

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.011

弯应力作用下混凝土结构水力劈裂试验研究

曾奕滔¹, 沈振中¹, 甘磊^{1,2}, 李舸航¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 混凝土重力坝坝踵在运行期间易出现拉应力,是坝体的薄弱区域。为研究该区域的水力劈裂问题,采用四点弯曲弯矩+高水压的联合施载方式,模拟混凝土重力坝坝踵受拉状态下的水力劈裂破坏过程。基于不同弯矩与水压值组合,研究坝踵因施工应力出现初始裂缝情况下的水力劈裂问题。结果表明,裂缝发展过程中,混凝土试件的应变可分为线性段及指数段,当应变进入指数段时,试样临近破坏;较小的荷载增量即会打破稳态,促使裂缝失稳扩展;劈裂水压与拉应力存在叠加效应,若最大值作用位置相同,裂缝尖端应力集中现象明显,易引起水力劈裂破坏,若作用位置不同,则受拉截面应变分布较均匀,较大限度地发挥了混凝土受拉截面的抗劈拉能力,减弱了水力劈裂作用。

关键词: 弯应力;混凝土重力坝;坝踵;水力劈裂;试验研究

中图分类号:TV331 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2018)01-0072-06

Experimental study on the hydraulic fracture of concrete structure under bending stress

ZENG Yitao¹, SHEN Zhenzhong¹, GAN Lei^{1,2}, LI Gehang¹

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

Abstract: Tensile stress is prone to be developed within the dam heel during the operation period of the concrete gravity dam, thereby leading to a weak area. To address the problem of hydraulic fracture in the weak area, experiments are conducted to simulate the hydraulic fracturing process of dam heel under tensile stress, in which a combined loading mode including four-point bending moment and high hydraulic pressure is used. The hydraulic fracturing problem due to initial cracks during construction is explored using different loading combinations. The experimental results show that the variation of the concrete strain is composed of linear and exponential stages during cracking process, and a fracture failure is prone to be developed when the exponential stage is reached. In this case, a small load increment applied will break the steady state with crack failure being extended. It is found that superposed effect is developed due to the splitting water pressure and the tensile stress. When the maximum values of the two stresses are applied at the same place, significant stress concentration at crack tip is developed, which would contribute to hydraulic fracture failure. In contrast, if the two maximum stresses act at different places, the strain distribution on the tensile section of the concrete would be more uniform with its tensile strength being largely mobilized, thereby reducing the hydraulic fracturing effect.

Key words: Bending stress; concrete gravity dam; dam heel; hydraulic fracture; experimental study

迄今,全世界已修建了许多高混凝土重力坝,如我国的三峡水电站、龙滩水电站、向家坝水电站,瑞士的大迪克桑斯水电站等,这些高坝作用水头高,坝体工作状态复杂,施工期存在的表面裂缝在高水头作用下易

基金项目: 国家自然科学基金(51609073);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放研究基金(YK915007);江西省水利科技项目(KT201545);国家级大学生创新创业训练计划项目(201610294016)

作者简介: 曾奕滔(1995—),男,江苏东海人,硕士研究生,从事水工结构工程研究。E-mail:825227656@qq.com

通信作者: 甘磊,讲师。E-mail:ganlei2015@hhu.edu.cn

引用本文: 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.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.011.

发生水力劈裂破坏。混凝土重力坝坝踵部位是坝体的薄弱区域,监测资料表明,绝大多数坝体在坝踵部位产生不同程度的裂缝,安全系数偏低和表面保护认识不足是导致无坝不裂的重要原因^[1]。坝踵裂缝的产生主要源于施工期的温度应力,而施工应力在运行期不会消失,它在水库蓄水以后作为初始应力存在于混凝土中^[2]。坝身存在的损伤裂缝在深水压力作用下有可能进一步扩展,破坏坝体的整体性,威胁坝体的安全^[3-4]。坝踵区域施工裂缝的存在会给后期大坝投产运行带来安全隐患,因此,研究蓄水期重力坝的水力劈裂具有重要的理论意义和应用价值。

Brühwiler 等^[5-6]通过不同级配混凝土试件的水力劈裂试验,研究了混凝土裂纹内水压对混凝土断裂性能和断裂过程区的影响以及裂缝内水压的分布变化规律。Slowik^[7]研究了动态荷载条件下混凝土材料裂缝内水压、裂纹张开速度与时间的关系。而针对重力坝坝踵薄弱区域,Barpi 等^[8]对混凝土坝体和坝基交结面裂纹的水力劈裂进行了模拟研究。董玉文等^[9]采用扩展有限元法(XFEM)进行重力坝水力劈裂数值模拟。沈振中等^[10]基于无单元法建立了渗流-应力-损伤数值耦合分析模型,进行了重力坝裂缝扩展分析。贾金生等^[11-12]进行的混凝土试件高压水劈裂模拟试验,可近似模拟无拉、压应力作用下混凝土结构的水力劈裂问题;其后期又进行了混凝土试件单轴拉、压应力作用下高压水劈裂模拟试验,并运用断裂力学对试验结果进行了分析和参数校核,推导了重力坝坝踵是否会发生水力劈裂的判定公式。孔祥清等^[13]针对不同初始裂缝角混凝土试件,采用恒定水压力和恒定轴向拉力两种不同加载方式,进行了水压力和外力联合作用下的常态混凝土试件轴拉破坏试验。甘磊等^[14]研制了混凝土结构水力劈裂试验装置,实现了混凝土水力劈裂过程中缝内水压和缝宽数据的实时采集。

在现有的混凝土水力劈裂试验研究中,试样应力状态较为简单,与重力坝真实工作情况存在差别。本文基于已有的研究基础^[14],自制加载工具,模拟重力坝坝踵应力条件,在试样上同时施加四点弯曲弯矩及水压力,开展混凝土水力劈裂试验,研究混凝土重力坝坝踵处水力劈裂的形成和破坏机理。

1 试验方法

针对坝踵部位混凝土应力状态由拉应力向压应力转变过渡的受力特点,设计了混凝土构件在弯矩作用下的高压水劈裂模拟试验,模拟试样在弯矩+水压联合作用下的裂缝扩展及破坏过程,研究重力坝坝踵因施工应力或蓄水而出现受拉情况下的水力劈裂问题。本试验中试样荷载及裂缝所在断面应力情况如图 1 所示,试件厚度为 150 mm。其中, F 为作用力, L_1 为上表面线性均布荷载间距离, L_2 为下表面反作用力间距离, p 为缝内水压, y 为距中和轴距离, I_x 为绕垂直视图方向的惯性矩。

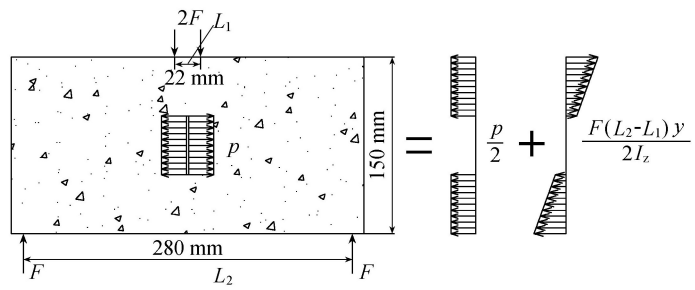


图 1 断面荷载应力
Fig.1 Load and stress within the section

1.1 试件成型

准备净空尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm 的长方体模具,在模具的对称两个面中心位置各切割一条刀口,浇筑试样时在刀口中预置一横截面尺寸为 50 mm×2 mm 的钢片,用于形成初始裂缝。浇筑而成的试样,裂缝面积占所在截面混凝土面积的一半。混凝土构件按水泥:砂:石子:水=1.00:2.29:3.90:0.63 的配合比浇筑。根据 DL/T 5332—2005《水工混凝土断裂试验规程》,测得该配合比下混凝土标准样的材料如下:密度为 2 200 kg/m³,抗压强度为 11.54 MPa,劈拉强度为 0.82 MPa,弹性模量为 1.72×10⁴ MPa,泊松比为 0.16。

1.2 荷载施加

试验所涉荷载包括水压及弯矩。水压由电调压力泵提供,水压范围为 0~3 MPa。弯矩为四点弯曲弯矩,故裂缝所在截面仅受拉应力或压应力。由万能试验机提供压力,经上下 2 个 π 字形钢座将压力转化为四点弯曲弯矩作用在试样内部,万能试验机压力范围为 0~1 000 kN。

1.3 缝内水压密封

试验采用的水压密封装置包括柔性橡胶垫和刚性工字钢架,如图 2 所示。通过拧紧螺母提供外压力,从

而使橡胶垫紧贴在预置裂缝上。由于橡胶垫有一定厚度,安装好试样后,试样和钢架仅通过橡胶垫接触。又因预制裂缝横截面面积小,故用以密封高压水的侧压远小于试验荷载,可忽略其作用效果。工字型钢架与橡胶垫上预留孔洞,连通预制裂缝,作为供水通道,并设有进水口及排气阀。

1.4 试验数据采集

试验过程中需实时记录的数据包括缝内水压及试样变形。裂缝内水压采用 HM20 水压传感器测量。测量试样变形时,根据试验需要在试样表面粘贴应变片。应变片在裂缝扩展方向上贴 4 片,测量垂直裂缝方向应变。每片应变片长度为 50 mm,宽度为 5 mm。第一个应变片紧靠裂缝端部,应变片之间净距分别为 5 mm、8 mm、10 mm,应变片编号按序依次为 1 号、2 号、3 号、4 号,如图 3 所示。DH5956 动态信号测试分析系统采集记录。



图2 高压水密封装置
Fig.2 High water pressure sealing device

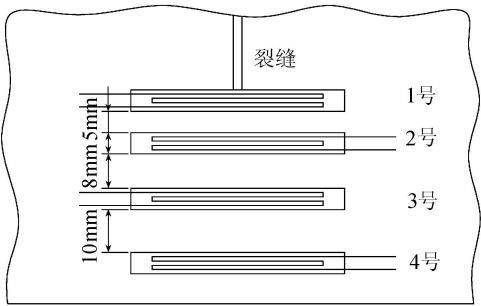


图3 试样应变片布设
Fig.3 Strain gauge arrangement in the sample

2 试验设计

2.1 试验方案

针对施工期拉应力情况,设计了 6 组试验方案,每组准备 3 个试样。试验荷载分为 4 类,各组试验方案具体见表 1。

2.2 试验过程

将养护好的试样取出,粘贴应变片后放置于工字钢架内的进出水孔之间,裂缝平行于工字形钢架腹板,拧紧螺栓固定。试样安装完毕后,确保密封完好。在试验正式开始前将电调压力泵通过水管与预制缝相连,打开排气阀,由电调压力泵往预制缝内的施加水压,当排气孔有水流出现时,封闭排气阀,此时预制缝充水完毕。

将安装好的试样摆放在钢座上,放置于万能试验机上,施加压力,压力通过支座转化为试样内部的弯矩。其中钢座成 π 字形,下钢座支座间距离为 280 mm,上钢座支座间距离为 22 mm。通过电调压力泵施加水压,在水压-弯矩联合作用下劈裂混凝土试件。

3 试验结果分析

A 组试验试件仅受水压作用,高压水作用于试样中部裂缝。测得试样劈裂水压均值为 1.922 MPa,相应的荷载及应变如图 4 所示。由采集的应变结果可以看出,加荷前期,试样变形呈线性规律,越接近裂缝位置试样变形越大。在临近破坏阶段,变形呈指数规律分布,应变值急剧上升。试验过程中观察到,试样破坏在极短时间内完成,应变片随之过载,密封夹具失效,电调压力泵所提供的水压急剧下降。试样破坏时裂缝可能向某一方向或同时向两个方向扩展。

进行 B-1 组试验,首先施加水压至 0.4 MPa,再施加弯矩。从应变采集结果中可以看出,前期 145 s 时间内,水压逐渐上升至 0.4 MPa 的过程中,试样应变与水压值对应增长;越接近裂缝位置试样变形越大。当水压稳定在 0.4 MPa 之后,施加弯矩。在弯矩作用下,试样上粘贴的 4 个应变片对应的应变大小顺序交换,试

表 1 试验方案
Table 1 Testing program

试验荷载 分组	荷载说明
A	施加水压使试样开裂
B-1	施加水压至 0.4 MPa,施加弯矩至试样破坏
B-2	施加水压至 0.8 MPa,施加弯矩至试样破坏
C-1	施加弯矩至 774 N·m,施加水压至试样破坏
C-2	施加弯矩至 1 161 N·m,施加水压至试样破坏
D	施加弯矩使试样开裂

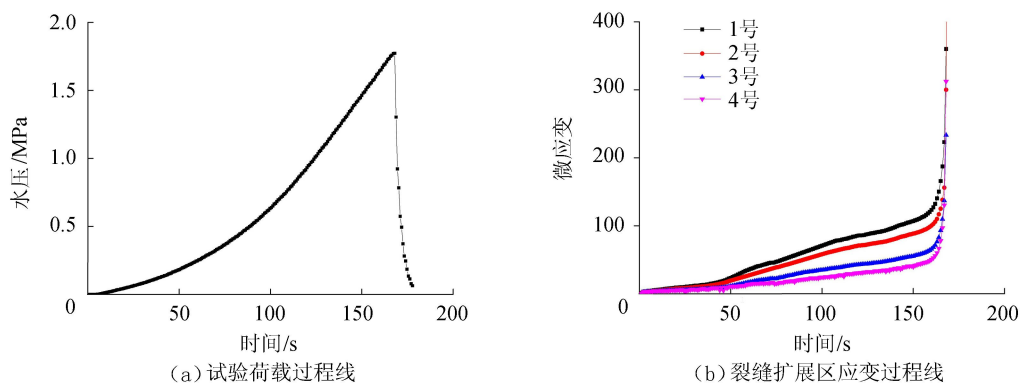


图 4 试验荷载及应变过程线

Fig.4 Variation curves of load and strain

样边缘粘贴的 4 号应变片变形最大,靠近中和轴的 1 号应变片变形最小。1 号应变片在施加弯矩瞬间应变值出现波动,一是因为施荷瞬间硬接触受力较大,二是因为该处应变片接近裂缝,边界约束效果不明显。试验荷载及应变结果如图 5 所示。B-2 组试验过程相同,先施加水压至 0.8 MPa,再施加弯矩至试样破坏。

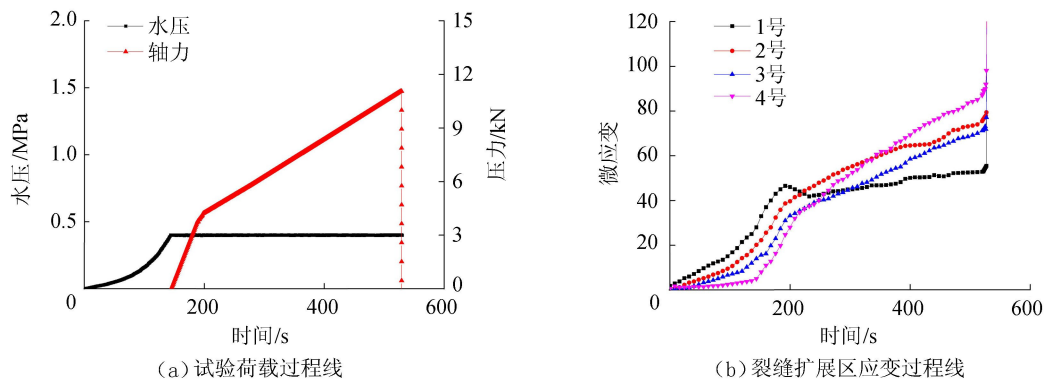


图 5 水压 0.4 MPa 时试验荷载及应变过程线

Fig.5 Variation curves of load and strain under water pressure of 0.4 MPa

水压 0.4 MPa 时试验荷载及应变过程线进行 C-1 组试验,首先施加弯矩,万能试验机压力逐步增加至 6 kN 的过程中,试样应变对应增长。随后施加水压,同样出现了应变数值大小顺序变更的情况,该过程中各应变片变形仍呈指数分布,但增长速率有所不同,接近裂缝区域应变上升速度最快,1~4 号应变片上升速率递减(图 6)。进行 C-2 组试验过程相同,先由万能试验机施加压力至 9 kN,再施加水压至试样破坏。

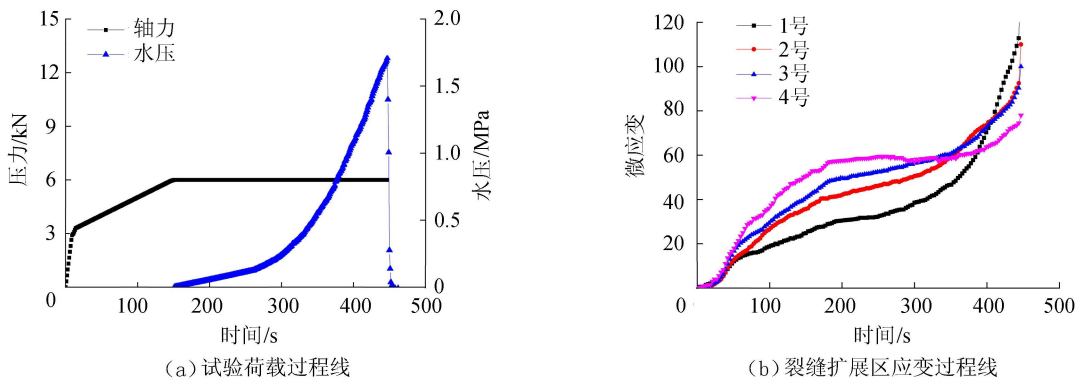


图 6 轴压 6 kN 时试验荷载及应变过程线

Fig.6 Variation curves of load and strain under an axial force of 6 kN

在进行 D 组试验时,仅施加弯矩使试样破坏,测得当压力施加至 13.91 kN 时试样断裂。试样外侧变形明显,3 号、4 号应变片应变值增长较快,而 1 号、2 号应变片虽位于中和轴下方,受混凝土塑性性能影响,应变值变化幅度小,未呈现与到中和轴距离成正比的关系。试验过程中试样在瞬间断裂。

由以上试验结果可知,在水压力作用下,越接近初始裂缝试样应变越大,应变值随水压力的上升而增大;在弯矩作用下,应变值由试样表面向内侧递减,符合受弯变形规律。在混凝土试样破坏前,应变可分为线性阶段与指数阶段。对应混凝土断裂过程的3个阶段:裂缝的起裂、裂缝的稳定扩展和裂缝的失稳扩展。线性段应变值较小,指数段应变值偏大。加荷前期,试样应变一直处于线性段,当应变进入指数段时,试样临近破坏。

混凝土裂尖断裂过程区的出现导致了荷载—位移曲线上升段的非线性,目前多数学者认为荷载—位移曲线线性到非线性的转折点对应的荷载便是起裂荷载^[15]。试验过程中,当试样破坏,水压密封装置失效,水压力便急速下降至零,认为此刻所采集到的荷载数值为失稳荷载。本文试验起裂荷载及失稳荷载结果见表2。

因混凝土构件破坏时沿截面方向应力分布趋于均匀,且本试验所用试样受拉截面的厚度较小,故选取中点处拉应力计算值进行分析。各组试样在组合荷载下破坏瞬间相应的应力关系如图7所示。由起裂荷载与失稳荷载对比可知,二者差值不大,说明较小的荷载增量即会打破稳态,使裂缝失稳扩展。试样劈裂时在裂缝端部应力集中现象明显,一旦该处裂缝扩展,所在截面失去抵抗水压力的能力,试样瞬间开裂。所得的弯曲正应力-水压对应关系可作为设计水位下控制施工工期温度应力的参考依据。

表2 起裂荷载及失稳荷载
Table 2 Initial cracking load and critical collapsing load

试验 荷载分组	起裂荷载		失稳荷载	
	水压/ MPa	万能机 荷载/kN	水压/ MPa	万能机 荷载/kN
A	1.794		1.922	
B-1	0.400	10.81	0.400	11.06
B-2	0.800	8.04	0.800	8.51
C-1	1.624	6.00	1.739	6.00
C-2	0.911	9.00	1.002	9.00
D		12.98		13.91

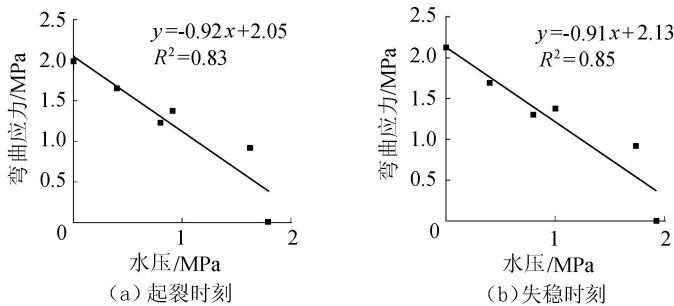


图7 应力对应关系

Fig.7 Relationship between stress and water pressure

由起裂时刻应变值,可拟合受拉截面应变分布曲线如图8所示。由量纲和谐原理,将临界状态下各荷载与同类荷载最大值的比值求和,可绘制成图9。

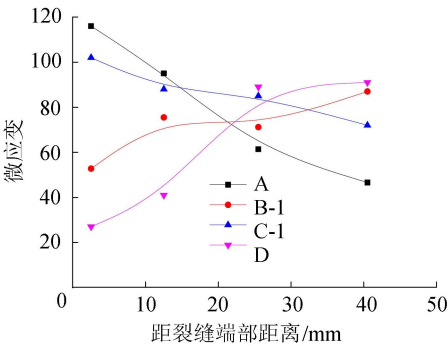


图8 受拉截面应变分布

Fig.8 Strain distribution on the tensile section

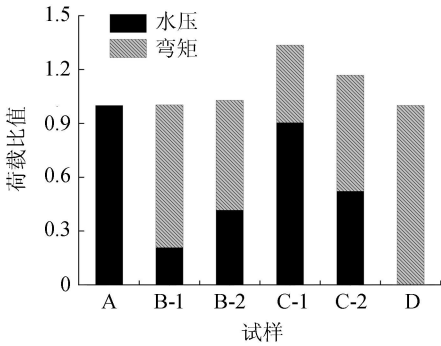


图9 荷载叠加效应

Fig.9 Superposition effect of loads

对照分析混凝土构件断裂时受拉截面应变分布情况及各荷载所起的作用,可以看出两种作用力作用效果相同,存在叠加效应。最大起裂应变值变幅不大,是判断混凝土试样断裂的较好标准;而失稳时应变呈指数上升,未能选取具有代表性的应变值进行分析。对比可知,当某一类荷载占主导作用时,受拉截面的应变分布不均匀,荷载比值求和的结果接近1.0,即荷载最值叠加,局部应力应变值较大,易使混凝土结构发生土水力劈裂;当两种荷载作用相当时,荷载比值求和的结果可达到1.3,说明荷载极值作用位置不同,相应的应变分布曲线较均匀,较大限度地发挥了混凝土试样的抗拉能力,此时不易发生水力劈裂。

4 结 语

针对重力坝坝踵这一薄弱区域,通过在混凝土试样上施加四点弯曲弯矩,在预制裂缝内施加高水压,模拟了重力坝坝踵应力状态,研究了因施工应力产生初始裂缝的坝踵水力劈裂问题。

- a. 水压力作用下,越接近初始裂缝试样变形越大,变形随水压力的上升而增大;在弯矩作用下,变形数值由试样表面向内侧递减,符合试件受弯变形规律。
- b. 裂缝扩展过程中,混凝土试样应变可分为线性阶段与指数阶段两个阶段,当应变进入指数段时,表明试样临近破坏。各组试样起裂应变值变幅不大,起裂应变可较好地判断混凝土试样是否发生断裂。
- c. 高压水作用下裂缝尖端存在明显的应力集中效应,一旦该处裂缝扩展,所在截面便丧失抵抗水压力的能力,试样瞬间开裂。
- d. 各种荷载在引起混凝土开裂时存在叠加效应,应避免荷载最值的叠加作用,对于高混凝土坝而言,有必要于蓄水前弥补裂缝。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1424-1432. (ZHU Bofang. Current situation and prospect of temperature control and cracking prevention technology for concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1424-1432. (in Chinese))
- [2] 王志远. 重力坝的实测坝踵应力及原因分析[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(2): 1-3. (WANG Zhiyuan. Observed stresses in dam heel and analyses of causes[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(2): 1-3. (in Chinese))
- [3] 李雪红. 重大水工混凝土结构裂缝演变规律及转异诊断方法研究[D]. 南京:河海大学, 2003.
- [4] 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))
- [5] BRÜHWILER E, SAOUMA V E. Water fracture interaction in concrete-part I: fracture properties[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(3): 296-303.
- [6] BRÜHWILER E, SAOUMA V E. Water fracture interaction in concrete-part II: hydrostatic pressure in cracks[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(3): 383-390.
- [7] SLOWIK V. Water pressure in propagating concrete cracks[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(2): 235-242.
- [8] BARPI F, VALENTE S. Modeling water penetration at dam-foundation joint[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(3-4): 629-642.
- [9] 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))
- [10] 沈振中, 张鑫, 孙粤琳. 岩体力学水力劈裂的应力-渗流-损伤耦合模型研究[J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 523-528. (SHEN Zhenzhong, ZHANG Xin, SUN Yuelin. Research on stress-seepage-damage coupling model of hydraulic fracturing for rock mass[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(4): 523-528. (in Chinese))
- [11] 贾金生, 李新宇, 郑瑾莹. 特高重力坝考虑高压水劈裂影响的初步研究[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1509-1515. (JIA Jinsheng, LI Xinyu, ZHENG Cuiying. Studies on safety problem of high gravity dams higher than 200m with consideration of hydraulic fracturing under water pressure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1509-1515. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 孔祥清, 王学志, 肖克见, 等. 水压力和轴力联合作用下常态混凝土的断裂试验研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2014, 34(1): 25-28. (KONG Xiangqing, WANG Xuezhi, XIAO Kejian, et al. Experimental investigation into fracture of normal concrete under combined effects of water pressure and axial force[J]. Journal of Liaoning University of Technology, 2014, 34(1): 25-28. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 232-237.