese))
- [5] 赵婷婷, 周 伟, 常晓林, 等. 堆石料缩尺方法的分形特性及缩尺效应研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(4): 1093 - 1101. (ZHAO Ting-ting, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. Fractal characteristics and scaling effect of the scaling method for rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(4): 1093 - 1101. (in Chinese))
- [6] 马 刚, 周 伟, 常晓林, 等. 堆石料缩尺效应的细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(12): 2473 - 2482. (MA Gang, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, et al. Mesoscopic mechanism study of scale effects of rockfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(12): 2473 - 2482. (in Chinese))
- [7] 花俊杰, 周 伟, 常晓林, 等. 堆石体应力变形特性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 328 - 335. (HUA Jun-jie, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, 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))
- [8] 周 伟, 常晓林, 周创兵, 等. 堆石体应力变形细观模拟的随机散粒体不连续变形模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(3): 491 - 499. (ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin, ZHOU Chuang-bing, et al. Stochastic granule discontinuous deformation model of rockfill and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(3): 491 - 499. (in Chinese))
- [9] 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 Yong-ming, WENG Hou-yang. 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))
- [10] 王永明, 朱 晟, 任金明, 等. 筑坝粗粒料力学特性的缩尺效应研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1799 - 1806, 1823. (WANG Yong-ming, ZHU Sheng, REN Jin-ming, et al. Research on scale effect of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1799 - 1806, 1823. (in Chinese))
- [11] 朱 晟. 高面板坝堆石体的填筑质量控制指标研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 610 - 615. (ZHU Sheng. Study and application of control indices for filling quality of high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 610 - 615. (in Chinese))
- [12] 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): 39 - 42. (LI Neng-hui, ZHU Tie, MI Zhan-kuan, et al. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi Dam and scale effect[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2001, **19**(2): 39 - 42. (in Chinese))

(编校: 明经平)