

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.094



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



两河口超高心墙堆石坝三维非线性地震反应分析

杨星, 余挺, 金伟, 朱先文

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072)

摘要: 中国水能资源主要集中在西部地区, 西部地区属于地震强震区, 高土石坝的抗震安全是该区域水电开发最突出的问题之一。基于《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015) 的有关规定, 采用设定地震场地相关设计反应谱生成的地震动时程对两河口超高心墙堆石坝进行三维非线性地震反应分析。结果表明: 位于 V 形河谷中的两河口超高心墙堆石坝坝体加速度在 4/5 坝高以上; 1/3 坝轴线长度范围内的河谷中部放大效应显著, 表现出明显的“鞭梢效应”和三维河谷效应。在此基础上提出了两河口超高心墙堆石坝的抗震加固范围。

关键词: 高土石坝; 反应谱; 地震反应分析; 抗震加固

中图分类号: TV641.4

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)03-0009-07

Three dimensional nonlinear seismic response analysis of Lianghekou super high core rockfill dam

YANG Xing, YU Ting, JIN Wei, ZHU Xianwen

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, P. R. China)

Abstract: China's hydropower resources mainly concentrated in west China, which is also the meizoseismal area of China. The seismic safety of high earth rockfill dams in these areas is one of the most serious problems in China's hydropower development. Based on the relevant provisions of *Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project* (NB 35047—2015), the three-dimensional nonlinear seismic response analysis of Lianghekou super high core rockfill dam was carried out by using the ground motion time history generated by site related design response spectrum of the scenario earthquake. The research results show that the dam acceleration amplification effect was quite significant in the middle part of the valley which is exactly of 4/5 dam height above and within 1/3 dam axis length for Lianghekou super high core rockfill dam located in a V-shaped Valley. It showed obvious whiplash effect and three-dimensional valley effect. On this basis, the reinforcement range of Lianghekou super high core rockfill dam was proposed.

Keywords: high earth rockfill dam; response spectrum; seismic response analysis; seismic reinforcement range

土石坝具有选材容易、施工方便、造价较低、地基适应性**强**和抗震性能好等优点,是水利水电工程

建设的主要坝型之一^[1]。中国水能资源分布丰富的西部地区是地震的强震区,发震频率和地震强度都

收稿日期: 2021-02-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401907)

作者简介: 杨星(1982-),男,博士,高级工程师,主要从事高土石坝抗震研究, E-mail: yangxing032515@126.com。

Received: 2021-02-03

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0401907)

Author brief: YANG Xing (1982-), PhD, senior engineer, main research interest: seismic resistance of high earth and rockfill dam, E-mail: yangxing032515@126.com.

非常高^[2]。2008年8.0级汶川地震、2010年7.1级玉树地震、2013年7.0级芦山地震及2014年7.3级于田地震都造成了严重灾害^[3]。尤其是汶川大地震中,坝高156 m的紫坪铺面板堆石坝发生了坝顶震陷、面板施工缝错台、面板挤压破坏、下游护坡块石松动乃至滚落等地震破坏,严重影响了水库安全^[4-5]。

“5·12”汶川大地震后,中国对大型水利水电工程的抗震安全提出了更高的要求。陈厚群^[6]、刘小生等^[7]通过对震害调查和分析,深入研究了大坝抗震设计、震害机理、抗震加固措施等方面的经验和教训。中国水利水电科学研究院对《水工建筑物抗震设计规范》(DL 5073—2000)^[8]进行了修编。水电水利规划设计总院发布并实施了《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)^[9]。针对新规范对标准设计反应谱的修订,张宇等^[10]通过对250 m高的面板堆石坝进行二维有限元动力计算,对比分析了以新、旧抗震规范标准设计反应谱为目标谱拟合生成的地震波作用下面板堆石坝的动力响应特性及差异。针对新规范明确规定的对进行专门场地地震安全性评价的抗震设防类别为甲类的工程,其设计反应谱应采用场地相关设计反应谱。李红军等^[11]基于设定地震场地相关反应谱和一致概率反应谱生成的地震波,研究了其对建于深厚覆盖层上的长河坝心墙堆石坝动力响应的影响。以上研究主要针对依据新、旧抗震规范输入的地震动对坝体动力响应的影响,对新规范输入的地震动作用下超高土石坝的抗震加固范围未进行研究。

在建的两河口水电站位于四川省甘孜藏族自治州雅江县境内的雅砻江干流,为雅砻江中、下游的“龙头”水库,拦河大坝为砾石土心墙堆石坝,坝顶高程为2 875.00 m,正常蓄水位高程为2 865.00 m,最大坝高为295 m,为一等大(I)型工程,抗震设防类别为甲类。在大型通用有限元软件ABAQUS中引入等效线性模型,根据新规范采用设定地震场地相关设计反应谱生成的地震动时程^[12],对两河口超高心墙堆石坝进行三维非线性动力反应分析,在此基础上提出两河口超高心墙堆石坝的抗震加固范围。

1 计算本构模型

目前在堆石料弹塑性本构模型研究方面已取得较多成果^[13-14],但邓肯张模型和等效线性黏弹性模型由于概念明确、参数较少、简单实用,在土石

坝静动力计算中应用广泛,因此,静力计算采用邓肯张E- ν 模型^[15],动力计算采用等效线性黏弹性模型^[16],其中,等效线性黏弹性模型的动剪切模量 G_d 和阻尼比 λ 的表达式为

$$G_d = \frac{k_2}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} p_a \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_{\max} \frac{k_1 \bar{\gamma}_d}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} \quad (2)$$

式中: σ'_m 为平均有效主应力; $\bar{\gamma}_d$ 为归一化的剪应变,可根据地震过程中的最大动剪应变 $\gamma_{d\max}$ 计算,见式(3)。

$$\bar{\gamma}_d = 0.65 \gamma_{d\max} \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{n-1} \quad (3)$$

上述各式中,参数 k_1 、 k_2 、 n 和 λ_{\max} 可由动力试验测定。

2 有限元网格与计算参数

2.1 有限元网格

两河口大坝三维有限元模型共划分34 471个节点,32 246个单元,主体网格采用八节点六面体单元,少量采用六节点楔形单元和四节点四面体单元进行过渡,坐标系为: x 轴正向沿坝轴线指向右岸, y 轴正向沿顺河向指向下游, z 轴正向竖直向上,大坝三维有限元网格如图1所示。

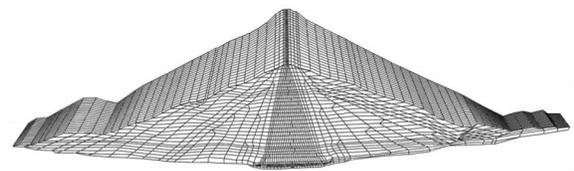


图1 两河口大坝三维有限元网格

Fig. 1 Three dimensional finite element mesh of Lianghekou dam

2.2 计算参数

筑坝料静力计算参数和动力计算参数分别见表1和表2^[17]。混凝土结构采用线弹性模型,弹性模量为30 GPa,泊松比为0.167,容重为24.0 kN/m³。

2.3 输入地震波

根据场地地震安全性评价成果,两河口水电站工程场地地震基本烈度为Ⅷ度,100年超越概率2%的基岩水平峰值加速度为287.8 cm/s²。计算输入的地震动采用设定地震场地相关设计反应谱生成的地震波加速度时程,两河口水电站坝址设定地震场地相关设计反应谱如图2所示,输入的顺河向、坝

表 1 筑坝料静力计算参数

Table 1 Static calculation parameters of dam materials

材料	密度/ (g·cm ⁻³)	线性抗剪强度		邓肯张 E-v 模型参数							
		c/kPa	φ/(°)	φ ₀ /(°)	Δφ/(°)	K	n	R _f	D	G	F
反滤料 1	2.19			49.4	7.2	890	0.26	0.77	3.0	0.32	0.074
反滤料 2	2.19			48.5	6.7	895	0.27	0.79	3.0	0.35	0.102
过渡料	2.23			50.8	8.4	904	0.28	0.74	6.9	0.28	0.161
堆石料 I 区	2.25			48.7	5.0	912	0.29	0.73	5.1	0.33	0.182
堆石料 II 区	2.21			49.2	8.1	853	0.25	0.75	5.5	0.30	0.169
堆石料 III 区	2.23			46.8	5.3	783	0.27	0.75	4.6	0.32	0.140
掺砾心墙料	2.18	122	21.7	33.3	6.4	385	0.41	0.88	1.1	0.43	0.028
接触黏土	1.98	52	18.1			132	0.25	0.91	3.77	0.39	0.140

表 2 筑坝料动力计算参数

Table 2 Dynamic calculation parameters of dam materials

材料	k ₁	k ₂	n	λ _{max}
反滤料 1	11.60	1 216	0.321	0.23
反滤料 2	16.40	1 486	0.300	0.22
过渡料	15.70	1 997	0.328	0.22
堆石料 I 区	18.80	2 336	0.268	0.19
堆石料 II 区	17.95	2 270	0.273	0.20
堆石料 III 区	17.10	2 205	0.279	0.21
掺砾心墙料	21.35	1 106	0.556	0.25
接触黏土	21.35	450	0.500	0.30

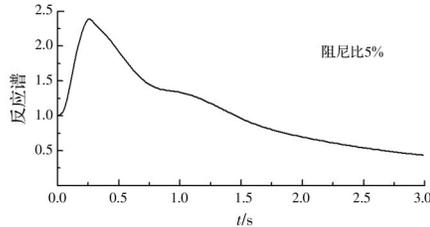


图 2 两河口坝址设定地震场地相关设计反应谱 (100 年超越概率 2%)

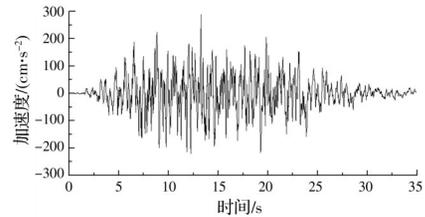
Fig. 2 Site related design response spectrum of the scenario earthquake at Lianghekou dam site (2% exceeding probability in 100 years)

轴向和竖向地震波加速度时程如图 3 所示,地震动历时 35 s^[12],计算中竖向加速度峰值取为水平向的 2/3。

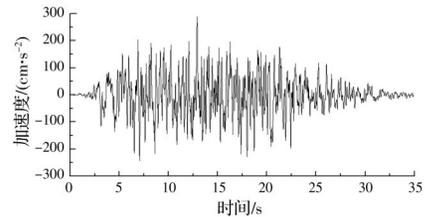
3 大坝三维地震响应

3.1 加速度响应

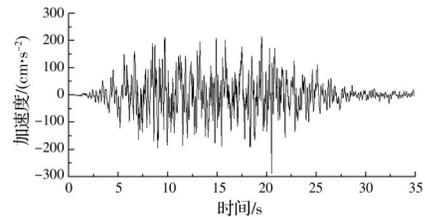
图 4 为坝体最大断面顺河向最大加速度分布等值线图,可以看出,坝体顺河向加速度反应总体不大,甚至由于坝体材料阻尼的作用,相对于输入最大加速度,坝体内部最大加速度响应略有减小,但在坝顶部加速度等值线密集,位置越高,加速度增



(a) 顺河向



(b) 坝轴向



(c) 竖向

图 3 输入地震波加速度时程

Fig. 3 Acceleration time history of input seismic wave

大的速率越快,数值越大。坝顶顺河向最大加速度为 6.53 m/s²,相较于输入最大加速度,放大了 2.27 倍。由图 4 还可以看出,对于同高程,坝体表层加速度响应较内部大,其原因主要是由于地震波在坝体表层的反射和叠加,这也表明高土石坝坝坡需进行大块石压重护坡或浆砌石护坡的科学性和必要性^[18]。

图 5 为坝轴线断面顺河向最大加速度分布等值线图,可以看出,坝轴线断面顺河向加速度在靠近两岸附近数值较小,但在河谷中部的坝顶部,加速

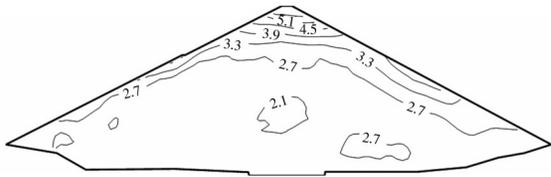


图 4 坝体最大断面顺河向最大加速度分布(单位: m/s^2)
 Fig. 4 Maximum acceleration distribution along the river direction of the maximum section of the dam body (Unit: m/s^2)

度等值线密集,数值较大,表明位于V型河谷中的两河口超高心墙堆石坝地震响应具有明显的三维河谷效应,这主要是由于两岸对坝体存在约束作用,而河谷部位为临空面,受岸坡约束作用较弱所致。

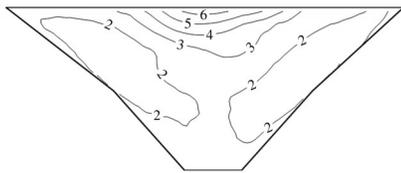


图 5 坝轴线断面顺河向最大加速度分布(单位: m/s^2)
 Fig. 5 Maximum acceleration distribution along river direction of dam axis section (Unit: m/s^2)

为了进一步研究两河口超高心墙堆石坝加速度放大系数沿坝高和坝轴线的分布,图6给出了坝体最大断面顺河向加速度放大系数沿坝高的分布,图7给出了顺河向加速度放大系数沿坝顶坝轴线的分布(图中 H 为坝高, l 为坝轴线长度)。同时,为了与现行《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)规定的土石坝加速度动态分布系数进行比较,将规范规定的设计烈度Ⅷ度和Ⅸ度的坝体加速度动态分布系数也绘制于图6中。

由图6的加速度放大系数沿坝高的分布可以看

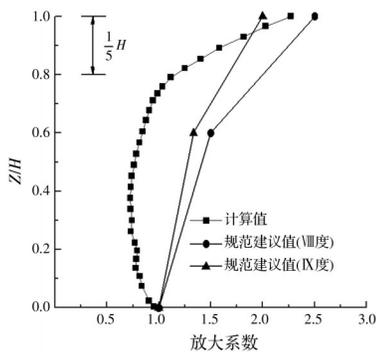


图 6 最大断面顺河向加速度放大系数沿坝高分布
 Fig. 6 Acceleration amplification factor distribution along the river of the maximum section with the dam height

出,在 $4H/5$ 以下计算的加速度放大系数变化不大,但在 $4H/5$ 附近加速度放大系数突然增大,表明在 $4H/5$ 以上的坝顶部地震响应存在明显的“鞭梢效应”,并且计算的加速度放大系数分布规律与规范规定值存在差异。这主要是因为现行抗震规范规定的土石坝坝体加速度动态分布系数是基于坝高150 m以下的土石坝得出的,而两河口砾石土心墙堆石坝为300 m级超高土石坝,坝体受地基刚性约束减弱,自振周期延长,高阶自振周期容易与地震卓越周期遇合,在地震过程中高阶振型参与量增大所致^[19]。由图7可以看出,坝轴线顺河向加速度放大系数沿河谷中部基本呈对称分布,在靠近两岸附近放大效应不明显,但在坝顶河谷中部约 $l/3$ 范围内,加速度放大效应显著。

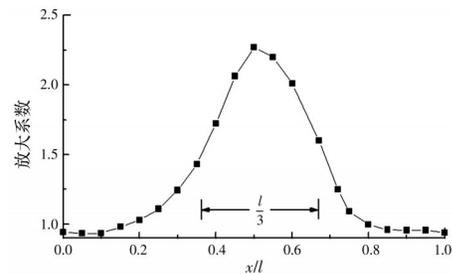


图 7 坝轴线顺河向加速度放大系数
 Fig. 7 Acceleration amplification factor along river direction of dam axis

3.2 动位移响应

坝体最大断面顺河向和竖向最大动位移等值线分布见图8和图9。可以看出,顺河向和竖向最大动位移均随坝体高程的增加而增加,在坝体上部等值线密集,增加速率显著,最大值出现在坝顶,顺河向动位移最大值为29.32 cm,竖向动位移最大值为12.7 cm,顺河向动位移值大于竖向动位移值,两河口超高心墙堆石坝动位移响应以顺河向为主。

3.3 动应力响应

地震过程中,坝体各单元的6个应力分量都是变化的,可采用广义剪应力作为动剪应力 τ_d 来综合

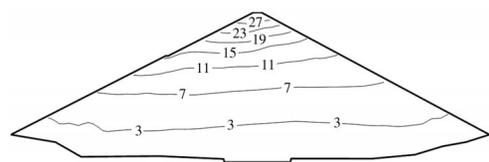


图 8 坝体最大断面顺河向最大动位移分布(单位: cm)
 Fig. 8 Maximum dynamic displacement distribution along river direction of the maximum section of the dam body (Unit: cm)

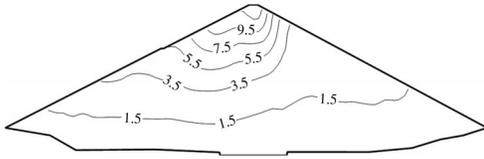


图9 坝体最大断面竖向最大动位移分布(单位:cm)

Fig. 9 Maximum vertical dynamic displacement distribution of the maximum section of the dam body (Unit: cm)

反映各单元受到的往复剪切作用。动力计算中,各单元最大动剪应力 $\tau_{d,max}$ 与初始平均有效主应力 σ'_m 之比称为动剪应力比。坝体顺河向最大断面和坝轴线断面最大动剪应力等值线分布如图10和图11所示。由图10可以看出,坝壳料中最大动剪应力随着离坝面距离的增加而增大,即由坝面向坝内逐渐增大,在坝体不同材料分区的交接处,由于模量的差异,最大动剪应力等值线发生转折,坝壳料动剪应力最大值为442.8 kPa,相应的动剪应力比为0.38。由图11可以看出,坝轴线断面最大动剪应力在心墙中间位置相对较大,在两侧相对较小,心墙动剪应力最大值为393.0 kPa,相应的动剪应力比为0.2。坝壳料和心墙料的动剪应力比相对较小,坝体不会发生动力剪切破坏。

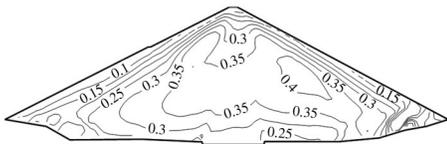


图10 坝体最大断面最大动剪应力分布(单位:MPa)

Fig. 10 Maximum dynamic shear stress distribution of the maximum section of the dam body (Unit: MPa)

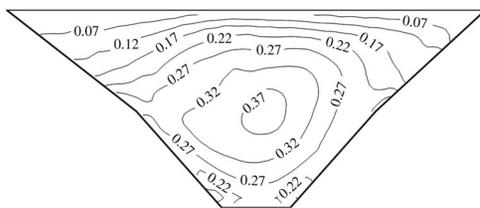


图11 坝轴线断面最大动剪应力分布(单位:MPa)

Fig. 11 Maximum dynamic shear stress distribution of the dam axis section (Unit: MPa)

3.4 抗震加固范围

尽管经过现代重型施工机械碾压密实的堆石坝具有良好的抗震性能,但鉴于地震的不确定性和高土石坝的复杂性,高土石坝的抗震安全是西部强震区水利水电工程建设最突出的问题之一^[20]。实际

震害和大型振动台模型试验表明,高土石坝遭遇地震发生破坏时,破坏首先从坝顶部开始,破坏模式主要表现为坝顶部堆石松动、滚落、坍塌,甚至出现局部浅层滑动,这些局部破坏可能会危及大坝的整体抗震安全^[18]。

上述计算结果表明,位于V型河谷中的两河口超高心墙堆石坝在4/5坝高附近加速度放大效应突然增大,表明在4/5坝高以上的坝顶部存在明显的“鞭梢效应”。同时,在坝顶河谷中部约1/3坝轴线长度范围内,加速度放大效应显著,表明坝体地震响应具有明显的三维河谷效应。因此,两河口超高心墙堆石坝的抗震加固范围可取坝顶部1/5坝高范围,并应加强河谷中部1/3坝轴线长度范围内的抗震设计。

4 结论

采用设定地震场地相关设计反应谱生成的地震动时程对两河口超高心墙堆石坝进行三维非线性地震反应分析,得出以下结论:

1)位于V型河谷中的两河口超高心墙堆石坝在4/5坝高附近加速度放大效应突然增大,表明在4/5坝高以上的坝顶部存在明显的“鞭梢效应”,同时,在坝顶河谷中部约1/3坝轴线长度范围内,加速度放大效应显著,表明坝体地震响应具有明显的三维河谷效应。

2)顺河向和竖向动位移均随坝体高程的增加而增大,最大值出现在坝顶,顺河向动位移值大于竖向动位移值,两河口超高心墙堆石坝动位移响应以顺河向为主。坝壳料和心墙料的动剪应力比相对较小,坝体不会发生动力剪切破坏。

3)两河口超高心墙堆石坝的抗震加固范围可取坝顶部1/5坝高范围,并应加强河谷中部1/3坝轴线长度范围内的抗震设计。

参考文献

- [1] 杨星,刘汉龙,余挺,等.高土石坝震害与抗震措施评述[J].防灾减灾工程学报,2009,29(5):583-590.
YANG X, LIU H L, YU T, et al. Review on seismic disasters and aseismic measures of high earth and rockfill dams [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(5): 583-590. (in Chinese)
- [2] 陈厚群.重视高坝大库的抗震安全:纪念唐山大地震30周年[J].中国水利水电科学研究院学报,2006,4(3):161-169.

- CHEN H Q. Appeal for laying stress on seismic safety of high dams with large reservoir [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2006, 4(3): 161-169. (in Chinese)
- [3] 孔宪京, 邹德高, 刘京茂. 高土石坝抗震安全评价与抗震措施研究进展[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(7): 1-14.
KONG X J, ZOU D G, LIU J M. Developments in seismic safety evaluation methods and aseismic measures for high rockfill dams [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(7): 1-14. (in Chinese)
- [4] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(6): 795-801.
CHEN S S, HUO J P, ZHANG W M. Analysis of effects of “5.12” Wenchuan Earthquake on Zipingpu concrete face rock-fill dam [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(6): 795-801. (in Chinese)
- [5] LIU P, MENG M Q, XIAO Y, et al. Dynamic properties of polyurethane foam adhesive-reinforced gravels [J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, 64(3): 535-547.
- [6] 陈厚群. 水工建筑物抗震设计规范修编的若干问题研究[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(6): 4-10, 15.
CHEN H Q. Study on some revision issues of aseismatic design codes of hydraulic structures in China [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(6): 4-10, 15. (in Chinese)
- [7] 刘小生, 赵剑明, 杨玉生, 等. 基于汶川地震震害经验的土石坝抗震设计规范修编[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(11): 2111-2118.
LIU X S, ZHAO J M, YANG Y S, et al. Advances in seismic design of earth-rockfill dams and foundations in China and revision of code based on lessons from Wenchuan Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(11): 2111-2118. (in Chinese)
- [8] 水工建筑物抗震设计规范:DL 5073—2000 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Specifications for seismic design of hydraulic structures: DL 5073—2000 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001. (in Chinese)
- [9] 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB 35047—2015 [S]. 北京: 国家能源局, 2015.
Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project: NB 35047—2015 [S]. Beijing: National Energy Board, 2015. (in Chinese)
- [10] 张宇, 孔宪京, 邹德高. 高面板堆石坝地震响应比较: 基于新、旧《水电工程水工建筑物抗震设计规范》[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(2): 102-111.
ZHANG Y, KONG X J, ZOU D G. Comparison of seismic responses of concrete faced rockfill dam under excitation from design response spectra in new and old codes [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(2): 102-111. (in Chinese)
- [11] 李红军, 朱凯斌, 赵剑明, 等. 基于设定地震场地相关反应谱的高土石坝抗震安全评价[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(5): 934-941.
LI H J, ZHU K B, ZHAO J M, et al. Safety evaluation of high rockfill dams subjected to earthquakes based on site-related response spectra [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(5): 934-941. (in Chinese)
- [12] 中国水利水电科学研究院. 四川省两河口水电站坝址区场地相关设计反应谱研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Research on the site-related response spectrum of Lianghekou hydropower station in Sichuan Province [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017. (in Chinese)
- [13] XIAO Y, LIU H L. Elastoplastic constitutive model for rockfill materials considering particle breakage [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(1): 04016041.
- [14] XIAO Y, MENG M Q, DAOUADJI A, et al. Effects of particle size on crushing and deformation behaviors of rockfill materials [J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 11(2): 375-388.
- [15] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [16] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. *水利水运科学研究*, 1996(2): 143-150.
SHEN Z J, XU G. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading [J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1996(2): 143-150. (in Chinese)
- [17] 河海大学岩土工程科学研究所. 两河口土石坝工程筑坝料动力特性试验研究[R]. 南京: 河海大学岩土工程科学研究所, 2008.
Geotechnical Research Institute of Hohai University. Test study on dynamic characteristics of dam materials for Lianghekou earth rockfill dam [R]. Nanjing: Geotechnical Research Institute of Hohai University, 2008. (in Chinese)
- [18] 杨星, 余挺, 王晓东, 等. 高土石坝地震响应特性振动

- 台模型试验与数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 380-387, 427.
- YANG X, YU T, WANG X D, et al. Shaking table model tests and numerical simulation of the seismic response behavior of high earth-rockfill dam [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3): 380-387, 427. (in Chinese)
- [19] 邹德高, 周扬, 孔宪京, 等. 高土石坝加速度响应的三维有限元研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(Sup1): 656-661.
- ZOU D G, ZHOU Y, KONG X J, et al. 3D FEM study of acceleration response of high earth-rock dams [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup1): 656-661. (in Chinese)
- [20] 杨星, 刘汉龙, 余挺, 等. 高土石坝复合加筋抗震加固技术开发与应用[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(6): 69-74.
- YANG X, LIU H L, YU T, et al. Technological development of composite reinforcement aseismic measure for high earth rockfill dams and its application [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 69-74. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)