

DOI: 10.11779/CJGE202004002

# 高面板坝堆石体的填筑质量控制指标研究与应用

朱 晟<sup>1, 2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

**摘 要:** 利用建设中的阿尔塔什高面板坝的堆石料填筑级配, 进行了现场大型相对密度试验, 结合三因素图研究了堆石体采用孔隙率和相对密度双控填筑标准的设计方法, 并利用堆石料挖坑检测资料说明了相应的现场填筑质量控制流程。结果表明: ①堆石料的填筑级配基本为分形分布, 粒度分形维数在 2.516~2.633 之间, 压实性能较优; ②当堆石料的最大粒径达到 400 mm 时, 其干密度缩尺效应已经较小, 可直接利用最大控制粒径等于 400 mm 级配的相对密度试验结果制作三因素图, 作为评价现场堆石体压实质量的依据; ③满足设计孔隙率不大于 19% 的堆石体, 如果增设相对密度压实标准, 则相对密度需满足不小于 0.76, 则仍有 15% 的检测坑不满足双控填筑标准要求的压实程度。孔隙率受级配影响较大, 仅仅满足设计孔隙率要求, 不能保证堆石体都能得到充分的压实, 理论上不适合作为堆石体的压实标准; ④采用孔隙率和相对密度双控填筑标准, 为设计级配优良且充分压实的堆石体提供了理论依据, 可以更好地满足高土石坝对于变形控制的要求, 是保证高坝建设与运行安全的基础。

**关键词:** 面板堆石坝; 堆石; 双控填筑标准; 相对密度; 孔隙率; 压实; 分形理论

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)04-0610-06

**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。

## Study and application of control indices for filling quality of high concrete face rockfill dams

ZHU Sheng<sup>1, 2</sup>

(1. State key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Hydroelectric College, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Based on the filling gradation of rockfill of Aertashi high concrete face dam under construction, field large-scale relative density tests are carried out. The three-factor map is used to study the design method of the double-control filling standards of porosity and relative density of the rockfill. Based on the pit detection data of the rockfill, the corresponding on-site filling quality control process is explained. The results show that: (1) The filling gradation of the rockfill of Aertashi concrete face dam is basically in accordance with the fractal distribution, the fractal dimension of particle size is between 2.516 and 2.633, and the compaction performance is superior. (2) From the different scales of the similar method, the relative density test results of the rockfill can be obtained. The scale effect of dry density of the rockfill is already small when the maximum particle diameter reaches 400 mm. The three-factor map can be directly produced by using the relative density test results of the maximum control particle diameter equal to gradation of 400 mm as the basis for evaluating the compaction quality of the rockfill on site. (3) For the rockfill satisfying the design porosity of not more than 19%, the relative density must not be less than 0.76 if the relative density is required to be compacted. There are still 15% of the test pits that do not meet the compaction requirements of the double-control filling standards. The porosity of the rockfill is greatly affected by the gradation. The rockfill that meets the porosity requirements cannot guarantee sufficient compaction. It is theoretically not suitable as the compaction standards for the rockfill. (4) The double-controlled filling standards of porosity and relative density provide a theoretical basis for the design of well-graded and fully compacted rockfill. They can better meet the deformation control requirements of high rockfill dams and are the foundation for ensuring the safety of their construction and operation.

**Key words:** concrete face rockfill dam; rockfill; double-control filling standard; relative density; porosity; compaction; fractal theory

## 0 引 言

由于20世纪50年代末重型振动碾压机械的出现,

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

收稿日期: 2019-05-22

堆石体的压实程度明显提高,更易于进行大坝变形控制设计,堆石坝的建设得到了快速发展,中国已建成小浪底、瀑布沟、糯扎渡和长河坝一批高心墙堆石坝,以及天生桥、三板溪、洪家渡、水布垭和猴子岩等一批高面板堆石坝。

堆石料作为一种透水性较强的无黏性粗粒土,其压实标准应该与砂砾料相同,采用相对密度指标评价其压实程度。但是,采用相对密度控制堆石体压实质量的工程实践,发展却甚为曲折。对于1965年—1969年建设的Carters坝,Stephenson<sup>[1]</sup>结合现场200组挖坑检测级配中的126组石英岩堆石料,在工地试验室设计了振动频率15 Hz、离心力2.72t(6000磅)、振幅50~76 mm(1~2英寸)的大型振动台装置,在振动台上放置桶径1041 mm(41英寸)、桶高610 mm(24英寸)、底部连接高度558 mm(22英寸)半球型容器的密度钢桶,钢桶容积0.765 m<sup>3</sup>(1立方码),进行了最大粒径250~450 mm级配的大型相对密度试验,测得最大干密度试验值均低于现场填筑检测结果。研究成果表明<sup>[2-4]</sup>:导致堆石料试验干密度偏低的主要原因,是现场压实方式、压实参数与室内试验存在差异造成的。基于此,司洪洋认为确定堆石料的相对密度并无实际意义<sup>[5]</sup>,规范<sup>[6-7]</sup>采用孔隙率作为堆石体的填筑标准。由于堆石料的孔隙率与级配、相对密度相关<sup>[8]</sup>,设计孔隙率可以通过优化级配,采用较小压实功达到;而对于充填关系较差的级配,也可通过提高压实功达到,使得不同工程压实程度(相对密度)差异较大。但是,孔隙率相同而级配和压实程度不同的堆石体,在高应力条件下的压缩模量差异较大<sup>[8]</sup>,导致按相同孔隙率标准建设不同堆石坝工程的变形特性存在较大差异,增加了高坝变形控制设计的难度。

近年来,研究者提出了采用施工振动碾进行原级配砂砾料相对密度试验的方法——密度桶法<sup>[9]</sup>,并规定了相应的试验流程<sup>[10]</sup>和检测技术规程<sup>[11]</sup>。由于该方法采用了施工碾压设备对原级配砂砾料进行现场密度桶试验,消除了室内相对密度试验方法带来的误差,长河坝、阿尔塔什等工程<sup>[4, 12]</sup>相继进行了堆石料的现场相对密度试验探索。

阿尔塔什水利枢纽位于新疆喀什地区的叶尔羌河上,是国家十三五重点水利工程,混凝土面板坝地处8度烈度强震区,最大高度164.8 m,坝基覆盖层最大厚度93 m,为目前正在建设的世界上同类工程的最高坝。为此,本文结合该面板坝下游区堆石料的实际填筑级配,采用大型密度桶试验方法,进行填筑标准的研究,并对堆石体的压实质量进行评价。

## 1 现场相对密度试验与检测结果分析

### 1.1 试验方案

依据现场填筑堆石料的检测资料,确定堆石料的试验级配,其中第三方检测级配资料34组,施工自检级配资料78组,见图1(a)所示。采用文献[13]的级配公式:

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

对图1所示检测级配进行分形分布检验,可得堆石料的填筑级配基本符合分形分布,计算粒度分形维在2.516~2.633之间,最大粒径在400~600 mm之间,各组级配的粒度分形维的分布见图1(b)。

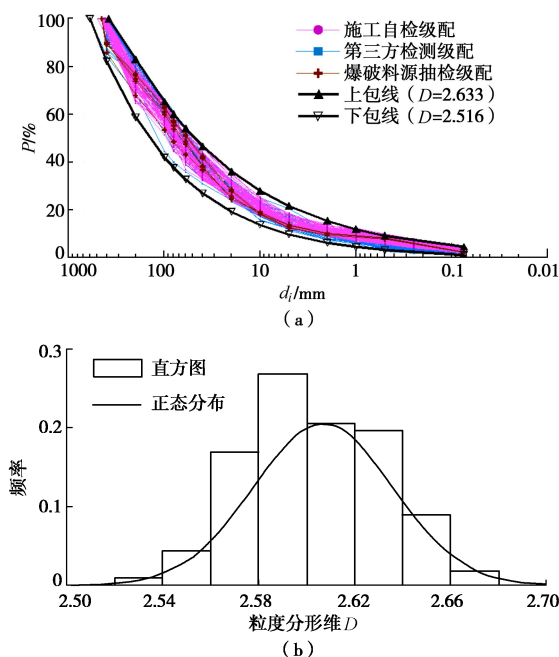


图1 堆石料填筑级配以及粒度分形维的概率分布

Fig. 1 Probability distribution of filling gradation and fractal dimension of rockfill

#### (1) 不同最大粒径的级配试验

为研究不同最大粒径堆石料的干密度缩尺规律,以平均填筑级配作为原级配,采用相似级配缩尺方法,分别得到 $d_{\max}=500, 400, 300, 150$  mm的现场密度桶试验级配,共4组级配,编号为(1)~(4),见图2所示。

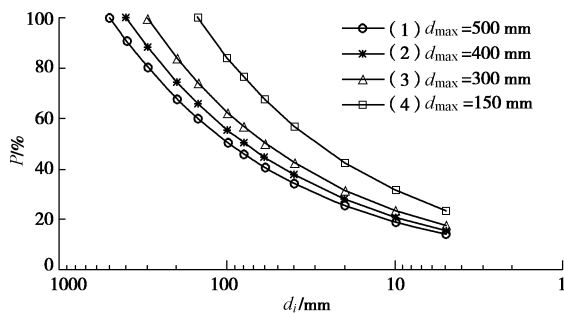


图2 平均级配堆石料的大型相对密度试验级配

Fig. 2 Large relative density test gradation of averagely-graded rockfill (different scale ratios)

(2)  $d_{\max}=400\text{ mm}$  的级配试验

根据图 1 堆石料的级配范围, 确定本次相对密度试验级配见图 3, 共 5 组, 编号为 (5) ~ (9), 其最大粒径取  $400\text{ mm}$ , 粒度分形维在  $2.516\sim 2.633$ 。

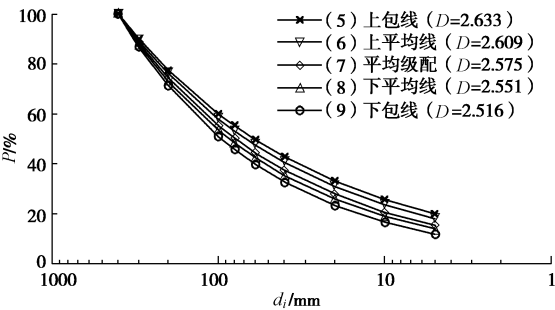


图 3 堆石料的现场大型相对密度试验级配

Fig. 3 Field large-scale relative density test gradation of rockfill

1.2 试验方法

现场相对密度试验, 采用密度桶法<sup>[10-11]</sup>, 其中  $d_{\max}=500\text{ mm}$  级配采用直径 $\times$ 桶高为  $1.5\text{ m}\times 0.8\text{ m}$  的密度桶,  $d_{\max}=400\text{ mm}$  级配采用直径 $\times$ 桶高为  $1.2\text{ m}\times 0.8\text{ m}$  的密度桶,  $d_{\max}=300, 150\text{ mm}$  级配采用直径 $\times$ 桶高为  $1.0\text{ m}\times 0.8\text{ m}$  的密度桶, 以满足规范关于密度桶直径与试样最大粒径的径径比不小于 3 的要求。现场相对密度试验在坝后的碾压场进行, 其中最大干密度试验采用  $32\text{ t}$  的施工用自行式振动碾, 振动工作频率为  $28\text{ Hz}$ , 激振力为  $590\text{ kN}$ , 行驶速度  $2\text{ km/h}$ , 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  $15\text{ min}$ 。图 4 示出部分试验流程。



(a) 备料



(b) 密度桶埋设

(c) 体积标定



(d) 最小干密度测量

(e) 碾压完成后

图 4 现场密度桶法试验流程示意图

Fig. 4 Diagram of field density barrel test process

1.3 试验结果

(1) 不同最大粒径的试验级配

表 1 为采用图 3 不同最大粒径级配的相对密度试验结果。根据表 1 可见, 在级配分布规律相同时, 随着堆石料最大粒径的增加, 试验干密度均增大; 但当  $d_{\max}$  达到  $300\sim 400\text{ mm}$  时, 干密度的缩尺效应已经较小。本工程现场检测级配的最大粒径基本大于  $400\text{ mm}$ , 对于不同最大粒径填筑级配检测干密度的尺寸效应, 可以忽略不计。

表 1 平均级配的极值干密度与最大粒径的关系

Table 1 Relationship between average gradation dry density and maximum particle size

最大粒径 /mm	分形维 $D$	试验干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	
		最小值	最大值
500	2.575	1.919	2.361
400	2.575	1.917	2.362
300	2.575	1.911	2.357
150	2.575	1.873	2.335

(2)  $d_{\max}=400\text{ mm}$  的试验级配

表 2 为图 5 中最大粒径  $400\text{ mm}$  的堆石料包线范围内级配的现场相对密度试验结果, 其不同相对密度的三因素图, 示于图 5。可见, 随着粒度分形维数的增加,  $5\text{ mm}$  以下颗粒含量的增加, 无论最大干密度还是最小干密度, 都表现出先逐步增加然后减小的现象。如最小干密度从  $1.881\text{ g/cm}^3$  增加到  $1.917\text{ g/cm}^3$  然后减小到  $1.888\text{ g/cm}^3$ , 而最大干密度从  $2.32\text{ g/cm}^3$  增加到  $2.362\text{ g/cm}^3$  然后减小到  $2.332\text{ g/cm}^3$ 。

表 2 堆石料现场相对密度试验结果

Table 2 Test results of relative density of rockfill

粒度分形维 $D$	2.516	2.551	2.579	2.609	2.633
干密度 最大	2.320	2.337	2.362	2.349	2.332
/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 最小	1.881	1.903	1.917	1.913	1.888

1.4 现场压实质量的检测结果分析

现场堆石料检测级配的最大粒径均大于  $400\text{ mm}$ , 干密度缩尺效应可以忽略不计, 故无需进行修正。将

现场填筑堆石料第三方检测的干密度结果绘于图5,得到图6所示的三因素图。

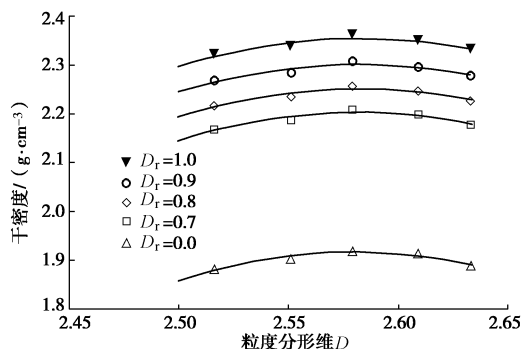


图5 堆石料现场大型相对密度试验结果

Fig. 5 Large-scale relative density test results of rockfill materials

可见,该工程堆石体按设计孔隙率标准 $\leq 19\%$ ,对应干密度等于 $2.2 \text{ g/cm}^3$ ,检测干密度全部满足规范要求。检测堆石体的相对密度基本位于 $0.7 \sim 0.9$ 区间,且由于堆石体区域内的填筑级配差异较大,而填筑标准采用孔隙率控制,导致不同部位的相对密度值存在一定差异。

## 2 关于堆石料填筑质量控制标准的讨论

### 2.1 堆石体的压缩模量

由于重型振动碾的压实能有效减小堆石体的变形,可以保证面板与接缝止水组成防渗系统的安全性,现代面板堆石坝才得到了快速发展,而变形控制是高面板堆石坝建设与运行安全的根本保证,其中压缩模量作为大坝变形控制的主要指标,已经得到广泛应用。

Hardin<sup>[14]</sup>提出粗粒土压缩模量 $E_s$ 的经验计算公式:

$$E_s = (1 + e_0) \frac{\sigma_{v2} - \sigma_{v1}}{e_1 - e_2}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{e_i} = \frac{1}{e_0} + \frac{1}{S_D} \left( \frac{\sigma_{vi}}{p_a} \right)^{0.5}, \quad (3)$$

$$S_D = K_D \left( 1 + \frac{D_r}{2} \right) \left( 1 + \frac{700}{n_s^2} \cdot \frac{d_{40}}{d_{90}} \right). \quad (4)$$

式(2)~(4)中, $\sigma_v$ 为竖向有效压应力; $D_r$ 为相对密度; $e_0$ 为初始孔隙比; $d_{40}$ , $d_{90}$ 为反映粗粒土级配状态的参数,分别为小于此直径颗粒占全部颗粒质量40%和90%的粒径; $K_D$ 为矿物成分因素; $n_s$ 为颗粒形状因子; $p_a$ 为标准大气压力。

可见,堆石料的压缩模量首先取决于原岩的矿物组成和颗粒形状等自身特性,其次与堆石料的级配特征粒径、初始孔隙比和相对密度有关,同时与加载的量值也有关。

文献[8]对英安岩堆石料大量级配进行的相对密度和压缩试验结果表明,压缩模量可表示为级配、相对密度和作用荷载的函数。由于孔隙率又与级配和相对密度相关,若将级配表示为孔隙率和相对密度的函数,则堆石体的压缩模量可表示为孔隙率、相对密度和作用外荷载的函数。

### 2.2 堆石料的双控填筑标准

目前规范关于砂砾料和堆石料分别采用相对密度和孔隙率作为填筑标准,两者的定义如下:

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s \cdot \gamma_w}, \quad e = \frac{n}{1 - n}, \quad (5)$$

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_d}{e_{\max} - e_{\min}}, \quad (6)$$

式中, $\gamma_d$ , $e_d$ 分别为设计干重度和设计孔隙比, $\gamma_w$ 为水重度, $G_s$ 为原岩颗粒比重, $e_{\max}$ , $e_{\min}$ 为最大、最小孔隙比。

可见,相对密度定义为设计孔隙比和指定级配的最大、最小孔隙比的比值,排除了级配本身的影响,可反映任意级配的压实程度。

由于采用现代重型振动碾压设备施工的堆石坝,堆石体的坝坡稳定和渗流要求较易于满足<sup>[15]</sup>,确定高坝堆石体填筑标准的核心原则,在于得到满足大坝变形控制所需要的压缩模量,根据2.1节分析可知压缩模量取决于堆石体的孔隙率、相对密度以及荷载等因素。为此,首先需要确定不同填筑级配堆石料的压实程度,采用与级配无关的相对密度指标衡量,可通过调整碾压施工参数实现;其次,进一步确定设计相对密度前提下的孔隙率指标,可通过调整级配的分布范围实现。

可见,堆石体采用相对密度和孔隙率双控填筑标准的物理意义在于:对于满足设计压缩模量标准的堆石料填筑级配而言,首先需要满足相对密度指标的要求,保证不同级配的堆石料都能得到充分的压实;同时,填筑级配在满足压实标准的前提下,还要达到相应的孔隙率要求,才能保证土体具有足够的压缩模量等力学性质指标,以满足高土石坝变形控制的要求。这样,即可从理论上实现高土石坝的变形控制目标,也便于保持原设计规范的延续性。

下面说明如何确定堆石料的双控填筑标准设计值。图6为根据阿尔塔什堆石料相对密度试验三因素图,得到的双控填筑标准示意图。根据规范<sup>[6]</sup>,确定堆石料的设计孔隙率 $\leq 19\%$ ,即设计干密度不低于 $2.2 \text{ g/cm}^3$ 。将图1统计堆石料填筑级配的范围标于图6,可见,若按双控标准控制大坝填筑,则对应的设计相对密度 $D_r \geq 0.76$ 。

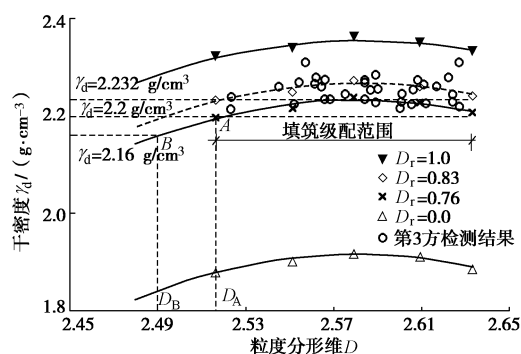


图6 堆石体双控填筑标准示意图

Fig. 6 Schematic diagram of double-control filling standards for rockfill

从图6所示堆石体的现场挖坑检测资料来看,仍存在占总检测样本15%(5组)级配的相对密度低于0.76,但由于这些级配的颗粒充填关系相对较好,孔隙率完全满足现行规范要求。但堆石体的孔隙率是由级配和压实程度等因素共同决定的,孔隙率相同但级配和压实程度不同的堆石体,控制变形量值的压缩模量可能存在较大的差异。由于堆石坝不是单一级配填筑,从理论角度讲,孔隙率不能作为大坝压实标准。

同时,若堆石体压实标准取相对密度 $D_r \geq 0.76$ ,则当堆石料的检测干密度位于图6中的相对密度等于0.76的实线,应修改为黑色实线,即满足压实的要求。如果按孔隙率 $\leq 19\%$ 与相对密度 $\geq 0.76$ 的双指标控制,则图6的B点( $D_B=2.49$ ),完全满足相对密度压实指标的要求,但由于级配粒度分形维较低,其干密度仅为 $2.16 g/cm^3$ ,对应孔隙率21%,显然不满足孔隙率 $\leq 19\%$ 的指标要求!可见,只有级配的粒度分形维大于图中的 $D_A$ 时,才能同时满足相对密度和孔隙率的双控指标要求。

值得指出的是,图6所示堆石料孔隙率和相对密度的双控填筑标准,是针对整个堆石坝的不同填筑级配而言。只有在计算或评价某一具体级配时,相对密度和孔隙率才满足一一对应关系,才可以采用土力学公式(5)和(6)进行换算,此时相对密度和孔隙率标准才是等价的,即“双控”标准退化为“单控”标准。可见,堆石料的相对密度和孔隙率双控填筑标准,与土力学概念并无矛盾。

考虑到阿尔塔什大坝位于强震区,且坝基覆盖层与大坝总压缩土体高达258 m,为提高坝体抗震性能,有效减弱地震过程中坝顶的辫梢效应,参考抗震设计规范<sup>[16]</sup>,可将坝顶堆石区的设计相对密度提高到0.83,根据本次堆石料现场相对密度试验成果,若换算成填筑干密度,则由图6可见,要求填筑干密度不低于 $2.232 g/cm^3$ 。

## 2.3 关于双控填筑标准的现场质量控制

采用孔隙率和相对密度的双控标准,控制现场堆石料填筑质量,同样按规范<sup>[17]</sup>规定方法取样,记录现场挖坑检测级配和干密度,绘于图6。如果检测值位于满足最低干密度或孔隙率要求的相对密度标准线上方,则为填筑质量合格单元;否则为不合格单元,需要重新填筑碾压。考虑到级配对于压实影响较大,取样频次建议取规范规定的高限,即 $5000 \sim 10000 m^3$ /次。

可见,采用孔隙率和相对密度的双控标准,与现行规范采用孔隙率或相对密度填筑标准相比,现场填筑质量检测时不增加任何工作量,方便易行。

## 3 结 论

(1)大型密度桶试验方法为堆石料采用相对密度指标作为压实设计标准提供了技术基础。与砂砾料相同,可采用基于相对密度控制的三因素图,对不同填筑级配堆石料进行现场压实质量控制。

(2)级配对堆石体的填筑标准有重要影响,现行规范以孔隙率作为堆石坝的压实标准,属于纯经验指标。以变形控制和变形协调为设计原则的高堆石坝,应采用相对密度和孔隙率双控标准进行设计,在堆石料得到充分压实的前提下,同时达到相应的孔隙率要求,保证高应力条件下堆石体具有足够的压缩模量等力学性质指标,以满足高土石坝建设与运行安全的要求。这样,即可从理论上实现高土石坝变形控制的目标,也便于保持原设计规范的延续性。

(3)阿尔塔什堆石料的填筑孔隙率全部大于19%的设计指标。但现场检测最低相对密度为0.71,低于按双控标准的相对密度 $D_r \geq 0.76$ 的要求,双控标准可以更有效地控制大坝的变形。

(4)对于强震区堆石坝,双控设计标准由于保证了堆石体的充分压实,有利于保证大坝的抗震能力。阿尔塔什采用孔隙率18%、相对密度0.83作为坝顶堆石区的填筑标准合理可行。

**致 谢:** 本文现场试验得到了新疆新华叶河公司王志坚副总经理和水电五局吴高见总工程师以及部分现场技术人员的大力协助,在此表示衷心感谢!

## 参考文献:

- [1] STEPHENSON R J. Relative density tests on rock fill at Carters Dam[C]// Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, ASTM, ST P 523, 1973: 234 - 250.

- [2] Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table: ASTM—D4253—2016[S]. 2016.
- [3] 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))
- [4] 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): 108 - 115. (ZHU Sheng, ZHONG Chun-xin, WANG Jing, et al. Test research on the filling standard of high rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 108 - 115. (in Chinese))
- [5] 蒋国澄, 付志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝工程[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997, **12**: 54. (JIANG Guo-cheng, FU Zhi-an, FENG Jia-ji. CFRD Engineering[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 1997, **12**: 54. (in Chinese))
- [6] 混凝土面板堆石坝设计规范: DL/T 5016—2011[S]. (Design Code for Concrete Face Rockfill Dams: DL/T 5016—2011[S]. 2011. (in Chinese))
- [7] 碾压式土石坝设计规范: DLT 5395—2007[S]. (Design Code for Roller Compacted Earth-Rock Dam: DLT 5395—2007[S]. 2007. (in Chinese))
- [8] 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 Chun-xin, ZHENG Xi-lei, et al. Filling standards and gradation optimization of rockfill materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(1): 108 - 115. (in Chinese))
- [9] 田堪良, 张慧莉, 张伯平, 等. 超径无黏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. (TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, ZHANG Bo-ping, et al. The method for determining the placement standards of oversized cohesionless coarse grained soil[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. (Earth and Rock Dam Material Rolling Test Procedure: 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]. (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] 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 - 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]. Waterpower, 2018, **44**(2): 40 - 51. (in Chinese))
- [13] 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): 1151 - 1155. (ZHU Sheng, DENG Shi-de, NING Zhi-yuan, et al. Gradation design method of rockfill materials based on the fractal theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(6): 1151 - 1155. (in Chinese))
- [14] HARDIN B O. 1-D Strain in normally consolidated cohesionless soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, **113**(12): 1449 - 1467.
- [15] COOKE J B. Rockfill and rockfill dams[C]// Proceedings International Symposium on High Earth-rockfill Dams, 1993, Beijing: 1 - 24.
- [16] 水工建筑物抗震设计标准: GB 51247—2018[S]. 2018. (Standard for Seismic Design of Hydraulic Structures: GB 51247—2018[S]. 2018. (in Chinese))
- [17] 混凝土面板堆石坝施工规范: DLT 5128—2009[S]. 2011. (DLT 5128—2009 Construction Code for Concrete Face Rockfill Dams[S]. 2011. (in Chinese))