

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.005

刘得潭, 沈振中, 徐力群, 等. 岩体水力劈裂临界水压力影响因素及机理研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 30-37. (LIU Detan, SHEN Zhenzhong, XU Liqun, et al. Experimental studies on influence factors and mechanism of critical water pressure of hydraulic splitting in rock mass[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 30-37. (in Chinese))

岩体水力劈裂临界水压力影响因素及机理研究

刘得潭^{1,2}, 沈振中^{1,2}, 徐力群^{1,2}, 邱莉婷^{1,2}, 江婷^{1,2}

(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. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究材料强度、初始裂缝开度、初始缝长和轴向压应力对岩体水力劈裂临界水压力的影响, 采用水泥砂浆作为岩体相似材料, 进行岩体水力劈裂试验, 探讨其水力劈裂破坏机理。试验结果表明, 岩体水力劈裂临界水压力与材料强度和轴向压应力存在正相关关系, 轴向压应力较材料强度对水力劈裂临界水压力影响大; 水力劈裂临界水压力与初始裂缝开度、初始缝长呈负相关关系, 初始缝长对水力劈裂临界水压力敏感性比初始裂缝开度大。随着缝内水压的增大, 岩体初始裂缝的裂尖扩展, 裂隙水流渗入到损伤劣化区, 在裂隙水流的双重力学作用下, 损伤区裂隙、孔隙扩展贯通形成宏观裂缝, 宏观裂缝在缝内水流双重力学作用下, 裂尖应力强度因子超过断裂韧度, 岩体失稳破坏。

关键词: 岩体; 水力劈裂; 临界水压力; 双重力学作用

中图分类号: TU457; TV313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)04-0030-08

岩体水力劈裂是指高水头压力作用下, 裂缝扩展、贯通从而改变岩体结构的一种物理现象^[1]。水力劈裂在天然气开采、核废料堆存、地热开发等地质工程中具有重要作用^[2], 然而高水头压力条件下对岩质边坡和水工隧洞有时会带来严重破坏。意大利瓦力昂边坡失稳^[3]和我国雅砻江锦屏二级水电站长探洞3次涌水^[4], 是水力劈裂作用造成事故的2个典型工程案例。

Papanastasion 和 Thiercelin^[5]通过试验, 研究了岩石塑性屈服和剪胀对水力劈裂裂缝的张开和扩展的影响, 定性分析了裂缝尖端在水力劈裂作用下的力学和结构上的反应; Ito 等^[6]在边长为 0.3 m 立方体安山石岩块表面钻 1 个 $\varphi 10$ mm 的圆孔, 以黏性稠油为液体进行三轴水力劈裂试验, 得出裂缝重新开裂的临界孔压经验式; 陈勉等^[7]采用大尺寸真三轴模拟试验系统模拟地层条件, 对立方体岩样进行水力劈裂试验, 定性研究了地应力、断裂韧度、节理和天然裂缝等因素对水力劈裂破坏的影响; 吴景浓^[8]对干、湿厚壁圆筒岩样进行了不同围压下水力劈裂试验, 得到了岩样的破裂模式、致裂强度与围压的关系。针对规定形状的岩样在制备过程中对试验设备要求较高, 岩样力学性能易受外界影响, 制作成本高等缺陷, 水泥砂浆材料具有力学性质与模拟的岩石材料抗压强度与抗拉强度相似、力学性能稳定、改变砂浆的配合比可调整材料的某些性质适应相似条件的需要等, 许多学者选用这种岩石材料用于岩体力学性能模拟试验^[9-11]。王国庆^[12]采用高压渗流-应力耦合试验仪对以水泥砂浆作为岩石相似材料的厚壁圆筒试件进行水力劈裂试验, 探讨了试件不同压力环境下水力劈裂破坏的机理, 定量分析了试件劈裂破坏临界孔压与围压关系; 詹美礼等^[13]针对厚壁圆筒水泥砂浆试件进行 9 组近 30 个试样的水力劈裂试验研究, 从渗流原理出发, 研究提出了水力劈裂问题中渗透力作用机制, 并从宏观上论证

收稿日期: 2017-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609073); 江西省水利科技项目(KT201545); 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资助项目(YK915007); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYZZ15_0139, KYZZ16_0284)

作者简介: 刘得潭(1993—), 男, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 主要从事水工结构研究。E-mail: 2456650534@qq.com

了试验成果的合理性以及在水力劈裂中以渗透力为基本作用因素的必要性;谢兴华^[14]制作空心圆柱水泥砂浆试件,在三轴渗流应力耦合试验仪上进行水力劈裂破坏试验,研究试件在水力劈裂条件下的破坏特征,认为试件破坏时的应力状态没有满足整体破坏条件是由于材料不均匀性所致,材料的不均匀性会引起高应力点出现微裂纹,微裂纹应力集中显著,沿裂尖继续扩展,直到整体劈裂,试件破坏。

上述研究工作通过在试件预制圆孔中加载水压或油压,分析了试件劈裂临界孔压与围压的关系,并探讨了劈裂机理。然而,对有初始裂缝的岩样,劈裂破坏临界水压影响因素及机理的研究工作仍需进一步开展。针对这一问题,本文从岩体单裂缝水力劈裂试验入手,研究材料强度、初始裂缝开度、初始裂缝长度、轴向压应力对试件水力劈裂临界水压力的影响,探讨岩体水力劈裂破坏机理。

1 试验概述

1.1 试件制备

分别对2种尺寸规格、3种初始裂缝开度、4种强度等级及3种初始缝长的水泥砂浆试件进行水力劈裂试验研究,试件采用图1所示的形式。试件尺寸及材料基本力学参数见表1。试验水泥采用南京龙潭镇生产的P·O 32.5和42.5硅酸盐水泥,砂子采用天然河砂(中砂),水为普通生活用水。试件采用可拆卸塑料模具浇筑,模具前后两面中心部位沿竖向切割一条贯穿的方形孔,孔长为 a ,孔宽为 b ,插入相同规格的预制钢片制成初始预制裂缝。为了确保试件初始预制裂缝开度及长度的精度,浇筑试件时,先将试模内壁及预制钢片擦拭干净,在试模内壁,用透明胶带将其前后两面中心部位的方形孔封闭,然后将预制钢片穿过透明胶带插入方形孔中,砂浆搅拌均匀后,注入试模,用振捣器捣实,排出内部气泡,待初凝时间拔出钢片,静置48 h脱模。同时浇筑4种不同强度等级边长为70.7 mm的立方体试样,用于测定抗压强度及劈拉强度。所有试件浇筑过程严格按照水工混凝土试验规程操作,脱模后放入标准养护室养护28 d后进行试验,以确保试件材料强度精度。

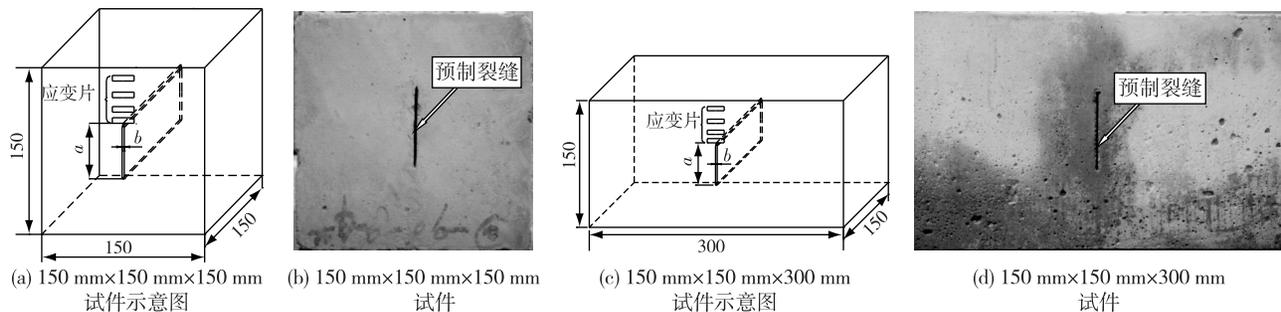


图1 试件形状及实物照片

Fig. 1 Schematic diagram of specimen

表1 试件基本参数及试验结果

Tab. 1 Basic parameters and test results of specimens

方案	编号	试件尺寸	初始裂缝开度 b/mm	初始缝长 a/mm	数量/个	抗拉强度 f_t/MPa	轴压/ kN	σ_z/MPa	P_c/MPa
A	A-1	150 mm×150 mm×150 mm	2	50	3	1.09	0	0	0.915
	A-2	150 mm×150 mm×150 mm	4	50	3	1.09	0	0	0.695
	A-3	150 mm×150 mm×150 mm	6	50	3	1.09	0	0	0.441
B	B-1	150 mm×150 mm×150 mm	2	40	3	1.09	0	0	1.541
	B-2	150 mm×150 mm×150 mm	2	50	3	1.09	0	0	0.915
	B-3	150 mm×150 mm×150 mm	2	60	3	1.09	0	0	0.582

(续表)

方案	编号	试件尺寸	初始裂缝 开度 b/mm	初始缝长 a/mm	数量/个	抗拉强度 f_t/MPa	轴压/ kN	σ_z/MPa	P_c/MPa
C	C-1	150 mm×150 mm×150 mm	2	50	3	1.17	0	0	1.067
	C-2	150 mm×150 mm×150 mm	2	50	3	1.66	0	0	1.551
	C-3	150 mm×150 mm×150 mm	2	50	3	2.31	0	0	2.000
D	D-1	150 mm×150 mm×150 mm	2	50	3	1.66	0	0	1.551
	D-2	150 mm×150 mm×300 mm	2	50	3	1.66	4.5	0.2	1.764
	D-3	150 mm×150 mm×300 mm	2	50	3	1.66	9.0	0.4	1.934

1.2 试验设备

试验采用微机控制电液伺服压力试验系统提供高压,该水压力加载系统可施加 0~3 MPa 的水压,可以满足水泥基材料或岩石水力劈裂试验研究的需要。试件预制裂缝水密封性的好坏直接决定试验的成败,随着试件所受水压力的增加,试件水密封难度也迅速增加。为了获得良好的水密封效果,采用专门研制的水密封装置,如图 2 所示。该水密封装置由硅胶密封层和工字钢架密封层构成。采用栅长 20 mm,栅宽 3 mm 规格的应变片测量裂缝扩展,东华动态应变测试系统读取记录应变测值。应变片从楔形裂尖向外布置,间距为 0,5,7 和 10 mm(见图 1)。

1.3 试验方案与过程

试验共设计了 4 种方案,研究初始裂缝开度、长度、材料强度、轴向压应力对试件劈裂破坏临界水压的影响,试验参数及结果见表 1。试件养护 28 d 后用水泥砂浆填补试件表面缺陷,并用砂纸打磨平整,预制裂缝与水密封装置进水孔对位,拧紧螺母夹持试件,启动水压加载系统将预制裂缝内的空气排出,使用密封帽密封水密封装置排气孔。A,B 和 C 三种方案,电动施压泵也以 15 rad/s 的速率加载水压直至试件发生水力劈裂破坏;D 方案将试件放置压力试验台,加载轴向压应力至设定值后,维持轴压,启动水压加载系统,电动施压泵以 15 rad/s 的速率加载水压直至试件发生劈裂破坏,研究轴向压应力对水力劈裂临界水压力的影响,并探讨劈裂机理。试件型式及加载方式如图 3 所示。

2 试验结果及分析

2.1 水力劈裂临界水压力 P_c 的确定

试件水力劈裂破坏时,裂缝贯通整个试样,有水从劈裂面大量渗出,并会听到沉闷的破坏声,裂缝面水压迅速下降至零附近。具体针对一轴向压应力 0.2 MPa 试件劈裂破坏时试验数据予以说明。图 4 为 D-2-3 试

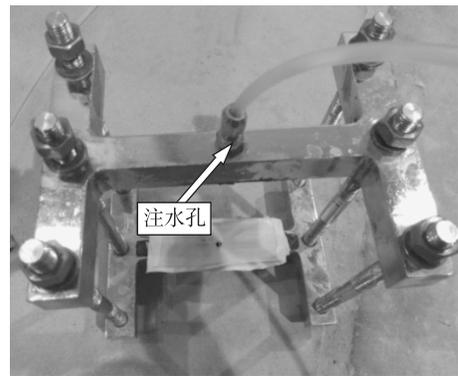


图 2 水密封装置

Fig. 2 Water sealing device

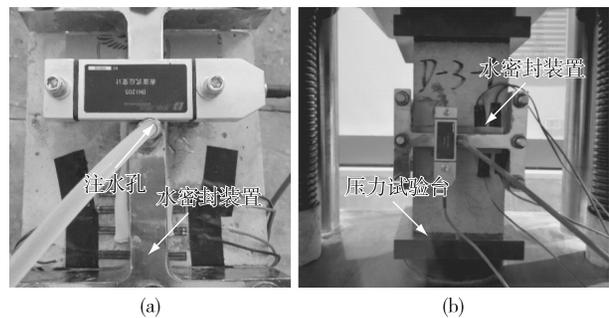


图 3 试件型式及加载方式

Fig. 3 Specimen types and loading mode

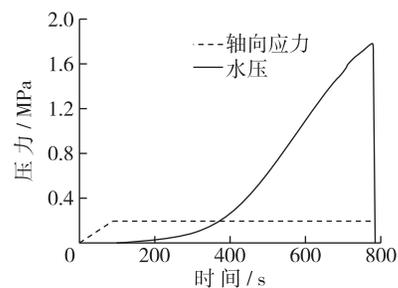


图 4 D-2-3 试件水压及轴压加载过程

Fig. 4 Process of water pressure and axial loading on D-2-3 specimen

样水压和轴压加载过程线。可以看出,水压由第 782 s 的 1.787 MPa 升至第 783 s 的 1.788 MPa,轴向压应力维持 0.2 MPa 不变,第 783—784 s,水压由 1.788 MPa 降至 0.765 MPa,期间有水从劈裂面渗出,由此可认为 D-2-3 试样在第 783 s 发生水力劈裂破坏,水力劈裂临界水压力 $P_c = 1.787$ MPa。取每组 3 个试样的平均值作为该组工况下试件水力劈裂临界水压力 P_c ,结果汇于表 1。部分试样水力劈裂破坏的形态如图 5 所示。

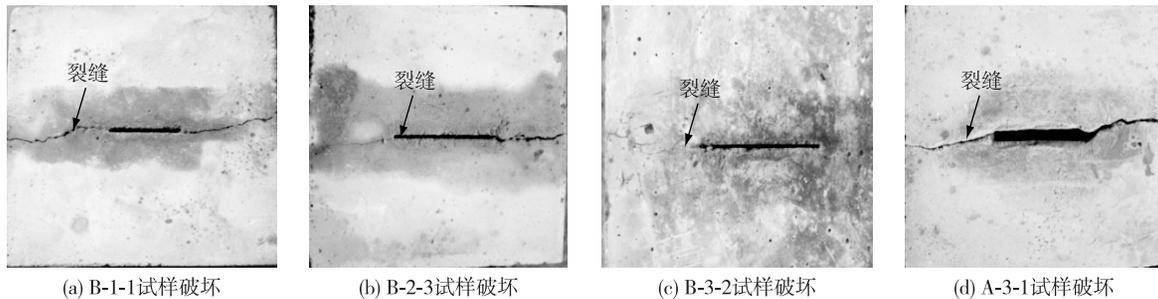


图 5 部分试样水力劈裂破坏形态

Fig. 5 Fracture morphology of hydraulic splitting of some specimens

2.2 材料强度对水力劈裂临界水压力 P_c 的影响

图 6 为试件劈裂抗拉强度与水力劈裂临界水压力 P_c 的关系。从图 6 可以看出,对于初始预制裂缝相同的试样,在无应力状态下其水力劈裂临界水压力 P_c 随材料强度的增加呈线性增长趋势。对试件强度与水力劈裂临界水压力进行线性回归分析,得到如下关系式:

$$P_c = 0.88f_t (R^2 = 0.97) \quad (1)$$

式中: P_c 为试件水力劈裂临界水压力 (MPa); f_t 为试件劈裂抗拉强度 (MPa)。

式(1)表明试件水力劈裂临界水压力与材料强度显著相关,与混凝土单裂缝试件^[15]和厚壁圆筒试件^[16-17]表现出来的规律一致,证明了本试验方法的正确性。对式(1)量化分析可得,试件材料强度对水力劈裂临界水压力的影响系数为 0.88,即岩体强度每提高 1 MPa,抗劈裂破坏能力增加 88 m 水头。试验中试件劈裂破坏临界水头为 90.4~202.7 m,目前一些岩质高边坡和深埋隧洞处于 100 m 以上高水头压力环境中,由于地质演变和人为因素边坡岩体和围岩内部存在许多微裂缝,在高水头压力作用下微裂缝会扩展、贯通引起边坡失稳和隧洞开挖涌水。式(1)给出了已知岩体强度,裂缝抗劈裂能力的判据,从而为库区岩质高边坡随库水位上升,预估蓄水位并采取工程措施及深埋隧洞选址提供了参考。

2.3 轴向压应力对水力劈裂临界水压力 P_c 的影响

图 7 为劈拉强度 1.66 MPa、初始裂缝开度 2 mm 和初始缝长 50 mm 试件水力劈裂临界水压力与轴向压应力的关系。从图 7 可以看出,对于初始裂缝和材料强度相同的试件,水力劈裂临界水压力与轴向压应力之间存在一定相关性,即抗劈裂破坏能力会随轴向压应力的增加而增大。试件在轴向压应力状态下,水力劈裂临界水压力与轴向应力的差值低于材料抗拉强度的 4.64%~9.58%,对试样水力劈裂临界水压力与轴向压应力进行

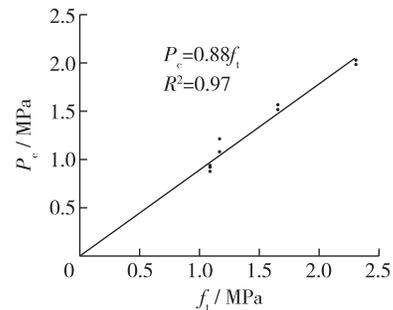


图 6 水力劈裂临界水压力与材料强度关系

Fig. 6 Relationships between critical water pressure of hydraulic splitting and material strength

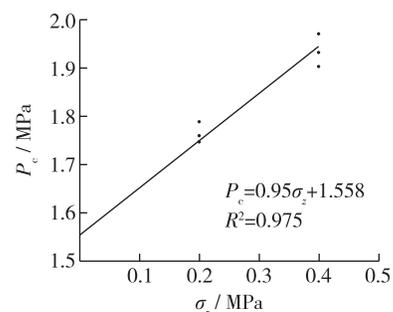


图 7 水力劈裂临界水压力与轴向压应力关系

Fig. 7 Relationships between critical water pressure of hydraulic splitting and axial compressive stresses

线性回归分析,得到的关系如下:

$$P_c = 0.95\sigma_z + 1.558 \quad (R^2=0.975) \quad (2)$$

式中: σ_z 为试件两端施加的轴向压应力(MPa)。

式(2)与混凝土单裂缝试件和厚壁圆筒试件呈现出的规律一致,证明了该试验方法的正确性。对式(2)量化分析可以得出,轴向压应力对劈裂破坏临界水压的影响系数为0.95,即岩体单向压应力每增加1 MPa,劈裂破坏临界水头提高95 m。试验中试件水力劈裂临界水头为158.8~190.1 m,与一些实际工程深埋隧洞和高坝库区边坡地下水头相符,在高水头作用下,深部岩体裂缝水力劈裂问题并不乐观。式(2)与式(1)对比分析表明,在岩体抗拉强度范围内轴向压应力比岩体强度对抗劈裂破坏能力影响大。工程上很难大幅度提升岩体强度,因此,采取工程措施提高岩体轴向压应力对设计深埋隧洞围岩水力劈裂问题有积极作用。

2.4 初始裂缝开度和初始缝长对水力劈裂临界水压力 P_c 的影响

图8为无拉压应力状态下,劈拉强度为1.09 MPa试件的水力劈裂临界水压力与初始裂缝开度和初始缝长的关系。定义 $\beta=100b/B$, $\eta=100a/D$ (b 为试件初始裂缝开度, a 为试件初始缝长, B 为试件宽, D 为试件长),从图8可以看出,试件水力劈裂临界水压力与初始裂缝开度和初始缝长之间存在一定的相关性,即 $1.33 \leq \beta \leq 4.00$ 时,水力劈裂临界水压力随着初始裂缝开度的增加而减小, $26.67 \leq \eta \leq 40.00$ 时,水力劈裂临界水压力随着初始缝长的增加而减小。对试件水力劈裂临界水压力与初始裂缝开度和初始缝长进行线性回归分析,得到的关系分别为:

$$P_c = -0.176\beta + 1.16 \quad (R^2=0.97) \quad (3)$$

$$P_c = -0.072\eta + 3.41 \quad (R^2=0.95) \quad (4)$$

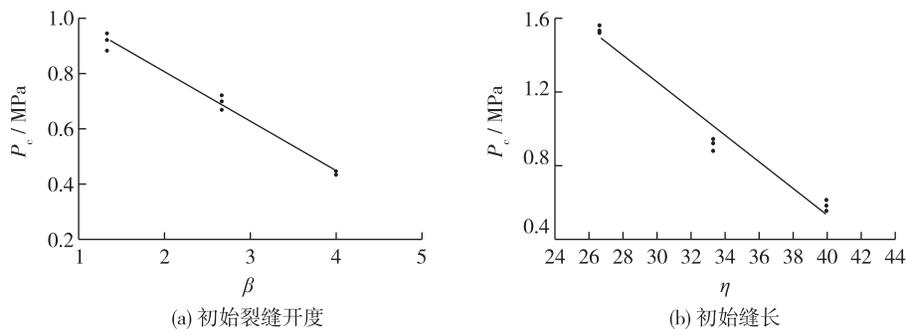


图8 初始裂缝开度和初始缝长与水力劈裂临界水压力关系

Fig. 8 Relationships among critical water pressure of hydraulic splitting and initial crack opening and slit length

从式(4)与式(3)的对比分析可以看出,初始缝长对水力劈裂临界水压力敏感性比初始裂缝开度大。说明在高水头压力作用下,试件裂缝长度的增加、断裂韧带的减小对裂缝尖端应力状态影响较大,加剧了裂尖应力集中程度,促使裂缝扩展直至试件失稳破坏。高坝库区快速蓄水会增加库区边坡深部岩体裂缝扩展延伸的可能性,通过对初始裂缝开度和初始缝长与劈裂破坏临界水压之间关系进行全面分析,可对预估岩体裂缝水力劈裂破坏临界水头,控制库区水位具有指导意义。

3 岩体水力劈裂破坏机理

按照 Griffith 脆性计算准则^[18]得到试件发生脆性破坏的阈值 $F_{Griffith} < 0$, 不满足 Griffith 发生脆性破坏的条件,即试样不会发生脆性破坏,这与试件劈裂破坏后的形态不符。但不能就此否定 Griffith 强度理论, Griffith^[19]通过对脆性物体研究提出:脆性物体破坏是由其内部裂缝决定的,内部裂缝应力集中致使裂缝扩展发生脆性断裂。王国庆和谢兴华^[16-17]利用厚壁圆筒水泥砂浆试件,研究试件在不同应力状态下水力劈裂破坏的机理,得到了与本文相同的结果,但认为这种结果是由于试件中胶凝材料水泥与砂子的强度不同,在

荷载作用下,内部会产生局部应力区,并提出用非均匀系数描述脆性材料的破坏特征。岩体在水力劈裂破坏过程中,材料不均匀性诱发应力集中是水力劈裂机理影响因素之一。

在水流作用下砂浆发生准脆性断裂,包括劣化损伤和断裂两个过程。已有研究^[20]表明沿裂缝行进的水流对裂缝壁有两种形式的力学作用,即裂缝水流的双重力学效应,一种是在垂直裂缝壁面方向存在静水压力;另一种是与裂缝水流方向一致的拖拽力。试件的初始裂缝在缝内水压作用下,裂尖的微裂纹有所发展形成少量损伤,缝内水压分布示意如图9(a)所示;随着缝内水压增大,裂尖损伤劣化区扩展,裂隙水流渗入到损伤劣化区,在裂隙水流的双重力学作用下,损伤区扩大,导致裂尖周围裂隙、孔隙扩展贯通形成宏观裂缝,宏观裂缝形成前损伤区双重力学作用示意如图9(b)所示;宏观裂缝在缝内水流双重力学作用下,裂尖应力强度因子超过断裂韧度,试件就会失稳破坏,宏观裂缝水流双重力学作用示意如图9(c)所示。压力作用下,裂缝周围产生了压力场,裂缝内水压逐渐增大改变了原应力场,促使裂缝周围岩体损伤劣化进而形成宏观裂缝。

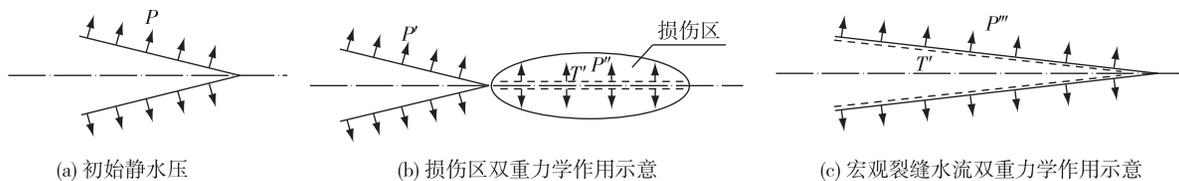


图9 裂缝扩展过程中水流双重力学效应

Fig. 9 Double mechanical effects of water flow during crack propagation

4 结 语

(1) 采用水泥砂浆作为岩体相似材料,进行岩体水力劈裂试验,试验结果分析表明,岩体水力劈裂临界水压与材料强度、轴向压应力、初始裂缝开度和初始缝长存在一定相关性。这种相关性能为高坝库区边坡蓄水和深埋隧洞涌水预报,提前采取工程措施提供指导,更好地满足边坡深部岩体和隧洞围岩抗劈裂破坏的安全要求。

(2) 岩体初始裂缝随着缝内水压的增大,裂尖损伤劣化扩展,裂隙水流渗入到损伤劣化区,在裂隙水流双重力学作用下,损伤区裂隙、孔隙扩展贯通形成宏观裂缝,宏观裂缝在缝内水流双重力学作用下,裂尖应力强度因子超过断裂韧度,岩体失稳破坏。

(3) 本文虽讨论了不同因素对岩体单裂缝水力劈裂临界水压的影响,而在实际情况中,岩质高边坡和深埋隧洞应力条件较为复杂,对其研究不够全面,有待进一步通过试验研究轴压方向与预制裂缝各角度对水力劈裂时裂缝扩展的影响。

参 考 文 献:

- [1] 倪小东, 赵帅龙, 王媛, 等. 岩体水力劈裂的细观 PFC-CFD 联合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 3862-3870. (NI Xiaodong, ZHAO Shuailong, WANG Yuan, et al. Numerical analysis of hydraulic fracturing of rock mass on mesoscopic level by coupled PFC-CFD method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 3862-3870. (in Chinese))
- [2] 王媛, 颜青青. 岩体水力劈裂非稳定渗流影响机制初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2016-2021. (WANG Yuan, YAN Qingqing. Primary research of influence of unsteady seepage processes on hydraulic fracturing in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 2016-2021. (in Chinese))
- [3] 蒋宇静, 李博, 王刚, 等. 岩石裂隙渗流特性试验研究的新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2377-2386. (JIANG Yujing, LI Bo, WANG Gang, et al. New advances in experimental study on seepage characteristics of rock fractures[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2377-2386. (in Chinese))
- [4] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 572-576. (HUANG Runqiu, WANG Xianneng, CHEN Longsheng. Hydro-splitting analysis of underground water in deep-lying tunnels and its effect on water gushing out[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 572-576. (in Chinese))
- [5] PAPANASTASIOU P, THIERCELIN M. Influence of inelastic rock behavior in hydraulic fracturing [C] // The 34th US Symposium on Rock Mechanics. University of Wisconsin-Madison, 1993: 339-342.
- [6] ITO T, HAYASHI K. Analysis of crack reopening behavior for hydrofrac stress measurement [C] // The 34th US Symposium on Rock Mechanics. University of Wisconsin-Madison, 1993: 335-338.
- [7] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊1): 868-872. (CHEN Mian, PANG Fei, JIN Yan. Experiments and analysis of hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Suppl1): 868-872. (in Chinese))
- [8] 吴景浓. 室内岩石水压致裂三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(4): 61-69. (WU Jingnong. Research on laboratory triaxial test for rock hydrofracture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(4): 61-69. (in Chinese))
- [9] 蒲成志, 曹平, 陈瑜, 等. 不同裂隙相对张开度下类岩石材料断裂试验与破坏机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(8): 2394-2399. (PU Chengzhi, CAO Ping, CHEN Yu, et al. Fracture test and failure mechanism of rock-like material of relatively different fracture apertures [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(8): 2394-2399. (in Chinese))
- [10] 张波, 李术才, 杨学英, 等. 含交叉多裂隙类岩石材料单轴压缩力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1777-1785. (ZHANG BO, LI Shucai, YANG Xueying, et al. Mechanical property of rock-like material with intersecting multi-flaws under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1777-1785. (in Chinese))
- [11] 李明田, 李术才, 杨磊, 等. 类岩石材料表面裂纹扩展模式的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(1): 21-26. (LI Mingtian, LI Shucai, YANG Lei, et al. Experimental study of the surface crack propagation mode in rock-like materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(1): 21-26. (in Chinese))
- [12] 王国庆. 岩体水力劈裂试验及裂纹扩展的无单元法计算[D]. 南京: 河海大学, 2004. (WANG Guoqing. Hydraulic fracture test and crack propagation simulation by element-free method [D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [13] 詹美礼, 岑建. 岩体水力劈裂机制圆筒模型试验及解析理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1173-1181. (ZHAN Meili, CEN Jian. Experimental and analytical study on hydraulic fracturing of cylinder sample [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1173-1181. (in Chinese))
- [14] 谢兴华. 岩体水力劈裂机理试验及数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (XIE Xinghua. Experimental study on hydraulic fracture mechanism of mass and numerical simulation [D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [15] 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. (GAN Lei. Experimental and numerical simulation of hydraulic fracturing of hydraulic concrete [D]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese))
- [16] 王国庆, 谢兴华, 速宝玉. 岩体水力劈裂试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 480-484. (WANG Guoqing, XIE Xinghua, SU Baoyu. Experimental study of hydraulic fracturing of rock mass [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(4): 480-484. (in Chinese))
- [17] 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(Suppl1): 2952-2957. (in Chinese))
- [18] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 232-237. (XU Shilang. Fracture mechanics of concrete [M]. Beijing: Science Press, 2011: 232-237. (in Chinese))
- [19] GRIFFITH A. 破坏理论[M] // 水利水电科学院, 译. 混凝土的强度和破坏论文集. 北京: 水利出版社, 1982. (GRIFFITH A. Failure theory [M] // Translated by China Institute of Water Resources and Hydropower Research. The Strength and Failure of Concrete Proceedings. Beijing: China Water & Power Press, 1982. (in Chinese))
- [20] 徐力群. 多场耦合下水工混凝土结构裂缝扩展的无单元法分析模型[D]. 南京: 河海大学, 2010. (XU Liqun. Analysis model of hydraulic concrete crack propagation by EFM under multi-field coupled conditions [D]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese))

Experimental studies on influence factors and mechanism of critical water pressure of hydraulic splitting in rock mass

LIU Detan^{1,2}, SHEN Zhenzhong^{1,2}, XU Liqun^{1,2}, QIU Liting^{1,2}, JIANG Ting^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to investigate the impacts of material strength, initial crack opening, initial slit length, and the axial compressive stress on the critical water pressure for hydraulic splitting of the rock masses, the cement mortar is selected as the substitute material for a rock mass, and it is subjected to hydraulic splitting tests to examine its hydraulic splitting mechanism. The experimental analysis results indicate that a positive correlation exists between the critical water pressure for the hydraulic splitting and the material strength and the axial compressive stress of the rock mass. The axial compressive stress is found to have a larger impact on the critical water pressure for the hydraulic splitting than that of the material strength. However, the critical water pressure for the hydraulic splitting has a negative correlation with both the initial crack opening and the initial slit length, with the latter being more sensitive to the critical water pressure for the hydraulic splitting than the former. When the water pressure in the rock cracks increases, the tip of the initial crack expands and allows more fissure water to infiltrate the damaged and degraded zone. Under the dual mechanical effects of fissure water, the fractures and pores in the damaged zone expand and interconnect to form macrocracks. These macrocracks are in turn subjected to similar dual mechanical effects. Eventually, the stress intensity factor at the tip exceeds the tenacity of the cracks, resulting in destabilization and destruction of the rock mass. Under the action of the double mechanics of water flow in the rock, the stress intensity factor of the crack tip exceeds the fracture toughness, and the rock mass is unstable.

Key words: rock mass; hydraulic splitting; critical water pressure; double mechanical effects