

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.04.026

混凝土结构水力劈裂试验装置研究及应用

甘磊^{1,2}, 沈振中¹, 张腾³, 钟水生², 熊素繁²

(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. 宜春市水利局, 江西 宜春 336000; 3. 水利部综合事业局, 北京 100053)

摘要: 自主研发的混凝土结构水力劈裂试验系统, 由加载系统、水密封装置和试验数据采集模块等部分组成, 它较好地解决了试验过程中高压水密封、试验数据实时采集等关键问题。采用该试验系统进行不同应力状态下混凝土结构水力劈裂试验, 试验结果表明: 试验试件破坏形式及劈裂破坏过程基本一致, 不同试验工况其临界劈裂水压及轴压的差值均小于材料抗拉强度, 并拟合得出了临界劈裂水压与轴压之间的定量关系。

关键词: 混凝土结构; 水力劈裂; 水密封装置; 试验系统; 劈裂水压

中图分类号: TU37

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)04-0130-07

Research and Application of A Hydraulic Fracturing Test Device for Concrete Structures

GAN Lei^{1,2}, SHEN Zhenzhong¹, ZHANG Teng³, ZHONG Shuisheng², XIONG Sufan²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Yichun Water Conservancy Bureau, Yichun, Jiangxi 336000, China;

3. Bureau of Comprehensive Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: A test system of hydraulic fracturing for concrete structures which is composed of loading system, water sealing device and test data acquisition module was developed independently. The test system solves some key issues of hydraulic fracturing tests, such as the high pressure water sealing and real-time test data acquisition in the process of the whole test. Here, this system was used to carry out some hydraulic fracturing tests on a concrete structure under different stress states. The experimental results suggest that the failure mode and the fracturing process of the test specimens are essentially the same. The difference between critical fracturing water pressure and axial pressure are all less than the tensile strength of the test material under each test condition, based on which the quantitative relation between critical fracturing water pressure and axial pressure is fitted out.

Keywords: concrete structure; hydraulic fracturing; water sealing device; test system; fracturing water pressure

受加载设备、水密封、测试仪器等条件的限制, 国内外对混凝土结构开展水力劈裂试验的研究较少^[1-11]。Brühwiler 和 Saouma^[3-4]对三种不同级配混凝土试件进行了水力劈裂试验, 研究混凝土缝内水压对混凝土断裂性能和断裂过程区的影响, 随后又研究了时间对渗透到断裂过程区水压力的影响, 试验表明, 缝内水压力会导致裂缝尖端损伤, 使得裂缝尖端部位的断裂韧度减小。而 Papanastasiou^[5]、朱

珍德等^[6]持有不同的结论, 认为裂缝尖端的塑性发展、产生钝化, 会导致裂缝尖端部位的断裂韧度增大。Slowik^[7]等针对混凝土材料, 在动态荷载条件下考虑裂纹内水压作用进行了试验研究, 重点研究裂缝内水压力、裂纹张开速度与时间的关系, 研究表明裂纹张开速度对裂纹内部水压分布有一定的影响, 但只进行了定性分析。我国有关混凝土材料裂纹水力劈裂机理的实验较少。徐世烺和王建敏^[8,12]采

收稿日期: 2015-03-15

修稿日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179062); 中央高校基金项目(2014B11914)

作者简介: 甘磊(1987—), 男, 江西抚州人, 博士, 讲师, 主要从事坝工设计计算理论与试验技术方面的教学与科研工作。

E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn

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,受水密封装置的限制,其研究水压未超过 0.4 MPa。贾金生等^[9-10]针对全级配混凝土试件开展其在单轴拉、压应力作用下的高压水劈裂模拟试验研究,但是试验只能测定其施加的水压力。本文从混凝土坝水力劈裂和地下结构劈裂涌水等问题出发,克服传统劈裂试验装置存在的缺陷,研制了一种可以测得高压水作用下水力劈裂完整特性的混凝土结构水力劈裂试验系统,并据此试验系统开展无拉压应力及压应力条件下的混凝土结构水力劈裂试验研究。

1 试验装置

1.1 试验系统

研制的耦合试验系统结构如图 1 所示,该试验系统由主机加载系统、液电站、温控系统、伺服控制系统、数据采集系统以及控制计算机等部分组成。该试验系统较好地解决了传统劈裂试验存在的一些不足(混凝土楔形劈裂试件的试验装置无法密封大于 200 m 水头的高水压,圆柱形试件无法测量试验过程中的裂缝开度及水压等数据)。该试验系统主要技术指标:最大轴向力 2 000 kN,渗透压力最大水头达 300 m,温控系统可模拟 -20℃~90℃,围压 0~40 MPa。

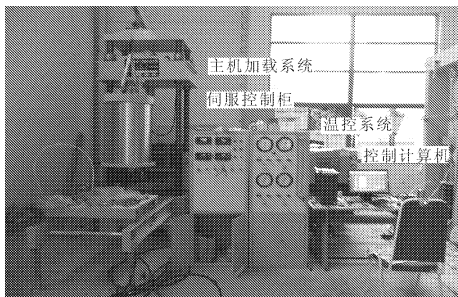


图 1 耦合试验系统示意图

1.2 试件模具

试件材料采用同一配比混凝土,细骨料为河砂,粗骨料为青碎石,最大粒径为 30 mm,水泥采用 325# 普通硅酸盐水泥,水泥:水:砂:石子 = 1:0.44:1.42:3.17。试验试模在立方体工程塑料试模基础上进行了加工,前后部切割有方孔,浇筑试样时插入薄钢片预制裂缝,试样侧面钻有 3 个圆孔,通过耐高压水管导出(水管里插入钢棒,钢棒用来制作预留孔以及定位,钢棒在试样浇筑 24 h 后拔出),连接 HM20 水压传感器。试验试件采用 150 mm 立方体混凝土试样,试件示意图如图 2 所示。

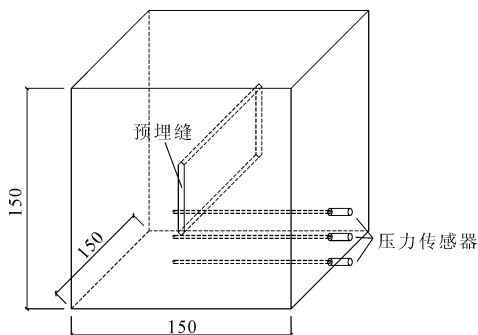


图 2 试件示意图(单位:mm)

1.3 水压密封装置

水压由电调压力泵提供,试验采用的水密封装置共两层,从内到外分别为橡胶垫密封层和厚钢架密封层。

1.3.1 橡胶垫密封层

橡胶垫密封层采用厚度 5 mm,宽度 15 mm,长度 110 mm 的普通橡胶垫,裂缝宽度为 2 mm,长度 50 mm,橡胶垫大小可完全覆盖预制缝,两块工字型钢架的内侧均开有深 3 mm,宽度 15 mm,长度 110 mm 的凹槽,橡胶垫安置于凹槽后,高出于钢架内侧 2 mm,橡胶垫中心预制直径 1 mm 的小孔,在前后两侧分别作为加水压和排气用。橡胶垫示意图见图 3。

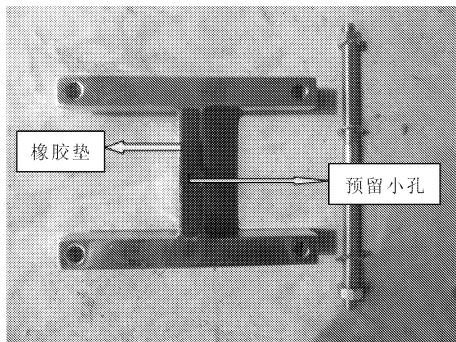


图 3 橡胶密封层示意图

1.3.2 钢架密封层

钢架采用 20 mm 厚的钢板切割打磨而成,前后钢架采用螺纹轴连接,钢架上安装螺母以使两边钢架间有一定压力,从而使橡胶垫紧贴在缝面上,由于橡胶垫有一定厚度,高于钢架内侧预制的凹槽,故试样和钢架只通过橡胶垫接触,使得橡胶垫与试样间产生的摩擦力尽可能小,减小其对实验结果的影响。工字型钢架中心预制有孔,与橡胶垫上的小孔相通,前后两侧分别安装接头和密封帽,作为进水口和排气口用,钢架密封层根据不同试验方案研制了两套,示意图见图 4。



图 4 两套钢架密封装置示意图

试样安装完毕后,首先要确保钢架和橡胶垫组合的水密封装置密封情况,密封完好后,由电调压力泵往预制缝内的施加水压。在实验开始前将电调压力泵通过注水管与预制缝相连,密封架安装完毕后打开排气阀,这样保证水压能够逐渐充满预制缝。在充水的过程中时刻监测压力表上的数值,防止局部堵塞造成压力的上升。当排气孔有水流出时,封闭排气阀,此时预制缝充水完毕。水压传感器的安装为实验开始前的最后一步。为了及时测量压力水进入裂缝的准确时间,避免延时和水压差,需在开始实验前将每一个连接孔洞注满水。在连接孔洞注满水后,将试件侧翻,使得试件预制孔口朝上,用长针头精密注射器通过导管注满预制孔,再往转换接口里注水,当水从转换接口溢出时,快速把导管插入转换接口,从而与水压传感器联通,一个水压传感器安装完毕。待所有水压传感器安装完毕后,可进行试验,如图 5 所示。

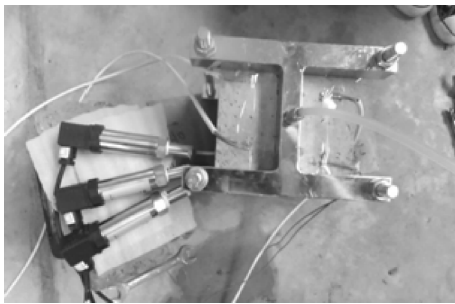


图 5 水压传感器安装实物图

1.4 测量数据采集

数据采集模块包括缝内水压的量测及采集模块,应变采集模块,耦合试验机自带数据采集模块(自动采集电调水压、轴压、围压及位移等数据)。

裂缝内水压的测量采用 HM20 水压传感器。试件的侧面预埋 M4 mm 的导管,导管端连接转换器,通过转换器与水压传感器的接头相连接,共设置三

个水压传感器,测定裂缝扩展过程中不同位置的缝内水压。试验水压数据采集软件界面示意图如图 6 所示。在试验前需要对每组水压传感器进行标定。

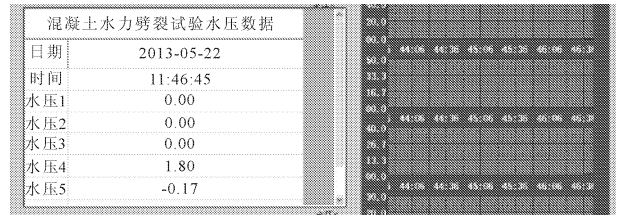


图 6 水压数据采集界面

根据试验需要在试样表面粘贴应变片,应变片通过导线与北京东方所研制的动态应变测试系统连接,信号采集分析仪型号为 INV3060A,应变调理器型号为 INV1861A。采样频率设置为 5 Hz,电压设置为 2 V,标定值定为 -0.1。每次安装好试样,准备试验前需要进行调试,使得示波中的应变值变化较平顺后,方可开始施加荷载进行试验。

试验过程中的水压、轴压、围压可以根据试验需要加载,水压可以通过电调压力泵按所需的加载速率控制,轴压和围压可以通过荷载和位移两种方式进行伺服控制,其荷载和变形数据均可实现自动采集和处理,耦合试验机数据采集分析软件界面示意图如图 7 所示。

2 混凝土结构水力劈裂试验

2.1 试验工况设计

根据试验需要,设计了两组工况。第一组(A组)为无拉压应力条件下混凝土结构水力劈裂试验;第二组(B组)为压应力条件下的混凝土结构水力劈裂试验。

2.1.1 A组水力劈裂试验

试样组装好开始试验前的实物图见图 8。按试验采用试样龄期分为 7 d 的 A-1 组和 28 d 的 A-2 组工况,A 组试验过程:对试件进行水力劈裂试验,施加的初始水压为 0 MPa,以某设定水压加载速率增大水压,直至混凝土试件被劈裂为止。A 组试验水压加载过程如图 9 所示。

2.1.2 B组水力劈裂试验

根据水压和轴压施加的方案不同,分为 B-1 组工况和 B-2 组工况。B-1 组工况:开始缓慢施加轴压,轴压加载至试验设定值 $\sigma_1^{(1)}$ 后,稳定轴压,开始施加水压,逐渐升高水压,当水压加载到试验设定

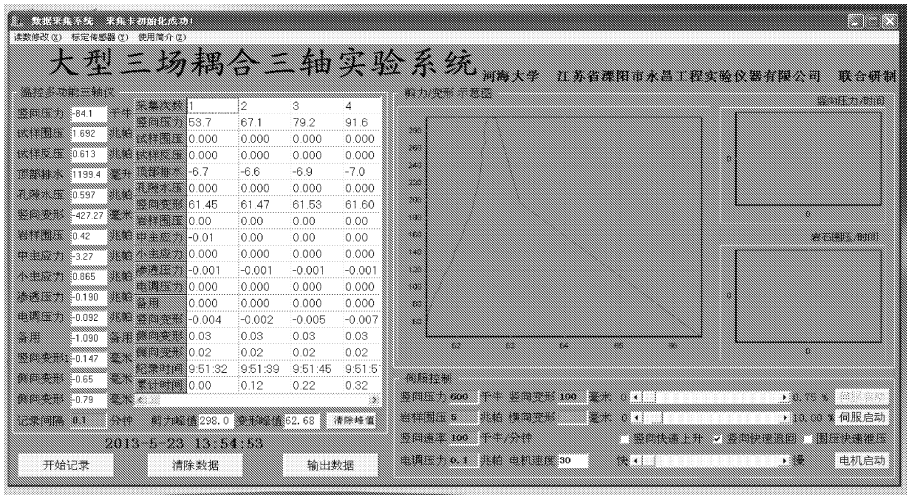


图 7 耦合试验机数据采集软件界面图

值 P 时,恒定水压,调整轴向加载系统,使轴向荷载以一定速率减小至 $\sigma_1^{(2)}$ 后,减缓减载速率,让轴压缓慢减小,直至试件发生水力劈裂破坏为止。B-1 组试验工况如表 1 所示,其荷载加载路径如图 10 所示。B-2 组工况:先施加水压,水压升至试验设定值 P' 时,恒定水压,开始施加轴压,加载至试验设定值后,恒定轴压,开始按设定加载梯度增大水压,直至混凝土试件破坏为止。B-2 组试验 B-2-1 ~ B-2-3 三个工况的轴压分别恒定在 0.2 MPa、0.5 MPa 和 1.0 MPa,其试验过程中水压和轴压加载路径如图 11 所示。

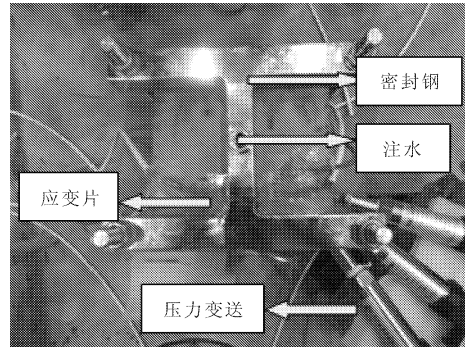


图 8 试样安装实物图

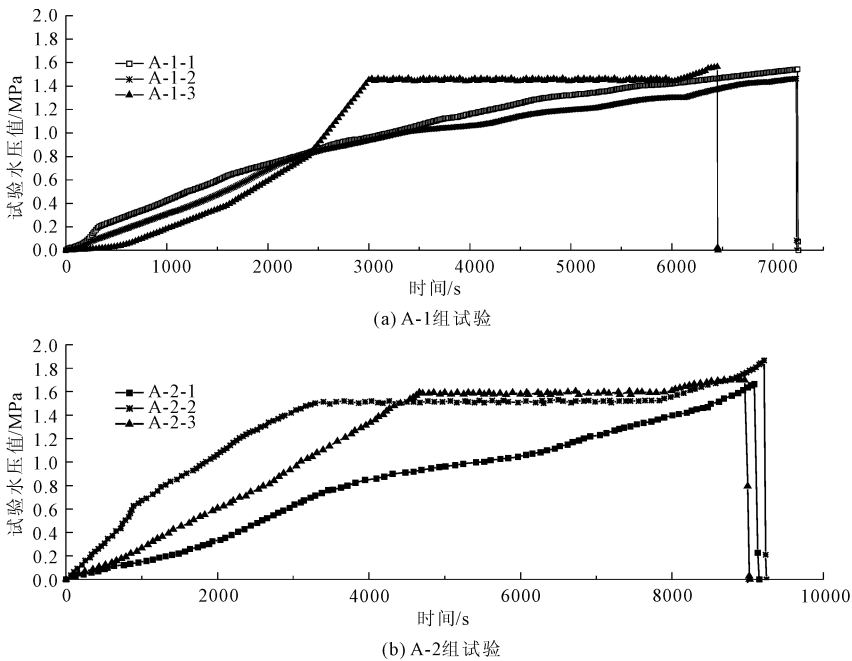
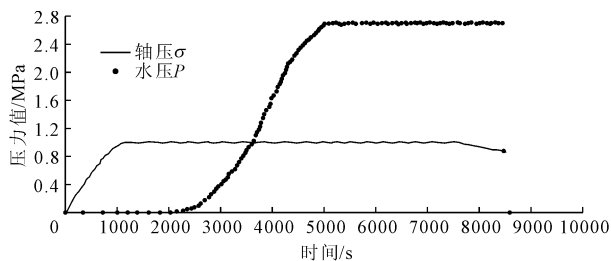


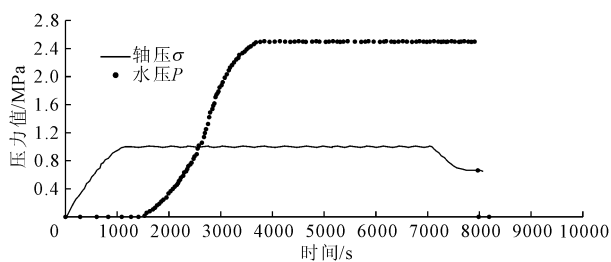
图 9 A 组试验水压加载曲线

表 1 B-1 组试验工况表

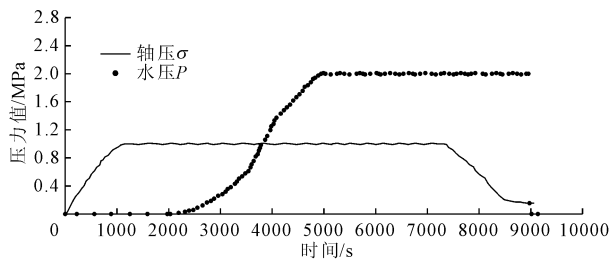
工况编号	$\sigma_1^{(1)}/\text{MPa}$	P/MPa	$\sigma_1^{(2)}/\text{MPa}$	$\sigma_1^{(3)}/\text{MPa}$
B-1-1	1.0	2.7	1.0	0.878
B-1-2	1.0	2.5	0.7	0.662
B-1-3	1.0	2.0	0.2	0.154



(a) 工况B-1-1



(b) 工况B-1-2



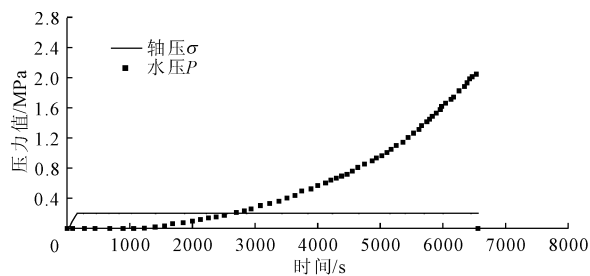
(c) 工况B-1-3

图 10 B-1 组试验水压及轴压加载曲线

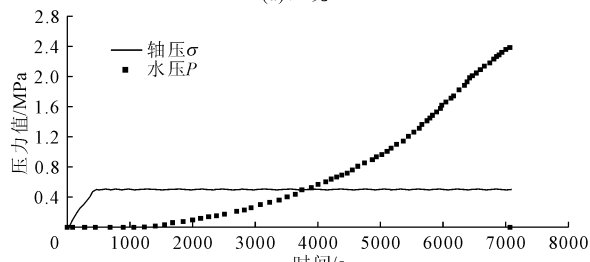
2.2 试件发生水力劈裂破坏判定

针对无拉压应力条件下高压水劈裂试验(A组工况),其混凝土试件发生水力劈裂破坏的判定:安装好试件,开始给裂缝面施加水压,水压不断增大,当水压上升到试件发生贯穿劈裂破坏的临界值时,水压会突然下降到接近于零压或负压值,劈裂面有水喷射出来,并伴随有破裂声。上述试验现象说明,混凝土试件已经产生了水力劈裂裂缝,并且裂缝贯穿了劈裂面,产生了连通的裂缝通道。

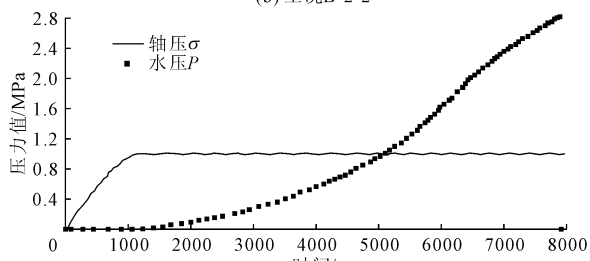
截取该组工况的一个试样 A-1-1 的部分试验数据进行分析,如表 2 所示,水压由 7 245 s 时的 1.544 MPa 骤降至 7 248 s 的 0.075 MPa,由此推断,这个试件在 7 245 s ~ 7 248 s 时间段发生了水力劈裂,由于缺乏该 3 s 时间段的水压测值,故大致认定水力劈裂破坏发生在 7 245 s, A-1-1 试件发生水力劈裂破坏时的临界水压值为 1.544 MPa。



(a) 工况B-2-1



(b) 工况B-2-2



(c) 工况B-2-3

图 11 B-2 组试验水压和轴压加载曲线

表 2 A-1-1 试件劈裂段数据记录表

试验时间/s	水压值/MPa	试验时间/s	水压值/MPa
7224	1.542	7239	1.544
7227	1.542	7242	1.544
7230	1.542	7245	1.544
7233	1.543	7248	0.075
7236	1.543	7251	0.000

针对压应变条件下的混凝土结构单裂缝水力劈裂试验(B组工况),其混凝土试件发生水力劈裂破坏的判定:试件装入水密封装置后,将试件固定于试验台上,调整加载平台,待试件与加载板接触后,开始缓慢施加轴压,轴压加载至试验设定值后,稳定轴压,开始施加水压,不断增大水压,当水压加载到试验设定值时,恒定水压,开始以一定速率减小轴向荷载,直至水压突然下降至零压附近,劈裂面有水喷射出来,伴随有破裂声,此时认定该试件已经发生水力劈裂破坏。选取该组试验 B-1-1 试件发生水力劈裂时的试验数据进行分析,其荷载加载施加过程如图 10(a)所示,水压稳定在 2.7 MPa 左右,轴压从 1.0 MPa 开始缓慢减小,当轴压减小至 0.878 MPa,即在 8 400 s 时刻,水压突然骤降,故认定此时刻 B-1-1

试件发生了水力劈裂破坏,劈裂水压临界值为 2.7 MPa,轴压为 0.878 MPa。

2.3 试验结果分析

孙亚平^[13]等利用了空心圆柱土体试样开展土体在渗流场中的水力劈裂试验研究,试验试样的破坏,依据大小主应力比值不同分为塑性流动破坏和水力劈裂破坏两种形式。速宝玉等^[11]利用两组不同孔径大小的空心圆柱水泥砂浆试件,进行了水力劈裂试验研究,试验结果表明,试件破坏形式为水力劈裂破坏形式。

本次试验分为无拉压应力和单轴受压两种应力

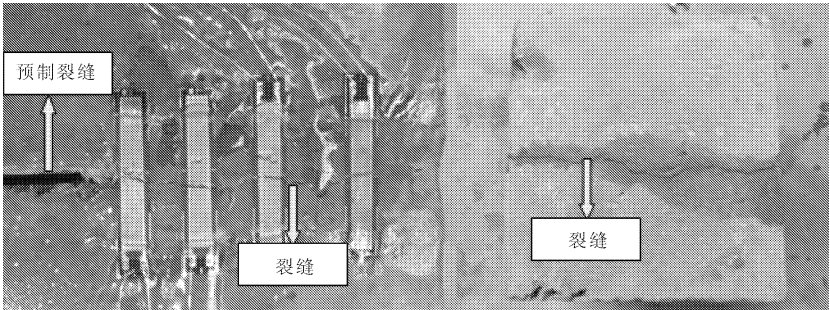


图 12 试件劈裂形态

试验设计了不同水压加载路径,同一组工况下不同水压加载路径试件试验得到的劈裂临界水压值基本一致,认为混凝土试件是否发生水力劈裂破坏主要与发生劈裂当时所处的应力状态有关,而与达到该应力条件的应力路径基本无关。

无拉压应力及压应力条件下混凝土试件高压水劈裂试验结果见表 3。

表 3 不同试验工况劈裂水压强度值比较 单位:MPa

编号	f_c	f_t	σ_1	P_c
A-1(7 d)	20.3	1.71	0.000	1.523*
A-2(28 d)	26.1	2.01	0.000	1.746*
B-1-1(28 d)	26.1	2.01	0.878	2.700
B-1-2(28 d)	26.1	2.01	0.662	2.500
B-1-3(28 d)	26.1	2.01	0.154	2.000
B-2-1(28 d)	26.1	2.01	0.200	2.045
B-2-2(28 d)	26.1	2.01	0.500	2.382
B-2-3(28 d)	26.1	2.01	1.000	2.812

注: σ_1 为试件所受轴压; P_c 为劈裂水压的试验值; f_c 为试件抗压强度值; f_t 为试件抗拉强度值;*取同试验组多个试件试验劈裂水压测值的平均值。

从表 3 可以看出,混凝土试件在无拉压应力状态下,抗高压水劈裂的能力随龄期的增长有所提高,但是总体上都比较低,临界劈裂水压值明显低于其相应试验组试件的抗拉强度,小了 10.9%~13.1%。

环境,试件在不同轴压的条件下产生破坏时其水压均发生骤降,每组试验完成后,均拆卸水密封装置,发现试件的破坏形式基本一致,沿裂缝尖端向右端扩展,劈裂面与预制裂缝面基本处于同一平面上,试件劈裂破坏形态见图 12。故判定本次试验均为水力劈裂破坏形式。混凝土结构产生水力劈裂破坏的机理为:裂缝内水压升高至裂缝尖端处的有效应力强度因子超过试件材料的断裂韧度时,试件由预制裂缝端部开始产生裂缝并向两端延伸,最终裂缝贯通试件,试件发生劈裂破坏。

混凝土试件在压应力状态下,临界劈裂水压与轴压的差值小于其材料抗拉强度的 6.37%~9.85%,随着轴压的增大,其临界劈裂水压也增大,但是试件发生的水力劈裂时其轴压与水压的差值基本为常数,对劈裂临界水压与轴压进行回归分析,可以得出其关系式(见图 13)为

$$P_c = 1.772 + 1.085\sigma \quad (1)$$

式中: σ 为轴压(MPa); P_c 为水力劈裂临界水压(MPa)。

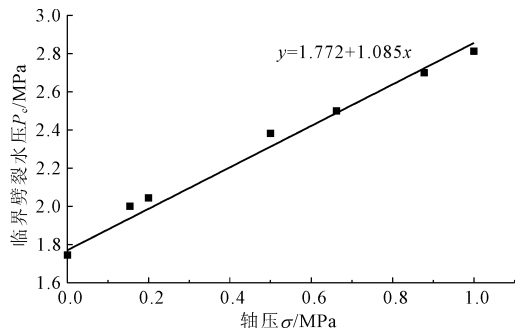


图 13 临界劈裂水压与轴压关系

3 结 论

(1) 针对以往水力劈裂试验采用混凝土楔形劈裂试件无法密封高压水作用和圆柱形混凝土试件无法测量试验过程中的裂缝开度、水压、水温等重要数

据的缺陷,研制了一套混凝土结构水力劈裂试验系统,具有劈裂水压加载方案、水温、外力荷载可调节等特点,解决了试验过程中高压水密封及试验数据实时采集等技术难题。

(2) 无拉压应力条件以及压应力条件下的混凝土结构单裂缝水力劈裂试验表明各试验试件的破坏形式及水力劈裂破坏过程基本一致,均是沿裂缝尖端向右端扩展,劈裂面与预制裂缝面基本处于同一平面上,均为水力劈裂破坏形式。

(3) 混凝土试件在无拉压应力状态下,抗高压水劈裂的能力随龄期的增长有所提高,但是总体上都比较低,临界劈裂水压值明显低于试件的抗拉强度,小了 10.9% ~ 13.1%;混凝土试件在压应力状态下,临界劈裂水压与轴压的差值小于其材料抗拉强度的 6.37% ~ 9.85%,随着轴压的增大,其临界劈裂水压也增大,但是试件发生的水力劈裂时其轴压与水压的差值基本为一常数。

参考文献:

[1] 陈卫忠,朱维申,罗超文.万家寨引黄工程总干一、二级泵站水力劈裂试验研究[J].岩土力学,2001,22(1):26-28.

[2] 艾凯,刘元坤,韩晓玉.深圳抽水蓄能电站水力劈裂试验研究[J].长江科学院院报,2008,25(5):46-49.

[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] Papanastasiou P, Thiercelin M. Influence of inelastic rock behavior in hydraulic fracturing[C]//Haimson B. Rock Mechanics in 1990s: Pre - print Proceedings of the 34th US Symposium on Rock Mechanics. Madison: University of Wisconsin-madison, 1993:339-342.

[6] 朱珍德,徐卫亚,张爱军.脆性岩石损伤断裂机理分析与试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1411-1416.

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

[8] 王建敏.静水压力环境下混凝土裂缝扩展与双 K 断裂参数试验研究[D].大连:大连理工大学,2008.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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(S1):2952-2957.

[12] 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.

[13] 孙亚平.水力劈裂机制研究文[D].北京:清华大学,1985.

(上接第 100 页)

[7] 朱松岭,周平,韩毅,等.基于模糊层次分析法的风险量化研究[J].计算机集成制造系统,2004,10(8):980-984.

[8] Wang Ying - ming, Elhag Taha M S, Hua Zhong - sheng. A modified fuzzy logarithmic least squares method for fuzzy analytic hierarchy process[J]. Fuzzy and Systems, 2006, 157(23):3055-3071.

[9] Mikhailov L, Tsvetinov P. Evaluation of services using a fuzzy analytic hierarchy process[J]. Applied Soft Computing, 2004,5(1):23-33.

[10] Tiryaki F, Ahlatcioglu B. Fuzzy portfolio selection using fuzzy analytic hierarchy process[J]. Information Sciences, 2009,179(1/2):53-69.

[11] 郝晓磊.山丘区生态河道设计方法研究[D].扬州:扬州大学,2008.

[12] 张震,于天彪,梁宝珠,等.基于层次分析法与模糊综合评价的供应商评价研究[J].东北大学学报,2006,10(27):1142-1145.

[13] 常志朋,赵倩.层次分析法在河道护岸堤型护坡材料选择中的应用[J].甘肃水利水电技术,2011,47(1):41-45.

[14] 石瑞花.河流功能区划与河道治理模式研究[D].大连:大连理工大学,2008.

[15] 戴琰琦.基于模糊层次的商标价值评估方法研究[J].价值工程,2010,29(11):1-3.