

DOI: 10.11779/CJGE201903019

# 高心墙堆石坝填筑标准的试验研究

朱 晟<sup>1,2</sup>, 钟春欣<sup>1</sup>, 王 京<sup>1,2</sup>, 何顺宾<sup>3</sup>

(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 210024; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024;  
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610081)

**摘要:** 近期建成的几座高心墙堆石坝的监测资料表明, 坝体的分区变形协调性并没有达到设计目标。为此, 结合建设中的长河坝 300 m 级心墙堆石坝, 开展了坝壳料的室内和现场大型相对密度试验, 得到了相应的相对密度指标, 并对各分区的填筑标准进行了讨论。结果表明: ①由于级配为较好的分形分布、压实性优良, 现场堆石区的填筑平均孔隙率达到 19%, 优于 21% 的设计指标, 但相对密度仅为 0.65; ②根据规范要求设计的反滤 2 区、过渡区和堆石区的填筑相对密度在 0.96~0.65 之间, 其压实程度存在明显差异, 不易保证坝体各分区的变形协调; ③采用与现场压实功能相匹配的室内相对密度试验技术, 可解决高心墙坝的反滤料或面板坝的垫层料相对密度大于 1 的问题; ④高坝堆石体的变形控制设计, 需要考虑级配效应的影响, 宜采用孔隙率和相对密度双控填筑指标。结论可为高堆石坝的设计与建设提供参考。

**关键词:** 分形理论; 堆石坝; 填筑标准; 孔隙率; 相对密度; 变形协调

中图分类号: TU451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)03-0561-06

作者简介: 朱 晟(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土石坝及水土岩土和环境岩土方面的研究。E-mail: szhu@hhu.edu.cn。

## Experimental study on filling standard of high rockfill dams with soil core

ZHU Sheng<sup>1,2</sup>, ZHONG Chun-xin<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>, HE Shun-bin<sup>3</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; 3. China Power Construction Group Chengdu Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610081, China)

**Abstract:** The monitoring data of high ECRDs have shown that the deformation coordination in dam material zones does not meet the design goal, which is related to the degree of matching in the current specifications of filling for the filtration zone, transition zone and rockfill zone. Based on the fractal theory, the relative density tests on dam shell materials are carried out, and the relative density values are obtained. The filling criteria for the dam shell material zone are discussed. The results show that: (1) Due to its superior gradation and excellent compaction characteristics, the site average porosity rate of the rockfill is 19% and is lower than the design value 21%, but its relative density is only 0.65. (2) The relative densities in the anti-filter zone No. 2, transition zone and rockfill zone are 0.96, 0.75 and 0.65, respectively, and their relative difference may be the main reason for the deformation coordination without achieving the design goal. (3) The compaction function matching technique of indoor and field relative density tests can solve the problem that the relative density of the cushion materials or the cushion materials of the face dam is greater than 1.0. (4) The deformation control of high rockfill dams needs to consider the effect of gradation. The filling design should adopt the double control indices of porosity rate and relative density. The conclusions may provide a reference for the design and construction of high rockfill dams.

**Key words:** fractal theory; rockfill dam; filling standard; porosity rate; relative density; deformation coordination

## 0 引言

20 世纪初欧美发达国家开始用现代振动碾压技术修建堆石坝以来, 堆石坝建设得到了快速发展, 筑坝高度与填筑规模不断提高, 已建成 Nurek 等 300 m 级心墙堆石坝; 1960 年代末重型振动碾的出现, 碾压

堆石体的密实程度提高, 有效减小了大坝的变形, 也促进了面板坝的迅速发展。期间中国堆石筑坝技术也已从引进、消化、吸收、再创新到自主创新的跨越<sup>[1]</sup>,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404801)

收稿日期: 2017-10-23

建成了以水布垭、糯扎渡为代表的一批坝高大于200 m的堆石坝。

堆石坝结构安全的关键，在于是否满足大坝变形控制及各分区变形协调的要求<sup>[1-2]</sup>。目前堆石坝的设计，是根据规范选取坝料级配和填筑标准<sup>[3-4]</sup>，并通过现场碾压试验验证其可行性；根据坝料力学试验和变形应力计算成果，预判设计大坝的安全性。但是，由于缩尺效应、颗粒破碎等因素影响，堆石料力学性质十分复杂，当计算成果的精度不能满足大坝变形控制及各分区变形协调设计的要求时，则坝体可能出现坝顶裂缝<sup>[5-8]</sup>、面板破损<sup>[9-11]</sup>等结构性破坏。

对于堆石坝而言，合理的填筑标准有利于堆石体的质量控制，更是达到坝体变形控制设计目标的根本保证。随着国民经济的发展，中国澜沧江、金沙江、黄河上游、雅砻江、大渡河等流域上游将建设一批世界级300 m高度的堆石坝，已有建坝经验难以覆盖。从已建高坝原型监测资料入手，深入研究堆石体的填筑标准，是保证高堆石坝安全的重要手段和途径。

## 1 高心墙堆石坝的实际变形特性

图1为糯扎渡心墙堆石坝截止2014年11月实测变形分布图<sup>[12]</sup>。该工程最大坝高261.5 m，坝顶长度628 m，心墙上、下游侧均设I、II反滤区，反滤区外接过渡区，最外侧为堆石填筑区。大坝2008年11月开始填筑，2012年12月18日竣工，大坝各分区填筑标准、碾压施工参数及检测指标见表1所示。

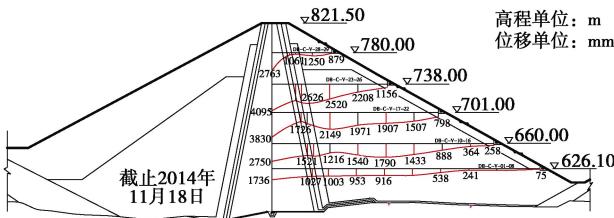


图1 糯扎渡心墙堆石坝监测变形分布

Fig. 1 Distribution of monitored deformation of Nuozadu EC RD

表12 座心墙堆石坝填筑设计、施工参数

Table 1 Designed and practical parameters of two rockfill dams

项目	糯扎渡 <sup>[12-13]</sup>	长河坝 <sup>[14-15]</sup>
反滤 I	$D_f \geq 0.8$	$D_f \geq 0.85$
填筑 反滤 II	$D_f \geq 0.85$	
标准 过渡区	$n=22\% \sim 25\%$	$n=20\%$
堆石区	$n=20.5\% \sim 22.5\%$	$n=21\%$
施工质量控制	GPS 在线监控系统	
母岩名	角砾岩、花岗岩	花岗岩
堆石区 碾压	26t 自行振动碾	32t 自行振动碾
参数	碾压 8 遍	碾压 6 遍
检测值	$n=17\% \sim 22.4\%$	$n \leq 19\%$
反滤 检测值	$D_f=0.82 \sim 1.15$	$D_f=0.85 \sim 1.05$

图2为长河坝心墙堆石坝截止2016年4月实测变形分布图<sup>[14]</sup>，对应大坝的施工填筑高程为1660 m。长

河坝工程最大坝高240 m，坝顶长度503 m，河床覆盖层最大深度50 m。大坝2013年7月开始填筑，计划2016年低竣工，坝体分区填筑标准、碾压施工参数及检测指标见表1所示。

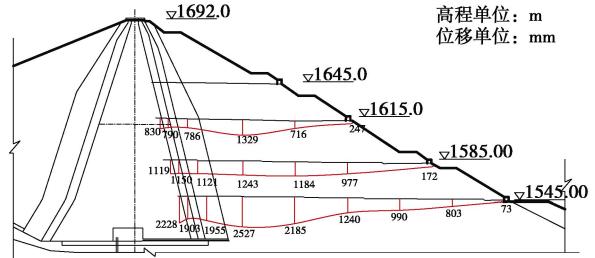


图2 长河坝心墙堆石坝监测变形分布

Fig. 2 Distribution of monitored deformation of Changheba EC RD

从两座高心墙堆石坝的实测变形来看，坝壳区内最大沉降，糯扎渡为262.6 cm，长河坝为252.7 cm，最大沉降量均为已建坝高的1%左右。在坝壳料填筑指标均满足设计要求的前提下，两座大坝各分区之间均存在一定的变形不协调现象，如糯扎渡701 m高程堆石区的最大沉降达214.9 cm，比该高程反滤区增加了25%，长河坝堆石区的实测沉降也都大于反滤区和过渡区。

为此，本文结合长河坝坝壳料，进行室内与现场的相对密度试验研究，从大坝填筑标准方面，探讨出现上述现象的原因。

## 2 坝壳料的相对密度试验

### 2.1 试验方案

统计现场检测资料，得到反滤2区料、过渡料以及下游堆石料的填筑平均级配见图3，其中堆石料填筑级配，按相似级配法缩尺得到最大粒径分别为400, 300, 200, 100 和 60 mm 共 5 组试验级配也如图3所示。

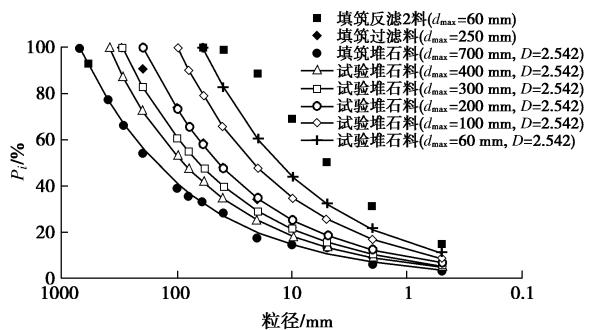


图3 坝壳料填筑级配与试验级配

Fig. 3 Filling and test gradations of dam shells

现场相对密度试验采用密度桶法<sup>[16]</sup>，自制内径1.2 m 和 0.5 m 的大、小两组密度桶，其中坝料  $d_{max}$  在 100 mm 以内的用小桶，其余均用大桶。现场相对密度试验直接在碾压密实的 1660 m 高程过渡区坝面进行，

其中最大干密度试验分别采用中大 YZ32 (用于直径 1.2 m 密度桶) 和三一重工的 YZ26E (用于直径 0.5 m 密度桶) 的施工用自行式振动碾, 试验行驶速度 2 km/h, 按“进退法”振动碾压 26 遍后, 再在每个密度桶顶部范围定点振动碾压 15 min。

## 2.2 试验和结果分析

### (1) 反滤2区料

反滤料现场相对密度试验, 包括密度桶埋设, 装样测量最小干密度, 振动碾压实以及测量最大干密度。图 4 为反滤 2 区料现场密度桶试验流程示意图。



(a) 密度桶埋设



(b) 装料测量松铺密度



(c) 碾压结束后吊出密度桶



(d) 最大干密度称量

图 4 反滤 2 区料现场相对密度试验

Fig. 4 Relative density tests on anti-filter materials

采用风干料试验测得最大干密度为  $2.328 \text{ g/cm}^3$ , 而加 4% 体积水的试验料最大干密度为  $2.331 \text{ g/cm}^3$ 。

### (2) 堆石料和过渡料

堆石料现场相对密度试验流程与反滤料相似, 但由于颗粒粒径较大, 采用 5 分法分 5 次装样, 其中前 4 次装样完成后即可测量最小干密度; 由于装样时采用松铺方式, 表面平整度较差, 试验采用标准砂抹平以减小测量试样松铺体积的误差, 图 5 为试验示意图。



(a) 密度桶埋设



(b) 振动碾现场压实



(c) 最大干密度测量



(d) 试验结束后筛分

图 5 堆石料现场相对密度试验

Fig. 5 Relative density tests on dam shell materials in the field

表 2 为本次坝壳料的相对密度试验结果, 将堆石料的最大控制粒径与极值干密度之间的关系绘于图 6。可见, 在相同的压实条件下, 堆石料的极值干密度随着最大粒径的增大而增大, 当最大粒径达到 300 mm 以上时, 干密度的缩尺效应大大减小。

表 2 坝壳料现场相对密度试验成果

Table 2 Results of relative density tests on dam shell materials

坝料名	试验桶 径/cm	最大粒 径/mm	测量干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		Marsal 破碎率/%
			最小值	最大值	
堆石料	120	400	2.051	2.543	8.2
	120	300	2.048	2.544	8.5
	120	200	1.996	2.503	5.4
	50	100	1.885	2.444	—
	50	60	1.865	2.418	—
过渡料	120	250	2.021	2.513	—
反滤 2	50	60	1.774	2.327	—

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:

$$y = \frac{a}{(1 + e^{b - cx})^{1/d}}, \quad (1)$$

拟合曲线见图 6, 可见效果较好, 相关系数大于 0.95。

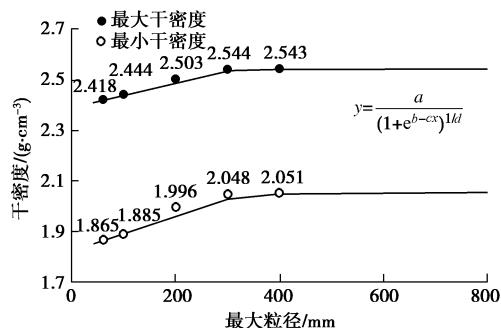


图 6 堆石料极值干密度与最大粒径的关系

Fig. 6 Relationship between extremum dry density and maximum particle size of rockfill

根据本次相对密度试验结果, 利用大坝填筑过程中的现场检测干密度平均值<sup>[15]</sup>, 计算坝壳料的实际相对密度, 见表3所示。可见, 虽然堆石体的填筑孔隙率为19%, 但相对密度并不高, 仅为0.65, 而反滤2区料的相对密度则高达0.96, 堆石体的压实程度远低于反滤区, 是大坝堆石区的实测变形反而小于反滤区的内在主要原因之一。

表 3 填筑坝壳料的相对密度指标

Table 3 Relative density indices of dam shell materials

坝料名	干密度/(g·cm⁻³)			相对密度 $D_r$
	现场检测 平均值 <sup>[15]</sup>	极值干密度 最大值	极值干密度 最小值	
反滤2	2.30	2.327	1.774	0.96
过渡料	2.37	2.513	2.021	0.75
堆石料	2.344	2.545	2.051	0.65

表4列出了不同工程堆石体的设计孔隙率与对应相对密度指标<sup>[17]</sup>。

表 4 已建工程的堆石体设计指标

Table 4 Designed relative density indices of constructed dams

工程名	筑坝材料	干密度/(g·cm⁻³)	相对密度
水布垭	茅口组灰岩	2.18/0.196*	0.69
	栖霞组灰岩	2.15/0.207*	0.64
紫坪铺	灰岩	2.16/0.212*	0.66

注: \*表示孔隙率。

可见, 与长河坝工程类似, 堆石体的相对密度指标基本在0.6~0.7之间, 低于高坝砂砾料的0.9, 这也是导致堆石坝的变形大于砂砾坝的重要原因。

为了解堆石料试验过程中颗粒破碎情况, 对试验结束后级配进行了筛分, 结果见图7所示, 表2中示出了相对密度试验堆石料的Marsal破碎率<sup>[18]</sup>。可见由于本次试验堆石料为硬岩堆石料, 颗粒破碎率小于10%, 与砂砾料同类试验的破碎率基本相当。

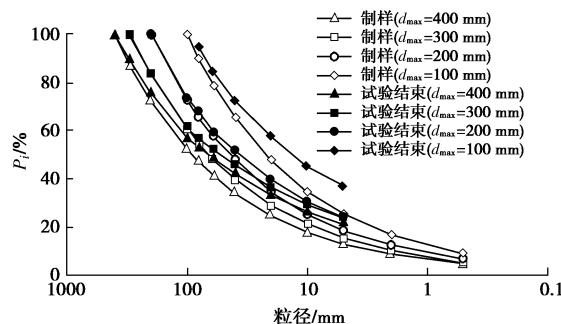


图 7 堆石料密度桶法试验后筛分级配

Fig. 7 Sieve gradation of rockfill materials after density barrel tests

### 3 心墙堆石坝坝壳料填筑压实特性

#### 3.1 关于反滤料相对密度大于1的问题

由于压实机理更接近于振动碾现场施工, 坝壳料室内相对密度试验多采用表面振动压实方法。值得注意的是, 长河坝等工程的反滤料现场检测资料出现了相对密度大于1的现象。分析原因, 是由于规范<sup>[19]</sup>规定30.5 cm内径试筒的振动器质量为27 kg, 计算其静压力仅为3.7 kPa, 远未达到试验要求的14 kPa, 使得压实功能不足; 如果增加配重使得试样表面静压力达到14 kPa, 则激振力4.2 kN的振动器无法对试样进行充分的压实, 导致试验最大干密度结果偏低, 出现反滤料现场检测相对密度大于1的现象。

为此, 采用国家发明专利技术<sup>[20]</sup>, 对振动器进行重新改造, 选用功率为2.2 kW, 激振力为8 kN, 激振频率为47.5 Hz的附着式振动电机; 同时加厚振动器的夯板, 使试验振动装置总质量增加到102 kg, 满足规范试样表面静压力达到14 kPa要求; 然后进行反滤2区料的室内相对密度试验, 得到试验干密度和振动历时的关系曲线如图8所示。

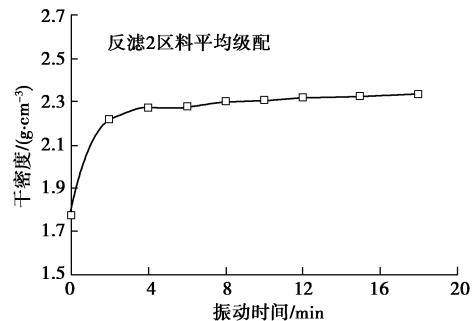


图 8 反滤2的室内试验干密度与振动历时关系

Fig. 8 Relationship between dry density and vibration duration in laboratory tests on filter materials

对比现场试验表2的最大干密度值和图8的数据可知, 本次室内试验振动10 min的干密度为2.327 g/cm<sup>3</sup>, 与现场密度桶试验值相当, 两者的压实功基本一致。可见, 采用上述经过标定的振动参数得到的室内相对密度试验结果, 进行反滤料现场压实程度检测,

就不会出现相对密度大于 1 的现象了。

### 3.2 心墙堆石坝不同分区填筑标准的匹配问题

对心墙堆石坝而言, 坝体不同分区料相适应的填筑标准, 是保证大坝变形协调的前提。表 3 的现场相对密度试验结果表明, 根据现行设计规范确定的坝体分区填筑标准, 其不同分区的压实程度相差较大, 原因在于: ①规范<sup>[3]</sup>反滤区采用相对密度指标, 而过渡以及堆石区采用孔隙率指标, 两种不同的设计标准, 难以直观判断各分区坝料的压实匹配程度, 使得坝壳料的变形协调性难以保证; ②根据现场密度桶试验结果计算的填筑相对密度, 可以较好地反映坝料的压实程度。但是, 依据试验规程<sup>[19, 22]</sup>采用室内相对密度试验手段, 得到反滤或缩尺小粒径料的最大干密度为指标密度——即在某一规定压实功能下的干密度, 如果两者的压实程度不匹配, 同样影响分区变形协调性的客观判断。可见, 采用相对密度指标, 统一以现场试验参数为基准, 或者采用与现场试验相匹配的室内试验标准, 是客观判断大坝分区变形协调性的前提和基础。

### 3.3 关于堆石料的压实特性问题

试验堆石料母岩为花岗岩, 其饱和抗压强度大于 75 MPa, 软化系数均大于 0.7, 属于硬岩堆石料。堆石体的设计孔隙率 21%, 但现场填筑碾压时, 32 t 振动碾压 6 遍就能达到 19%。分析图 3 的堆石料级配, 进行图 9 的颗粒分布规律验证, 堆石料各粒组粒径除以最大粒径的值, 与小于该粒径的颗粒质量百分数在双对数坐标系中基本为直线, 其标准差仅为 0.03, 填筑级配很好地符合分形分布<sup>[23]</sup>, 且现场花岗岩堆石料颗粒基本接近圆形, 粒型较好。可见, 满足分形分布的堆石料级配具有较好的颗粒充填关系, 在相同的压实条件下更易于获得较低的孔隙率。

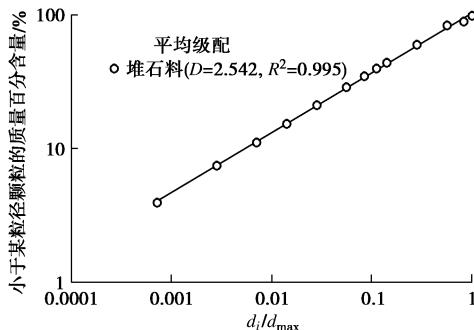


图 9 长河坝堆石料填筑平均级配的分形特性

Fig. 9 Fractal characteristics of average gradations of Changheba rockfill materials

长河坝现场相对密度试验结果表明, 虽然堆石料的孔隙率达到 19%, 但是, 由于实际碾压遍数并不高, 反映其压实程度的相对密度仅为 0.65。

文献[21]认为堆石体的孔隙率是相对密度和级配粒度分形维数的函数, 级配对堆石体 1.6 MPa 以上高

压力条件下的压缩模量存在较大影响。对于现阶段采用重型振动碾压实的堆石坝, 振动碾压时堆石体内部的峰值应力一般在 1.5 MPa 左右, 对于 100 m 以下中低坝的工作应力, 一般在施工碾压的初始附加应力范围内, 堆石体基本处于回弹状态, 此时级配对堆石体的压缩性影响相对较小, 采用相对密度压实指标, 基本可行。但是, 随着建坝高度的增加, 堆石体的应力增大到超过碾压时的初始应力, 处于重新加载状态时, 此时级配对堆石体力学性质的影响增大, 单一相对密度指标已不能满足高坝变形控制的要求。因此, 对于高堆石坝而言, 采用孔隙率和相对密度双控填筑标准, 可以更有效地控制堆石体的填筑质量, 达到高坝变形控制与变形协调的设计目标。

## 4 结 论

(1) 反滤料或垫层料相对密度的现场检测值大于 1, 室内最大干密度试验的振动压实功能低于现场振动压实功能是主要原因。利用现场密度桶试验结果标定室内表面振动器振动参数的方法, 可以较好地解决这一问题。

(2) 采用相同或一致的填筑标准, 是客观判断高心墙堆石坝坝壳不同分区是否变形协调的基础; 需要反滤料增设孔隙率指标, 过渡区和堆石区增设相对密度压实指标, 以考虑高应力工作条件下粗粒土的级配效应, 使得高心墙堆石坝不同分区的压实程度相匹配。

## 参考文献:

- [1] 马洪琪. 中国坝工技术的发展与创新. 水力发电学报[J]. 2014, 33(6): 1 - 10. (MA Hong-qi. Development and innovation of dam construction technology in China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6): 1 - 10. (in Chinese))
- [2] 邵能惠. 高混凝土面板堆石坝设计新理念[J]. 中国工程科学, 2011, 13(3): 12 - 18. (LI Neng-hui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(3): 12 - 18. (in Chinese))
- [3] DLT 5395—2007 碾压式土石坝设计规范[S]. 2007. (DLT 5395—2007 Design code for roller compacted earth-rock dam[S]. 2007. (in Chinese))
- [4] DLT 5016—2011 混凝土面板堆石坝设计规范[S]. 2011. (DLT 5016—2011 Design code for concrete face rockfill dams[S]. 2011. (in Chinese))
- [5] SOWERS GEORGE F, DAVIE J, MANSOER M N. Jatiluhur dam: problems and rehabilitation[J]. Geotechnical Special Publication, 1993, 35: 17 - 34.
- [6] UNAL B, EREN M, YALCIN M G. Investigation of eakage at Ataturk dam and hydroelectric power plant by means of

- hydrometric measurements[J]. Engineering Geology, 2007, **93**(1/2): 45 - 63.
- [7] KALKAN Y, POTTS L V, BILGI S. Assessment of vertical deformation of the Ataturk dam using geodetic observations[J]. Journal of Surveying Engineering, 2016, **142**(2): 1 - 14.
- [8] 韩朝军, 朱 晟. 土质防渗土石坝坝顶裂缝开裂机理与成因分析[J]. 中国农村水利水电, 2013(8): 116 - 120. (HAN Chao-jun, ZHU Sheng. Cracking mechanism and cause analysis of cracks in earth dam foundation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(8): 116 - 120. (in Chinese))
- [9] MARENGO H. Case study: dam safety during construction, lessons of the overtopping diversion works at Aguamilpa dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **132**(11): 1121 - 1127.
- [10] 关志诚. 紫坪铺高面板坝“5.12”震害修复处理[J]. 中国水利, 2008, **20**: 71 - 76. (GUAN Zhi-cheng. Repair of high face rock-fill dam after "May 12" Earthquake[J]. China Water Resources, 2008, **20**: 71 - 76. (in Chinese))
- [11] 邢林生, 朱锦杰, 赵晓宇. 天生桥一级大坝面板挤压破損分析[J]. 水力发电学报. 2008, **27**(5): 59 - 63. (XING Lin-sheng, ZHU Jin-jie, ZHAO Xiao-yu. Analysis of squeezing damage of slabs on Tianshengqiao 1st stage dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, **27**(5): 59 - 63. (in Chinese))
- [12] 中国电建昆明院糯扎渡安全监管中心. 糯扎渡水电站心墙堆石坝安全监测报告[R]. 昆明: 中国电建昆明院糯扎渡安全监管中心, 2015. (Nuozhadu Safety Supervision Center of China Electric Construction Group Kunming Survey and Design Research Institute Co., Ltd.. Safety monitoring report of core wall rockfill dam of Nuozhadu Hydropower Station[R]. Kunming: Nuozhadu Safety Supervision Center of China Electric Construction Group Kunming Survey and Design Research Institute Co., Ltd.. 2015. (in Chinese))
- [13] 雷红军, 刘兴宁, 冯业林. 糯扎渡大坝坝料现场压实特性及心墙安全性研究[J]. 大坝与安全, 2014(5): 26 - 31. (LEI Hong-jun, LIU Xing-ning, FENG Ye-lin. Research on field compaction characteristic of Nuozadu dam materials and safety of core wall[J]. Dam and Safety, 2014(5): 26 - 31. (in Chinese))
- [14] 四川大唐国际甘孜公司安全监测中心. 长河坝水电站安全监测报告[R]. 成都: 四川大唐国际甘孜公司安全监测中心, 2016. (SiChuan Datang International Ganzi Company Safety Monitoring Center. Changheba hydropower station safety monitoring report[R]. Chengdu: SiChuan Datang International Ganzi Company Safety Monitoring Center, 2016. (in Chinese))
- [15] 四川大唐国际甘孜公司中心实验室. 长河坝水电站 2015 年度质量检测分析报告[R]. 成都: 四川大唐国际甘孜公司中心实验室, 2015. (SiChuan Datang International Ganzi Company Central Laboratory. 2015 quality inspection analysis report[R]. Chengdu: SiChuan Datang International Ganzi Company Central Laboratory, 2015. (in Chinese))
- [16] NBT 35016—2013 土石筑坝材料碾压试验规程[S]. 2013. (NBT 35016—2013 Earth and rock dam material rolling test procedure[S]. 2013. (in Chinese))
- [17] 朱 晟. 粗粒筑坝材料现场压实质量的控制标准研究[J]. 水力发电, 2011, **37**(12): 22 - 26. (ZHU Sheng. Study on on-site compaction quality control standard of coarse-grained materials[J]. Hydroelectric Power, 2011, **37**(12): 22 - 26. (in Chinese))
- [18] MARSAL R J. Large-scale of rockfill material[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [19] DLT 5356—2006 水电水利工程粗粒土试验规程[S]. 2006. (DLT 5356—2006 Test code for coarse grained soil in hydropower and water conservancy projects[S]. 2006. (in Chinese))
- [20] 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]. 中国专利: 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 Patent: ZL 20151067446.8, 2017-09-29. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] ASTM—D4253—2016 使用振动台测定土壤最大指数密度和单位重量的试验方法[S]. 2016. (ASTM—D4253—2016 Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table[S]. 2016. (in Chinese))
- [23] 朱 晟, 邓石德, 宁志远. 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))