

DOI: 10.11779/CJGE2021S1039

狭窄河谷面板堆石坝坝体底部应力拱效应的形成机理及影响范围研究

杨超¹, 薛海斌^{*2,3}, 党发宁², 王辉¹

(1. 北方民族大学土木工程学院, 甘肃 银川 750021; 2. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点试验室, 陕西 西安 710048;
3. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要:受狭窄河谷地形的影响, 峡谷地区修建的面板堆石坝工程会在跨河方向上出现应力拱效应问题, 造成坝体底部堆石体难以被充分碾压密实, 大坝蓄水后沉降变形增大, 危及大坝安全。从应力拱效应的形成条件出发, 分析峡谷地区面板堆石坝在跨河方向上应力拱效应的形成条件。采用有限元数值模拟方法, 通过对比分析宽、窄河谷中面板堆石坝大、小主应力的分布规律, 揭示峡谷地区面板堆石坝坝体内部应力拱效应的形成机理。研究了峡谷地区面板堆石坝坝体底部应力拱效应合理拱轴线的分布形态及范围, 在河谷中心处的坝体底部堆石体受到应力拱效应的影响最大, 影响范围约占坝体整体高度的23%。研究成果为采用工程措施减弱应力拱效应对面板堆石坝的不利影响提供参考依据。

关键词:狭窄河谷; 面板堆石坝; 应力拱效应; 影响范围

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S1-0214-05

作者简介:杨超(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程数值计算方面的研究。E-mail: yckevin5.163.com。

Mechanism and influence range of stress arching effect of CFRD in narrow valley regions

YANG Chao¹, XUE Hai-bin^{*2,3}, DANG Fa-ning², WANG hui¹

(1. School of Civil Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Shaanxi Province Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute, Xi'an 710001, China)

Abstract: Influenced by canyon topography, the CFRD built in canyon areas will cause the stress arching effect in the river-crossing direction. The stress arching effect makes it difficult for the rockfill to be fully compacted at the bottom of the dam. Starting from the forming conditions, 3-D FEM is used to compare the distribution of the major and minor principal stresses of the CFRD with wide narrow valley, in order to reveal the formation mechanism of internal stress arching effect of CFRD in canyon regions. The distribution form and range of reasonable arch axis of stress arching effect at the bottom of CFRD are studied. The bottom rockfill at the center of the valley is most affected by the stress arching effect. The influence area accounts for about 23% of the overall height of the dam. The research results may provide a reference for reducing the adverse effect of stress arching effect of CFRD in canyon area.

Key words: narrow valley; CFRD; stress arching effect; influence range

0 引言

随着“南水北调”、“西电东送”、“西部大开发”等国家战略的开展实施, 在高山峡谷众多的西部地区修建高库大坝是未来中国水利水电事业发展的趋势。混凝土面板堆石坝作为新兴坝型, 具有工程量小、施工方便、拦洪度汛简单、可就地取材、工程造价低等优点^[1], 是现阶段世界各国主要发展的优势坝型, 也是未来中国西部地区筑高库大坝的首选坝型^[2-3]。但近年来越来越多峡谷地区面板堆石坝的工程实践表明, 峡谷地区修建的面板堆石坝会受河谷地形的影响, 在跨

河方向上出现较为强烈应力拱效应问题, 峡谷地区面板堆石坝工程中的应力拱效应问题开始为人们关注。

在土石坝工程中, 人们普遍关注黏土心墙坝心墙内部存在的土拱效应问题, 也对此类应力拱效应问题

基金项目:北方民族大学校级重点科研项目(2019KJ33); 宁夏回族自治区重点研发项目(引才专项)(2019BEB04035); 北方民族大学科研启动项目; 国家自然科学基金项目(51979225)

收稿日期:2020-12-15

*通信作者(E-mail: xhbyts2013@163.com)

展开了较多的研究^[4-7],但针对狭窄河谷地形影响而导致的应力拱效应问题,开展的相关研究不多。张岩,朱永国等研究报道了狭窄河谷中修建的猴子岩高面板堆石坝工程中存在的应力拱效应问题及在设计和施工规划过程中采取的工程控制措施^[8]。党发宁,杨超等利用有限元数值计算方法,研究了河谷地形对高面板堆石坝应力变形的影响,发现堆石体内部存在的应力拱效应增大了坝体的后期沉降量^[9]。狄文龙等利用微分方程求解竖向应力和宽高比及土体力学参数之间的关系,提出了针对面板堆石坝的拱效应评估参数^[10]。但总的来看,目前针对峡谷地区面板堆石坝的应力拱效应问题开展的研究尚不够深入和系统,还缺少峡谷地区面板堆石坝应力拱效应的形成机理和确定应力拱效应合理拱轴线的数值模拟方法研究。为此,本文从峡谷地区面板堆石坝坝体底部应力拱效应的形成条件出发,利用有限元数值计算方法,揭示峡谷地区面板堆石坝应力拱效应发生的力学机理,根据堆石体中大小主应力的大小分布规律,提出可以确定应力拱效应合理拱轴线的数值模拟方法,以便于分析面板堆石坝坝体底部应力拱效应的强弱及影响范围,为采取工程措施消除应力拱效应带来的不利影响提供理论依据。

1 峡谷地区面板坝坝体内部应力拱效应的形成条件

太沙基在 1936 年通过活动门试验证实了土拱效应存在的两个条件:一是土体内部存在不均匀形变,二是存在作为支撑土拱效应的拱脚存在^[11]。修建在狭窄河谷中的面板堆石坝,大坝堆石体与两岸山体因为物理力学性质不同,其变形模量差异较大。当堆石体发生沉降变形时,两岸变形模量大的河谷岸坡对其沉降变形产生阻碍作用,且越靠近两岸山体的坝肩处,河谷岸坡对大坝堆石体竖向沉降变形的阻碍作用越明显,这就使得大坝堆石体沿着跨河方向上产生了不均匀沉降。当河谷地形为狭窄河谷时,在大坝跨河方向上产生较大的不均匀沉降变形区域,引起大坝坝体底部产生强烈的应力拱效应。因此狭窄河谷地形引起的大坝堆石体内部产生的不均匀沉降是面板堆石坝坝体底部产生应力拱效应的一个条件。

狭窄河谷面板堆石坝出现应力拱效应的第二个条件是狭窄河谷地形作为支撑拱脚的存在。当河谷地形为狭窄河谷时,堆石体产生竖向沉降,坝体两侧狭窄的河谷岸坡阻碍堆石体的竖向沉降,由于河谷两岸河谷岸坡是较为稳定且坚固的结构,这样河谷两侧的岸坡即为堆石体内部应力拱效应的产生提供了稳定的拱脚。

2 峡谷地区面板堆石坝形成应力拱效应的力学机理

当坝体内部出现应力拱效应时,由于应力拱效应的作用,大坝底部堆石体将一部分应力传递给两岸山体。因此分析大坝堆石体大、小主应力的大小及分布规律的变化,就可以揭示坝体底部应力拱效应形成的力学机理。考虑到有限元法可以较为准确的求解出面板堆石坝坝体应力的变化规律,因此采用有限元方法,分别建立典型的宽河谷计算模型与与窄河谷计算模型,分别对宽、窄河谷中面板堆石坝的大、小主应力的大小及分布规律进行计算分析,揭示坝体底部应力拱效应形成的力学机理。

2.1 有限元计算模型

参考某面板堆石坝工程,建立典型的宽河谷面板堆石坝计算模型与窄河谷面板堆石坝计算模型,并对河谷岸坡地形做适当的简化,以节省计算时间并增强对比分析的规律性。计算模型最大坝高为 120 m,坝顶宽 10 m,河谷左右两岸岸坡为 50°,上游坝坡坡比 1:1.4,下游坝坡坡比 1:1.5,面板厚度取 0.3 至 0.7 m,垫层和过渡层厚度均取 3 m,其中宽河谷面板坝坝轴线长度取为 320 m,窄河谷面板堆石坝坝轴线长度取为 230 m,有限元计算模型如图 1 所示。

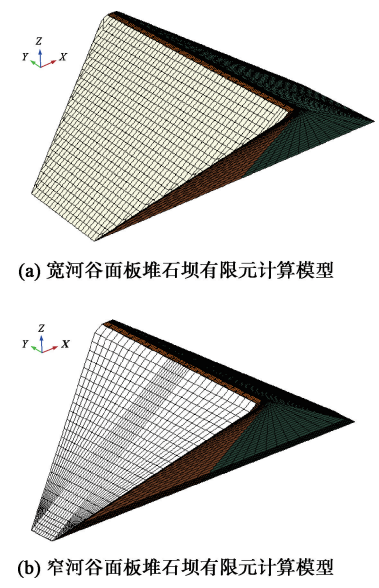


图 1 有限元计算模型
Fig.1 FEM model

计算模型中采用笛卡儿直角坐标系,其中 X 轴以顺河方向指向下游为正,Y 轴以坝轴线方向指向左岸为正,Z 轴以垂直向上为正;整体计算模型采用位移边界约束,四周采用法向约束,底部采用全约束。计算区域从坝体上游面向上延伸 500 m,从坝体下游面向下延伸 500 m,建基面向下延伸 200 m。

表 1 邓肯模型材料参数
Table 1 Parameters of Duncan-Chang model

材料	K	n	R_f	c/KPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	K_b	m	K_{ur}	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
上游堆石料	1422	0.28	0.70	300	50	11.8	768	0.03	2701	2.09
下游堆石料	1198	0.29	0.70	293	50	12.2	768	0.03	2276	2.12
过渡料	1055	0.3	0.62	315	51	12.0	627	0.12	2113	2.32
垫层料	1165	0.3	0.62	315	51	12.0	627	0.47	2213	2.34

2.2 计算模型参数

计算模型筑坝材料本构模型采用邓肯 $E-B$ 模型模拟,取值参考某筑坝材料工程特性试验报告,计算模型计算参数如表 1 所示。表中 K 为模量系数, n 为模量指数, R_f 为破坏比, c 为黏聚力, φ 为摩擦角, $\Delta\varphi$ 为摩擦角衰减参数, K_b 为切线体积模量系数, m 为切线体积模量指数, K_{ur} 为卸载模量, ρ 为密度。基岩和面板采用线弹性模型,基岩密度取 2.68 g/cm^3 ,弹性模量取 10 GPa ,泊松比取 0.27 ,面板密度取 2.4 g/cm^3 ,弹性模量取 24 GPa ,泊松比取 0.167 。

2.3 狭窄河谷面板堆石坝应力拱效应力学机理分析

图 2~5 分别为蓄水期宽河谷与窄河谷计算模型中面板堆石坝跨河剖面上大、小主应力的等值线图。

由图 2~5 可知,宽河谷计算模型中面板堆石坝的大、小主应力均随坝体高程的降低而增大,表明越靠近坝体底部,坝体自重应力值越大。而窄河谷计算模型中,坝体大、小主应力的的最大值没有出现在坝体最底部,而是出现在坝体底部偏上的位置,表明窄河谷面板堆石坝坝体底部出现了应力拱效应。

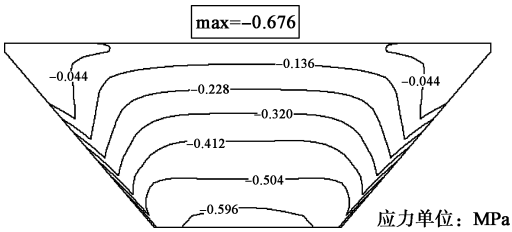


图 2 宽河谷计算模型坝体小主应力等值线图
Fig. 2 Contour map of minor principal stress of dam for wide valley model

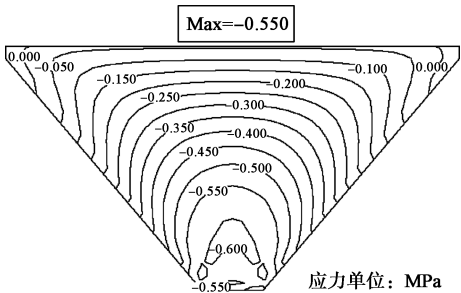


图 3 窄河谷计算模型坝体小主应力等值线图
Fig. 3 Contour map of minor principal stress of dam for narrow valley model

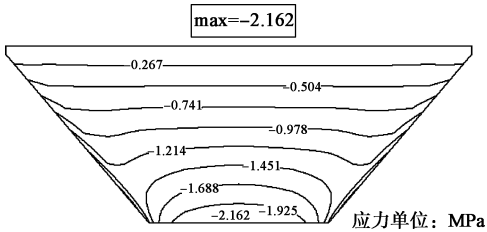


图 4 宽河谷计算模型坝体大主应力等值线图
Fig. 4 Contour map of major principal stress of dam for wide valley model

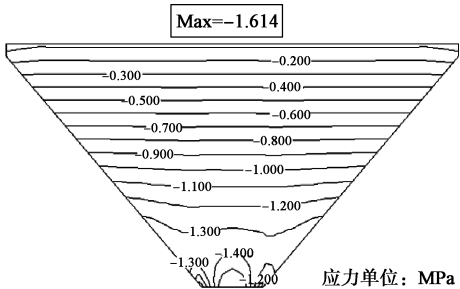


图 5 窄河谷计算模型坝体大主应力等值线图
Fig. 5 Contour map of major principal stress of dam for narrow valley model

窄河谷面板坝河谷中心点处大、小主应力随坝体高程的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,窄河谷面板堆石大主应力随坝体高程的降低而增大,当坝体高程降低至 32 m 时,坝体大主应力的增加幅度开始放缓。但小主应力随坝体高程的降低呈现先增大后减小的变化规律,当坝体高程降低为 28 m 时,小主应力值增加到最大值,随后随着坝体高程的降低而减小。这是因为当坝体底部出现应力拱效应时,受狭窄河谷岸坡的阻挡,坝体底部堆石体在大主应力方向上的挤压

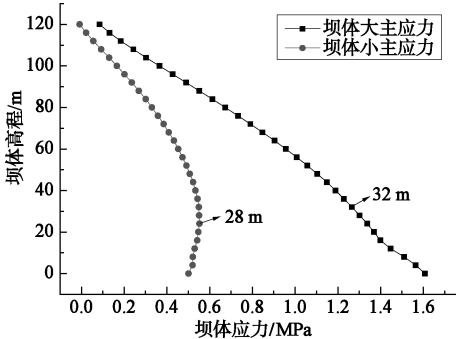


图 6 窄河谷时河谷中心点处主应力随坝体高程变化曲线
Fig. 6 Variation curves of principal stress with dam height at center point of narrow valley

受到阻碍,荷载通过应力拱向周围稳定的堆石体及河谷岸坡传递,使得坝体底部大、小主应力的方向发生偏转,造成坝体底部大主应力值增加幅度减小,小主应力值增加幅度增大。在应力拱的合理拱轴线处,小主应力增加到最大值,然后随着坝体高程的降低,在合理拱轴线以下,由于应力拱将坝体应力传递到拱脚,坝体底部的小主应力又开始减小,这就是狭窄河谷面板堆石坝底部应力拱效应发生的力学机理。

3 坝体底部应力拱效应合理拱轴线的分布形态及范围研究

当狭窄河谷面板坝坝体底部产生应力拱效应时,坝体底部的堆石体因为应力拱的存在而得不到充分的碾压密实,随着大坝蓄水后应力拱效应的消散,坝体会产生较大的工后变形,威胁大坝的安全。因此,需研究坝体底部应力拱效应的强弱及影响范围,以便于为工程措施工程改善措施提供理论依据。由应力拱效应的形成机理分析可知,在应力拱的合理拱轴线上,小主应力值增加到最大,随后由于应力拱的作用,其又开始减小。因此小主应力增加到最大值时对应的坝体高程即为应力拱的合理拱轴线高程,在此高程之下的坝体均受到应力拱的影响。

如果在坝轴线方向上多取一些关键剖面,分析这些剖面处大、小主应力随坝体高程的变化规律,就可以得出狭窄河谷中应力拱合理拱轴线的分布形态与范围。建立二维直角坐标系,将窄河谷计算模型中大坝左岸岸坡坡脚取为坐标原点,大坝河床段坝体沿着大坝轴线方向为横坐标,大坝高程为纵坐标。窄河谷计算模型大坝河床段宽度为 30 m,考虑到河谷为对称河谷,因此只确定左岸河床段关键剖面坐标。选取 4 个关键剖面坐标由左岸到右岸依次为 (0,0), (5,0), (10,0), (15,0), 其中河谷中心点 (15,0) 处坝体主应力随坝体高程的变化如图 6 所示, (0,0), (5,0) (10,0) 点处坝体主应力随坝体高程的变化曲线如图 7 至图 9 所示。

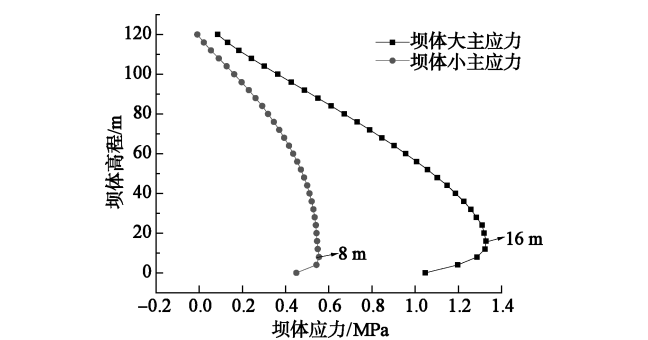


图 7 (0,0) 点处坝体主应力随坝体高程变化

Fig. 7 Variation curves of principal stress with dam height at point (0,0)

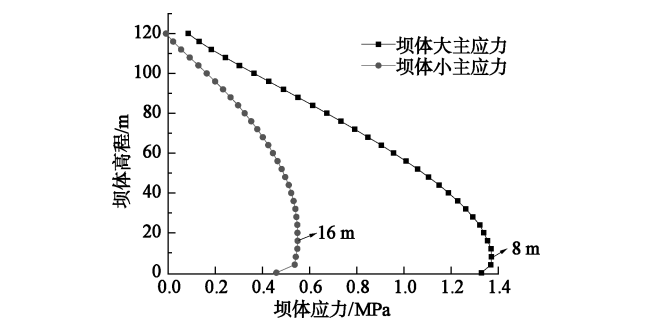


图 8 (5,0) 处坝体主应力随坝体高程变化

Fig. 8 Variation curves of principal stress with dam height at point (5,0)

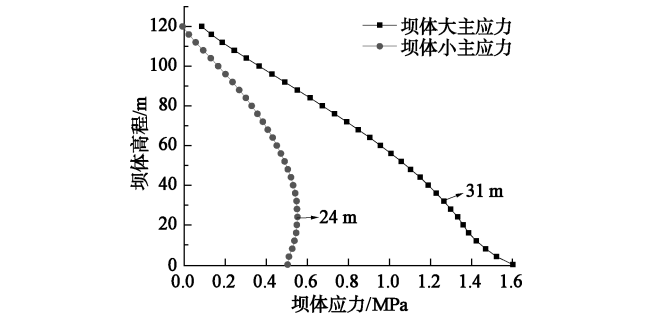


图 9 (10,0) 处坝体主应力随坝体高程变化

Fig. 9 Variation curves of principal stress with dam height at point (10,0)

由图 6 至图 9 可知,在 (0,0) 点处,小主应力最大时对应的坝体高程为 8 m,在 (5,0) 点处,小主应力最大时对应的坝体高程为 16 m,在 (10,0) 点处,小主应力最大时对应的坝体高程为 24 m,在 (15,0) 点处,小主应力最大时对应的坝体高程为 28 m,通过插值方法,将这些点连起来,得出本此计算中狭窄河谷面板坝合理拱轴线形态如图 10 所示。

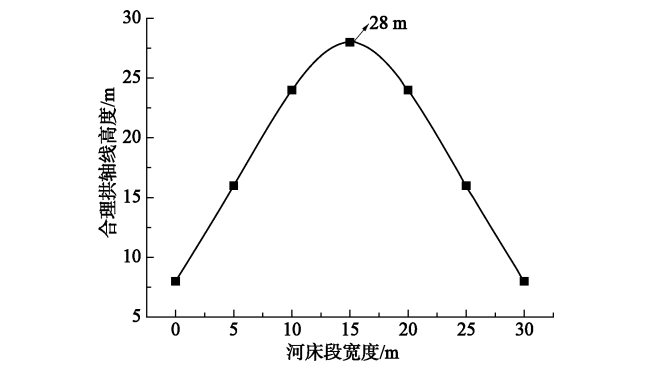


图 10 窄河谷计算模型中坝体底部应力拱的合理拱轴线

Fig. 10 Reasonable arch axis of stress arching at dam bottom for narrow valley model

由图 10 可知窄河谷面板坝底部应力拱的合理拱轴线形态为单拱形,拱脚位于两岸坝坡的坡脚处,在河谷中心处,合理拱轴线的高度最高。其影响范围为图 10 所示合理拱轴线以下的大坝区域,约占坝体整体高度的 23%。在进行面板堆石坝的设计与施工时,应该在此区域采取设置特殊碾压区、增加碾压压实度、预留

足够沉降期等工程措施,以减轻应力拱效应对坝体应力变形产生的不利影响。

4 结 语

采用有限元数值模拟方法,研究宽河谷与窄河谷条件下,面板堆石坝坝体底部大、小主应力的变化规律,以此揭示狭窄河谷面板堆石坝坝体底部应力拱效应的形成机理。研究表明:受到狭窄河谷岸坡的阻挡,狭窄河谷面板堆石坝坝体底部堆石体在大主应力方向上的挤压受到阻碍,荷载通过应力拱向周围稳定的堆石体及河谷岸坡传递,使得坝体底部大、小主应力的方向发生偏转,造成坝体底部大主应力值增加幅度减小,小主应力值增加幅度增大,从而使得狭窄河谷面板堆石坝坝体底部产生应力拱效应。研究了峡谷地区面板坝坝体底部应力拱效应合理拱轴线的分布形态及范围,窄河谷面板坝底部应力拱的合理拱轴线形态为单拱形,坝体受拱效应的影响范围约占坝体整体高度的 23%。

参考文献:

- [1] 蒋国澄,傅志安,凤家骥. 混凝土面板坝工程[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1997. (JIANG Guo-cheng, FU Zhi-an, FENG Jia-yi. Concrete Face Rockfill Dam Engineering [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 蒋国澄,曹克明. 中国的混凝土面板堆石坝[C]//国际高土石坝学术研讨会论文集. 1993, 北京. (JIANG Guo-cheng, CAO Ke-ming. Concrete face rockfill dam in China [C]//Proceedings of the International Symposium on High Earth Rockfill Dams. 1993, Beijing. (in Chinese))
- [3] WILKINS J K, MITCHELL W R, FITZPATRICK M D, et al. The design of cethana concrete face rockfill dams[C]//11th ICOLD Congress. 1973, Madrid.
- [4] 汪小刚. 高土石坝几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 203–222. (WANG Xiao-gang. Discussion on some problems observed in high earth-rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 203–222. (in Chinese))
- [5] 曾奕滔,沈振中,甘磊,等. 反滤层对高心墙堆石坝拱效应影响研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(1): 90–95. (ZENG Yi-tao, SHEN Zhen-zhong, GAN Lei, et al. Influence from filter layer on arching effect of high rockfill dam with core wall[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2018, 49(1): 90–95. (in Chinese))
- [6] 高 昂,苏怀智,刘春高. 超高心墙堆石坝拱效应分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 138–145. (GAO Ang, SU Huai-zhi, LIU Chun-gao. Analysis of soil arching in high core-wall rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(9): 138–145. (in Chinese))
- [7] 林 江,胡万雨,孟凡理,等. 瀑布沟大坝心墙拱效应分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2031–2035. (LIN Jiang, HU Wan-yu, MENG Fan-li, et al. Arching effect analysis of core wall in Pubugou dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2031–2035. (in Chinese))
- [8] 张 岩. 猴岩狭窄河谷高面板堆石坝拱效应及其控制措施研究[C]//水电 2013 大会——中国大坝协会 2013 学术年会暨第三届堆石坝国际研讨会论文集. 2013, 昆明. (ZHANG Yan. Study on arch effect and control measures of high concrete face rockfill dam in Houziyan narrow valley [C]. //Hydropower 2013 Conference—Proceedings of the 2013 Annual Conference of China Dam Association and the Third International Symposium on Rockfill Dam. 2013, Kunming. (in Chinese))
- [9] 党发宁,杨超,薛海斌,等. 河谷形状对面板堆石坝变形特性的影响研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 435–442. (DANG Fa-ning, YANG Chao, XUE Hai-bin, et al. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 435–442. (in Chinese))
- [10] 狄文龙,屈楚杰,蒋宽鹏. 狭窄河谷高面板堆石坝拱效应计算分析[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(6): 7–12. (DI Wen-long, QU Chu-jie, JIANG Kuan-peng. Analysis of arch effect of high CFRD built in narrow valley[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2016, 22(6): 7–12. (in Chinese))
- [11] KARL T. Theoretical Soil Mechanics[M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1947.

(编校:黄贤沙)