

高混凝土重力坝坝踵裂缝水力劈裂特性分析

甘磊^{1,2}, 吴健¹, 马泽锴¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450003)

摘要:高水压作用下常年运行的高混凝土重力坝易存在水力劈裂破坏隐患,对某高混凝土重力坝坝踵裂缝水力劈裂特性进行数值分析,研究了缝内水压对高混凝土坝水力劈裂裂缝扩展的影响,探讨了高混凝土坝水力劈裂裂缝稳定性和坝基面抗滑稳定性。结果表明,当初始裂缝距离坝踵的高度为3.0 m,裂缝深度为2.0 m时,与不考虑缝内水压作用相比,缝内水压作用下坝体极限承载能力降低17.6%;当初始水平裂缝深度为2.0 m,裂缝距离坝踵的高度小于等于5.0 m时,坝体裂缝处于拉剪断裂模式;初始水平裂缝位于坝踵位置,缝内水压作用下坝基面抗滑稳定安全系数下降明显,下降速率为未考虑缝内水压情况的8倍,缝内水压作用对重力坝坝踵裂缝稳定及抗滑稳定不利。

关键词:高混凝土重力坝;水力劈裂;坝踵;缝内水压;裂缝稳定性;抗滑稳定性

中图分类号:TV314 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2020)06-0023-05

Analysis of hydraulic fracturing characteristics of cracks in a high concrete gravity dam heel//GAN Lei^{1,2}, WU Jian¹, MA Zekai¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Center on Levee Safety & Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: High concrete gravity dams operating perennially under the condition of high water pressure are prone to hydraulic fracturing failure. In this study, the hydraulic fracturing characteristics of the dam heel crack in a high concrete gravity dam were analyzed, the influence of water pressure inside the crack on the expansion of hydraulic fracturing crack was studied, and the stability of hydraulic fracturing crack and anti-sliding stability of dam foundation surface were discussed. The results show that if the initial crack is 3.0 m away from the dam heel and the depth of the crack is 2.0 m, the ultimate bearing capacity of the dam body under the water pressure in the crack decreases by 17.6 % compared with that without considering water pressure inside the crack. If the initial horizontal crack depth is 2.0 m and the distance from the crack to the dam heel is less than 5.0 m, the crack of the dam body is in the tension shear fracture mode. If the initial horizontal crack is located at the dam heel position, the safety coefficient of anti-sliding stability of dam foundation surface in the joint under the action of water pressure decreases obviously, with a decreasing rate of 8 times compared to the case without considering the water pressure inside the crack. The effect of water pressure inside the crack is unfavorable to the crack stability and anti-sliding stability for gravity dam heel.

Key words: high concrete gravity dam; hydraulic fracturing; dam heel; water pressure inside crack; crack stability; anti-sliding stability

随着筑坝技术的快速发展,世界上已建成了许多高混凝土坝,其中不少已达200 m级,甚至300 m级,这些高坝常年在高水位条件下服役,大坝初始裂缝易起裂、扩展甚至贯穿,影响坝体整体性,威胁大坝安全^[1]。国内外诸多学者开展了混凝土水力劈裂试验及机理研究,研究了混凝土裂缝张开速度对缝内水压分布的影响^[2-4],探讨了不同缝内水压对裂缝扩展过程的影响^[5-10],分析了不同裂缝形态或缝内水压分布形式对水力劈裂裂缝扩展过程的影

响^[11-14],讨论了不同位置、不同裂缝深度情况下混凝土重力坝裂缝稳定性^[15]。在水力劈裂数值模拟方法方面,方修君等^[16]基于扩展有限元法,模拟了重力坝地震开裂过程;董玉文等^[17]采用扩展有限元法,开展了重力坝水力劈裂分析;Wang等^[18]在董玉文等^[17]的研究基础上,考虑了缝内水压与裂缝宽度的耦合关系,模拟了某重力坝水力劈裂演化过程;周维垣等^[19-20]采用无单元伽辽金法模拟了拱坝的三维开裂过程和含孔洞岩体的水力劈裂裂缝扩展过程。

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20201312);水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心资助项目(DFZX202003);2020年度河海大学大学生创新创业训练计划(2020067)

作者简介:甘磊(1987—),男,副教授,博士,主要从事水工结构稳定分析研究。E-mail: 20140040@hhu.edu.cn

本文采用笔者建立的混凝土结构水力劈裂数值分析模型^[21-23],模拟某高混凝土重力坝水力劈裂破坏过程,研究缝内水压作用对重力坝极限承载能力和裂缝扩展过程的影响,分析不同初始裂缝位置和初始裂缝深度下重力坝水力劈裂裂缝的稳定性,探讨缝内水压作用对重力坝建基面抗滑稳定安全的影响。

1 数值实现

1.1 缝内水压分布计算

针对高混凝土坝中存在的粗糙裂缝问题,沿裂缝长度方向取若干微段体,将整条裂缝视为由有限个单元构成的弥散裂缝,当微段体的长度足够短时,可将粗糙裂缝视为平行板之间的裂缝进行处理,且在裂隙面的两侧就近对应布设两排节点,每对垂直裂缝的节点之间的距离可以表征为该段裂缝的开度。在考虑裂纹中的水流流动方程时,利用差分原理,得到裂缝内水压力的差分形式,然后将裂缝处的节点概化为四边形单元,依次联立每个裂缝单元的缝内水压力计算式,采用迭代法求解裂缝内水压分布,使得本条裂缝其各节点的水压力之差最大值满足预设的精度要求即可,具体计算过程可参阅文献[23]。

1.2 水力劈裂扩展判据

数值模型考虑了渗透水压作用下复合型裂缝的应力强度因子,推导了不同应力状态下的水力劈裂裂缝开裂判据公式。裂缝面受拉时,其裂缝开裂判据公式^[22]为

$$K_{\theta} = \frac{\sqrt{\pi l}}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \left\{ \left[-\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\beta) + P \right] \cdot (1 + \cos \theta_0) + \frac{3(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin(2\beta) \sin \theta_0 \right\} > K_{IC}$$
 (1)

其中

$$\theta_0 = \begin{cases} \arccot \frac{-3K_I \pm \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{8K_{II}} & K_{II} \neq 0 \\ 0 & K_{II} = 0, K_I \neq 0 \end{cases}$$

式中: K_{θ} 为裂缝尖端有效应力强度因子; θ_0 为开裂角; $2l$ 为初始裂缝长度; β 为裂缝长轴方向与最大主应力夹角; P 为作用于裂缝渗透水压; K_{IC} 为材料断裂韧度值; K_I 、 K_{II} 分别为I、II型应力强度因子; σ_1 、 σ_3 分别为单裂缝模型所受的竖向、水平向压应力。

裂缝面受压时,压剪应力状态下水力劈裂裂缝开裂判据公式^[22]为

$$K_{\theta} = \frac{2\sqrt{3\pi l}}{3} \left\{ \left| -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\beta) \right| - \mu \left[-\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\beta) + P \right] \right\} > K_{IC}$$
 (2)

其中

$$\mu = \tan \varphi + \frac{c}{\sigma_n}$$

式中: φ 为裂缝面的摩擦角; c 为裂缝面的黏聚力; σ_n 为裂缝面的法向压应力。

2 计算模型及参数

选定某高混凝土重力坝,沿坝踵和坝趾分别向上游、下游截取 400 m 作为计算模型上、下游边界,沿坝体建基面垂直往下截取 400 m 作为模型底边界,坝体断面如图 1 所示。坝基面高程设为 0 m,坝高 216.50 m,坝顶宽 18.00 m,假定重力坝迎水面垂直,下游坝坡坡比为 1 : 0.73。将坝基和坝体作为整体进行计算分析,计算模型如图 2 所示,节点总数为 5855,裂缝尖端加密布置了 100 个节点。将坝踵定为模型坐标原点,以上游水平指向下游为 x 轴的正方向,竖直向上为 y 轴的正方向。

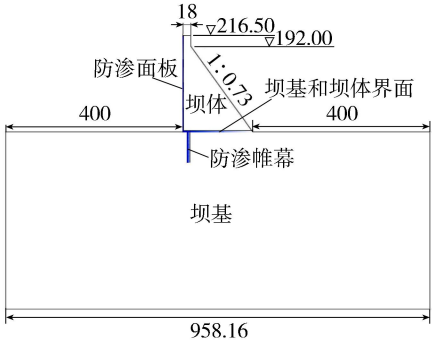


图 1 坝体断面 (单位:m)

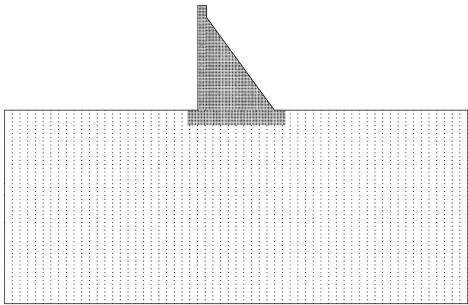


图 2 大坝模型

计算考虑正常蓄水位 210.00 m,对应下游水位 40.00 m,假定坝体和坝基材料为各向同性弹性材料,在坝基与坝体交界处设置厚度为 0.5 m 的交界面,各分区材料的计算参数见表1。计算未考虑坝

表 1 各分区材料计算参数

材料	弹性模量/ GPa	容重/ (kN · m ⁻³)	泊松比	渗透系数/ (cm · s ⁻¹)	断裂韧度/ (MN · m ^{-3/2})
坝体	20	24.0	0.2	2.5×10 ⁻⁷	1.20
防渗面板	20	24.0	0.2	2.5×10 ⁻⁹	1.20
帷幕	20	26.5	0.2	2.5×10 ⁻⁷	1.20
坝基	16	25.0	0.3	2.5×10 ⁻⁵	2.00
交界面	16	24.0	0.3	2.5×10 ⁻⁴	0.65

体排水的影响,主要考虑的载荷包括坝体自重,上、下游静水压力,裂缝内水压力 and 坝基自重。假定初始裂缝为水平裂缝,位于坝体上游面。坝基的上、下游边界设置为水平约束,底边界设为固定约束。

3 结果与分析

3.1 缝内水压对裂缝扩展的影响

图3为考虑与不考虑缝内水压作用两种工况下裂缝扩展路径,两种工况下裂缝尖端有效应力强度因子随裂缝扩展过程的变化曲线如图4所示。由图3和图4可知,两种工况下裂缝均朝下游且向坝体底部扩展,不考虑缝内水压作用时,裂缝扩展6步后,裂缝尖端的有效应力强度因子降至 $0.78\text{ MN/m}^{3/2}$,低于混凝土材料的断裂韧度,裂缝不再扩展,对应的裂缝水平长度为 2.328 m 。考虑缝内水压作用时,裂缝尖端有效应力强度因子始终大于混凝土材料的断裂韧度,裂缝不断扩展,有效应力强度因子曲线存在拐点,在拐点处,有效应力强度因子骤增,呈现不稳定的扩展趋势,其裂缝水平长度为 3.544 m 。以上研究表明,缝内水压的存在会导致裂缝尖端有效应力强度因子增大,降低坝体裂缝的稳定性,影响坝体安全度。

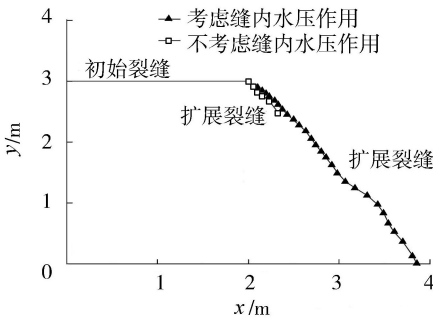


图3 裂缝扩展路径

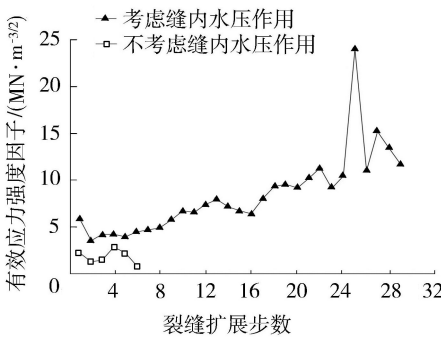


图4 裂缝尖端有效应力强度因子随裂缝扩展的变化

针对不同初始深度裂缝,对其裂缝面施加不同水压,保持水位恒定,分析该裂缝起裂时对应的临界上游水位,考虑缝内水压和 不考虑缝内水压作用下的初始裂缝深度和临界上游水位关系曲线如图5所示。由图5可知,初始裂缝深度越小,裂缝起裂所需

的临界上游水位值越大,考虑缝内水压力作用时,极限荷载受初始裂缝深度的影响较大;不考虑缝内水压作用时,临界上游水位-初始裂缝深度曲线较平缓,初始裂缝深度小于 2.0 m 时,坝体的极限承载水头为 $241.0\sim 243.0\text{ m}$,约为坝高的 1.12 倍;考虑缝内水压作用时坝体的极限承载能力较未考虑缝内水压情况显著降低,当初始裂缝距离坝踵的高度为 3.0 m ,裂缝深度为 2.0 m 时,缝内水压作用下坝体极限承载能力比不考虑缝内水压情况下降 17.6% ,随着裂缝深度的不断增大,坝体承载能力降低的速率减缓。

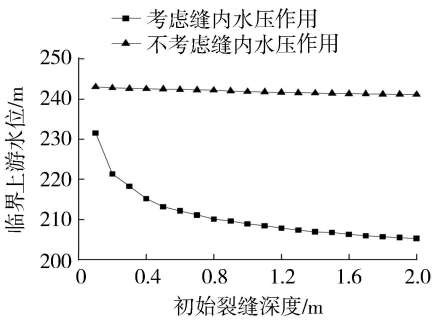


图5 临界上游水位-初始裂缝深度曲线

在不同缝内水压作用下,裂缝均向坝体底部和下游侧扩展,缝内水压力越大,裂缝开裂深度越大,当缝内水压增至 2.05 MPa 时,裂缝转变为不稳定状态,不断扩展至坝体破坏^[22]。

3.2 裂缝位置对裂缝稳定性的影响

假定初始裂缝为水平裂缝,位于坝体上游面,裂缝深度为 2 m ,考虑初始裂缝距离坝踵的高度 h_a 分别为 0 m 、 3 m 、 5 m 、 7 m 和 10 m 5种方案,分析不同初始裂缝位置对裂缝稳定性的影响。不同位置初始裂缝的断裂参数见表2。由表2可知,当初始裂缝深度为 2 m 时, h_a 越小,即初始裂缝越靠近坝踵,缝内水压对裂缝的劈裂作用越显著,裂缝就越不稳定。考虑缝内水压作用时, $h_a\leq 5\text{ m}$ 的裂缝处于拉剪断裂模式,其裂缝尖端有效应力强度因子一直大于材料断裂韧度值,裂缝一直扩展至坝体发生失稳破坏为止,裂缝不稳定;当 h_a 增至 7 m 后,裂缝受力状况由拉剪转化为压剪,裂缝处于稳定状态。

表2 不同位置初始裂缝的断裂参数

h_a/m	$K_I/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	$K_{II}/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	$K_{\theta}/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	$K_{IC}/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	裂缝类型	裂缝状态	开裂深度/m
0	3.45	-1.15	3.64	0.65	拉剪	不稳定	
3	1.23	-2.13	2.46	1.20	拉剪	不稳定	
5	1.14	1.42	1.82	1.20	拉剪	不稳定	
7	-0.42	-0.74	0.85	1.20	压剪	稳定	3.425
10	-0.35	0.63	0.72	1.20	压剪	稳定	2.752

3.3 裂缝深度对坝体建基面应力分布的影响

假定初始裂缝在坝踵位置,对初始裂缝深度 a_0

分别为 0 m、5 m、10 m、20 m 和 30 m 5 种情况下建基面上的垂直正应力和切向剪应力进行分析,不同初始裂缝深度下坝体沿建基面上的应力分布如图 6 所示。

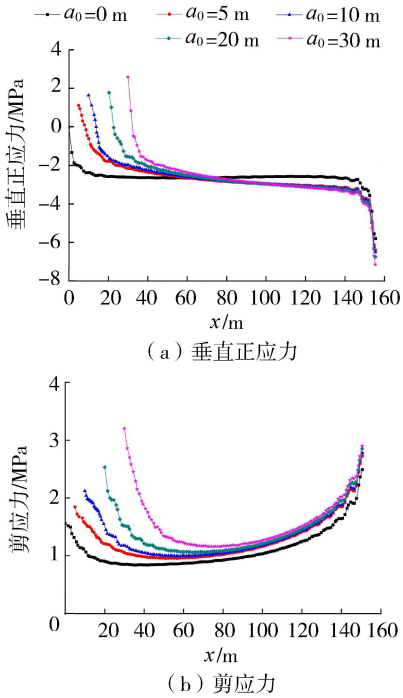


图 6 不同初始裂缝深度下坝体沿建基面的应力分布

由图 6 可知,裂缝的存在使得坝踵附近较小区域存在拉应力,而坝体沿建基面仍基本上处于受压状态;裂缝的存在对裂缝尖端附近区域应力影响较大,而对离裂缝较远的区域应力影响很小,具有一定的局部效应;随着初始裂缝深度的增大,建基面上裂缝尖端附近的应力变化较为明显,远离裂缝的下游侧应力变化较小。

3.4 坝体建基面抗滑稳定性

基于垂直正应力和剪应力分布结果,采用如下公式^[24]计算坝体沿建基面的抗滑稳定安全系数 K :

$$K = \frac{\int (f\sigma'_n + c') ds}{\int \tau_n ds} = \frac{f \int \sigma'_n ds + c'(L - a)}{\int \tau_n ds} \quad (3)$$

式中: σ'_n 、 τ_n 分别为建基面上的垂直正应力和切向剪应力; f 为坝体混凝土与坝基基岩之间的滑动摩擦系数,取 $f=1.2$; c' 为坝体与基岩间的黏聚力, $c'=1.2$ MPa; L 为建基面的长度, $L=158.16$ m; a 为裂缝深度。在式(3)中,当建基面某些点的垂直正应力 σ'_n 为拉应力时,则令其为 0 MPa。

考虑与不考虑缝内水压作用两种数值方案下,裂缝均沿着坝体和坝基的交界面不断扩展,坝体建基面抗滑稳定安全系数随裂缝深度的变化关系如图 7 所示。由图 7 可知,随着裂缝深度的不断增大,两种数值方案下的坝体抗滑稳定安全系数均下降;

在裂缝深度相同的情况下,与不考虑缝内水压作用相比,考虑缝内水压作用计算出的抗滑稳定安全系数偏小,裂缝深度为 30 m 情况下减小了 29.3%;不考虑缝内水压作用时,无裂缝情况该坝的抗滑稳定安全系数为 4.079,裂缝深度为 10 m 情况下为 3.952,减小了 3.1%;考虑缝内水压时,坝体抗滑稳定安全系数从无裂缝情况下的 4.079 减小至裂缝深度 30 m 情况下的 3.056,减小了 25.1%,说明在缝内水压作用下,随裂缝深度的增大,坝体的抗滑稳定安全系数的下降速率较快,约为未考虑缝内水压情况的 8 倍。

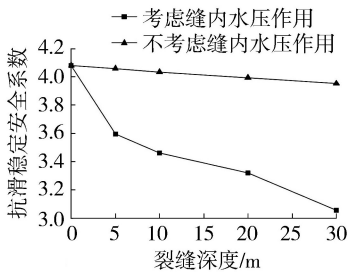


图 7 坝体建基面抗滑安全系数随裂缝深度的变化

4 结 论

- 当初始水平裂缝距离坝踵的高度为 3.0 m,裂缝深度为 2.0 m 时,考虑缝内水压作用下坝体极限承载能力较未考虑缝内水压情况降低了 17.6%,缝内水压作用下坝体极限承载能力显著降低,且随着裂缝深度的增大,坝体承载能力降低速率减缓。
- 当初始水平裂缝深度为 2.0 m,裂缝距离坝踵的高度小于等于 5.0 m 时,坝体裂缝处于拉剪断裂模式,裂缝呈不稳定扩展趋势,当初始裂缝距离坝踵的高度增至 7 m 后,裂缝转变为稳定状态。
- 裂缝的存在使得坝踵附近较小区域存在拉应力,对裂缝尖端附近区域应力影响较大,存在一定局部效应,且随着初始裂缝深度的增大,建基面上裂缝尖端附近的应力变化较为明显。
- 初始水平裂缝位于坝踵位置时,考虑缝内水压作用下坝基面抗滑稳定安全系数下降明显,下降速率为未考虑缝内水压情况的 8 倍,缝内水压作用对重力坝建基面抗滑稳定不利。

参考文献:

[1] 余春勇,张可,杨圣涛.碾压混凝土坝施工质量风险评价研究[J].水利经济,2018,36(3):45-49. (SHE Chunyong, ZHANG Ke, YANG Shengtao. Risk evaluation of construction quality of roller compacted concrete dams [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(3): 45-49. (in Chinese))

- [2] BRÜHWILER E, SAOUMA V E. Water fracture interaction in concrete: part I. fracture properties[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(3): 296-303.
- [3] BRÜHWILER E, SAOUMA V E. Water fracture interaction in concrete: part II. hydrostatic pressure in cracks[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(4): 383-390.
- [4] SLOWIK V, SAOUMA V E. Water pressure in propagating concrete cracks[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(2): 235-242.
- [5] 贾金生,汪洋,冯炜,等. 重力坝高压水劈裂模拟方法与特高重力坝设计准则初步探讨[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 127-133. (JIA Jinsheng, WANG Yang, FENG Wei, et al. Simulation method of hydraulic fracturing and discussions on design criteria for super high gravity dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 127-133. (in Chinese))
- [6] 徐世烺, 王建敏. 水压作用下大坝混凝土裂缝扩展与双K断裂参数[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 119-125. (XU Shilang, WANG Jianmin. Crack propagation in a concrete dam under water pressure and determination of the double-K fracture parameters [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(2): 119-125. (in Chinese))
- [7] 甘磊,沈振中,张腾,等. 混凝土结构水力劈裂试验装置研究及应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(4): 130-136. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, ZHANG Teng, et al. Research and application of a hydraulic fracturing test device for concrete structures [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(4): 130-136. (in Chinese))
- [8] 徐力群,陶韵成,刘得潭,等. 单轴压缩状态下类岩石材料水力劈裂试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 28-34. (XU Liqun, TAO Yuncheng, LIU Detan, et al. Hydraulic fracture test of rock-like materials under uniaxial compression [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4): 28-34. (in Chinese))
- [9] 甘磊,沈心哲,王瑞,等. 单裂缝混凝土结构水力劈裂试验[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 30-35. (GAN Lei, SHEN Xinzhe, WANG Rui, et al. Hydraulic fracturing test of concrete structures with single crack [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 30-35. (in Chinese))
- [10] 曾奕滔,沈振中,甘磊,等. 弯应力作用下混凝土结构水力劈裂试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 72-77. (ZENG Yitao, SHEN Zhenzhong, GAN Lei, et al. Experimental study on the hydraulic fracture of concrete structure under bending stress [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 72-77. (in Chinese))
- [11] 甘磊,沈振中,徐力群. 多场耦合作用下高混凝土坝水力劈裂研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(2): 87-94. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, XU Liqun. Review on hydraulic fracture in high concrete dam under multi-field coupling conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(2): 87-94. (in Chinese))
- [12] 黄云,金峰,王光纶,等. 高拱坝上游坝踵裂缝稳定性及其扩展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(4): 555-559. (HUANG Yun, JIN Feng, WANG Guanglun, et al. Stability and propagation of cracks at the heel of high arch dams [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(4): 555-559. (in Chinese))
- [13] 李宗利,任青文,王亚红. 岩石与混凝土水力劈裂缝内水压分布的计算[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 656-661. (LI Zongli, REN Qingwen, WANG Yahong. Formula for water pressure distribution in rock or concrete fractures formed by hydraulic fracturing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 656-661. (in Chinese))
- [14] YANG H, XIE S Y, SECQ J, et al. Experimental study and modeling of hydromechanical behavior of concrete fracture[J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(2): 97-106.
- [15] 李宗利,王锦丽,刘霞. 考虑水力劈裂效应的重力坝坝踵裂缝稳定分析[J]. 人民长江, 2010, 41(8): 86-88. (LI Zongli, WANG Jinli, LIU Xia. Crack stability analysis of gravity dam heel considering hydraulic fracturing effect [J]. Journal of Yangtze River, 2010, 41(8): 86-88. (in Chinese))
- [16] 方修君,金峰,王进廷. 基于扩展有限元法的 Koyna 重力坝地震开裂过程模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2065-2069. (FANG Xiujun, JIN Feng, WANG Jinting. Seismic fracture simulation of the Koyna gravity dam using an extended finite element method [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(12): 2065-2069. (in Chinese))
- [17] 董玉文,任青文. 重力坝水力劈裂分析的扩展有限元法[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1361-1367. (DONG Yuwen, REN Qingwen. An extended finite element method for modeling hydraulic fracturing in gravity dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1361-1367. (in Chinese))
- [18] WANG Kefeng, ZHANG Qing, XIA Xiaozhou, et al. Analysis of hydraulic fracturing in concrete dam considering fluid-structure interaction using XFEM-FVM model[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 57: 399-412.

(下转第 59 页)