

# 不同水压下混凝土断裂能弱化效应试验研究

胡少伟,王洋,孙岳阳,陆俊

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

**摘要:**为了研究混凝土在水力劈裂过程中的断裂能变化规律,分析了水力劈裂中的各荷载做功,建立了水压力下断裂能的计算公式,开展了12组混凝土水力劈裂试验,得出了水压力对混凝土断裂能的影响规律。结果表明:水压力作用下混凝土的断裂能减小,水压力越大,混凝土的断裂能越小;混凝土在水力劈裂过程中的断裂能弱化效应不可忽略,在0.3 MPa水压力下,该弱化效应随水压力增加呈线性递增趋势。

**关键词:**混凝土;断裂能;水力劈裂;水压力;三点弯曲梁

中图分类号:TU528.36 文献标识码:A doi:10.19761/j.1000-4637.2020.12.006.05

## Experimental Study on Fracture Energy of Concrete Under Different Hydraulic Pressure

HU Shao-wei, WANG Yang, SUN Yue-yang, LU Jun

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study the influence of water pressure on fracture energy of concrete under hydraulic fracturing, the work done by each load in hydraulic fracturing test was analyzed, the calculation formula of fracture energy under water pressure was established, and 12 groups of hydraulic fracturing tests of concrete were carried out. The results show that the fracture energy of concrete decreases under the action of water pressure, and the greater the water pressure, the smaller the fracture energy of concrete, which shows that the weakening effect of the fracture energy in the process of concrete hydraulic fracturing cannot be ignored, the weakening effect increases linearly with the increase of water pressure which not exceed 0.3 MPa.

**Key words:** Concrete; Fracture energy; Hydraulic fracturing; Hydraulic pressure; Three-point bending beam

## 0 前言

混凝土作为用量最大的建筑材料已广泛用于工业与民用建筑、水利、城市建设、农林、交通及海港等工程<sup>[1-3]</sup>。混凝土材料在施工期和服役期均会出现裂缝,环境水压力易通过裂缝浸入结构内部影响其抗裂性能,从而导致结构裂缝扩展延伸<sup>[4-6]</sup>。因此,研究水压力作用下混凝土的断裂能规律具有重要意义。

水对混凝土性能的影响作用主要包括水的化学作用和孔隙水的力学作用。基于混凝土断裂试验,ROSSI<sup>[7]</sup>开展了饱和与非饱和混凝土断裂试验,在慢加载速率下饱和混凝土断裂韧度较小,但在快

加载速率下非饱和混凝土的断裂韧度较小。BRUHWILER和SAOUMA<sup>[8-9]</sup>研究了裂缝和水的相互作用,水压力作用下混凝土断裂韧度和断裂能显著减小,得到了断裂能与水压力之间的函数关系。ALFANO等<sup>[10]</sup>将水压看作永久性静压力,并得到了水压力在初始水压力与最终水压力之间的变化规律。孙志伟等<sup>[11]</sup>测试了海水浸泡、水浸泡和全干燥混凝土断裂试验,研究了混凝土断裂能及强度的变化规律。此外,还通过全干燥、半干燥、水浸泡和海水浸泡混凝土断裂试验,研究了水分含量及液体表面张力对断裂能的影响,认为断裂能随着水分增加而减小,浸泡液体表面张力将对断裂能产生重要影响,与水相比,海水对断裂能的影响更显著。徐世琅等<sup>[12]</sup>研究了荷载和水压力双重作用下混凝土断裂性能规律,试验结果表明,水压力在试件内产生劈裂力,试件承载能力随水压力增加而降低。

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401902);国家自然科学基金项目(51679150,51739008);国家重大科研仪器研制项目(51527811)。

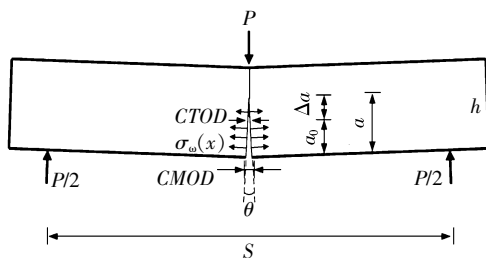
混凝土断裂能可通过荷载-挠度( $P-\delta$ )曲线计算得到。1991年,GOPLARATNAM<sup>[13]</sup>建立了裂缝张口位移( $CMOD$ )与挠度( $\delta$ )关系式,并提出断裂能的 $P-CMOD$ 曲线算法。2003年,BARR<sup>[14]</sup>基于刚体分析模型改进了 $CMOD$ 与 $\delta$ 的计算关系式,并建立了断裂能计算新模型。2008年,张秀芳<sup>[15]</sup>基于旋转角( $\theta$ )和断裂功( $W$ )的关系提出了弯矩-转角( $M-\theta$ )曲线计算断裂能方法,并与RILEM方法进行了对比,该方法计算断裂能与 $P-\delta$ 曲线算法等价。2017年,HU等<sup>[16]</sup>改进了张秀芳提出的计算模型,该模型在张秀芳计算模型的基础上建议将梁的起裂作为裂缝扩展的判断依据,并利用该模型研究了酸性条件下混凝土断裂能变化规律。

国内外学者针对混凝土断裂能已开展了大量研究。然而,研究水力劈裂作用下混凝土断裂能的成果不多。鉴于此,本文基于断裂力学理论,建立水力劈裂作用下混凝土断裂能计算方法,结合水力劈裂试验,研究不同水压力下混凝土断裂能变化规律,并建立断裂能与水压力的函数关系。

### 1 混凝土水力劈裂断裂能计算方法

混凝土水力劈裂断裂能计算模型中试验梁的旋转角度较小(小于 $0.1^\circ$ ),故假定断裂全过程为小变形,假定梁的断裂过程为沿着虚拟裂缝尖端的旋转过程,若等效裂缝长度为 $a$ ,则旋转角可表示为 $\theta=CMOD/a$ 。水力劈裂过程中垂直荷载 $P$ 与重力 $G$ 做功量可采用普通梁断裂过程做功的方法计算得到。由于试验梁的挠度获取需在试验梁侧面设置钢梁,这样加大了水力劈裂试验难度,水力劈裂试验中梁中间不便于布置挠度测量钢架。因此,采用基于 $P-CMOD$ 曲线计算混凝土断裂能的方法。图1为水力劈裂试验中混凝土梁裂缝扩展导致梁转动的示意图。

基本双K断裂模型,可将裂缝在混凝土中的扩



$P$ —外加荷载; $CTOD$ —裂缝尖端张开位移; $CMOD$ —裂缝口张开位移; $a$ —虚拟裂缝长度; $\Delta a$ —虚拟裂缝扩展长度; $a_0$ —预制裂缝长度; $h$ —试件高度; $S$ —跨度; $\theta$ —梁旋转角度; $\sigma_w(x)$ —裂缝中水压力分布函数。

图1 混凝土梁受力裂缝扩展示意图

展过程分为弹性段、稳定扩展段和失稳扩展段。弹性段裂缝长度为 $a_0$ ,另外两个阶段长度为 $a$ ,断裂过程中梁的旋转角见式(1):

$$\theta = \begin{cases} \frac{CMOD}{a_0} & \text{未开裂} \\ \frac{CMOD}{a} & \text{已开裂} \end{cases} \quad (1)$$

基于双参数模型<sup>[17]</sup>,可得裂缝长度 $a$ 与裂缝张口位移 $CMOD$ 关系见式(2):

$$CTOD = CMOD \times \sqrt{(1 - \frac{a_0}{a})^2 + (1.081 - 1.149 \frac{a}{h}) [\frac{a_0}{a} - (\frac{a_0}{a})^2]} \quad (2)$$

通过式(2),结合 $CMOD$ 和 $CTOD$ ,可计算得到梁的转角 $\theta$ 。

根据三点弯曲梁的弯矩分布可知,垂直荷载 $P$ 在梁中间截面产生的弯矩 $M_p = \frac{PS}{4}$ ,利用上述分析,可将试验获取的 $P-CMOD$ 和 $P-CTOD$ 曲线转化为 $M_p-\theta$ 曲线。设 $P=0$ 时的旋转角为 $\theta_0$ ,垂直荷载 $P$ 在断裂过程中做功可以表示为式(3):

$$W_p = \int_0^{\theta_0} M_p d\theta = \int_0^{\theta_0} \frac{PS}{4} d\theta \quad (3)$$

根据三点弯曲梁弯矩分布状态可知,梁自重 $G$ 产生的弯矩值 $M_G = \frac{mgS}{8}$ ,设当梁完全断裂时,其旋转角 $\theta_{max} = \frac{CMOD_{max}}{h}$ ,重力做功可表示为式(4):

$$W_G = \int_0^{\theta_{max}} M_G d\theta = \frac{mgS\theta_{max}}{8} \quad (4)$$

裂缝张开过程中内部水压力随裂缝宽度的变化而变化,为了计算得到水压力的做功量,取裂缝长度上单元水压力并求出其做功量,沿裂缝长度积分求出水压力做功总量。沿裂缝长度取单元水压力计算其做功量,基于缝内水压力分布规律,针对所取单元位置分为单元位于预制缝段和单元位于扩展段两种情况,见图2。

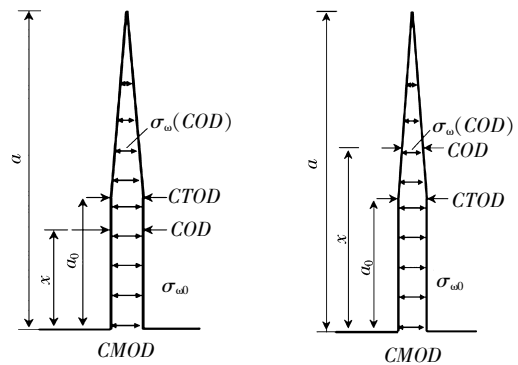


图2 裂缝中水压分布状态图

位于预制缝段的单元,水压力在断裂过程中始终保持恒定,该单元水压力做功量为 $\sigma_{\omega_0}$ 与 $COD$ 的乘积。因此,距裂缝张口 $x$ 处单元长度上水压力做功量可表示为式(5):

$$W_x = \sigma_{\omega_0} COD(x)_{\max} t \quad (5)$$

式中: $t$ 为混凝土梁试件宽度; $COD(x)_{\max}$ 为距裂缝张口 $x$ 处裂缝在梁断裂过程中的最大张开量,当裂缝尖端扩展至试件边缘时,该处的裂缝宽度值可基于双参数模型<sup>[18]</sup>计算得到,见式(6):

$$COD(x)_{\max} = CMOD_{\max} \times \left\{ \left( 1 - \frac{x}{h} \right)^2 - 0.68 \left[ \frac{x}{h} - \left( \frac{x}{h} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

预制缝中水压力做功量计算见式(7):

$$W_{\omega_1} = \int_0^{a_0} \sigma_{\omega_0} COD(x)_{\max} t dx \quad (7)$$

针对位于扩展段的单元体,水压力在断裂过程中随该处裂缝宽度变化,可表示为 $\sigma_{\omega} [COD(x)]$ ,该单元上水压力做功量为水压力 $\sigma_{\omega} [COD(x)]$ 沿裂缝张开宽度函数的积分,距裂缝张口 $x$ 处单元长度上水压力在断裂过程中做功量计算见式(8):

$$W_x = \int_0^{COD(x)_{\max}} \sigma [COD(x)] t d[COD(x)] \quad (8)$$

根据参考文献[8]和[9],混凝土裂缝内水压力分布规律, $\sigma [COD(x)]$ 可表示为式(9):

$$\sigma [COD(x)] = \begin{cases} A [\vartheta(x)]^2 \sigma_{\omega_0} + B [\vartheta(x)] \sigma_{\omega_0} & COD(x) \leq COD_{\omega} \\ \sigma_{\omega_0} & COD(x) > COD_{\omega} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\vartheta(x) = \frac{COD(x)}{COD_{\omega}}$ , $A$ 、 $B$ 为水压力-裂宽模型参数,可通过试验拟合得到。

扩展段内水压力做功量可表示为式(10):

$$W_{\omega_2} = \int_{a_0}^h W_x dx = \int_{a_0}^h \int_0^{COD(x)_{\max}} \sigma [COD(x)] t d[COD(x)] dx \quad (10)$$

裂缝中水压力做功量可表示为式(11):

$$W_{\omega} = W_{\omega_1} + W_{\omega_2} \quad (11)$$

根据断裂能的定义可获得水力劈裂作用下混凝土断裂能计算公式,见式(12):

$$G_F = \frac{W_F + W_G + W_{\omega}}{A} \quad (12)$$

式中: $A$ 为混凝土试件断裂面面积, $A = (h - a_0)t$ 。

## 2 试验概况

### 2.1 试验设计

混凝土水力劈裂试验方法采用文献[18]中基于

三点弯曲梁水力劈裂的试验方法,试验梁见图3。

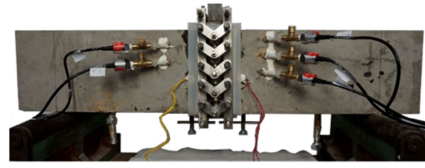


图3 裂缝中含水压力试验梁

混凝土试验梁长度1000 mm、跨度800 mm、高度200 mm、厚度120 mm、初始缝长80 mm。混凝土梁强度等级为C30,配合比见表1,试件一次性浇筑完成,28 d测得其力学性能见表2。

表1 试验混凝土材料配合比  $kg/m^3$

水泥	水	河砂	粗骨料	
			5~12.5 mm	12.5~25 mm
350	182	761	614	538

表2 试验混凝土材料力学参数

弹性模量/GPa		抗拉强度/MPa		抗压强度/MPa	
样本值	平均值	样本值	平均值	样本值	平均值
35.3		3.18		32.5	
31.1	32.4	3.43	3.12	31.9	33.2
30.8		2.74		35.2	

混凝土水力劈裂试验中需要在试件裂缝内提供稳定长期的水压力。因此,试验中构建了一套稳压罐与试件裂缝共通的水压系统,该水压系统设计原理见图4。试验中设计的水压系统部件包括:水泵、止回阀、稳压罐、水压力计、压力传感器、阀门,各部件通过高压水管连接。其中,试件裂缝通过预埋的金属波纹管与外部水压系统连接,同时,通过预制2 mm直径孔斜穿混凝土梁试件的裂缝扩展段,用以测量断裂过程中裂缝前段的水压力值。

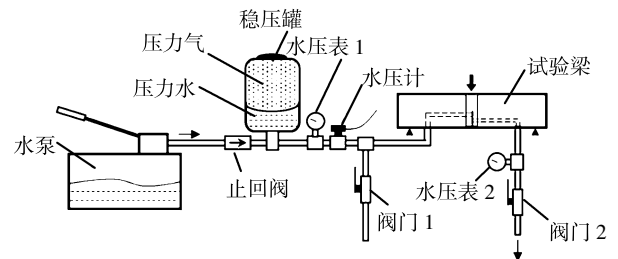


图4 水压系统设计示意图

### 2.2 试验测试内容

混凝土三点弯曲梁水力劈裂试验采用液压伺服试验机进行加载,试验为准静态加载。数据采集设备为DH-5902动态采集仪,采集频率为200 Hz。主要采集数据包括:荷载 $P$ 、裂缝尖端应变 $\varepsilon$ 、裂缝张口位移 $CMOD$ 和裂缝尖端位移 $CTOD$ 。加载过程中通

过预先在混凝土表面粘贴应变片(裂缝尖端两侧的应变片的作用是测量试件的起裂荷载)以及受压侧放置荷载传感器测量混凝土三点弯曲梁试件的应变和荷载值,并采用夹式引伸计测量混凝土预制裂缝张口位移和裂缝尖端张开位移,试验现场见图 5。



图 5 混凝土梁水力劈裂试验

### 3 结果分析

为了研究水压力对混凝土断裂能的影响,开展了 12 组混凝土水力劈裂试验,试验的水压力分别

为:0 MPa、0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa。试验梁编号为“TPB-水压力值-编号”,如“TPB-0.2-3”表示 0.2 MPa 水压力下第 3 根混凝土梁。

混凝土水力劈裂试验测得  $P-CMOD$  曲线见图 6。由图 6 可知,相同水压力下水力劈裂试验获得的  $P-CMOD$  曲线基本相似,这表明了水力劈裂试验中梁的承载能力与变形规律保持恒定,即裂缝中含水压力对  $P-CMOD$  曲线规律不产生影响。对比不同水压力的  $P-CMOD$  曲线可知,裂缝张开位移的最大值不随水压力的变化而变化, $CMOD$  值相近,表明了裂缝扩展中张开规律保持不变。同时,对比  $P-CMOD$  曲线峰值可知,水压力对梁的承载能力降低效应明显,水压力越大,梁的承载能力越弱。由前文可知, $P-CMOD$  曲线与坐标轴围成的面积表示了梁的垂直荷载做功量,水压力越大,面积越小,垂直荷载做功越低。

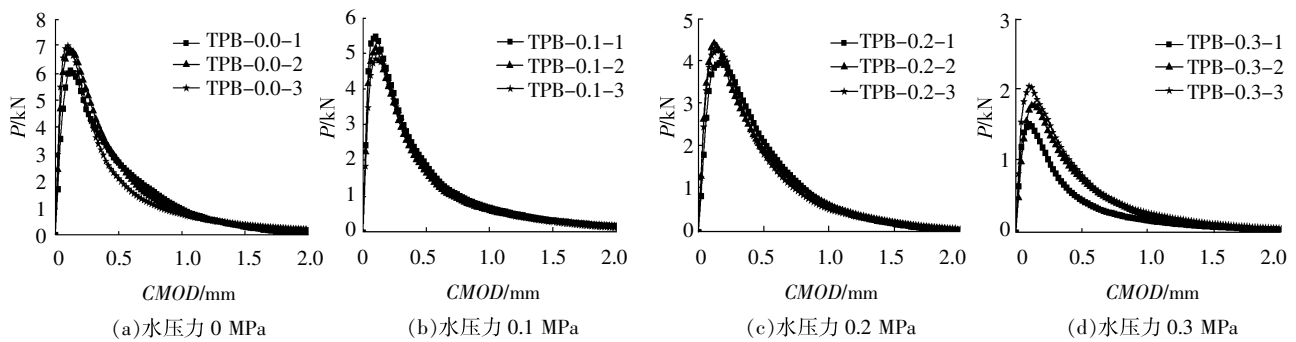


图 6 试验测得  $P-CMOD$  曲线

表 3 为不同水压力下混凝土梁水力劈裂全过程中垂直荷载  $P$  做功量  $W_P$ 、梁自重  $G$  做功量  $W_G$ 、裂缝中水压力做功量  $W_w$ ,并计算断裂能  $G_F$ 。由表 3 可知,水压力越大,断裂能越小。当水压力由 0 MPa 增至 0.3 MPa,测得断裂能降低了 21.3%,远高于混凝土材料测量的随机误差。因此,水压力作用下混凝土断裂能的降低效应是不可忽略的,为了分析水力劈裂作用下混凝土梁所受荷载做功效应,计算得到的各荷载做功量及断裂能如图 7 所示。

由图 7 可知,随着水压力增加,混凝土水力劈裂试验中垂直荷载做功量逐渐降低,而裂缝中水压力做功量逐渐增加。这表明随着裂缝中水压力增加,试件断裂的主导荷载因素由外加垂直荷载转向裂缝中水压力荷载。同时,由于混凝土断裂能随着水压力的增加而降低的效应使得荷载的做功总量降低。

为了定量描绘裂缝中水压力对混凝土断裂能的弱化降低效应,通过试验获得的 0~0.3 MPa 水压力下混凝土断裂能测试结果绘于图 8,并拟合得到了

表 3 各荷载做功量及断裂能计算结果

试件编号	$CMOD_{max}$ /mm	$W_P$ /(N·m)	$W_G$ /(N·m)	$W_w$ /(N·m)	$G_F$ /(N/m)
TPB-0.0-1	2.15	0.82	0.53	0.00	93.28
TPB-0.0-2	2.23	0.85	0.55	0.00	97.16
TPB-0.0-3	2.07	0.87	0.51	0.00	95.91
平均值	2.15	0.85	0.53	0.00	95.45
TPB-0.1-1	1.99	0.59	0.49	0.22	90.56
TPB-0.1-2	2.19	0.42	0.54	0.31	87.91
TPB-0.1-3	2.06	0.32	0.54	0.35	84.24
平均值	2.08	0.44	0.52	0.29	87.57
TPB-0.2-1	1.89	0.4	0.46	0.37	86.02
TPB-0.2-2	2.15	0.3	0.53	0.32	79.89
TPB-0.2-3	1.99	0.3	0.49	0.37	80.42
平均值	2.01	0.33	0.49	0.35	82.11
TPB-0.3-1	2.03	0.26	0.47	0.42	80.29
TPB-0.3-2	1.92	0.22	0.43	0.42	74.76
TPB-0.3-3	1.83	0.18	0.41	0.43	70.16
平均值	1.93	0.22	0.44	0.42	75.07

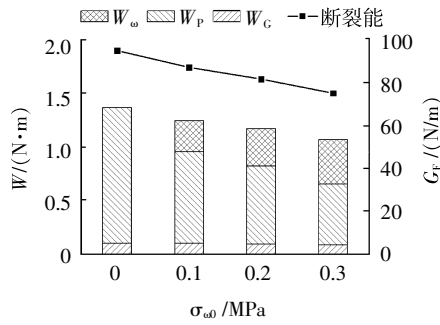


图7 混凝土梁断裂过程中各荷载做功

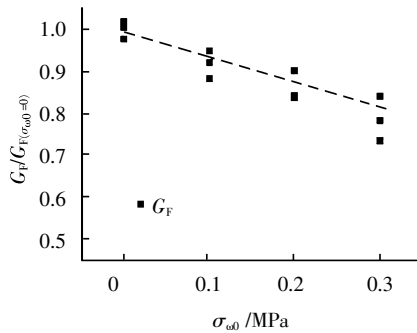


图8 不同水压力下混凝土断裂能变化规律

0.3 MPa 水压力下混凝土断裂能与裂缝中水压力关系曲线。混凝土断裂能随水压力的变化关系满足一次函数关系，混凝土断裂能随裂缝中水压力增大而降低的曲线拟合结果见式(13)。

$$\frac{G_F}{G_{F(\sigma_{w0}=0)}} = 0.99 - 0.66\sigma_{w0} \quad (13)$$

式中： $G_{F(\sigma_{w0}=0)}$ 为水压力为0的混凝土断裂能； $\sigma_{w0}$ 为裂缝中含水压力值。式(16)拟合精度  $R^2=0.934$ 。由拟合结果可知，在0.3 MPa 水压力下混凝土断裂能随水压力增大而降低，并且混凝土断裂能受水压力影响而降低的规律大致满足线性关系。

#### 4 结论

(1)通过分析水压力下混凝土断裂过程中垂直荷载、梁自重和水压力的做功量，得到了基于  $P-CMOD$  和  $P-CTOD$  曲线计算混凝土水力劈裂断裂能方法。

(2)分析不同水压力下混凝土断裂能可知，水压力越大，混凝土断裂能越低，当水压力由0增至0.3 MPa 时，混凝土断裂能降低约21.3%，拟合试验数据发现，0.3 MPa 水压力下，断裂能与水压力的减小值满足线性关系。

(3)不同种类混凝土材料的断裂能受水压力降低效应差异较大，且水力劈裂的液体特征对混凝土性能的影响效应也不尽相同。另外，值得注意的是，本文研究的是0.3 MPa 水压力下的混凝土材料测试结果，针对0.3 MPa 以上及更高水压力导致的混凝土材料影响效应需进一步进行研究。

#### 参考文献:

[1] 胡少伟,陆俊,范向前.混凝土损伤断裂性能试验研究进展[J].水利学报,2014,45(S1):10-18.

[2] 胡少伟,范向前,陆俊.缝高比对不同强度等级混凝土断裂特性的影响[J].防灾减灾工程学报,2013,33(2):162-168.

[3] 范向前,胡少伟,陆俊.三点弯曲梁法研究试件宽度对混凝土断裂参数的影响[J].水利学报,2012,43(S1):85-90.

[4] 范向前,胡少伟,陆俊.非标准混凝土三点弯曲梁双K断裂韧度试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(10):152-157.

[5] 方俊.水力劈裂作用下普通混凝土复合型断裂试验研究[D].锦州:辽宁工业大学,2019.

[6] 张钰彬,刘一鸣,黄丹.水力劈裂问题的态型近场动力学建模[J].计算力学学报,2019,36(1):21-26.

[7] ROSSI P.Coupling between the crack propagation velocity and the vapour diffusion in concrete [J].Material and Structure, 1989(22):91-97.

[8] BRUHWILER E,SAOUMA V.Water fracture interaction in concrete-PartI: fracture properties[J].ACI Mater,1995,92(3):296-303.

[9] BRUHWILER E,SAOUMA V E.Water fracture interaction in concrete: hydrostatic pressure in cracks [J].ACI Mater,1995,92(4):383-390.

[10] ALFANO G,MARFIA S,SACCO E.A cohesive damage - friction interface model accounting for water pressure on crack propagation[J].Comput Methods Appl,2006,196:192-209.

[11] 孙志伟,任昭君,赵铁军.海水对混凝土断裂能及强度的影响[J].混凝土,2007(7):9-10.

[12] 徐世焯,王建敏.静水压力下混凝土双K断裂参数试验测定[J].水利学报,2007(7):792-798.

[13] GOPALARATNAM V,SHAH S P,BATSON G,et al.fracture toughness of fibre reinforced concrete [J].Aci Materials Journal, 1991,88(4):339-353.

[14] BARR B,LEE M M,HANSEN E J,et al.Round -robin analysis of the RILEM TC 162-TDF beam-bending test:Part 1- Test method evaluation [J].Materials and Structure,2003,36(9): 609-620.

[15] 张秀芳,徐世焯.采用荷载-裂缝张开口位移曲线确定混凝土三点弯曲梁的断裂能[J].水利学报,2008(6):714-719.

[16] HU S W,CHEN Q,GONG N.Effect of acid corrosion on crack propagation of concrete beams [J].Sadhana:Academy Proceedings in Engineering Science,2018(18):790-795.

[17] JENQ Y S,SHAH S P.Two parameter fracture model for concrete [J].Journal of Engineering Mechanics,1985,111(10): 1227-1241.

[18] WANG Y,HU S,FAN X,et al.Effect of water pressure on fracture parameters of concrete [J].Construction and Building Materials,2019,199(28):613-623.

收稿日期:2020-05-19

作者简介:胡少伟(1969—),男,教授级高级工程师。

E-mail:hushaowei@nhri.cn