

单裂缝混凝土结构水力劈裂试验

甘磊^{1,2}, 沈心哲¹, 王瑞³, 刘泽涵¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 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 210098;

3. 上海水利勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 针对不同强度单裂缝混凝土试件开展了两组应力状态下的水力劈裂试验, 研究了应力状态、荷载施加方式对试件裂缝扩展过程的影响, 分析了裂缝扩展路径上缝内水压演化规律, 拟合得到了混凝土试件临界劈裂水压预测模型的定量关系式。试验结果表明, 两组不同应力状态下的试件均发生水力劈裂破坏; 临界劈裂水压值与轴压的差值均小于试件的劈拉强度值; 试件水压尖端的发展滞后于干裂缝的发展。

关键词: 混凝土结构; 水力劈裂; 单裂缝; 缝内水压; 临界劈裂水压

中图分类号: TV331

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2017)04-0030-06

Hydraulic fracturing test of concrete structures with single crack//GAN Lei^{1,2}, SHEN Xinzhe¹, WANG Rui³, LIU Zehan¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: Two groups of hydraulic fracturing tests were carried out on concrete specimens of different strengths with a single initial crack under different stresses. The effects of stress state and loading pattern on the crack propagation process of concrete specimens were studied. The evolution law of water pressure within crack along the crack propagation path was analyzed, and the quantitative relation for the critical fracturing pressure prediction model of concrete specimens was obtained. Results show that damages induced by hydraulic fracturing occurred to the two groups of specimens under different stresses. Besides, the differences between the critical fracturing pressure and axial pressure of the two groups of specimens were less than the splitting strength of the specimens, and the development of the sharp cutting edge under water pressure lagged behind that of the dry crack.

Key words: concrete structure; hydraulic fracturing; single crack; water pressure within crack; critical fracturing pressure

迄今为止,世界上已经建成了许多高混凝土坝,其中不少高混凝土坝已达200 m级,甚至300 m级,这些高混凝土坝常年在高压水环境下运行,大坝混凝土初始裂纹易损伤起裂、扩展甚至贯穿,从而破坏坝体的整体性,威胁坝体的安全。不仅高混凝土坝存在水力劈裂问题,抽水蓄能电站、水工隧洞、大型水闸等混凝土结构工程也存在水力劈裂破坏的隐患^[1]。目前,由于受加载设备、水密封、测试仪器等条件的限制,国内外对混凝土开展室内水力劈裂试验的研究较少。Reinhardt等^[2]研究了混凝土裂缝内非承压流体流动在静荷载作用下对含裂缝的混凝土

结构裂缝扩展的影响,结果表明流体的流速和流量及渗透深度非常依赖裂纹的宽度。Brühwiler等^[3-4]对三种不同级配混凝土试件进行了试验,研究混凝土裂缝内水压对混凝土断裂性能和断裂过程区的影响及时间对断裂过程区内水压的影响。Slowik等^[5]对混凝土材料在动态荷载作用下考虑裂缝内水压开展试验研究,定性分析了裂纹张开速度对裂纹内部水压分布的影响。徐世烺等^[6]采用楔入式紧凑拉伸混凝土试件,对静水作用下裂缝扩张长度以及缝内水压力的分布扩展进行了研究,但受水密封装置的限制,其研究水压未超过0.4 MPa。贾金

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开放基金(YK915007);中央高校基本科研业务费专项(2014B11914)

作者简介:甘磊(1987—),男,讲师,博士,主要从事水工结构稳定分析研究。E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn

生等^[7-8]开展了全级配混凝土圆筒试件在单轴拉、压应力作用下的高压水劈裂模拟试验,研究高压水对裂缝扩展的影响,但试验不能测定裂缝扩展过程中的裂缝开度和缝内水压变化规律。甘磊等^[9]进行了无拉压应力、压应变条件下的单裂缝混凝土试件水力劈裂试验,针对 I 型裂缝测定裂缝扩展过程中的缝内水压分布。李宗利等^[10]从流体质量守恒和动量守恒原理出发,假定水力劈裂裂缝形态为半椭圆形,推导了任意时刻缝内水压分布微分方程式。黄云等^[11]针对裂缝内水压呈矩形、三角形等分布形式,对裂缝的开展情况和坝体应力特征进行了研究。游茂源等^[12]研发了一种新型密封装置,进行了不同加载速率下的混凝土水力劈裂试验,得到了缝内水压分布规律,结果表明,裂缝开口宽度相同时动荷载作用下裂缝扩展路径上相同位置的水压较静荷载时要小。

本文从混凝土坝的水力劈裂和地下结构的劈裂涌水等单裂缝的水力劈裂问题出发,针对 4 组不同强度混凝土试件进行无拉压应力及压应力条件下的混凝土单裂缝水力劈裂试验,研究在不同应力状态、不同水压加载路径和不同荷载施加方案下不同强度混凝土试件的破坏形态和临界劈裂水压变化规律,分析加载路径、轴向应力、混凝土强度等因素对混凝土试件水力劈裂裂缝扩展的影响,探讨缝内水压演变规律,并拟合得到临界劈裂水压预测模型。

1 试验概况

1.1 试验装置

试验装置包括水-固-热耦合试验系统、动态应变测试系统、水压量测系统和水压密封装置^[13]。耦合试验系统由主机加载系统、液压泵站、温控系统、液压伺服控制系统、控制柜以及试验数据采集系统等部分组成(图 1),最大轴力可达 2 000 kN,最高渗透水压为 3.0 MPa,最大围压为 40 MPa。



图 1 耦合试验系统

1.2 试件制备

试件材料采用的细骨料为河砂,粗骨料为青碎石,最大粒径为 30 mm,水泥为普通硅酸盐水泥,分

批浇筑 4 组不同配合比的混凝土试件,4 组试件材料配合比见表 1。含预制单裂缝的试件如图 2 所示,预制裂缝为贯穿裂缝,长、宽、厚分别为 150 mm、50 mm 和 2 mm,试样侧面导出的耐高压水管直径为 4 mm,3 个预留孔中心离裂缝尖端的距离分别为 10 mm、25 mm 和 40 mm。试验材料参数按照 SL352—2006《水工混凝土试验规程》进行测定,测得的主要参数见表 1。

表 1 混凝土材料参数

试件组号	水泥、水、砂、石子质量比	抗压强度 f_c /MPa	抗拉强度 f_t /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ
①	1 : 0.71 : 4.12 : 2.75	15.9	1.45	22.6	0.20
②	1 : 0.55 : 1.85 : 3.28	21.2	1.76	26.1	0.20
③	1 : 0.47 : 1.36 : 2.90	26.4	2.03	28.6	0.20
④	1 : 0.41 : 1.08 : 2.52	32.7	2.32	30.8	0.20

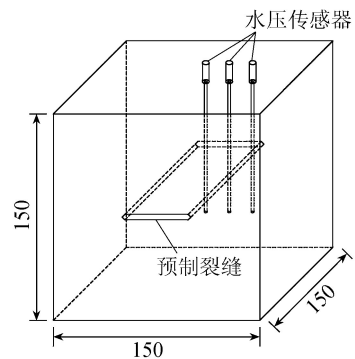


图 2 试件示意图(单位:mm)

1.3 试验设计

在实际工程中, I 型裂缝是最危险的,在复杂应力状态下,裂缝扩展将趋向于 I 型裂缝占优的方向,本次针对混凝土结构 I 型单裂缝试件进行试验,研究不同应力状态、不同水压加载路径方案下不同强度混凝土试件的水力劈裂破坏过程,分析加载路径、轴向应力及混凝土强度等对水力劈裂裂缝扩展的影响。根据试验需要,共设计了 2 组试验方案:

第 I 组:无拉压应力条件下混凝土单裂缝水力劈裂试验(图 3(a))。对于各强度混凝土试件分别取 ① ~ ③ 号试件进行试验,不考虑轴压的作用($\sigma_1 = 0$ MPa),通过电调压力泵以某设定的加载速率

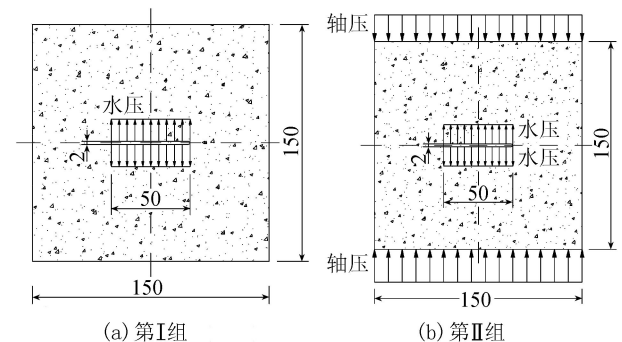


图 3 混凝土试件受力示意图(单位:mm)

从 0 MPa 开始逐步增加水压力,直至混凝土试件被高压水劈裂破坏为止。发生水力劈裂破坏时,其劈裂面有水喷射出来,水压值突然大幅下降,试验结束。记录整个加载过程水压值、测量裂缝内水压值以及应变值。

第 II 组:压应力条件下混凝土单裂缝水力劈裂试验(图 3(b))。按试验加载方式可分为两种,第 1 种(①~③号试件):以某设定的速率增大轴压,当轴压增大到设定值时,稳定轴压,开始逐步增大水压,直至试件被劈裂破坏为止;第 2 种(④号试件):先逐步增大某设定轴压时,稳定轴压,逐步增大水压至某设定水压值后,稳定水压,开始缓慢减小轴压,直至混凝土试件发生劈裂破坏为止。

1.4 试验加载过程

试验需要施加的荷载有水压 p 和轴压 σ 。水压可以通过电调压力泵按所需的加载速率控制,轴压可以通过荷载和位移两种方式进行伺服控制。

1.4.1 第 I 组试验

以第①组强度的混凝土试件为例来说明试验加载过程。对于试验 I-①-1,施加的初始水压为零,按照 0.01 MPa/min 左右的加载速率,不断增大水压,当水压增加到 1.25 MPa 时,水压骤降至零附近,混凝土试件发生劈裂破坏,劈裂面有水射出,并伴有破裂声;对于试验 I-①-2,施加的初始水压为零,按照 0.02 MPa/min 左右的加载速率,不断增大水压,当水压增加到 1.00 MPa 时,恒定水压 3 600 s,然后以 0.01 MPa/min 左右的加载速率缓慢增大水压,当水压增加到 1.40 MPa 时,混凝土试件发生水力劈裂破坏;对于试验 I-①-3,施加的初始水压为零,以 0.03 MPa/min 左右的水压加载速率增大水压,当水压加载至 1.10 MPa 时,恒定水压 3 600 s,再以 0.01 MPa/min 左右的加载速率缓慢增大水压,当水压增加到 1.32 MPa 时试件破坏。I-①组试验水压加载过程线如图 4 所示。

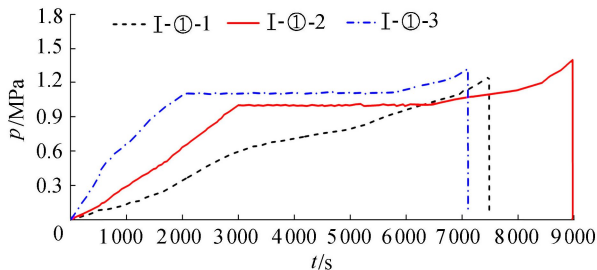


图 4 I-①组试验水压加载过程线

1.4.2 第 II 组试验

以第①组强度的混凝土试件为例来说明试验加载过程。对于试验 II-①-1 至 II-①-3,先缓慢施加轴压,将轴压分别加载至 0.2 MPa、0.5 MPa 和

1.0 MPa 时,稳定轴压一段时间后,逐渐增大水压,直至试件发生水力劈裂破坏;对于试验 II-①-4,先以 0.05 MPa/min 的速率施加轴压,轴压加载至 1.0 MPa 时,稳定轴压一段时间,再以 0.01 MPa/min 左右的加载速率缓慢施加水压,当水压增加至 2.10 MPa 时,稳定水压 3 600 s,再以 0.05 MPa/min 的速率缓慢减小轴压,当轴压减小至 0.81 MPa 时,水压骤降至零附近,试件发生水力劈裂破坏。II-①组试验水压加载过程线如图 5 所示。

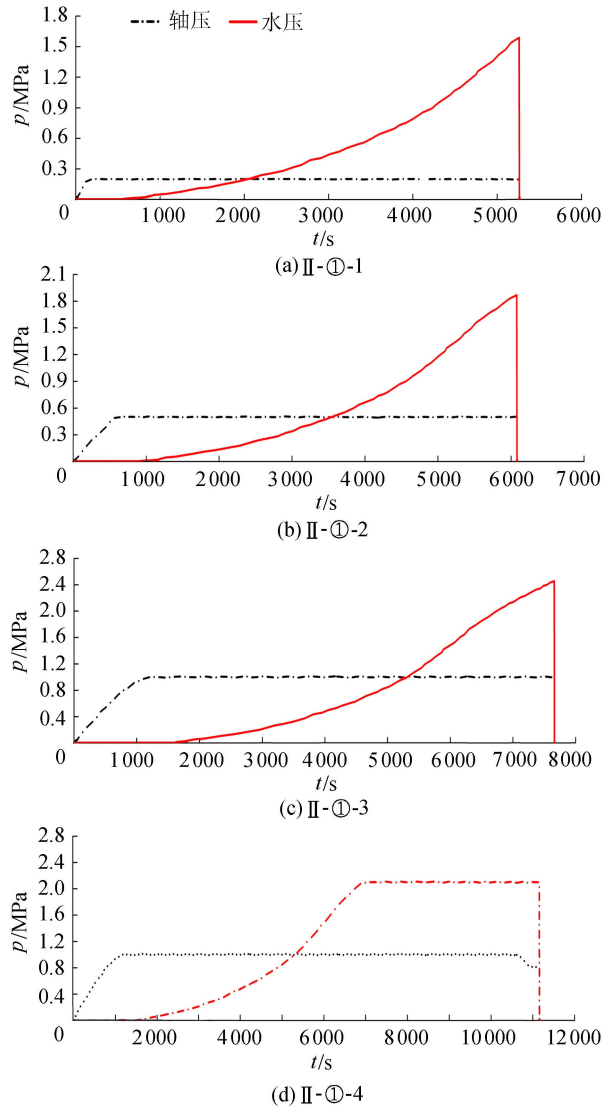


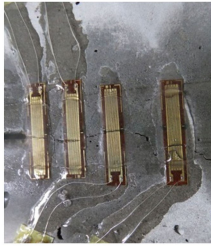
图 5 II-①组试验水压加载过程线

2 试验结果分析

2.1 试件破坏形式

速宝玉等^[14]针对两组不同孔径的空心圆柱水泥砂浆试件进行的水力劈裂试验表明,圆柱水泥砂浆试件破坏形式为水力劈裂破坏形式。本文两组不同应力状态的试验方案,其试件破坏时劈裂面有水喷射出来,并伴有破裂声,其水压骤降至零附近,每组试验完成后,均拆卸水密封装置,将试验后的试

件取出,发现试件裂缝的扩展形式基本一致:自预制裂缝尖端沿初始裂缝方向向外扩展,劈裂面与预制裂缝面基本处于同一平面上。试件裂缝的扩展路径如图6所示。劈裂试件外观如图7所示,故判定本次试验试件均为水力劈裂破坏形式。



(a) 前视图



(b) 侧视图

(c) 后视图

图6 试件裂缝扩展路径

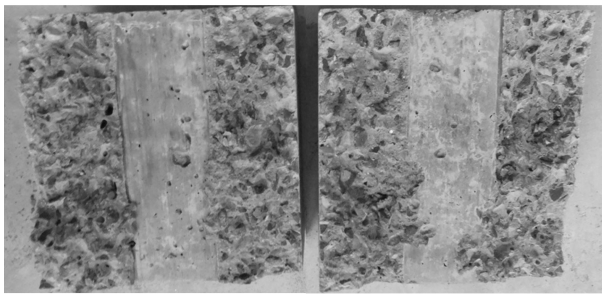


图7 劈裂试件外观

2.2 临界劈裂水压分析

在混凝土试件破坏的瞬间,裂缝扩展至临空面,水压会突然下降至零附近,可将水压骤降时刻作为水力劈裂发生时刻,对应的水压即为水力劈裂的临界劈裂水压。截取试件 I-①-1 的部分水压数据进行分析。在 7482 s 时,水压值为 1.25 MPa,在 7485 s 时,水压突然降至接近 0.043 MPa,接近零。因此,认为该试件在 7482 ~ 7485 s 之间发生了水力劈裂破坏。由于试验数据记录时间间隔为 3 s,故近似认定试件 I-①-1 在 7482 s 时发生水力劈裂破坏,临界劈裂水压值为 1.2 MPa。4 组不同强度混凝土试件水力劈裂试验测定的各工况下试件临界劈裂水压值如表 2 所示。

从表 2 可看出,在无拉压应力条件下的 I 组试验,4 组不同强度混凝土试件的临界劈裂水压均小于其劈拉强度,依次小了 8.9%、11.9%、15.8% 和 18.1%;在压应力条件下,各组混凝土的临界劈裂水

表 2 试件临界劈裂水压

MPa

编号	劈拉强度 f_t	轴压 σ	临界劈裂水压 p_c
I-①-1	1.45	0	1.25
I-①-2	1.45	0	1.40
I-①-3	1.45	0	1.32
I-②-1	1.76	0	1.57
I-②-2	1.76	0	1.46
I-②-3	1.76	0	1.64
I-③-1	2.03	0	1.79
I-③-2	2.03	0	1.67
I-③-3	2.03	0	1.67
I-④-1	2.32	0	1.94
I-④-2	2.32	0	1.77
I-④-3	2.32	0	1.99
II-①-1	1.45	0.20	1.48, 1.61, 1.72, 1.51
II-①-2	1.45	0.50	1.92, 1.81, 1.79, 1.96
II-①-3	1.45	1.00	2.21, 2.45, 2.36, 2.42
II-②-1	1.76	0.20	1.83, 1.94, 1.76, 1.79
II-②-2	1.76	0.50	2.17, 2.18, 2.09, 2.12
II-②-3	1.76	1.00	2.76, 2.68, 2.52, 2.48
II-③-1	2.03	0.20	1.85, 2.02, 1.96, 1.97
II-③-2	2.03	0.50	2.26, 2.38, 2.31, 2.29
II-③-3	2.03	1.00	2.95, 2.81, 2.79, 2.68
II-④-1	2.32	0.20	2.08, 2.21, 2.15, 2.24
II-④-2	2.32	0.50	2.59, 2.49, 2.42, 2.38
II-④-3	2.32	1.00	2.92, 2.98, 3.15, 2.95
II-①-4	1.45	0.84, 0.82, 0.75, 0.83	
II-②-4	1.76	0.65, 0.70, 0.74, 0.67	
II-③-4	2.03	0.62, 0.64, 0.59, 0.63	
II-④-4	2.32	0.50, 0.42, 0.49, 0.43	

压与轴压的差值亦均小于其劈拉强度 4.8% ~ 17.3%。分析表明,试件在缝内水压和轴压作用下,裂缝尖端会出现应力集中现象,使得各组混凝土的临界劈裂水压与轴压的差值小于其劈拉强度。

2.3 影响因素分析

2.3.1 荷载施加方案的影响

对于无拉压应力条件下混凝土水力劈裂试验,设计了 3 种不同的水压加载速率;对于压应力条件下混凝土水力劈裂试验,设计了固定轴压、施加水压和固定水压、施加轴压两种荷载施加方案。试验结果表明,同一组工况下不同水压加载路径试件试验得到的临界劈裂水压值基本一致,最大误差为 6.6%。因此,认为当轴压与裂缝面垂直时,混凝土试件是否发生水力劈裂破坏主要取决于发生破坏时所处的应力状态,而与达到该应力条件的应力路径基本无关。

2.3.2 轴压的影响

对各组混凝土的临界劈裂水压和轴压数据进行拟合,得到 4 组不同强度混凝土试件的临界劈裂水压与轴压的拟合关系式如下:

$$p_c = \begin{cases} 1.350 + 0.980\sigma & R^2 = 0.992, f_t = 1.45 \text{ MPa} \\ 1.598 + 0.996\sigma & R^2 = 0.989, f_t = 1.76 \text{ MPa} \\ 1.722 + 1.061\sigma & R^2 = 0.985, f_t = 2.03 \text{ MPa} \\ 1.921 + 1.082\sigma & R^2 = 0.997, f_t = 2.32 \text{ MPa} \end{cases} \quad (1)$$

拟合得出关系曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出,当混凝土试件劈拉强度一定时,临界劈裂水压值与轴压基本呈线性关系,轴压越大,试件发生水力劈裂破坏时所需的水压值越大,即临界劈裂水压值越大。

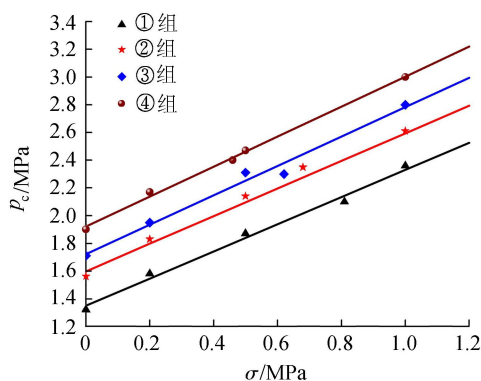


图 8 临界劈裂水压-轴压拟合曲线

2.3.3 混凝土强度的影响

在轴压恒定的情况下,拟合各组混凝土的临界劈裂水压-劈拉强度数据,得到 4 种不同轴压情况下的临界劈裂水压和劈拉强度的拟合关系式如下:

$$p_c = \begin{cases} 0.380 + 0.657f_t & R^2 = 0.996, \sigma = 0 \text{ MPa} \\ 0.639 + 0.658f_t & R^2 = 0.990, \sigma = 0.2 \text{ MPa} \\ 0.902 + 0.686f_t & R^2 = 0.988, \sigma = 0.5 \text{ MPa} \\ 1.307 + 0.733f_t & R^2 = 0.998, \sigma = 1.0 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2)$$

图 9 为轴压一定情况下的临界劈裂水压与劈拉强度拟合曲线。由图 9 可知,在轴压一定的情况下,混凝土试件的劈拉强度越高,其临界劈裂水压值越大,两者基本呈线性关系。

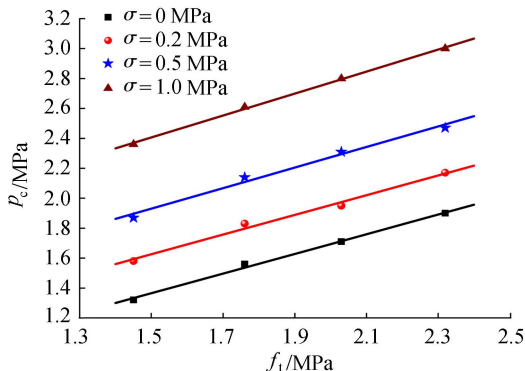


图 9 临界劈裂水压-混凝土劈拉强度拟合曲线

2.3.4 临界劈裂水压预测模型

基于上述分析,假定临界劈裂水压 p_c 与混凝土劈拉强度 f_t 、轴压 σ 之间关系的线性回归模型为

$$p_c = af_t + b\sigma + c \quad (3)$$

由于当 $f_t = \sigma = 0$ 时, $p_c = 0$, 故可得出 $c = 0$, 即临界劈裂水压预测模型为

$$p_c = af_t + b\sigma \quad (4)$$

根据最小二乘法原理,计算得到临界劈裂水压预测模型(图 10)为

$$p_c = 0.856f_t + 1.088\sigma \quad (5)$$

当 $\sigma = 0$ MPa 时,即表示无拉压应力条件下试件临界劈裂水压预测模型为 $p_c = 0.856f_t$ 。

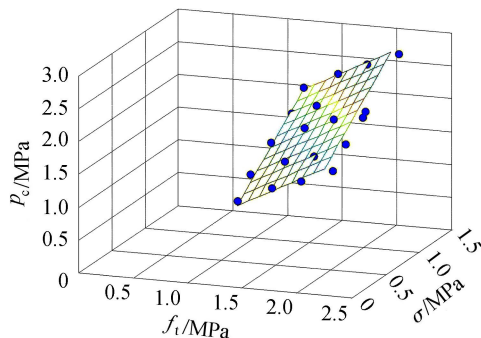


图 10 混凝土临界劈裂水压预测模型

2.4 缝内水压分布分析

以试验 I-①-1 为例,与裂缝尖端距离分别为 0 mm、10 mm、25 mm 和 40 mm 处的水压传感器测值随时间的变化规律如图 11 所示。由图 11 可知:随着施加在裂缝面水压的增大,裂缝开始张开,压力水进入扩展裂缝中,当裂缝扩展到预埋孔位置时,压力传感器开始有测值变化,图中标记的数字是水压传感器与预设缝尖端的垂直距离,用于分析裂缝的扩展情况。

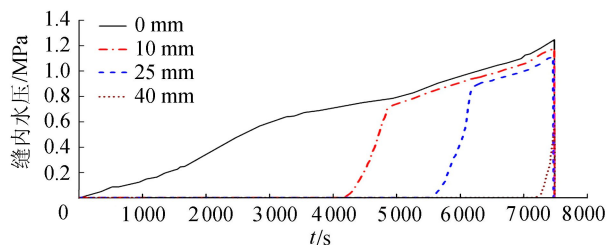


图 11 试验 I-①-1 水压传感器测值曲线

由图 11 可以看出,在水压较小的情况下,裂缝不张开,水压传感器的测值均为零。当水压不断升高,在试验进行到 $t = 4170$ s 时,离裂缝尖端 10 mm 的第一个传感器开始有测值。随着水压的进一步升高,裂缝张开宽度逐渐增大,压力水进入扩展的裂缝中,当裂缝宽度增大至某一临界值时,裂缝内的水压基本达到全水头;随着裂缝的进一步发展,在 $t = 5514$ s 时,离裂缝尖端 25 mm 的第 2 个传感器有测

值变化,裂缝扩展到此,随着裂缝的进一步扩展,此位置的裂缝宽度逐渐增至裂缝临界宽度,裂缝内水压为全水头分布;在 $t=7176$ s时,离裂缝尖端40 mm位置处的第3个传感器开始有测值变化,并不断增大,直至 $t=7472$ s时混凝土试件发生破坏,水流从劈裂面喷射出来,水压突然降至零附近,水压传感器的测值也随后骤降至零。

通过不同裂缝扩展位置处的水压测值数据分析,可以得到裂缝扩展过程中缝内水压的演变规律:水压尖端的发展明显滞后于干裂缝的扩展,这是由于在干裂缝形成初期,裂缝张开较小,压力水尚未能进入裂缝,待裂缝张开到一定值时,压力水进入裂缝,随着裂缝的不断扩展,当裂缝宽度超过其裂缝临界宽度,水压增加至全水头。试验测定的缝内水压演变规律与速宝玉等^[14]的试验结果及方修君等^[15]的数值模拟结果吻合。

3 结 论

a. 试件因水力劈裂发生结构破坏时,缝内水压突然降至零附近,劈裂面有水喷射出来,并伴随有破裂声,试件裂缝的扩展形式基本一致,自裂缝尖端沿初始裂缝方向向外扩展,劈裂面与预制裂缝面基本处于同一平面上。

b. 在缝内水压和轴压作用下,试件裂缝尖端会产生应力集中,使得各组混凝土的临界劈裂水压与轴压的差值小于其劈拉强度。

c. 当轴压与裂缝面垂直时,混凝土试件是否发生水力劈裂破坏主要与发生劈裂时裂缝所处的应力状态有关;在试件劈拉强度一定情况下,临界劈裂水压值与轴压呈线性关系;在轴压一定情况下,试件劈拉强度越高,临界劈裂水压值越大,两者呈线性关系;通过多元线性回归分析可得临界劈裂水压预测模型为 $p_c=0.856f_t+1.088\sigma$ 。

d. 水压尖端的发展滞后于干裂缝的扩展,干裂缝形成初期裂缝张开较小,压力水尚未能进入裂缝,待裂缝张开到一定值时,压力水进入裂缝,随着裂缝的不断扩展,当裂缝宽度超过其裂缝临界宽度,水压增加至全水头。

参考文献:

[1] 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))

[2] REINHARDT H W, COMELISSEN H A W, HORDIJK D A. Tensile tests and failure analysis of concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112 (11): 2462-2477.

[3] BRÜHWILER E, SAOUMA V E. Water fracture interaction in concrete: part I: fracture properties [J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(3): 296-303.

[4] 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.

[5] SLOWIK V, SAOUMA V E. Water pressure in propagating concrete cracks [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(2): 235-242.

[6] 徐世焯,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] 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))

[8] 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))

[9] 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))

[10] 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, RENG Qinwen, 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))

(下转第86页)

- 工程学报, 2016, 38 (10): 1869-1873. (CHEN Shengshui. Problems and countermeasures of safety evaluation of tailing pond [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (10): 1869-1873. (in Chinese))
- [59] 李全明, 李玲, 王云海, 等. 尾矿库溃坝淹没范围的定量计算方法研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21 (11): 92-96. (LI Quanming, LI Ling, WANG Yunhai, et al. Research on quantitative calculating method for tailing ponds submerged area in metal and nonmetal mines [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21 (11): 92-96. (in Chinese))
- [60] 胡凯衡, 崔鹏, 田密, 等. 泥石流动力学模型和数值模拟研究综述 [J]. 水利学报, 2012, 43 (增刊 2): 79-84. (HU Kaiheng, CUI Peng, TIAN Mi, et al. A review of the debris flow dynamic models and numerical simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (Sup2): 79-84. (in Chinese))
- [61] RICKENMANN D, LAIGLE D, MCARDELL B, et al. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events [J]. Computational Geosciences, 2006, 10 (2): 241-264
- [62] 王纯祥, 白世伟, 江崎哲郎, 等. 泥石流的二维数学模型 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (6): 1237-1241. (WANG Chunxiang, BAI Shiwei, ESAKI Tetsuro, et al. Two-dimensional mathematical model of debris flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (6): 1237-1241. (in Chinese))
- [63] 刘洋, 齐清兰, 张力霆. 尾矿库溃坝泥石流的演进过程及防护措施研究 [J]. 金属矿山, 2015 (12): 139-143. (LIU Yang, QI Qinglan, ZHANG Liting. Study on evolution of debris flow from dam break and protection measures [J]. Metal Mine, 2015 (12): 139-143. (in Chinese))
- [64] 皇甫凯龙, 廖文景, 孙志辉, 等. 尾矿坝溃决砂流数值模拟研究及应用 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25 (8): 171-176. (HUANGFU Kailong, LIAO Wenjing, SUN Zihui, et al. Numerical simulation of sandy flow due to mine tailings dam failure and its application [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25 (8): 171-176. (in Chinese))
- [65] 梅国栋. 尾矿库溃坝机理及在线监测预警方法研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [66] 赵一姝, 敬小非, 周筱, 等. 筋带对尾矿坝漫坝破坏过程阻滞作用试验研究 [J]. 中国安全科学学报, 2016, 26 (1): 94-99. (ZHAO Yishu, JING Xiaofei, ZHOU Xiao, et al. Experimental study on blocking action of bar strip on tailings dam overtopping [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26 (1): 94-99. (in Chinese))
- [67] 尹光志, 魏作安, 万玲, 等. 细粒尾矿堆坝加筋加固模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (6): 1030-1034. (YIN Guangzhi, WEI Zuohan, WAN Ling, et al. Test study on stability of fine grained tailings dam in geo-grid reinforcement situation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (6): 1030-1034. (in Chinese))
- [68] 李巧燕, 王惠栋, 马国伟, 等. 尾矿坝筑坝模袋力学性能试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (4): 957-964. (LI Qiaoyan, WANG Huidong, MA Guowei, et al. An experimental study of the mechanical performance of tailings dam geofabriform [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (4): 957-964. (in Chinese))
- [69] 张东明, 郑彬彬, 尹光志, 等. 高浓缩分级尾矿上游法堆坝及模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (7): 1832-1838. (ZHANG Dongming, ZHENG Binbin, YIN Guangzhi, et al. Model tests on upstream dam-building method using concentrated and classified tailings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (7): 1832-1838. (in Chinese))
- [70] 刘洋, 齐清兰, 张力霆. 尾矿库溃坝泥石流的演进过程及防护措施研究 [J]. 金属矿山, 2015 (12): 139-143. (LIU Yang, QI Qinglan, ZHANG Liting. Study on evolution of debris flow from dam break and protection measures [J]. Metal Mine, 2015 (12): 139-143. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-09-11 编辑: 熊水斌)

+++++
(上接第 35 页)

- [11] 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. (WANG Yun, JING Feng, WANG Guanglun, et al. Stability and propagation of cracks at the heel of high arch dams [J]. Journal of Tsinghua University (Sciences and Technology), 2002, 42 (4): 555-559. (in Chinese))
- [12] 游茂源, 杜成斌, 陈玉泉, 等. 动载作用下的混凝土水力劈裂试验研究 [J]. 中州煤炭, 2016, 38 (5): 54-57. (YOU Maoyuan, DU Chengbin, CHEN Yuqian, et al. Experimental study on hydraulic fracturing of concrete under dynamic loading [J]. Zhongzhou Coal, 2016, 38 (5): 54-57. (in Chinese))
- [13] 甘磊. 水工混凝土结构水力劈裂试验及数值模拟 [D]. 南京: 河海大学, 2013.
- [14] 速宝玉, 谢兴华, 王国庆. 水泥砂浆水力劈裂试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (增刊 1): 2952-2957. (SU Baoyu, XIE Xinghua, WANG Guoqing. Hydraulic fracture test on cement and sand mortar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Sup1): 2952-2957. (in Chinese))
- [15] 方修君, 金峰. 裂隙水流与混凝土开裂相互作用的耦合模型 [J]. 水利学报, 2007, 38 (12): 1466-1474. (FANG Xiujun, JING Fen. Coupling model for interaction between fissure water and cracking in concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (12): 1466-1474. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-08-19 编辑: 郑孝宇)