

堆石料干密度缩尺效应与制样标准研究

朱 晟^{1,2}, 王 京^{1,2}, 钟春欣¹, 武利强²

(1. 河海大学 水文水资源与水利水电工程国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对已有相对密度试验成果仅限于室内试验的现状, 采用某工程花岗岩堆石料, 首次进行现场大尺寸密度桶试验, 研究不同缩尺方法对干密度试验结果的影响, 研究干密度缩尺效应对室内缩尺试验的制样标准以及现场压实质量评价的影响。结果表明: (1) 由于缩尺后级配的截尾误差、颗粒形状差异等因素, 即使采用相似级配法缩尺, 堆石料干密度也随着最大粒径的增大而增大, 仍然存在一定的缩尺效应; 但当最大粒径达到 300 mm 以上时, 这种缩尺效应显著减小; (2) 最大粒径不同的各组级配堆石料干密度测量值均存在极大值, 对应的临界分形维数与级配的最大粒径无关; (3) 目前普遍使用的混合缩尺方法, 降低了原级配堆石料的粒度分形维数, 劣化了颗粒之间的充填关系, 导致同一相对密度条件下的干密度比相似级配法的试验结果更明显偏离现场, 难以合理反映原级配堆石料的物理力学性质; (4) 采用与现场碾压堆石体相同的相对密度标准制样, 比直接采用现场填筑干密度制样, 其室内压缩试验得到的压缩模量降低 90%~220%; 不考虑干密度缩尺效应的室内试验结果, 大大高估了现场碾压堆石体的力学性质; (5) 采用室内试验结果直接计算现场原级配堆石体的相对密度, 高估了堆石体的压实程度, 甚至可能出现相对密度大于 1 的问题。

关键词: 岩土工程; 分形理论; 堆石; 干密度; 相对密度; 缩尺效应; 制样标准

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)05 - 1073 - 08

Experimental study on scale effect of the dry density of rockfill material

ZHU Sheng^{1,2}, WANG Jing^{1,2}, ZHONG Chunxin¹, WU Liqiang²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Hydroelectric College, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In view of the current situation that the relative density test results are limited to indoor tests, site large-scale density barrel tests were carried out on granite rockfill material from a certain engineering for the first time. The effect of different scale methods on the dry density was investigated, and the influence of the dry density scale effect on the sample preparation standards for indoor scale tests and on-site compaction quality evaluation was revealed. The test results show that, due to the truncation error of the grading after the scale and the difference of the particle shape, the dry density of the rockfill increases with increasing the maximum particle size and the scale effect still exists even if the similar scale is used, but that the scale effect is significantly reduced when the maximum particle size reaches 300 mm or more. The measured dry density of each group of grading piles with different maximum particle diameters have maximum values, and the corresponding critical fractal dimension has nothing to do with the maximum particle size of the gradation. the mixed scale method commonly used at present reduces the fractal dimension of the original graded rockfill and deteriorates the filling relationship between the

收稿日期: 2018 - 06 - 28; **修回日期:** 2018 - 10 - 11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404801, 2017YFC0404805)

Supported by the National Key Research and Development Plan(Grant Nos. 2017YFC0404801 and 2017YFC0404805)

作者简介: 朱 晟(1965 -), 男, 博士, 1988年毕业于河海大学水利水电工程专业, 现任教授, 主要从事土石坝及环境岩土力学方面的教学与研究工
作。E-mail: 949507145@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0764

particles, and as a result, the dry density under the same relative density condition deviates from the scene more obviously than the test result of the similar grading method which is difficult to reasonably reflect the physical and mechanical properties of the original graded rockfill. It is shown that, using the same relative density standard sample preparation as the on-site compacted rockfill body, the compression modulus obtained by the indoor compression test is reduced by 90% - 220% compared with the direct filling of the dry density sample on site and that the indoor test results without considering the density scale effect significantly overestimate the mechanical properties of the rockfill on site. The indoor test results used to directly calculate the relative density of the original graded rockfill body overestimate the compaction degree of the rockfill body, and even the calculation value of the relative density may be greater than 1.

Key words: geotechnical engineering; fractal theory; rockfill; dry density; relative density; scale effect; sample preparation standards

1 引言

堆石体的密实程度对其工程性质影响很大,对于高土石坝的整体稳定和变形控制而言至关重要。堆石坝设计和施工质量控制标准本身就是通过密实度指标控制^[1],而采用密实度控制室内试验的制样标准,也间接影响了堆石体的力学性质。目前反映堆石体紧密程度的指标主要有干密度、孔隙率或孔隙比、结构孔隙比^[2]和相对密度等指标,由于孔隙率排除了母岩岩性差异引起的密实度差异,相对密度指标排除了级配差异导致的紧密程度差异^[3],这2个指标在砂砾料或堆石料密实度的评价标准中应用较广,但无论采用什么指标,都需要准确获取堆石体的干密度值。

采用控制爆破技术开采的筑坝堆石料,最大控制粒径已达到0.8~1.0 m,远远超过试验仪器的允许尺寸,进行室内试验时需要进行缩尺处理,其产生的密实度缩尺效应是一个不容忽视的问题。史彦文等^[4-5]采用相似级配缩尺方法,分别对砂卵石和堆石料的干密度缩尺效应进行了试验研究,得到了试样最大干密度随着颗粒最大粒径增大而增大,在半对数坐标系中接近线性关系的相同规律。田玉树^[6]采用等量替代法对砂卵石的密实度缩尺效应进行研究,在相同砾石含量(粒径>5 mm 颗粒含量)时,最大干密度随着最大粒径的增大而增大。朱俊高等^[7-8]研究了不同缩尺方法对堆石料干密度缩尺效应的影响,结果发现,在同一最大粒径时,相似级配法的试样干密度最大,等量替代法最小。朱晟等^[9-10]结合物理试验和数值试验手段,将分形理论引入堆石料干密度缩尺效应研究,解译了产生缩尺效应的根源;采用目前普遍使用的混合法确定缩尺级配,研究了干密度的缩尺规律。赵娜等^[11]得到了类似

的结论。可见,虽然堆石料干密度缩尺效应的研究成果较为丰富,但除武利强等^[12]统计了现场与室内不同尺寸颗粒形状外,主要局限于室内试验以及通过室内试验结果外推现场原级配干密度值。对堆石料基于现场大尺寸物理试验基础上的干密度缩尺问题研究,尚未见相关报道。

为此,本文结合某工程花岗岩堆石料,研究其干密度缩尺规律及对物理力学性质的影响。

2 试验方案

本次坝料试验包括相对密度试验以及侧限压缩试验。其中试验堆石料岩性为弱-微风化花岗岩,岩体致密坚硬,岩块相对密度2.90,饱和抗压强度为94.5~120 MPa,软化系数0.74~0.78。

2.1 试验仪器和方法

现场相对密度试验采用密度桶法^[13],自制内径1.2 m的密度桶,桶高0.8 m,采用厚度13 mm的钢板加工而成。现场相对密度试验直接在碾压密实的过渡区坝面进行,其中最大干密度试验采用32 t的施工用自行式振动碾,振动工作频率为28 Hz,激振力为590 kN,行驶速度2 km/h,按“进退法”振动碾压26遍后,在每个密度桶顶部范围定点振动碾压15 min。

室内最大干密度试验采用表面振动法^[14],采用自制表面振动器,试样表面静载为14 kPa,选用功率为2.2 kW、激振力为8 kN、振动频率为47.5 Hz的振动电机,为使振动参数与现场试验相匹配,利用朱晟^[15]的方法,标定表面振动器的振动时间为10 min;堆石料的侧限压缩试验采用河海大学 TYY-800 大型 k_0 测试仪。现场试验于2016年6月开始实施,同年8月完成,历时2个月。

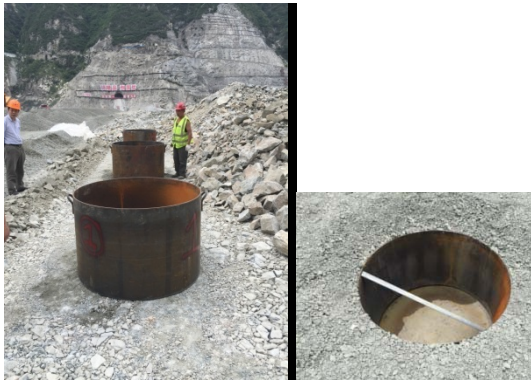


图 1 现场密度桶埋设

Fig.1 Density bucket buried on construction site

2.2 试验方案

(1) 相对密度试验

采用下游堆石区填筑平均级配作为原型级配，进行干密度的缩尺试验研究，按朱 晟等^[16]对其级配进行分形分布检验，计算得到粒度分形维数 2.542，相关系数 $R^2 = 0.993$ ，较好地符合分形分布。

现场试验分 2 组进行：第 1 组堆石料粒度分形维数为 2.542，最大粒径分别取 400，300，200 和 100 mm，共 4 个级配(按下式计算)；第 2 组为堆石料最大粒径均取 200 mm，粒度分形维数分别取 2.412，2.50，2.542，2.615 和 2.65 共 5 个级配，按满足分形分布的连续级配公式计算各粒组的百分含量：

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

式中： d_i 为粒组粒径， d_{max} 为最大粒径， D 为试验级配的粒度分形维数。具体试验级配曲线如图 2 所示。

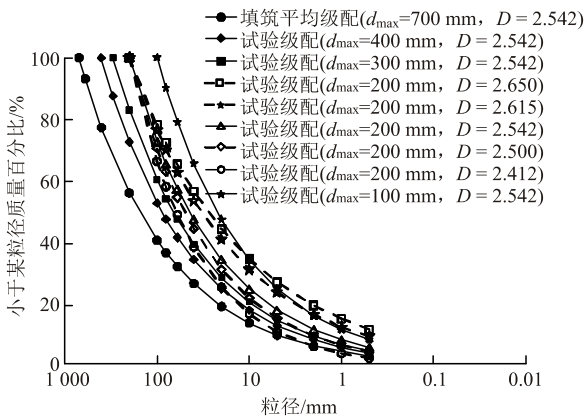


图 2 堆石料现场相对密度试验级配

Fig.2 Relative density test gradation of rockfill onsite

室内试验堆石料最大粒径取 60 mm，取粒度分形维数 $D = 2.20 \sim 2.65$ ，共 13 个级配，进行相对密

度试验，按式(1)计算级配曲线如图 3 所示。同时，为了研究径比对试验结果的影响，进行了桶径分别为 600 和 300 mm 两组密度桶的最小干密度试验，4 组级配的最大粒径为 100 mm、粒度分形维数分别为 2.412，2.491，2.542，2.615，按式(1)计算级配曲线见图 3。

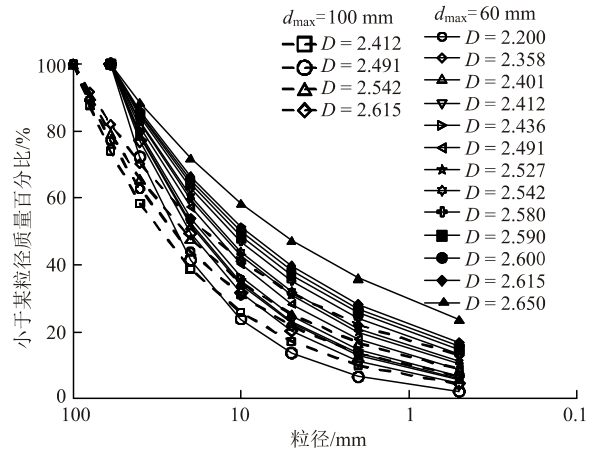


图 3 堆石料室内相对密度试验级配

Fig.3 Relative density test gradation of material indoor

(2) 室内缩尺试验级配和压缩试验

以图 2 堆石填筑平均级配作为原型级配，按最大粒径取 60 mm，分别采用相似级配法、不同 P_5 含量(< 5 mm 颗粒百分含量)的混合法和等量替代法缩尺，级配如图 4 所示。可见混合法和等量替代法缩尺后的级配在双对数图中基本为直线，符合分形分布，按式(1)求得 D 值标于图中。

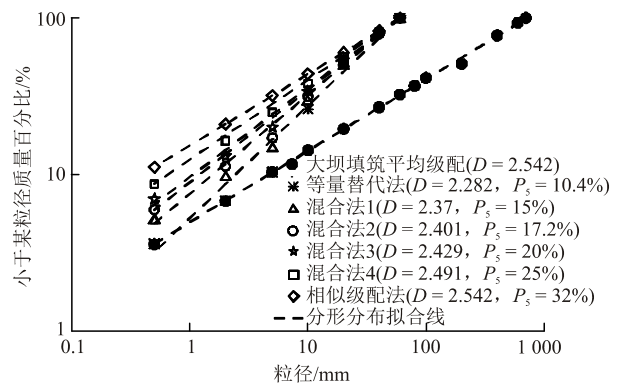


图 4 不同缩尺方法的堆石料室内试验级配

Fig.4 Test gradation of rockfill for different scale methods

图 4 中的混合法 2 级配，为采用目前常用的混合缩尺方法得到：即首先将堆石料原型级配按相似级配法缩小 3 倍，然后将大于 60 mm 的颗粒按等量替代法分配到 5~60 mm 范围，得到的缩尺级配。

采用混合法 2 级配进行室内压缩试验。

3 试验结果和分析

3.1 室内相对密度试验

图 5 为堆石料的室内相对密度试验结果。堆石料的极值干密度与粒度分形维数呈现二次函数的关系，其中，最小干密度由 1.711 g/cm³ 增大到 1.866 g/cm³，然后减小到 1.829 g/cm³，最大干密度由 2.22 g/cm³ 增大到 2.446 g/cm³，然后减小到 2.393 g/cm³，计算临界分形维数 D_c 分别为 2.582 和 2.581。

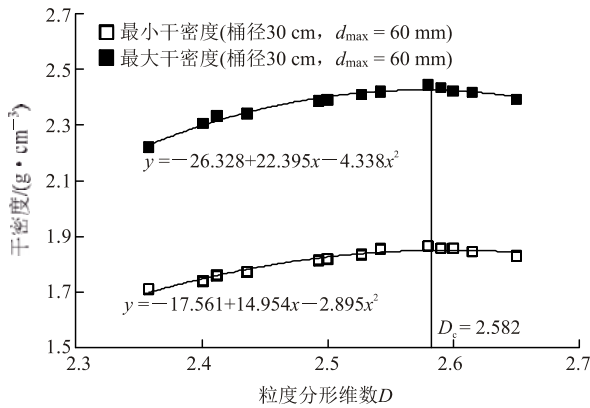


图 5 堆石料室内表面振动法相对密度试验结果

Fig.5 Relative density test results of internal surface vibration of rockfill

为了解密度桶直径和最大颗粒直径的比值(径径比)对相对密度试验结果的影响，分别采用 0.6 和 0.3 m 直径密度桶进行最大粒径 100 mm 堆石料的最小干密度试验，结果如图 6 所示，图中数据为每个级配重复 3 次试验取平均值。可见，当 $D = 2.491$ 时，最小干密度分别为 1.849 和 1.855 g/cm³，已经较为接近。因此，认为当粒度分形维数大于 2.5，径径比不小于 3 时，基本能满足相对密度试验的精度要求。

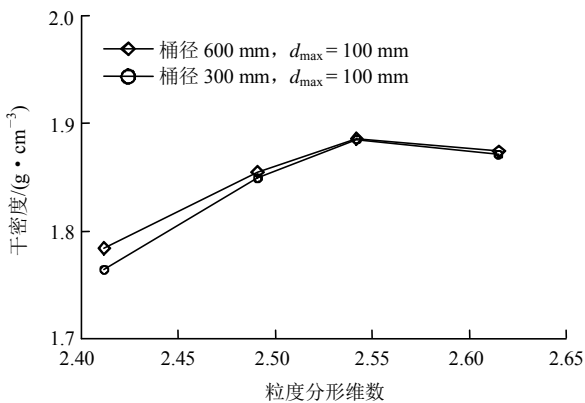


图 6 不同径径比堆石料最小干密度试验结果

Fig.6 Minimum dry density test results of different diameter ratios of rockfill

3.2 现场相对密度试验

堆石料的现场相对密度试验过程如图 7 所示，图 8 为最大粒径 200 mm 时不同级配堆石料的相对密度试验结果。与室内试验结果类似，当粒度分形维数从 2.412 变化为 2.615 时，最小干密度从 1.95 g/cm³ 增大到 2.03 g/cm³，然后减小到 2.01 g/cm³；最大干密度与级配之间的关系，和最小干密度一致，两者均可用粒度分形维数的二次函数曲线拟合，曲线的拐点对应的临界分形维数 D_c 分别为 2.581 和 2.580，非常接近。



(a) 松铺密度测量



(b) 碾压结束后



(c) 碾压结束后最大干密度称量和筛分

图 7 现场 1.2 m 直径密度桶试验示意图

Fig.7 On-site 1.2 m diameter density barrel test diagram

图 9 为粒度分形维数为 2.542，最大粒径 $d_{max} = 60 \sim 400$ mm 时堆石料相对密度试验结果。可见，无论是最大干密度还是最小干密度，均呈现出随着最大粒径的增大而增大，且当最大粒径达到 300 mm 以上时，试验干密度值就较为接近，干密度的缩尺效应大大减小。

为便于计算原级配堆石料的相对密度，提出以下公式拟合最大粒径与极值干密度之间的关系：

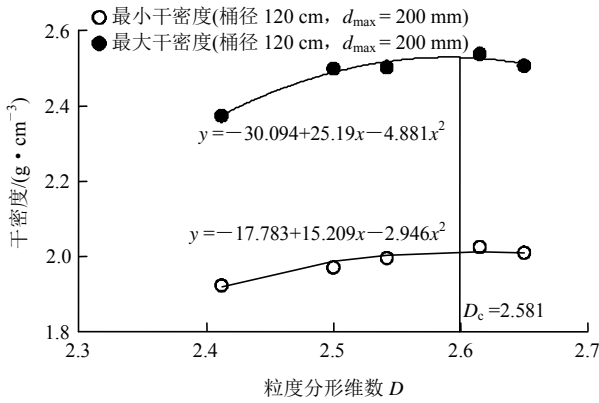


图 8 堆石料现场相对密度试验结果

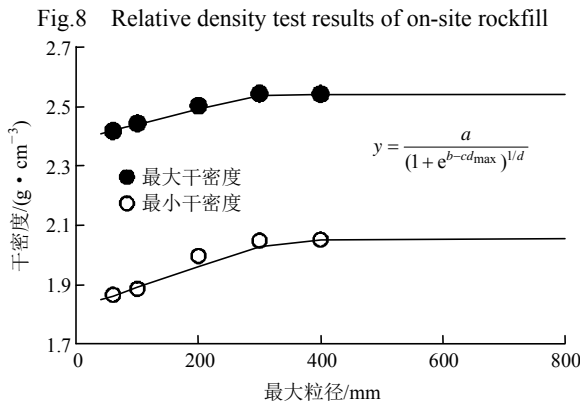


图 9 不同缩尺比的平均级配堆石料干密度规律
Fig.9 Dry density of average graded rockfill with different maximum particle sizes

$$\gamma_{d_{max}} \text{ 或 } \gamma_{d_{min}} = \frac{a}{(1 + e^{b-cd_{max}})^{1/d}} \quad (2)$$

式中： a 、 b 、 c 、 d 为拟合参数，取值见表 1，拟合曲线如图 9 所示，可见拟合效果较好，相关系数在 0.95 以上。

表 1 极值干密度拟合参数

Table 1 Fitting parameters of the maximum and minimum dry densities

极值干密度	a	b	c	d
$\gamma_{d_{max}}$	2.5	15.1	0.051	241.2
$\gamma_{d_{min}}$	2.1	12.4	0.038	102.9

3.3 关于堆石料干密度缩尺效应几个问题

3.3.1 缩尺效应的内在机制

(1) 级配截尾误差影响

根据图 9 的试验结果可知，即使采用相同粒度分形维数，不同最大粒径级配的极值干密度仍然表现出明显的缩尺效应，即干密度试验结果随着最大粒径的增大而增大，说明即使采用控制粒度分形维数相同的缩尺方法，干密度的缩尺效应仍然存在，这与

分形理论的自相似性和尺度无关性是否存在矛盾？

为了说明产生该问题的内在机制，取粒度分形维数 $D = 2.60$ ， d_{max} 分别取 40，80，120，160 mm，相应的颗粒最小粒径满足 $d_{max} / d_{min} = 4$ ，按式(1)生成第 1 组分形级配见图 10(a)；取粒度分形维数和 d_{max} 与第 1 组相同，但颗粒最小粒径都取 1 mm，按式(1)生成第 2 组分形级配见图 10(b)。按照朱 晟等^[9]的方法配制刚性圆形颗粒，进行 2 组级配的相对密度数值试验，结果见图 11。

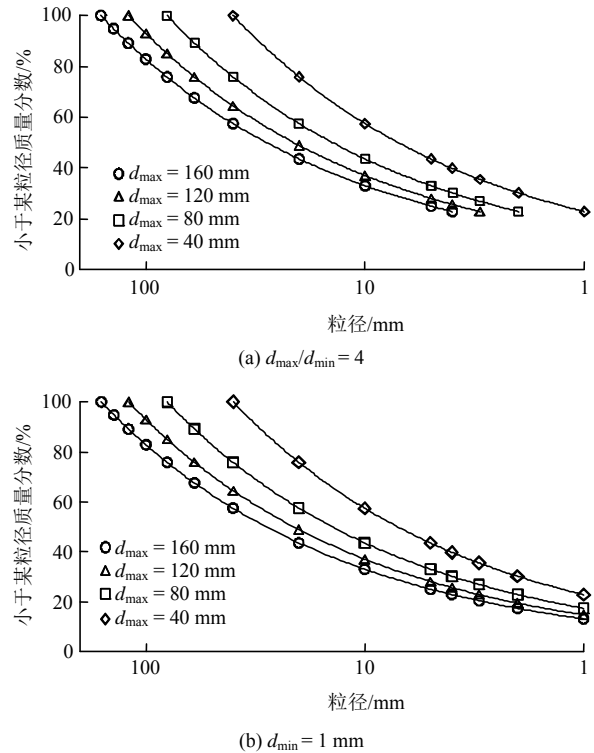
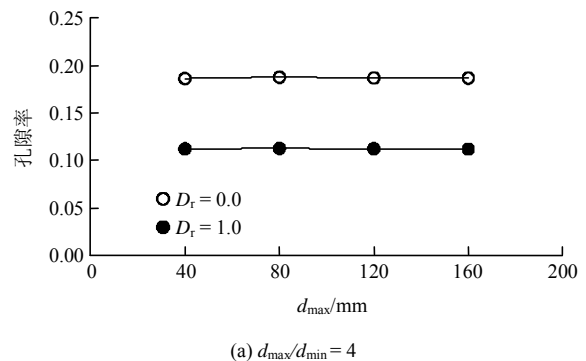


图 10 分形缩尺方法的数值试验级配

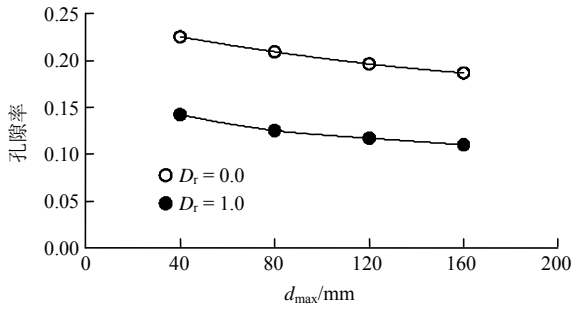
Fig.10 Numerical test gradation for fractal scale method

由图 11 可见，当级配满足严格相似条件时，颗粒体干密度或孔隙率与最大粒径是无关的。而当试验级配最小粒径相同时，则试验孔隙率随着最大粒径的增大而减小，表现出明显的缩尺效应。

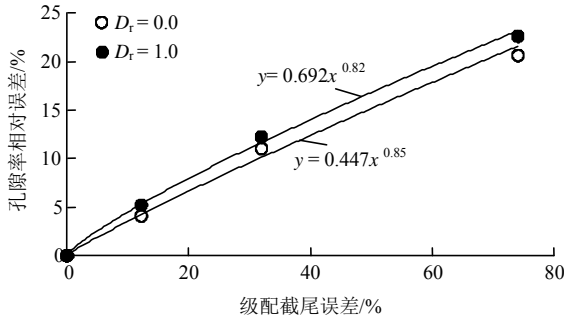
为了定量分析此部分误差的影响，以最大粒径 160 mm 级配为基准，定义截尾误差 $\delta = 100(p_i^1 -$



(a) $d_{max}/d_{min} = 4$



(b) $d_{min} = 1 \text{ mm}$



(c) 相对 $d_{max} = 160 \text{ mm}$ 级配的试验误差

图 11 两组满足分形缩尺条件的数值试验结果

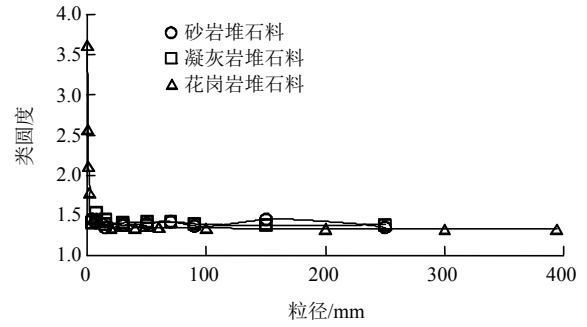
Fig.11 Numerical test results of two groups meeting fractal scale conditions

$p_{i=160}^1 / p_{i=160}^l$, 其中, p_i^l 为指定级配中小于 1 mm 颗粒含量, i 为最大粒径, 则由图 11(c)可知, 由于级配截尾误差的影响, 试验孔隙率的相对误差最大达到 20%左右。

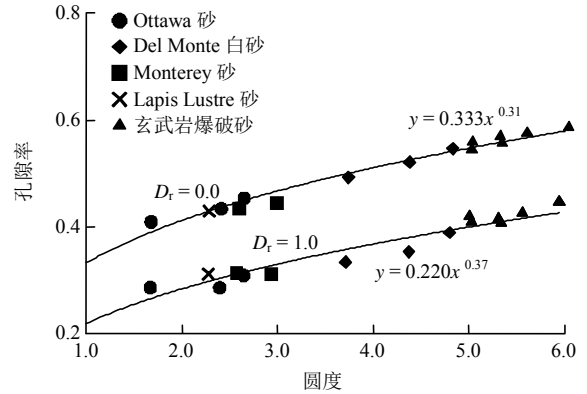
可见, 对于现场填筑堆石料而言, 最小粒径一般在 0.01~0.075 mm 范围, 对于原型级配缩尺后, 采用简单破碎加工的试验堆石料, 最小粒径颗粒不能无限小, 即缩尺后颗粒最小粒径与原级配基本一致, 理论上存在截尾问题; 而且, 实际试验操作时, 颗粒级配一般在 2~5 mm 就不再细分了, 存在人为截尾误差, 导致即使采用相同分形维数进行缩尺, 仍然存在干密度缩尺效应。

(2) 颗粒形状与颗粒破碎的影响

图 12(a)为堆石料颗粒粒径与类圆度的关系曲线, 其中, 颗粒类圆度按朱 晟等^[9]计算, 本次花岗岩堆石料除 0.5 mm 以下颗粒的棱角较锋利、颗粒明显不规则外, 其余粒组颗粒均接近于圆且不同粒径组的形状变化相对较小。图 12(b)为 T. L. Youd^[17]对于 2 mm 以内颗粒进行分组后的单一粒组相对密度试验结果。可见颗粒形状与孔隙率之间具有较好的规律性, 且这种规律性与材料类型无关, 可用统一的公式描述, 说明颗粒形状对试样压实性具有重要的影响, 即颗粒越接近于圆, 试验孔隙率或孔隙比越小, 试样干密度越大。分析原因主要是颗粒



(a)



(b)

图 12 颗粒形状对堆石料干密度缩尺效应的影响

Fig.12 Effect of particle shape on the scale of rockfill dry density

越接近于圆, 颗粒之间的接触越充分, 颗粒之间较小的接触力也有利于调整颗粒位置, 使得颗粒充填更为密实。另外, 不同尺寸颗粒的表面形状差异^[9]、破碎强度差异^[18], 也是影响干密度缩尺效应的因素。

3.3.2 临界分形维数的尺度无关性

图 5 和 8 分别为最大粒径 60 和 200 mm 的 2 组级配相对密度试验结果, 可见, 无论是现场还是室内试验, 极值干密度值和级配之间均表现相同的规律, 即随着粒度分形维数的增大, 试验干密度值出现从小到大、再减小的规律, 其临界分形维数尽管由于缩尺效应的影响不是一个固定理论值, 但仍然在 2.580~2.582 的较小区间内波动, 表现出一定的尺度无关性, 此时级配的颗粒充填关系最优。

值得注意的是, 虽然最大粒径不同的各组级配相对密度试验得到的临界分形维 D_c 非常接近, 可近似认为对于不同缩尺比而言具有尺度无关性, 但其 P_5 (小于 5 mm 颗粒的质量百分数) 含量却相差较大。如 D_c 取试验结果平均值 2.581 时, 根据式(1), 当 $d_{max} = 60 \text{ mm}$ 时计算得到的临界 P_5 即 $P_{5C} = 35.3\%$, 当 $d_{max} = 200 \text{ mm}$ 时 $P_{5C} = 21.3\%$, 可见, P_{5C} 是与级配最大粒径或缩尺比相关的量。

3.3.3 室内试验缩尺方法和制样标准

根据图 4 所示不同缩尺方法的堆石料室内试验级配，进行室内相对密度试验，得到的极值干密度如表 2 所示。

表 2 堆石料平均填筑干密度对应的相对密度计算值
Table 2 Calculation results of the relative density corresponding to the filling dry density of rockfill

级配类型	方法	分形维数 D	$P_5/\%$	试验干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		计算 D_r
				$D_r = 1.0$	$D_r = 0.0$	
填筑级配		2.542	10.4	2.545	2.051	0.65
缩尺级配 $d_{\max} = 60 \text{ mm}$	等量替代	2.282	10.4	2.085	1.589	1.35
	混合法 1	2.370	15.0	2.222	1.711	1.17
	混合法 2	2.401	17.2	2.306	1.739	1.04
	混合法 3	2.429	20.0	2.339	1.761	1.00
	混合法 4	2.491	25.0	2.381	1.817	0.94
	相似法	2.542	32.0	2.419	1.865	0.89

假定检测平均干密度即为现场填筑平均级配堆石料的干密度，即为 2.344 g/cm^3 ，由表 2 可见，堆石体现场相对密度为 0.65。若以室内最大粒径 60 mm 缩尺堆石料的相对密度试验结果来计算，则现场相对密度计算值与不同的缩尺方法有关，其中，相似级配法为 0.89，等量替代法为 1.35，混合法则位于两者之间。当级配缩尺后小于 5 mm 细粒含量小于 20% 时，由室内试验结果计算的填筑相对密度就大于 1.0 了；如果现场填筑干密度大于 2.419 g/cm^3 时，则即使采用室内相似级配法缩尺试验结果，计算的填筑相对密度也大于 1.0。

根据表 2 可以看出：(1) 规范等量替代法和混合缩尺方法，由于改变了堆石的颗粒结构，粒度分形维数降低，级配缩尺后使得颗粒之间的充填关系变差，导致其极值干密度试验值降低，其劣化程度取决于缩尺后的 P_5 含量或粒度分形维数降低的程度。(2) 即使采用相似级配缩尺方法，由于尺寸效应的影响，干密度试验值同样出现一定程度降低，且缩尺比越大，降低程度越大。可见，级配缩尺后得到的室内极值干密度试验结果，不能直接用于计算现场堆石体的相对密度；而且，由于干密度缩尺效应，室内缩尺试验时如果仍采用现场干密度制样，则试样的紧密程度远高于现场堆石体，试验结果将可能高估堆石体的力学参数。应按缩尺前、后堆石料的同一相对密度作为制样标准，以减小级配缩尺带来的误差。

为了进一步说明干密度缩尺效应对于堆石料力学性质的影响，以规范^[14]推荐混合缩尺法的混合法 2

级配，进行 2 组方案的压缩试验：第 1 组以现场检测相对密度 0.65 的标准制样，则室内试验制样干密度为

$$\gamma_d = \frac{1.739 \times 2.306}{(1 - 0.65) \times 2.306 + 0.65 \times 1.739} = 2.07 \text{ g/cm}^3$$

第 2 组方案直接以现场检测干密度 2.344 g/cm^3 作为制样标准，则根据表 2 计算试样的相对密度为 1.04，试验中出现了堆石料不能完全装进试样桶的问题，采取加大压实功的方法保证制样成功。

图 13 为 2 组压缩试验方案得到的应力 - 应变曲线，根据试验结果计算不同加载区间的压缩模量如表 3 所示。

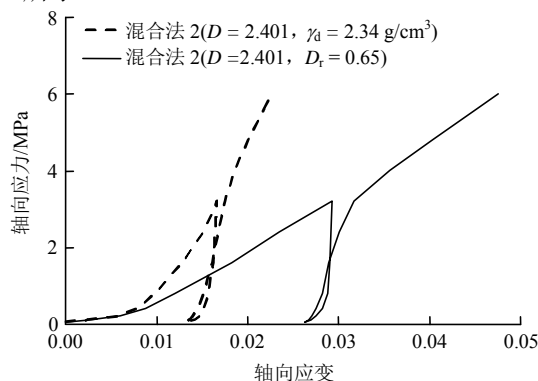


图 13 不同缩尺方案下堆石料压缩试验曲线

Fig. 13 Compression test curves of rockfill under different scale scheme

表 3 坝壳料不同加载区间的压缩模量

Table 3 Compression modulus of different loading ranges

方案编号	压缩模量/MPa				
	0.4~1.6	1.6~2.4	2.4~3.2	3.2~0.0~3.2	3.2~6.4
1	127.3	154.8	157.1	619.7	185.9
2	242.7	342.9	542.2	743.0	596.1

注：0.4~1.6 等指加载应力区间，单位 MPa。

可见，堆石料干密度的缩尺效应，对堆石体力学性质影响非常大，除卸载时模量较为接近外，在 0.4~6.0 MPa 的加载区间内，采用现场干密度制样的压缩模量高于按同一相对密度制样的 90%~220%，且加载应力越大，差异越大；不考虑干密度缩尺效应对室内缩尺试验的影响，直接采用现场检测干密度制样，相当于人为提高了制样的相对密度或紧密程度，其试验结果大大高估了堆石料的力学性质参数。

4 结 论

(1) 在堆石料室内和现场大型相对密度试验的基础上，建立了分形维数相同、最大粒径不同级配的干

密度缩尺公式。说明即使采用相似级配法缩尺,堆石料干密度也随着最大粒径的增大而增大,但当最大粒径达到 300 mm 以上时,这种缩尺效应明显减小。

(2) 混合法对级配缩尺时,由于细粒含量相对降低,粒度分形维数减小,破坏了与原级配堆石颗粒的结构相似,应尽量避免使用。对于本工程填筑级配而言,使得颗粒之间的充填关系变差,导致试验干密度低于相似级配法的结果,更明显偏离了原级配堆石料的试验结果。

(3) 堆石料充填关系最优级配对应的临界分形维数 D_c 约为 2.58,与最大控制粒径的取值无关。但临界分形维对应的 P_5 含量即 P_{5C} ,则随着最大粒径的增大而减小;以固定不变的 P_5 含量指标,评价不同最大粒径的级配堆石料级配的优劣,存在明显缺陷。

(4) 由于干密度缩尺效应的存在,以室内相对密度试验结果直接计算现场碾压堆石体的相对密度,高估了堆石体的紧密程度,不能作为堆石体质量控制标准;同时,不考虑堆石料干密度的缩尺效应,以设计干密度或填筑干密度作为室内缩尺试验的制样标准,同样高估了现场堆石体的力学性能。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. DLT 5016—2011 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. [S.1.]: [s.n.], 2011.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. DLT 5016—2011 Design code for concrete face rockfill dams[S]. [S.1.]: [s.n.], 2011.(in Chinese))
- [2] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill[C]// Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volum. New York: Wiley, 1973: 109 - 200.
- [3] 朱 晟, 钟春欣, 郑希镭, 等. 堆石体的填筑标准与级配优化研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 108 - 115.(ZHU Sheng, ZHONG Chunxin, ZHENG Xilei, et al. Filling standards and gradation optimization of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 108 - 115.(in Chinese))
- [4] 史彦文. 大粒径粗粒料填筑标准的确定及施工控制[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 78 - 93.(SHI Yanwen. Determination of filling criteria of large grain-size coarse materials for dam and construction control[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(4): 78 - 93.(in Chinese))
- [5] 冯冠庆, 杨荫华. 堆石料最大指标密度室内试验方法的研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 37 - 45.(FENG Quanqing, YANG Yinhua. Laboratory test methods for maximum index density of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(5): 37 - 45.(in Chinese))
- [6] 田树玉. 用渐近线辅助拟合法确定大粒径砂卵石最大干容重[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 35 - 43.(TIAN Shuyu. Determining the max. dry density of coarse grained sandy gravels by the method of curve-fitting with asymptotic line[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(1): 35 - 43.(in Chinese))
- [7] 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): 2 394 - 2 398.(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): 2 394 - 2 398.(in Chinese))
- [8] 傅 华, 韩华强, 凌 华. 堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2 645 - 2 649.(FU Hua, HAN Huaqiang, LING Hua. Effect of grading scale method on results of laboratory tests on rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2 645 - 2 649.(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 Yongming, WENG Houyang. Study of scale effect of density of coarse-trained 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): 1 799 - 1 806.(WANG Yongming, ZHU Sheng, REN Jinming, et al. Research on scale effect of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1 799 - 1 806.(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): 3 513 - 3 519.(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): 3 513 - 3 519.(in Chinese))
- [12] 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): 2 187 - 2 197.(WU Liqiang, ZHU Sheng, ZHANG Xiaohua, et al. Analysis of scale effect of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2 187 - 2 197.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. NB/T 35016—2013 土石筑坝材料碾压试验规程[S]. [S.1.]: [s.n.], 2013.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. NB/T 35 016—2 013 Specification for rolling test of materials for earth and rockfill dams[S]. [S.1.]: [s.n.], 2013.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. DLT 5356 - 2006 水电水利工程粗粒土试验规程[S]. [S.1.]: [s.n.], 2006.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. DLT 5356 - 2006 Test code for coarse grained soil in hydropower and water conservancy projects[S]. [S.1.]: [s.n.], 2006.(in Chinese))
- [15] 朱 晟. 一种确定粗粒料室内缩尺试验相对密度制样标准的方法与试验装置[P]. 中国: ZL 20151067446.8, 2017 - 09 - 29.(ZHU Sheng. Method and test device for determining relative density sample preparation standard for coarse-grained indoor scale test[P]. China: ZL 20151067446.8, 2017 - 09 - 29.(in Chinese))
- [16] 朱 晟, 邓石德, 宁志远, 等. 基于分形理论的堆石料级配设计方法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1 151 - 1 155.(ZHU Sheng, DENG Shide, NING Zhiyuan, et al. Gradation design method of rockfill materials based on the fractal theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1 151 - 1 155.(in Chinese))
- [17] YOU D T L. Factors CONTROLLING MAXIMUM AND MINIMUM DENSITIES OF SANDS[C]// Seventy-fifth Annual Meeting of ASTM. Los Angeles: ASTM. 1972: 98 - 112.
- [18] 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.