

DOI: 10.11779/CJGE202206013

大粒径粗粒土相对密度试验方法研究与应用

朱 晟^{1,2}, 叶华洋^{1,2}, 徐 靖^{1,2}, 冯树荣³

(1. 河海大学水文水资源与水利水电工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210029;
3. 中国电建中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 结合拉哇特高面板坝堆石料的设计填筑级配, 采用数值试验和现场试验手段, 研究了影响大型密度桶试验精度的主要因素, 提出了堆石料的孔隙率和相对密度双控填筑指标, 并结合碾压试验成果验证其适用性。结果表明: ①对于难以充分拌匀的大粒径粗粒土现场密度桶试验, 采用人工分层装样方式, 可有效减小试验结果的离散性。②密度桶尺寸的选择对试验结果影响较大, 过大的尺寸带来较高的试验成本, 甚至难以实施, 过小的尺寸会带来明显的容器边界尺寸效应。综合现场实际情况, 密度桶试验尺寸满足最小径比和高径比分别在 4.0, 2.0 左右时, 试验结果的尺寸效应相对较小。③随着最大粒径的增加, 密度桶试验的极值干密度均呈现增加的趋势, 但当最大粒径达到 300~400 mm 以后, 极值干密度基本稳定, 试验结果可以作为压实设计和填筑质量控制的依据。④试验得到拉哇角闪片岩堆石料的双控填筑指标为: 孔隙率不高于 19% 时相对密度不低于 0.73。采用 32 t 振动碾振动碾压 12 遍, 即可满足要求。⑤采用水平分层碾压的大粒径粗粒土, 适当提高压实层厚度与最大粒径的比值, 可以取得更佳的压实效率。堆石料取松铺层厚 1.0 m 左右、最大粒径 400~600 mm, 是一种较优的压实方案。研究成果可直接应用于大粒径粗粒土的填筑设计和评价, 具有较强的应用价值。

关键词: 面板堆石坝; 粗粒土; 填筑标准; 孔隙率; 相对密度; 装样方式; 干密度尺寸效应

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)06-1087-09

作者简介: 朱 晟(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事土石坝及环境土力学方面的教学研究工作。E-mail: 949507145@qq.com。

Research and application of relative density test method for large coarse-grained soil

ZHU Sheng^{1,2}, YE Hua-yang^{1,2}, XU Jin^{1,2}, FENG Shu-rong³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210029, China; 2. Hydroelectric College, Hohai University, Nanjing 210029, China; 3. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: Based on the design filling gradation of rockfill materials for Lawa super-high face dam, the main factors affecting the test accuracy of large density barrel are studied by means of numerical and field tests. The double-control index of rockfill porosity and relative density is proposed, and its applicability is verified by the results of rolling tests. The results show that: (1) For the field density barrel tests on the coarse-grained soil with a large particle size, which is difficult to be fully mixed, the method of artificial layering can effectively reduce the discreteness of the test results. (2) The selection of container size has a great influence on the test results, and too large size will bring higher test cost, even difficult to implement, while too small size will bring obvious container boundary size effect. Considering the actual situation in the field, the size effect of the test results is relatively small when the density barrel test size meets the minimum ‘diameter to diameter ratio’ and the ‘height to diameter ratio’ is about 4.0 and 2.0, respectively. (3) With the increase of the maximum particle size, the extreme dry density of density barrel tests shows an increasing trend. However, when the maximum particle size reaches 400 mm, the extreme dry density is basically stable. The test results can be used as the basis for compaction design and filling quality control. (4) The porosity is not higher than 19% and the relative density is not less than 0.75. The requirements can be met by using 32T vibration rolling 12 times. (5) For the soil with a large particle size with horizontal layered compaction, the ratio of the thickness of compaction layer to the maximum particle size can be appropriately increased, which can achieve better compaction efficiency. It is an optimal compaction scheme for rockfill materials to take a loose paving layer with a thickness of about 1.0 m and a maximum particle size of 400~600 mm. The research results can be directly applied to the compaction design and evaluation of coarse-grained soil with large particle size, which has a great application value.

收稿日期: 2021-07-19

Key words: CFRD; coarse grained soil; filling standard; porosity rate; relative density; test method; dry density size effect

0 引言

无黏性粗粒土的压实，主要依靠颗粒重排和接触点局部破损来完成。随着重型振动碾薄层碾压技术的发展，筑坝砂砾料和堆石料的最大粒径已达到600~800 mm，而限于试验条件，室内相对密度试验的最大粒径仅能做到100 mm以内。Low等^[1]、史彦文^[2]采用相似级配法的室内试验，得到最大粒径与压实干重度在半对数坐标系呈线性关系，可以外推现场大粒径级配的最大干密度，但与干密度随最大粒径增加而逐步稳定的试验结果不符^[3]。文献[4, 5]分别设计大型振动台装置，对Carters坝的石英岩堆石料和Cougar坝的玄武岩堆石料检测级配进行了大型相对密度试验，测得最大干密度试验值均低于现场填筑检测结果。现场压实方式、压实参数与室内缩尺试验存在差异^[6-8]，是导致堆石料试验最大干密度偏低的主要原因。

近年来，研究者基于最大粒径约300 mm的砂砾料提出了大型密度桶法^[9]，并规定了相应的试验流程^[10]和检测技术规程^[11]。由于采用振动碾对原级配料进行密度桶试验的压实，消除了室内缩尺试验带来的误差，阿尔塔什等高坝砂砾料的压实质量已经采用相对密度控制^[12]，长河坝^[3]、阿尔塔什^[13]、两河口^[14]等工程相继进行了堆石料的现场相对密度试验，并在阿尔塔什坝顶增模区得到成功应用^[15]。

尽管采用相对密度控制筑坝砂砾料和堆石料的压实质量已经取得共识，但根据已有资料，目前在桶径1.0~4.0 m、桶高0.8~1.0 m范围内的密度桶试验结果存在明显差异，尚缺少密度桶试验尺寸效应即径径比和径高比影响方面的研究成果；同时，现场超大粒径颗粒难以充分拌匀，如何进行人工装样，使得试验结果合理稳定，都是密度桶试验方法亟待解决的问题。

颗粒材料大多由不规则形状的颗粒组成，抵抗转动是其固有特性^[16-17]。在细观数值模拟中直接采用非圆颗粒时，需要大量与接触有关的低效率计算；而采用考虑抵抗转动的球形颗粒接触模型，进行不规则形状颗粒的数值试验分析，是一种较好的解决方案，PFC已经开发了滚动阻力模型的离散元方法^[18]，Ai等^[19]使用圆颗粒的抗转动模型重现了砂堆的形成。

为此，本文采用数值试验与物理试验相结合的手段，研究大型密度桶试验结果的主要影响因素，旨在提出一种相对合理的大型相对密度试验方法，为大粒径颗粒材料的现场相对密度设计和压实质量控制提供依据。

1 密度桶的装样方式与尺寸效应

1.1 试验方案

为了探究密度桶装样方式和尺寸效应的影响，选取不同装样方式，以及不同径径比和高径比，分别进行密度桶装样方式和尺寸效应的数值试验，其技术线路如图1所示。

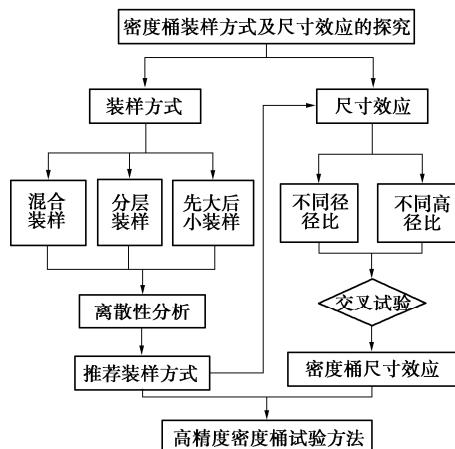


图1 密度桶数值试验技术线路图

Fig. 1 Diagram of technical circuit of density barrel tests

(1) 颗粒细观参数

选取拉哇堆石料，分别进行不同粒径组颗粒的堆积试验以及目标级配的三轴试验，如图2~5所示（限于篇幅，休止角堆积试验中仅列出10~20 mm粒径组示意图）。由堆积试验确定颗粒间摩擦系数及抗转动系数，由三轴试验确定颗粒弹性模量与刚度比等参数。张宜等^[20]指出截断粒径不超过最大粒径的0.25时（即级配宽度不低于4.0），截断粒径的影响在可接受的范围内。本节试验选取拉哇堆石料碾压级配下包线作为研究对象，按级配相似缩尺得到最大粒径60 mm的曲线，且将5 mm以下的颗粒料由5 mm颗粒进行替换保持级配宽度为12，以进行数值三轴试验。结合室内堆积休止角及三轴试验曲线的标定，细观参数的取值如表1所示。



图2 休止角堆积试验

Fig. 2 Angle of repose stacking tests

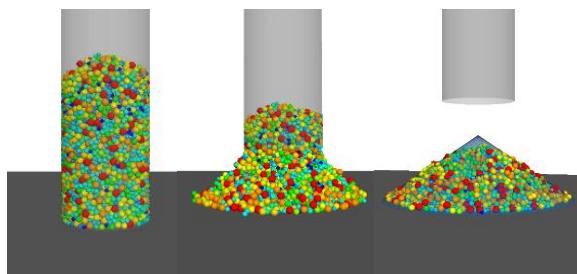


图3 休止角堆积数值模拟流程图

Fig. 3 Flow chart of numerical simulation of angle of repose stacking

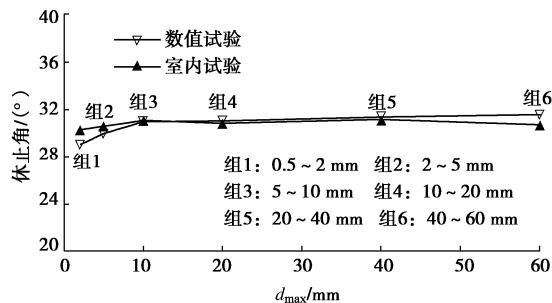


图4 休止角的室内物理试验及数值试验结果

Fig. 4 Results of experimental and numerical tests angle of repose

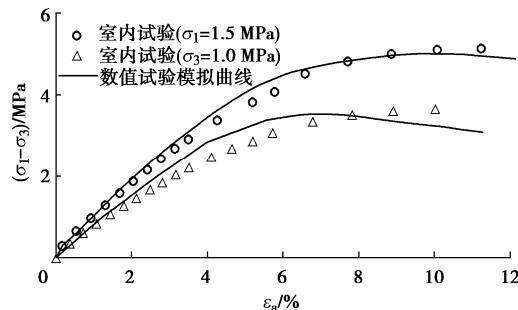


图5 室内三轴试验与数值模拟结果

Fig. 5 Triaxial results of laboratory and numerical tests

表1 数值试验颗粒细观参数

Table 1 Micro-parameters of numerical tests

颗粒密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	摩擦系数	抗转动系数	弹性模量 /GPa	刚度比
2.975	0.4	0.4	1.6	2.0

(2) 级配宽度影响

最大干密度数值试验采用振动台法,参考图6所示孔隙率结果的稳定过程,以每秒孔隙率的变化率小于2%作为试验结束的标准。

为了探究级配宽度对孔隙率的影响,控制最大粒径为400 mm,将某一细小粒径以下的颗粒按照质量守恒原则进行替换。设置级配宽度5~25,分别进行最大干密度试验,结果如图7所示。

由图7可知,随着级配宽度的增加,孔隙率呈减小趋势,最终趋于稳定。在数值模型中若对整个粒径段

的颗粒进行模拟,会导致计算量十分庞大而无法计算。后续试验主要涉及装样方式及尺寸效应的探究,级配宽度将兼顾计算机能力及试验精度综合选取。

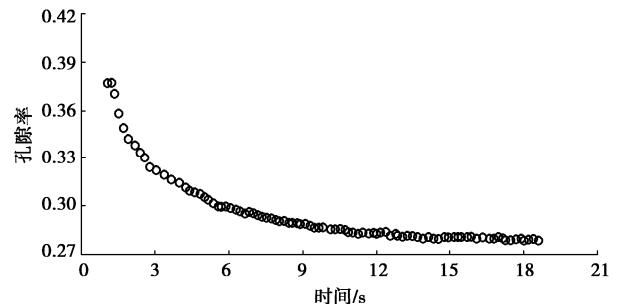


图6 振动过程中孔隙率变化示意图

Fig. 6 Variation of porosity during vibration

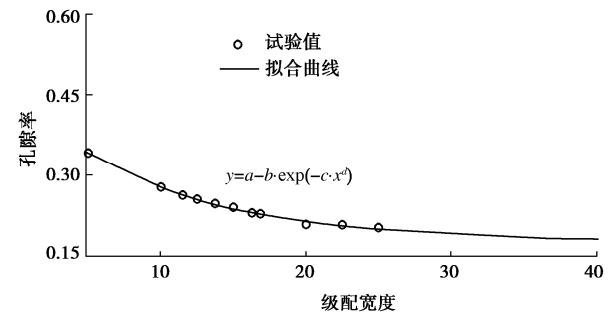


图7 级配宽度与孔隙率关系图

Fig. 7 Relationship between gradation width and porosity

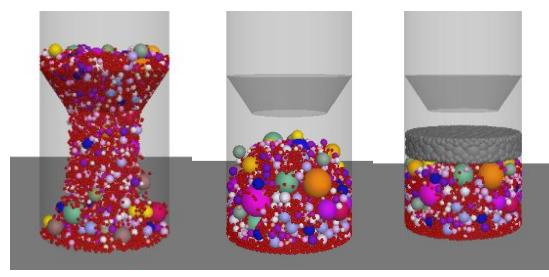
(3) 装样方式影响

分为“混合装样”、“分3层混合装样”、“先大后小装样”等3种,为便于对比,不同装样方式均采用同一样本进行试验。关于装样方式的研究,试验涉及上百组试验,综合计算效率及精度,选用级配宽度为10.0进行试验。试验方案如表2所示,试验过程见图8~10。

表2 不同装样方式试验方案

Table 2 Test schemes for different packing methods

密度桶尺寸	混合装样	分层装样	“先大后小”装样	合计/组
径径比 高径比=2.0 =4.0 高径比=1.2	40	40	40	120
	—	—	—	40



(a) 混合后下落 (b) 下落稳定 (c) 振动压实

图8 一次混合装样图

Fig. 8 First mixing and loading of sample

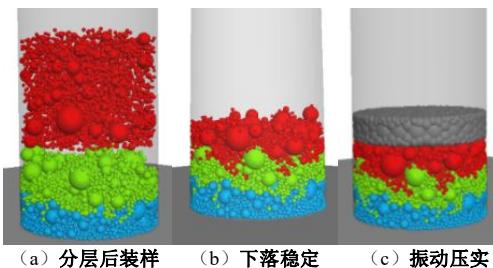


图9 分3层混合装样图

Fig. 9 Three-layer mixed sample

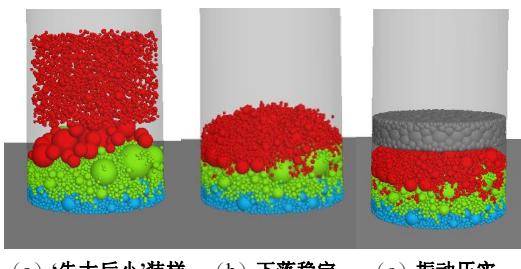


图10 先放大颗粒后放细颗粒装样图

Fig. 10 Sample with large particles first and then fine particles

(4) 尺寸效应影响

为了尽可能让数值试验结果与现场一致，兼顾计算机能力，此处选用级配宽度为18.0进行试验。针对尺寸效应的研究，进行不同径径比及高径比条件的试验，高径比为1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0时，径径比分别为2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 8.0。

1.2 试验结果分析

(1) 装样方式

图11, 12为试验结果的频数统计图，对应的变异系数及孔隙率均值整理结果见图13。可见，各尺寸比及装样方式下的试验最小孔隙率频数呈正态分布。

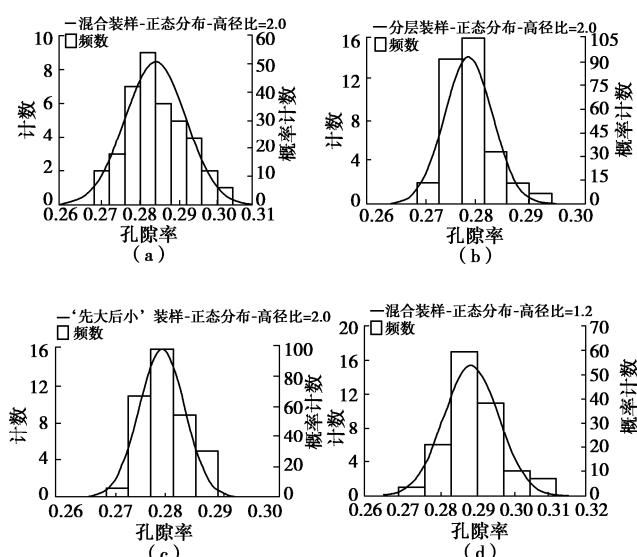
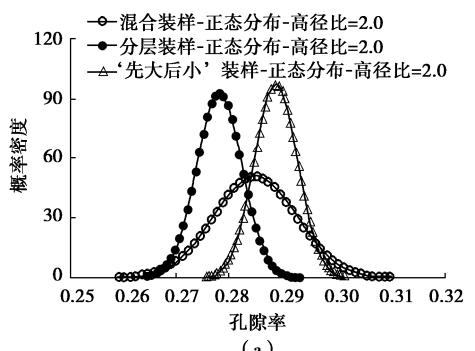
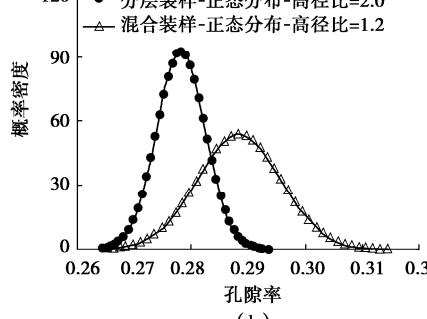


图11 不同装样方式及高径比条件下孔隙率频率分布

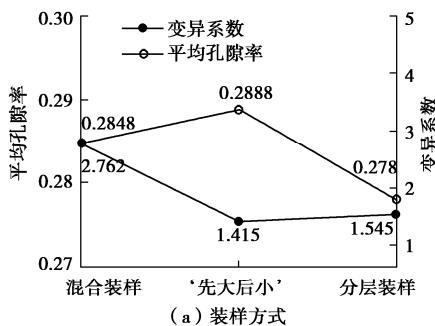
Fig. 11 Distribution of porosity frequency under different packing modes and H_0/d_{\max} conditions

(a)

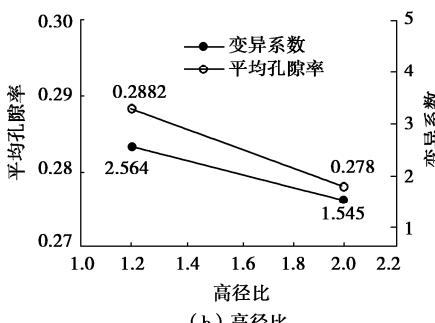


(b)

图12 不同装样方式及高径比条件下孔隙率正态分布

Fig. 12 Normal distribution of porosity under different packing modes and H_0/d_{\max} conditions

(a) 装样方式



(b) 高径比

图13 数值试验结果的变异系数

Fig. 13 Coefficient of variation of numerical test results

通过对比高径比为2.0, 1.2的试验结果可知，在相同装样方式的情况下，高径比的增大会导致孔隙率有一定降低，离散性也有减小趋势。而且不同装样方式的孔隙率均值也存在一定差异，“分层装样”的孔隙率更低，离散性相对较小；“混合装样”离散性更大一些。综合对比可知，“分层装样”均值较小且结果较为稳定（变异系数小）。后续的尺寸效应试验采用该种装样方式进行。

(2) 尺寸效应

图14中显示了不同容器尺寸条件下的孔隙率试验结果, 可知随着径径比及高径比的增大, 容器的尺寸效应减小。

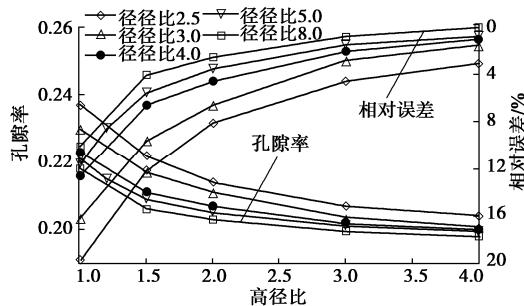


图 14 试验最小孔隙率的尺寸效应

Fig. 14 Size effect of minimum porosity

为了定量反映不同径径比及高径比对应的尺寸效应, 选取径径比为8.0、高径比为4.0对应的试验孔隙率作为基准孔隙率, 认为该条件下的孔隙率基本消除尺寸效应。定义孔隙率相对误差:

$$\delta = (e_j^i - e_0) / e_0 \quad , \quad (1)$$

式中, e_j^i 为径径比 i 及高径比 j 对应的试验孔隙率, e_0 为基准孔隙率。

从图14所示的试验孔隙率误差分布来看, 随着径径比及高径比的增大, 孔隙率相对误差呈减小趋势。值得注意的是, 当高径比小于1.5时, 即使径径比增加, 孔隙率仍然维持较高的水平, 偏离基准孔隙率较远。分析原因主要是当桶高接近最大粒径时, 在试验压实层厚度内不同尺寸的颗粒难以形成相对合理的空间骨架, 导致振实后的孔隙率试验值偏高。

对于现场大型密度桶试验而言, 一般重型振动碾碾轮的宽度为2.2~2.4 m, 为保证振动碾对桶内坝料均匀压实, 则密度桶的直径宜控制在2.0 m以内。同时, 目前水平摊铺分层碾压方法, 普遍采用0.8 m压实层厚控制, 为尽量模拟现场实际情况, 密度桶的桶高宜取0.8 m。结合图14的密度桶尺寸效应误差分析结果, 取试验坝料最大粒径 d_{\max} 为400 mm, 如果控制试验误差在5%以内, 则有多种尺寸可选择, 如选择径径比为5.0、高径比为1.76, 或径径比为4.0、高径比为2.0, 两者试验误差相当, 但后者密度桶试样的体积可减小约30%。综合现场试验条件及试验精度要求, 一般选择最小径径比和高径比分别为4.0, 2.0左右时, 可满足坝工粗粒土密度桶试验的要求。

2 基于密度桶方法的现场相对密度试验

2.1 试验方案

现场试验结合拉哇特高面板坝的角闪片岩堆石料进行, 其岩块平均饱和抗压强度为74.3 MPa, 级配最大粒径400~600 mm, 碾压试验级配和包线符合weibull模型的两参数分布^[21], 见图15。其平均级配的weibull模型参数 $c=0.801$ 和 $n=0.581$, 位于图15 (b) 所示极优级配线的上方, 进行干密度尺寸效应研究时, 可用相似法计算不同最大粒径的缩尺级配^[21], 见图16, 取最大粒径400 mm的包线内试验级配也示于图16中。

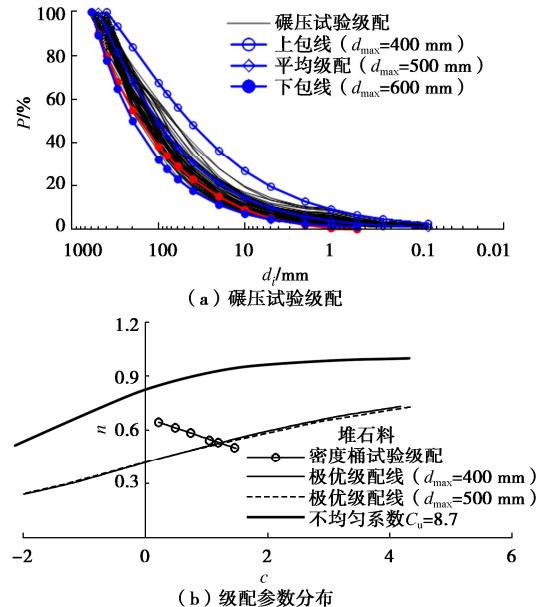


图 15 堆石料试验级配

Fig. 15 Test grading of rockfill

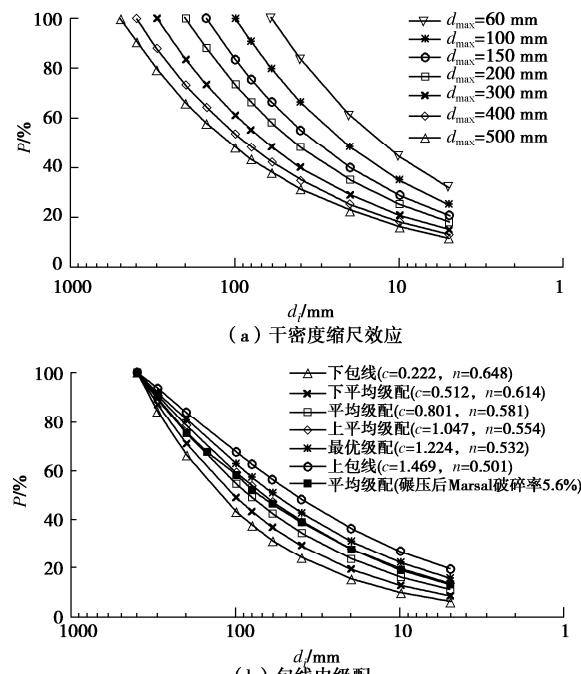


图 16 堆石料大型相对密度试验级配

Fig. 16 Grading of large-scale relative density tests on rockfill

试验采用内径分别为 0.5, 1.0, 1.2, 1.5 m 共 4 组带底密度钢桶, 桶壁厚 14 mm, 桶净高 0.8 m, 其中包线级配全部采用 1.5 m 直径桶。最小干密度采用分 4 层松铺, 最大干密度试验采用 32 t 振动碾碾压 16 遍, 行车速度不大于 2~3 kM/h, 然后在密度桶中心附近定点碾压 15 min。试验流程见图 17。



图 17 堆石料密度桶试验流程

Fig. 17 Test procedure of density barrel of rockfill

2.2 试验结果

(1) 干密度尺寸效应

图 18 为平均级配堆石料的尺寸效应试验结果。随着粒径的增加, 最大干密度和最小干密度均呈现增加的趋势, 但当最大粒径达到 400 mm 时干密度试验值基本稳定。

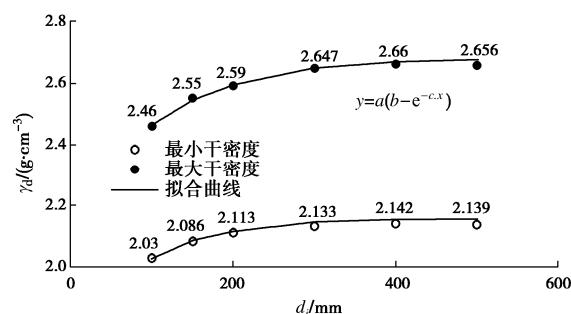


图 18 平均级配 (不同 d_{max}) 堆石料的相对密度试验结果

Fig. 18 Results of field relative density tests of average graded rockfill (different d_{max})

结合图 7 所示的数值试验结果可知, 随着级配宽度的增大, 孔隙率逐渐减小并趋于平稳, 当级配宽度 >40 时的变化率小于 2%, 干密度缩尺效应基本消除。而现场最大粒径达到 400 mm 及以上, 最小粒径小于 5 mm, 对应的级配宽度远大于 40, 理论上此时的干密度尺寸效应已基本消除。实际试验结果也是如此, 当最大粒径达到 400 mm 时干密度试验值已经稳定。

(2) 三因素图

根据上述数值试验研究成果, 三因素图试验采用直径 1.5 m 密度桶及分层装样技术, 图 19 表示出平均级配堆石料的试验过程。为了保证最大干密度试验尽可能是原级配, 在测量最小干密度时预留了部分料作为最大干密度试验的补料。因此, 使得三因素图中最小干密度与最大干密度对应的 P_5 位置有一定差异。

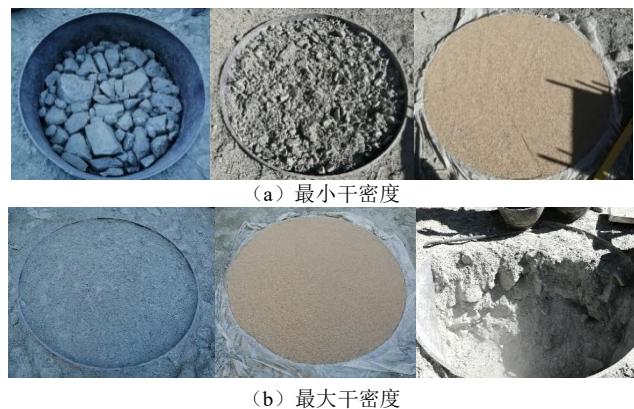


图 19 堆石料的现场密度桶试验示意图

Fig. 19 Schematic diagram of field density barrel tests on rockfill

图 20 为采用图 16 (b) 的最大粒径 400 mm 的包线内 6 组级配的现场相对密度试验结果, 随着 P_5 含量的增加, 堆石料的最小/最大干密度从 2.043/2.585 g/cm³ 逐渐增加到 2.144/2.67 g/cm³, 然后开始减小, 分别拟合最小/最大干密度与 P_5 之间的关系, 得到最小/最大干密度的极值对应的临界 P_5 含量在 15.5%。

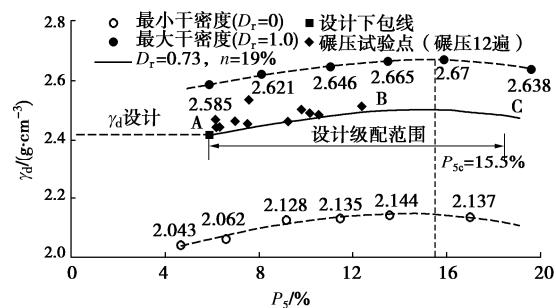


图 20 堆石料现场相对密度试验三因素图

Fig. 20 Three-factor diagram of relative density tests on rockfill

为了解试验过程中堆石料的颗粒破碎情况, 对于平均级配进行试验结束后级配筛分, 结果见图 16(b)。可见, 堆石料的 Marsal 破碎率为 5.6%, 且颗粒破碎主要集中在粒径 <100 mm 的颗粒, 大粒径颗粒仅表现为局部棱角破碎。

(3) 孔隙率与相对密度双控填筑指标

当拉哇堆石料的设计孔隙率 $\leq 19\%$, 对应设计干密度 $\geq 2.41 \text{ g/cm}^3$ 。由图 20 的试验三因素图可见, 设计级配范围内堆石料下包线对应的极值干密度最低, 则根据满足设计孔隙率 19% 要求的特征点 A 的最大、最小干密度, 计算对应的设计相对密度等于 0.73。利用包线内各试验级配的极值干密度, 计算相对密度等于 0.73 的干密度示于图 20 中, 拟合曲线见 ABC 所示。大坝堆石体填筑施工时, 只要级配参数对应的检测干密度位于 ABC 曲线的上方, 即可满足孔隙率 $\leq 19\%$ 和相对密度 ≥ 0.73 的要求, 保证大坝的每条填筑级配均得到充分压实。

(4) 施工碾压遍数

拉哇大坝已进行了堆石料的碾压试验。根据图 20 的 $d_{\max}=400 \text{ mm}$ 级配的三因素图, 若将堆石料的检测细粒含量 P_5 和填筑干密度结果直接绘制在图中, 则无法反映最大粒径的影响。由于最大粒径达到 400 mm 时堆石料的干密度尺寸效应已经较小, 可采用相似法将不同最大粒径级配归一化到 $d_{\max}=400 \text{ mm}$, 并计算归一化级配小于 5 mm 颗粒含量 P_5 。

假设原级配堆石料最大粒径为 $d_{0\max}$, 且原级配粒径为 d_x 的颗粒, 经相似缩尺后对应粒径为 5 mm , 则有

$$\frac{d_x}{d_{0\max}} = \frac{d_5}{d_{\max}}, \quad (2)$$

故 $d_x = \frac{d_{0\max}}{80} \text{ mm}$ 。 (3)

由于堆石料的最大粒径位于 $400\sim600 \text{ mm}$, 则

$$P_5 = P_{d_x}^0 = P_{10}^0 + (d_x - 5) \cdot \frac{P_{10}^0 - P_5^0}{10 - 5} \text{ %} \quad (4)$$

式中 $P_{d_x}^0$, P_{10}^0 , P_5^0 分别表示原级配小于 d_x , 10 mm , 5 mm 颗粒含量 (%)。

根据堆石料现场碾压试验资料, 采用 32 t 振动碾动碾 12 遍时, 根据检测最大粒径, 按式 (4) 计算检测级配修正后的 P_5 值, 以及干密度测量结果绘于图 20, 可见碾压试验时堆石料挖坑检测级配对应的干密度位于图中 ABC 曲线的上方, 满足本文提出的双控设计指标要求。

3 关于水平摊铺堆石料的最佳碾压参数

ICOLD 等^[22]认为, 需要通过使用最大密度级配和最佳层厚等措施, 获得减小面板堆石坝变形的最佳效果。《碾压式土石坝设计规范: DLT_5395—2007》、《混凝土面板堆石坝设计规范: DL/T5016—2011》则规定了最大粒径不超过压实层厚度的要求。

中国采用重型振动碾压实的堆石坝, 堆石料的压实层厚大多取 0.8 m , 对应摊铺层厚一般在 1.0 m 左右。图 21 为中国近期开工的几座高坝堆石体摊铺碾压实际情况, 均采用 32 t 振动碾压实, 压实层厚度 H_0 为 0.8 m , 则 H_0 与最大粒径 $d_{0\max}$ 的比值为 $1.0\sim2.0$ 。从表 3 的填筑孔隙率检测资料来看, 适当增大 $H_0/d_{0\max}$, 可以提高压实效率。

为了揭示 $H_0/d_{0\max}$ 对压实效率的影响机理, 选取数值试验中径径比=4.0、高径比分别为 1.2, 2.0 的两组试验结果进行分析。为了获取试样不同位置孔隙率的分布情况, 沿高度方向进行切片处理, 根据各切片

对应颗粒的总体积计算孔隙率, 测量孔隙率切片及各层孔隙率如图 22 所示。



Fig. 21 Schematic diagram of maximum particle size of rockfill and thickness of compacted layer

Table 3 Parameters and results of construction compaction
Table 3 填料施工摊铺碾压参数和压实效率

工程名	类型	最大粒径 /mm	$H_0/d_{0\max}$	碾压遍数	孔隙率 /%
两河口	堆石	800	1.0	8	≤ 21
句容抽蓄	堆石	700	1.1	8	≤ 19
阿尔塔什	堆石	600	1.5	8	≤ 18
	砂砾	400	2.0	10	≤ 15

由图 22 可知, 当高径比为 1.2 时, 各层的孔隙率都比高径比为 2.0 的更大一些。从试样高度方向的分布来看, 靠近桶底位置的孔隙率差异较小, 且随着切片高度的增加, 差异变大。

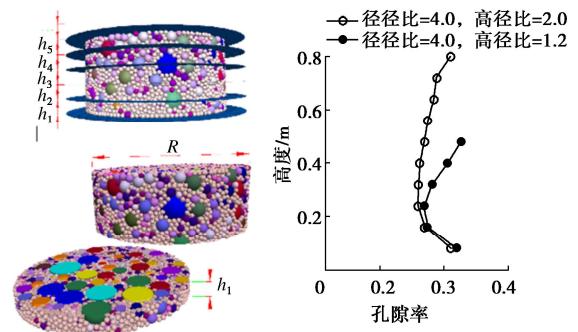


Fig. 22 Schematic diagram of sample slice and stratified porosity

Fig. 22 Schematic diagram of sample slice and stratified porosity

这主要是因为高径比等于 1.2 时, 其层厚与最大粒径基本接近, 由于大颗粒的顶托作用, 阻碍了摊铺层内颗粒位置的调整, 导致颗粒充填关系难以达到较优状态; 同时碾压过程也耗散了更多的振动能量, 从而降低了压实效率。所以, 在水平分层碾压施工时, 层厚与最大粒径之比不宜过小。根据本文数值试验和振动碾动应力沿碾压层深度方向分布的试验结果^[23],

堆石料取松铺层厚 1.0 m 左右、最大粒径 400~600 mm, 可以取得较好的压实效果, 也不会因为减小最大粒径而导致料场爆破时的单位耗药量过高。

4 结 论

(1) 提出了大粒径粗粒土满足相对密度压实设计与质量控制精度要求的密度桶试验方法。采用人工分层配料装样, 且密度桶试验尺寸最小径径比和高径比分别控制在 4.0 和 2.0 左右, 可有效减小试验结果的离散性, 并使试验结果的尺寸效应较小。

(2) 随着最大粒径的增加, 密度桶试验的极值干密度均呈现增加的趋势, 但当最大粒径达到 300~400 mm 以后, 极值干密度基本不变。可以采用最大粒径 400 mm 堆石料级配的相对密度试验成果, 进行大坝压实标准设计和填筑质量控制。

(3) 拉哇堆石料的双控填筑标准为: 孔隙率不高于 19% 且相对密度不小于 0.73。现场碾压试验结果表明, 采用 32 t 振动碾碾压 12 遍, 即可满足要求。

(4) 采用水平分层碾压的大粒径粗粒土, 适当提高水平压实层厚度与最大粒径的比值, 可以取得更好的压实效果。堆石料取松铺层厚 1.0 m 左右、最大粒径 400~600 mm, 是一种较优的压实方案。

参 考 文 献:

- [1] Field and Laboratory Determination of Maximum Density in Coarse Sands and Gravels for Mica Dam: ASTM STP523—1973[S]. 1973.
- [2] 史彦文. 大粒径砂卵石最大密度的研究[J]. 土木工程学报, 1981, 14(2): 53~58. (SHI Yan-wen. A study on maximum density of large sized sandy gravels[J]. China Civil Engineering Journal, 1981, 14(2): 53~58. (in Chinese))
- [3] 朱 晟, 钟春欣, 王 京, 等. 高心墙堆石坝填筑标准的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 561~566. (ZHU Sheng, ZHONG Chun-xin, WANG Jing, et al. Experimental study on filling standard of high rockfill dams with soil core[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 561~566. (in Chinese))
- [4] Relative Density Tests on Rock Fill at Carters Dam: ASTM STP523—1972[S]. 1972.
- [5] BERTRAM G E. Field tests for compacted rockfill [M]// Embankment Dam Engineering. New York: John Wiley & Sons Inc, 1973.
- [6] Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using A Vibratory Table : ASTM D4253-2016. [S]. 2016.
- [7] 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 Quan-qing, YANG Yin-hua. Laboratory test methods for maximum index density of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(5): 37~45. (in Chinese))
- [8] 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 Chun-xin 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))
- [9] 田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 超径无粘性粗粒土填筑标准的确定方法 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2002, 30(6): 193~197. (SHI Xin-ling, CHEN Meng-hua, LIU Yun-peng. The combined circuit device of transducer and amplifier in water-measuring meter[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2002, 30(6): 193~197. (in Chinese))
- [10] 土石筑坝材料碾压试验规程: NB/T 35016—2013[S]. 2013. (Testing Specification on Material Compaction for Earth and Rock-Fill Dams: NB/T 35016—2013[S]. 2013. (in Chinese))
- [11] 水电水利工程砂砾石料压实质量密度桶法检测技术规程: T/CEC 5001 — 2016[S]. 2016. (Testing Technical Specification on Sand-Gravel Compaction Quality Test With Density Bucket Method for Hydropower Engineering: T/CEC 5001—2016[S]. 2016. (in Chinese))
- [12] 王 龙, 李彦坡, 王志坚, 等. 阿尔塔什水利枢纽混凝土面板堆石坝筑坝砂砾料相对密度试验及工程应用 [J]. 水利水电技术, 2018, 49(增刊 1): 21~26. (WANG Long, LI Yan-po, WANG Zhi-jian, et al. Experiment on relative density of sand-gravel material for construction of concrete face rockfill dam for Altash Water Control Project and its engineering application[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(S1): 21~26. (in Chinese))
- [13] 张正勇, 包永侠, 唐德胜. 阿尔塔什大坝堆石料相对密度研究和施工应用 [J]. 水力发电, 2018, 44(2): 40~42, 51. (ZHANG Zheng-yong, BAO Yong-xia, TANG De-sheng. Study on relative density of rockfill material in aertashi dam and its application in dam construction[J]. Water Power, 2018, 44(2): 40~42, 51. (in Chinese))
- [14] 蔡加兴, 方德扬. 堆石料相对密度控制法试验及检测方法应用研究 [J]. 人民长江, 2019, 50(12): 136~141. (CAI Jia-xing, FANG De-yang. Controlling method of rockfill

- relative density and its detection method[J]. Yangtze River, 2019, **50**(12): 136 - 141. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] ZHOU B, HUANG R Q, WANG H B, et al. DEM investigation of particle anti-rotation effects on the micromechanical response of granular materials[J]. Granular Matter, 2013, **15**(3): 315 - 326.
- [17] WENSRICH C M, KATTERFELD A. Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM[J]. Powder Technology, 2012, **217**: 409 - 417.
- [18] Itasca Consulting Group Inc. Particle Flow Code in 3 Dimensions .User's Guide[R]. 1999.
- [19] AI J, CHEN J F, ROTTER J M, et al. Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations[J]. Powder Technology, 2011, **206**(3): 269 - 282.
- [20] 张 宜, 周 伟, 马 刚, 等. 细颗粒截断粒径对堆石体力学特性影响的数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, **50**(3): 332 - 339. (ZHANG Yi, ZHOU Wei, MA Gang, et al. Effect of minimum particle size on mechanical properties of rockfill materials by numerical simulation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, **50**(3): 332 - 339. (in Chinese))
- [21] 朱 晟, 张露澄. 连续分布超径粗粒土的级配缩尺方法与适用条件 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(9): 1895 - 1904. (ZHU Sheng, ZHANG Lu-cheng. A gradation scale method for continuously distributing super-diameter coarse-grained soils and its application conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(9): 1895 - 1904. (in Chinese))
- [22] ICOLD. Concrete Face Rockfill Dams: Concepts for Design and Construction, Bulletin 141[R]. 2010.
- [23] 朱 晟, 卢知是, 刘 纯, 等. 堆石体现场振动压实试验研究与应用[J]. 岩土力学, 2021, **42**(9): 2569 - 2577. (ZHU Sheng, LU Zhi-shi, LIU Chun, et al. Field vibration compaction test of rockfill and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(9): 2569 - 2577. (in Chinese))

彩色插图索引

- DOI: 10.11779/CJGE202206001 一文彩色插图 (后插 1)
- DOI: 10.11779/CJGE202206002 一文彩色插图 (后插 1)
- DOI: 10.11779/CJGE202206004 一文彩色插图 (后插 1)
- DOI: 10.11779/CJGE202206005 一文彩色插图 (后插 2)
- DOI: 10.11779/CJGE202206010 一文彩色插图 (后插 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202206011 一文彩色插图 (后插 2)
- DOI: 10.11779/CJGE202206014 一文彩色插图 (后插 4)
- DOI: 10.11779/CJGE202206017 一文彩色插图 (后插 4)
- DOI: 10.11779/CJGE202206018 一文彩色插图 (封 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202206021 一文彩色插图 (封 3)