

自密实混凝土重力坝浇筑层间稳定性分析研究

赵洋¹, 马少博¹, 赵珍², 王博³, 张岳¹

(1. 陕西省水务集团有限公司, 陕西 西安 710004; 2. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨陵 712100; 3. 陕西省引汉济渭建设工程有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 自密实混凝土重力坝是用流动性较强的混凝土在堆石之间填充并分层浇筑而成。为了研究浇筑层间的稳定性,采用刚体平衡原理和第三强度理论分别对自密实混凝土重力坝层间的抗滑稳定性和堆石间拉力情况进行了分析研究。结果表明:随着坝体层间堆石相对接触面积 α 的增大,层间抗滑稳定系数 K 逐渐增大,但是增加的幅度处在一个稳定的范围之内;随着堆石相对超出高度 β 的增大,堆石间的拉力逐渐增大, $\beta = 15\%$ 可以作为自密实混凝土重力坝设计上限值;地震工况对于坝体层间抗滑稳定系数 K 和堆石间拉力大小的影响较大,该工况抗滑稳定系数 K 减小了15%以上,堆石间拉力最大增大约2 MPa。

关键词: 自密实混凝土重力坝; 浇筑层间; 刚体平衡原理; 第三强度理论; 抗滑稳定性; 堆石间拉力大小

中图分类号:TV642.3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)02-0180-05

Study on stability between pouring layers of a self-compacting concrete gravity dam

ZHAO Yang¹, MA Shaobo¹, ZHAO Zhen², WANG Bo³, ZHANG Yue¹

(1. Shaanxi Water Affair Group Co., Ltd., Xi'an 710004, China; 2. Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, China; 3. Hanjiang - to - Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: Self-compacting concrete gravity dams are constructed by fully filling the space between rockfills with high-fluidity concrete and pouring the concrete in layers. In order to study the stability between the pouring layers, the rigid body balance principle and the third strength theory were used to analyze the anti-sliding stability and rockfill tension between the self-compacting concrete gravity dam layers. The results show that as the contact area α increases, the inter-layer anti-sliding stability coefficient K increases gradually, but the increment is within a stable range. Furthermore, the tensile force between the rockfill piles increases gradually with the increase of the exceeding height β , when $\beta = 15\%$, it can be used as an upper limit for the design of self-compacting concrete gravity dam. Under earthquake conditions, the earthquake had a great influence on the anti-sliding stability coefficient K of the dam and the tensile force between the piles, the anti-sliding stability coefficient K reduced by more than 15%, and the tensile force between the piles increased by about 2 MPa.

Key words: self-compacting concrete gravity dam; pouring layers; rigid body balance principle; third strength theory; anti-sliding stability; tensile force between piles

1 研究背景

自密实混凝土重力坝是一种新型环保坝型^[1]。坝体体积的55%左右是由天然石料填充,因此可以减少水泥的用量^[2],水化热也相应地减少^[3-4],有利于坝体的整体稳定性。但是由于自密实混凝土重力

坝在浇筑过程中需要进行分层浇筑,因此层间的稳定性是整个坝体的一个薄弱环节。金峰等^[5-6]对于自密实混凝土重力坝的施工技术和优点、绝热温升导致的抗裂现象以及力学性能等进行了比较系统的研究;谢越韬^[7]利用堆石混凝土试件模型,对石料界面和砂浆进行了背散射电子图像分析;任明倩

收稿日期:2020-04-22; 修回日期:2020-09-07

作者简介:赵洋(1993-),男,陕西咸阳人,硕士,主要从事水利工程管理及结构应力计算分析。

通讯作者:赵珍(1992-),女,陕西西安人,硕士,主要从事结构应力数值模拟计算。

等^[8]研究了堆石骨料露出高度、数量和强度以及竖向荷载对堆石混凝土施工缝抗剪性能的影响;钟文等^[9]通过建立离散元数学模型研究了自密实混凝土的胶结强度。方秦等^[10]和唐欣薇等^[11]提出了自密实混凝土填充算法,基于细观力学物理模型建立了堆石混凝土三维力学数学模型;凌俊^[12]进行了堆石混凝土剪切方面的物理试验,得到了堆石混凝土剪切应力-应变关系;马鸿钰^[13]利用 ANSYS 软件对基岩和坝体混凝土接触面进行了抗滑稳定性分析;石建军等^[14-15]利用强度试验确定堆石混凝土棱柱体轴心抗压强度及其力学特征。袁东^[16]和黄绵松^[17]将堆石混凝土看作由堆石体、自密实混凝土及二者之间的粘结界面层组成,对其进行数值模拟并分析了自密实混凝土的流动状况。

上述学者已经对自密实混凝土重力坝的施工工艺、材料的配合比、坝体整体稳定性等进行了大量的研究。本文在基本物理概念的基础上,提出了以坝体层间堆石相对接触面积 α 和相对超出高度 β 两个参数指标来衡量自密实混凝土重力坝浇筑层间的稳定性。通过实例工程,分别在正常蓄水位、校核洪水位和地震工况3种情况下,计算分析了 α 和 β 对自密实混凝土重力坝层间抗滑稳定性和堆石间拉力大小的影响,并研究了坝体不同高程的层间抗滑稳定性和堆石间拉力大小的变化规律。研究成果可以为自密实混凝土重力坝的设计和施工提供参考。

2 基本原理和计算方法

2.1 刚体平衡原理

当考虑坝体整体的抗滑稳定性时,以浇筑完成的整个坝体作为研究对象;研究某一高程的层间抗滑稳定性时,以此高程以上的坝体作为研究对象,对此坝体的所有受力进行刚体平衡分析。计算方法如公式(1)所示。

$$K = \frac{(G - F_{\text{扬}}) \cdot f + A_1 \cdot c_1 + A_2 \cdot c_2}{F_{\text{推}}} \quad (1)$$

$$A = A_1 + A_2 \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{A_2}{A} \quad (3)$$

式中: K 为坝体抗滑稳定系数; $F_{\text{扬}}$ 为扬压力,kN; $F_{\text{推}}$ 为坝体所受顺水流方向的推力(包括静水压力和地震作用力),kN; f 为层间摩擦系数; A_1 和 A_2 分别为层间混凝土和层间堆石接触面面积, m^2 ; c_1 和 c_2 分别为层间混凝土和堆石间的黏聚力,kPa; A 为层间接触总面积, m^2 ; α 为堆石接触面相对面积,%。

2.2 地震作用力计算方法

地震作用力主要包括两个方面,即坝体自重引起的惯性力和动水压力。利用达朗贝尔原理对所研究的坝体进行分析,可以将这两个力直接简化为两个主动力施加在研究坝体上的力进行分析。地震作用下坝体重力惯性力按公式(4)计算;根据最新《水工建筑物抗震设计标准》(GB 51247—2018)^[18],采用拟静力法计算重力坝地震作用效应时,其动水压力 $F_{\text{动}}$ 按公式(5)计算。

$$F_{\text{质}} = a_h \cdot m \quad (4)$$

$$F_{\text{动}} = 0.65 \cdot a_h \cdot \varepsilon \cdot \rho_w \cdot H^3 \quad (5)$$

式中: $F_{\text{质}}$ 和 $F_{\text{动}}$ 分别为重力惯性力和动水压力,kN; a_h 为设计地震加速度代表值, m/s^2 ; m 为所研究的坝体质量,kg; ε 为计算系数,采用拟静力法计算地震作用时,取 $\varepsilon = 0.25$; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; H 为坝前水位,m。

2.3 堆石拉力计算方法

对于堆石超出高度的拉力计算,假设主动力对于层间的弯矩全部由堆石承担,将层间堆石的接触面积假设成一个长度为 L 的矩形面积,则其宽度 $B = A_2/L$,采用第三强度理论对堆石进行两向应力分析,最危险的点在接触面积的几何中心并沿着垂直于坝轴线方向靠近上游。计算方法如公式(6)所示。

$$\tau = \frac{F_{\text{推}}}{A_2} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{F_{\text{推}} \cdot (h_0/2)}{(1/6) \cdot L \cdot B^2} \quad (7)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{h_0}{h} \quad (9)$$

式中: τ 和 σ 分别为剪应力和正应力,kPa; σ_1 和 σ_3 分别为第一大主应力和最小主应力,kPa; h_0 为层间超出高度,m; h 为每层浇筑的高度,m,一般取 $h = 2$ m; β 为相对超出高度,%。

3 实例工程计算与分析

3.1 工程概况与计算工况

某水利枢纽工程等级为IV等,由挡水坝、泄洪坝段和放水设施等主要建筑物组成。坝身采用自密实混凝土浇筑,坝底高程为1 145 m,坝顶高程为1 206 m,正常蓄水位为1 203.5 m,校核洪水位为1 204.2 m。挡水建筑物主要由5个坝段构成,为了研究不同高程坝体层间的稳定性,选取第3坝段作为研究对象(该坝段从坝底一直浇筑至坝顶,中间无主要

的放水、泄水设施),将整个坝段共分为 7 层(层间高程分别选取 1 201.4、1 197.4、1 178.0、1 170.0、1 162.0、1 154.5、1 146.5 m)。由于该工程所处河段水流的含沙量较小,因此不考虑淤沙作用力。计算工况如表 1 所示。

表 1 计算基本工况

计算工况	库水位/m	受力情况
正常工况	正常蓄水位	1203.5 自重 + 静水压力 + 扬压力
	校核水位	1204.2 自重 + 静水压力 + 扬压力
非正常工况	地震工况	1204.2 自重 + 静水压力 + 扬压力 + 质量惯性力 + 动水压力

3.2 正常蓄水位工况计算结果与分析

当库水位为正常蓄水位 1203.5 m 时,坝体的层间抗滑稳定系数 K 和堆石间拉力大小随层间高程的变化情况如图 1、2 所示。当计算堆石间拉力大小时,堆石间的相对接触面积 α 取 10% 作为固定值,在 α 为定值的情况下计算堆石不同相对超出高度 β

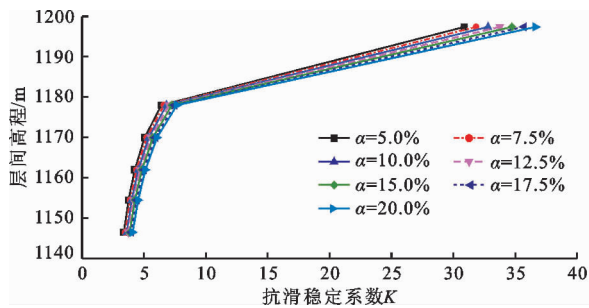


图 1 正常蓄水位工况不同 α 值坝体抗滑稳定系数 K 随层间高程的变化情况

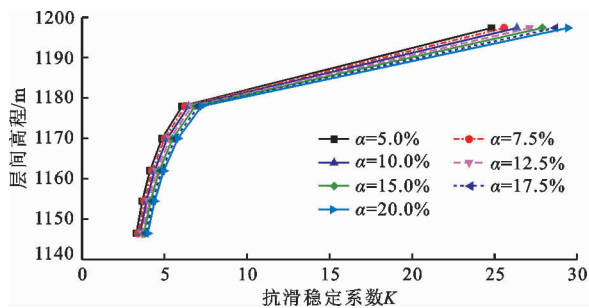


图 3 校核洪水位工况不同 α 值坝体抗滑稳定系数 K 随层间高程的变化情况

由图 3 和计算数据可以得出:随着层间高程的增加,抗滑稳定系数逐渐增大,处于校核水位以上坝体的抗滑稳定系数大于 29,所以是安全的。当坝体层间高程在低于 $0.4 H$ 范围内变化时(H 为校核洪水位相应的坝前水深),抗滑稳定系数 K 在 3.2 ~ 7.2 之间变化,变化区间相对较小。坝体层间高程超过 $0.4 H$ 时,抗滑稳定系数 K 增大较快,坝体较为安

对于堆石间拉力大小的影响。

由图 1、2 可以得出:在正常蓄水位下,随着坝体层间高程的增加,层间抗滑稳定系数 K 逐渐增大,最大可达 36,出现在最顶层。随着坝体层间堆石相对接触面积 α 的增大,相同高程层间的抗滑稳定系数 K 逐渐增大,因此增大堆石接触面积,可以增加坝体的整体安全性。但是随着层间堆石相对接触面积 α 的逐渐增大,抗滑稳定系数 K 的增加幅度较小,当 α 从 5% 逐渐增加到 20% 时,抗滑稳定系数 K 的增大范围为 18% ~ 20%。随着层间高程的不断增大,堆石受到的拉力逐渐减小,最大拉力为 7.8 MPa,出现在层间高程 1 146.5 m 位置处。随着 β 值的增大,相同高程层间堆石受到的拉力逐渐增大,增加幅度在 0.07 ~ 0.59 MPa 之间。

3.3 校核洪水位工况计算结果与分析

当库水位为校核洪水位 1 204.2 m 时,坝体的层间抗滑稳定系数 K 和堆石间拉力大小随层间高程的变化情况如图 3、4 所示。

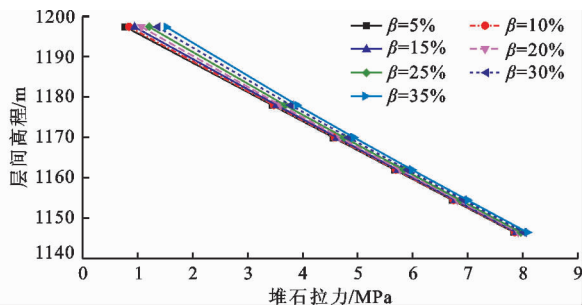


图 2 正常蓄水位工况不同 β 值堆石间拉力大小随层间高程的变化情况 ($\alpha = 10\%$)

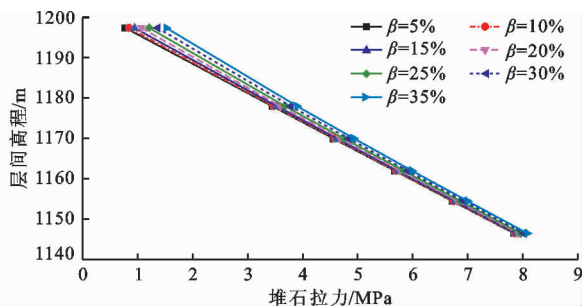


图 4 校核洪水位工况不同 β 值堆石间拉力大小随层间高程的变化情况 ($\alpha = 10\%$)

全。增大 α 值,可以提高不同高程坝体层间的抗滑稳定系数,增大坝体层间的抗滑力,但是对于抗滑稳定系数的增加幅度较小,仅增大 18% ~ 21% (以 $\alpha = 5\%$ 作为基数)。

由图 4 和计算数据可以得出:随着层间高程的不断增大,坝段受到的静水作用力逐渐减小,因此堆石受到的拉力也逐渐减小。整个坝体层间堆石受到

的拉力在 0 ~ 8 MPa 之间变化,最大拉力处于层间高程最低处。随着层间堆石相对超出高度 β 的增大,拉力逐渐增大,增加幅度为 0.12 ~ 0.74 MPa。 β 值的增加一方面可以增大堆石抵抗静水作用力,但另一方面也增大了堆石被折断的可能。因此合理的堆石相对超出高度 β 是自密实混凝土重力坝施工的一个重要设计参数。

3.4 地震工况计算结果与分析

当库水位为校核洪水位 1 204.2 m 并受到地震作用时,坝体的层间抗滑稳定系数 K 和堆石间拉力大小随层间高程的变化情况如图 5、6 所示。

由图 5、6 可以得出:在地震工况下,随着坝体层间高程的增加,层间抗滑稳定系数 K 逐渐增大,最大达到约 19,为校核洪水位计算结果的 42%。随着堆石相对接触面积的 α 增加,不同高程层间的抗滑

稳定系数 K 逐渐增大,增大的幅度范围在 18% ~ 21% 之间(以 $\alpha = 5\%$ 作为基数)。随着坝体层间高程的增加,堆石所受到的拉力逐渐减小,最大拉力在最底层,与堆石的抗拉强度基本相同。随着堆石相对超出高度 β 的增大,相同高程堆石拉力也逐渐增大,增大幅度在 0.5 ~ 1.2 MPa 之间。当 $\beta = 15\%$ 时,拉力比堆石的抗拉强度大 10 MPa,因此在进行自密实混凝土重力坝设计时,需要对堆石的相对超出高度 β 进行限制,本文研究建议 β 取 15% 作为设计上限值。

3.5 3 种工况对于层间稳定性分析结果

为了研究 3 种不同工况下 α 值和 β 值对层间抗滑稳定系数 K 和堆石拉力大小的影响,选择第 4 层(高程 1 170 m)和第 7 层(高程 1 146.5 m)进行分析研究,其结果见图 7 ~ 10。

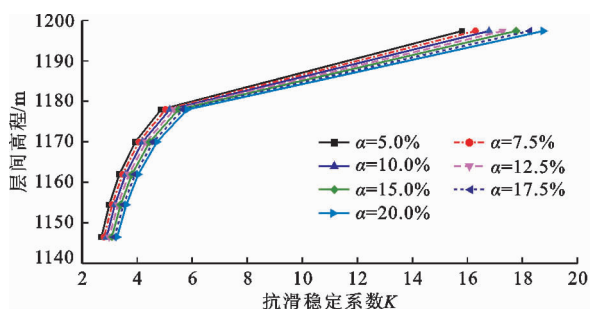


图 5 地震工况不同 α 值坝体抗滑稳定系数 K 随层间高程的变化情况

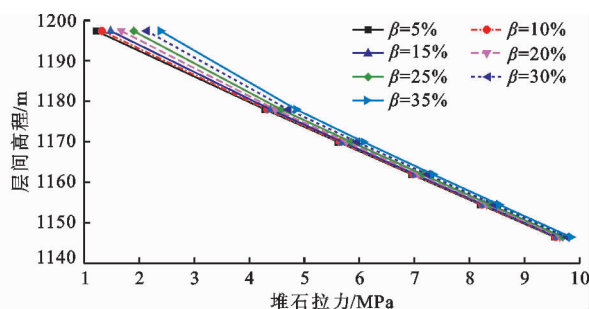


图 6 地震工况不同 β 值堆石间拉力大小随层间高程的变化情况 ($\alpha = 10\%$)

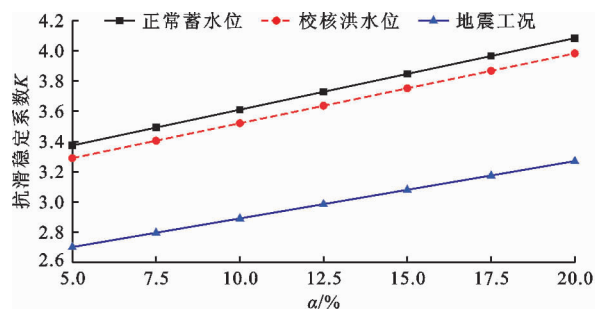


图 7 不同工况下 α 值对层间高程 1146.5 m 坝体抗滑稳定系数 K 的影响

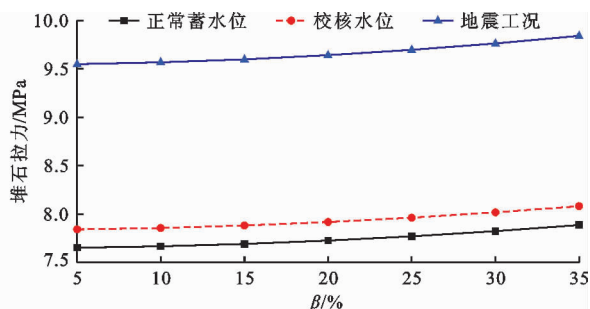


图 8 不同工况下 β 值对层间高程 1146.5 m 坝体堆石拉力的影响

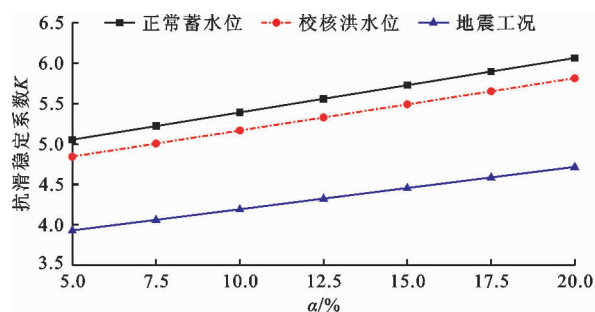


图 9 不同工况下 α 值对层间高程 1170.0 m 坝体抗滑稳定系数 K 的影响

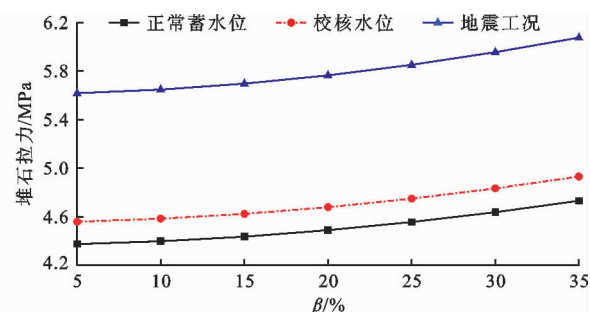


图 10 不同工况下 β 值对层间高程 1170.0 m 坝体堆石拉力的影响

由图 7、8 可以得出:在 3 种不同工况条件下,高程 1 146.5 m 坝体的层间抗滑稳定系数 K 随着 α 值的增大而增大,并且接近于线性关系;堆石间拉力随着 β 值的增大而逐渐增大,并呈非线性变化。正常蓄水位和校核洪水位两种工况下的层间抗滑稳定系数 K 和堆石拉力均较为接近,抗滑稳定系数 K 在 3.2 ~ 4.1 之间变化,堆石拉力在 7.6 ~ 8.0 MPa 之间变化。地震工况下的抗滑稳定系数 K 在 2.7 ~ 3.3 之间变化,相比正常工况减小了 15% 以上。堆石拉力在 9.5 ~ 10.0 MPa 之间变化,比正常蓄水位和校核洪水位两种工况的堆石拉力增大了 2 MPa 以上。因此在计算自密实混凝土重力坝抗滑稳定时,需要充分考虑地震工况条件。

由图 9、10 可以得出:当层间高程在 1 170 m 时,3 种不同工况下抗滑稳定系数 K 和层间堆石拉力大小的变化规律与高程 1 146.5 m 时相同。在正常蓄水位和校核洪水位两种工况下,抗滑稳定系数 K 在 4.8 ~ 6.1 之间,坝体堆石拉力在 4.3 ~ 5.0 MPa 之间。地震工况下,抗滑稳定系数 K 在 3.9 ~ 4.7 之间,堆石拉力在 5.6 ~ 6.1 MPa 之间。地震工况与其他两种工况相比,抗滑稳定系数 K 减小了约 22%,堆石拉力增大了约 1.2 MPa。

4 结 论

(1)在 3 种不同工况下,随着层间高程的增加,坝体层间抗滑稳定系数逐渐增大,堆石拉力逐渐减小。

(2)随着坝体层间堆石相对接触面积 α 的增大,层间抗滑稳定系数 K 逐渐增大,且两者接近于线性关系。但是以 $\alpha = 5\%$ 作为基本接触面积时,随着 α 值的增大, K 的增加幅度在 18% ~ 22% 之间,增加幅度较小。

(3)随着堆石相对超出高度 β 的增大,堆石间的拉力逐渐增大,变化规律呈非线性变化。根据堆石的抗拉强度,建议以 $\beta = 15\%$ 作为自密实混凝土重力坝设计的上限值。

(4)地震工况对于坝体层间抗滑稳定系数 K 和堆石拉力大小的影响较大,在堆石接触面积和超出高度相同的条件下,地震工况下的抗滑稳定系数 K 相比正常工况减小了 15% 以上,堆石拉力最大约增加 2 MPa。

参考文献:

- [1] 尹 蕾. 堆石混凝土的应用现状与发展趋势[J]. 水利水电技术, 2012, 43(7): 1-4.
- [2] 王韶华, 施佳嘉, 崔 召. 堆石混凝土施工技术应用研究[J]. 人民长江, 2019, 50(S1): 173-177.
- [3] 武海勇. 自密实砂浆充填堆石混凝土试验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [4] 林贻贤. 堆石混凝土(自密实)重力坝施工工艺研究[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(1): 160-161+172.
- [5] 金 峰, 安雪晖, 石建军, 等. 堆石混凝土及堆石混凝土大坝[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1347-1352.
- [6] 金 峰, 李 乐, 周 虎, 等. 堆石混凝土绝热温升性能初步研究[J]. 水利水电技术, 2008, 39(5): 59-63.
- [7] 谢越韬. 自密实混凝土填充性能及堆石混凝土界面微观特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [8] 任明倩, 安雪晖, 谭 妮, 等. 堆石骨料对混凝土层面剪切性能影响的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(12): 967-974.
- [9] 钟 文, 潘坚文. 堆石混凝土抗压强度影响因素细观分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 15-22.
- [10] 方 秦, 闫 鹏, 张锦华, 等. 堆石混凝土三维力学模型建模方法[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 55-60.
- [11] 唐欣薇, 石建军, 张志恒, 等. 自密实堆石混凝土力学性能的细观仿真与试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 844-849+857.
- [12] 凌 俊. 堆石混凝土剪切性能试验研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2011.
- [13] 马鸿钰. 基于 ANSYS 的堆石混凝土重力坝强度及抗滑稳定分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(7): 43-47+52.
- [14] 石建军, 张志恒, 金 峰, 等. 自密实堆石混凝土力学性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3231-3236.
- [15] 石建军, 周绍青, 张志恒, 等. 自密实堆石混凝土梁的正截面受力性能[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3(4): 33-35.
- [16] 袁 冬. 基于随机骨料投放的堆石混凝土力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [17] 黄绵松. 堆石混凝土中自密实混凝土充填性能的离散元模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水工建筑物抗震设计标准: GB 51247—2018 [D]. 北京: 中国计划出版社, 2018.