

相对切口深度对混凝土断裂性能影响试验研究

傅喻, 陈有亮

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要:以双K断裂模型为理论基础,采用混凝土标准三点弯曲梁试件,通过试验测得相对切口深度 a_0/h 为0~0.6的5组试件的起裂荷载 P_{ini} 、断裂荷载 P_{max} 及临界裂缝口张开位移 $CMOD$,计算得到起裂韧度 K_{Ic}^{ini} 、 K_{Ic}^{un} 断裂韧度,并使用立体显微镜对破坏后的混凝土进行切口尖端裂纹以及断裂面观察,探究其裂缝开展情况,以分析相对切口深度对混凝土断裂性能的影响。结果表明:相对切口深度越大,则试件起裂越早,而起裂荷载与断裂荷载的比值随初始缝高 a_0 的增大无明显变化,初始缝高对起裂荷载和断裂荷载的影响呈线性相关;起裂韧度和断裂韧度随着相对切口深度的增大无明显减小趋势,两者的比值随相对切口深度也无明显变化,即双K断裂参数取决于材料本身固有特性,与切口深度无关;混凝土断裂过程复杂,存在明显的亚临界扩展阶段,该阶段裂纹绕开骨料发展,整个断裂过程中裂缝扩展路径呈现出曲折型。

关键词:混凝土; 断裂荷载; 相对切口深度; 断裂性能; 起裂韧度; 断裂韧度; 双K断裂模型

中图分类号:TV313

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)04-0187-06

The experimental study on the influence of relative notch depth on concrete fracture properties

FU Yu, CHEN Youliang

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the theory of Double-K fracture model, and by using the standard three-point bending concrete specimens, the initial crack load P_{ini} , fracture load P_{max} and critical mouth open displacement ($CMOD$) of five specimens with relative notch depth a_0/h of 0-0.6 were measured in the experiment, and the initial fracture toughness K_{Ic}^{ini} and unstable fracture toughness K_{Ic}^{un} were also calculated. The crack tip and the fracture surface were observed by using a stereomicroscope to investigate the crack development, and the influence of the relative notch depth on the fracture performance of the concrete was analyzed. The results indicate that the larger the relative notch depth is, the earlier the specimen starts cracking, but the ratio of the initial crack load to the fracture load does not change with the increase of the initial seam height a_0 : the initial seam height is linearly related to the effect of initial crack load and fracture load. The initial fracture toughness and unstable fracture toughness did not decrease with the increase of the relative notch depth. The ratio of the two had no obvious change with the change of the relative notch depth, that is, the double-K fracture parameter depends on the inherent characteristics of the material itself and irrelevant to the relative notch depth. The fracture process of concrete is complicated, and there is a significant subcritical expansion stage. The subcritical crack growth appeared a kink path, by passing the aggregate in the process of development.

Key words: concrete; fracture load; relative notch depth; fracture property; initial fracture toughness; unstable fracture toughness; double-K fracture model

1 研究背景

混凝土作为一种多相复合材料,广泛应用于土

木、桥梁、隧道等工程领域。但是它的一个突出问题就是易开裂和脆性断裂^[1]。由于混凝土的非均匀多相性,其内部不可避免会出现空隙、微裂缝等缺

收稿日期:2017-03-28; 修回日期:2017-04-21

基金项目:中国国家留学基金项目

作者简介:傅喻(1992-),女,浙江杭州人,硕士研究生,从事混凝土断裂力学研究。

陷,而且混凝土抗拉强度远小于抗压强度,自身会产生收缩徐变^[2]。这些因素都会导致混凝土裂缝产生,使得实际工程中很多结构都是带裂缝进行工作。为了工程结构的安全性和耐久性,需合理解决混凝土断裂问题,根据其特有材料属性研究其断裂性能。自 Kaplan 首次将断裂力学运用到混凝土中并提出断裂韧度后^[3],针对混凝土自身非线性断裂变形的特点,国内外相关学者提出了许多适用于混凝土材料的非线性断裂模型,如虚拟裂缝模型(FCM)、裂缝带模型(CBM)、双参数断裂模型(TPFM)等^[4-6]。1999 年徐世烺等^[7]提出了双 K 断裂模型(DKFM),用起裂韧度参数和失稳断裂韧度参数控制混凝土断裂过程的 3 个阶段,作为裂缝扩展判断准则^[8]。

双 K 断裂韧度符合混凝土起裂和失稳断裂特征^[9],测定方法简便,所以得到了广泛的认同^[10-11]。目前针对混凝土试件尺寸进行双 K 断裂韧度的研究比较集中,相关研究^[12-14]表明小尺寸混凝土仍须考虑尺寸效应。而运用双 K 理论并结合细观角度对相同尺寸不同切口深度的混凝土的研究相对较少。本文以双 K 断裂模型为理论基础,制备 5 组相对切口深度分别为 0、0.1、0.2、0.4、0.6 的混凝土标准三点弯曲梁试件,通过试验数据实时采集获得试件破坏最大荷载,利用曲线法获得起裂荷载,计算得到临界裂缝口张开位移 *CMOD*、起裂韧度以及断裂韧度,分析相对切口深度对混凝土断裂性能的影响。使用立体显微镜对不同初始裂缝深度试件进行切口尖端裂纹以及断裂面的观察,得到混凝土断裂全过程的内部细观裂纹扩展状态图像,探究混凝土试件的裂缝开展情况,深入认识混凝土断裂行为,对实际工程正确合理应用混凝土具有十分重要的应用价值。

2 试验概况

2.1 试件制备

本次试验采用标准三点弯曲梁试件,试件尺寸 $1 \times b \times h = 400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。原材料为:水

泥采用 42.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料使用最大粒径 20 mm 的石灰石碎石;细骨料采用细度模数 2.8 的普通江砂;高效减水剂的掺量为水泥质量的 1%;加入适量日常饮用水。混凝土拌合物采用搅拌机拌和,台式振动器振捣成型,24h 后拆模,标准条件下 ($20 \pm 3^\circ\text{C}$ 的温度,相对湿度 90% 以上)养护 28 d。测得平均弹性模量 $E = 35.93 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.17$ 。预制裂缝方法采用厚 0.7 mm 钢板,涂上润滑油,于混凝土初凝前插入模具,脱模时取出,形成预制裂缝。分别制备 5 组(每组 5 块,标为 A、B、C、D、E)共 25 块试件,相对切口深度为 0、0.1、0.2、0.4、0.6,试件编号及配合比如表 1 所示。混凝土试件外观图如图 1 所示。

表 1 混凝土配合比及试件编号

试件 编号	混凝土配合比/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)					相对切 口深度
	水泥	石子	砂子	水	减水剂	
0A-E	415	1251	589	166	4.15	0
10A-E	415	1251	589	166	4.15	0.1
20A-E	415	1251	589	166	4.15	0.2
40A-E	415	1251	589	166	4.15	0.4
60A-E	415	1251	589	166	4.15	0.6

2.2 试验方法

三点弯曲试验采用 SANS 微机控制电液伺服压力试验机,试验机的最大荷载为 2 000 kN,如图 2 所示。试验机由电脑控制。首先提升压力试验机底部平台,抬高试验机上压板,将试块放置在试验机下距离为 250 mm 的两个支撑点上,并保证试块水平放置,如图 3 所示。下移上压板使其靠近试块表面,之后开动试验机,上压板将以恒定的速率 50 N/s 自动对混凝土试块施加连续荷载,并自动采集数据,直至试样开裂破坏。荷载传感器自动将数据与电脑对接,实现数据实时自动采集,可直接获得试件破坏时最大荷载 $P_{\max}$ 。用立体显微镜对破坏后的试件裂缝进行观察,以分析混凝土断裂行为以及细观物理力学过程,如图 4 所示。

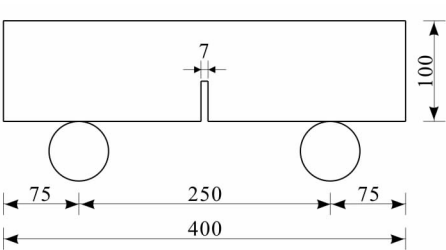


图 1 试块外观图 图 2 SANS 伺服压力试验机 图 3 三点弯曲试件剖面示意图(单位:mm) 图 4 研究级智能立体显微镜

3 试验结果

根据上述试验采集到荷载及位移信息,获得起裂荷载和断裂荷载。采用三点弯曲梁断裂韧度的计算公式,分别计算不同编号混凝土试件的起裂韧度和断裂韧度,剔除其中的失效数据。

3.1 起裂荷载与断裂荷载

由于混凝土裂尖断裂过程区的出现,使试件的荷载-位移曲线上升段出现了非线性区域,其中曲线从线性部分到非线性部分的转折点所对应的荷载便是起裂荷载 $P_{ini}^{[15]}$ 。断裂荷载 P_{max} 由试验数据直接获得。计算得到 P_{ini}/P_{max} ,数据如表 2 所示,试件初始相对切口深度 a_0/h 与其对应 P_{ini},P_{max} 以及 P_{ini}/P_{max} 关系如图 5、6 所示。

由表 2 及图 5 可知,相对切口深度越大,试件起裂越早,起裂荷载越小,开裂荷载也相应越小。起裂荷载均在开裂荷载的 55% ~ 75% 之间。由图 5 可看出, P_{ini} 与 P_{max} 平均值减小幅度趋势接近,即 a_0 对 P_{ini},P_{max} 的影响呈线性相关。图 6 为 P_{ini}/P_{max} 与初始裂缝高度 a_0 关系图,可以看出 P_{ini}/P_{max} 值随 a_0 的增大并无显著下降趋势,整体值均在 0.65 左右。说明当相对切口深度 $a_0/h \leq 0.6$ 时, P_{ini}/P_{max} 值与是否切口以及切口深度无关。

表 2 起裂荷载与断裂荷载

试件 编号	起裂荷载 P_{ini} /kN	开裂荷载 P_{max} /kN	P_{ini}/P_{max}
0A	8.3025	12.4738	0.6656
0B	9.3759	10.7739	0.8702
0C	8.9861	14.6442	0.6136
0D	8.4140	13.3781	0.6289
10A	7.2585	11.0281	0.6582
10B	8.0180	10.7129	0.7484
10C	6.3215	8.7730	0.7206
10D	7.2874	10.8825	0.6697
20A	5.6340	8.2921	0.6794
20B	5.3666	7.8215	0.6861
20C	5.3430	8.4683	0.6309
20D	6.7041	8.7697	0.7645
40A	3.0677	4.1373	0.7415
40B	3.1588	4.9806	0.6342
40C	3.0809	5.4413	0.5662
40D	3.0237	5.0855	0.5946
60A	1.2052	1.5912	0.7574
60B	1.2492	1.7911	0.6974
60C	1.8246	2.6647	0.5679
60D	1.3779	2.2276	0.6611

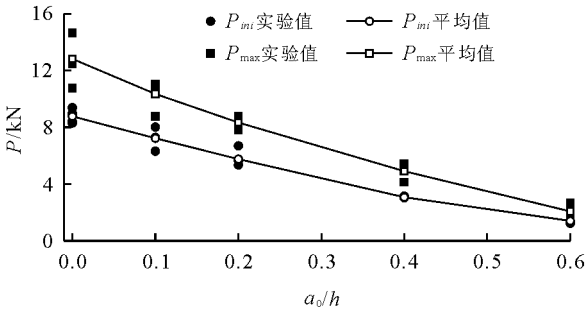


图 5 P_{ini}/P_{max} 与相对切口深度 a_0/h 关系图

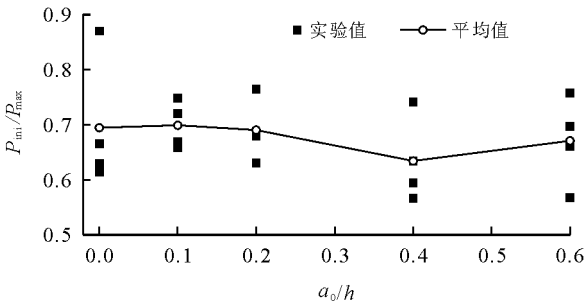


图 6 P_{ini}/P_{max} 相对切口深度 a_0/h 关系图

3.2 起裂韧度和断裂韧度

断裂韧度是反映材料抵抗裂纹扩展即抵抗脆性断裂的能力,是材料的力学性能指标^[16],起裂断裂韧度 K_{Ic}^{ini} 由式(1) 计算:

$$K_{Ic}^{ini} = \frac{3P_{ini}S}{2D^2B} \sqrt{a_0} F_1\left(\frac{a_0}{D}\right) \tag{1}$$

其中函数 $F_1(\frac{a_0}{D})$ 的表达式如下:

$$F_1\left(\frac{a_0}{D}\right) =$$

$$\frac{1.99 - \left(\frac{a_0}{D}\right)\left(1 - \frac{a_0}{D}\right)\left[2.15 - 3.93\frac{a_0}{D} + 2.7\left(\frac{a_0}{D}\right)^2\right]}{\left(1 + 2\frac{a_0}{D}\right)\left(1 - \frac{a_0}{D}\right)^{3/2}} \tag{2}$$

式中: a_0 为初始裂缝长度,mm; S 为试件跨度,mm; B 为试件厚度,mm; D 为试件高度,mm。

将最大荷载 P_{max} ,弹性模量 E 和临界裂缝口张开位移 $CMOD$ 代入式(3) 求得临界等效裂缝长度 a_c :

$$CMOD = \frac{24P_{max}a_c}{BDE} F_2(a_c/D) \tag{3}$$

其中函数 $F_2(a_c/D)$ 的表达式如下:

$$F_2(a_c/D) = 0.76 - 2.28a_c/D + 3.87(a_c/D)^2 - 2.04(a_c/D)^3 + \frac{0.66}{(1 - a_c/D)^2} \quad (4)$$

用 $P_{\max}$ 和 a_c 代替式(1) 的起裂荷载 P_{ini} 和初始

裂缝长度 a_0 , 即获得失稳断裂韧度 K_{Ic}^{un} :

$$K_{Ic}^{un} = \frac{3P_{\max}S}{2D^2B} \sqrt{a_c} F_1\left(\frac{a_c}{D}\right) \quad (5)$$

由以上公式计算得到 K_{Ic}^{ini} 、 K_{Ic}^{un} 、 a_c , 见表 3。

表 3 K_{Ic}^{ini} 、 K_{Ic}^{un} 计算结果					
试件编号	$CMOD / \text{mm}$	a_c / mm	$K_{Ic}^{ini} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{Ic}^{un} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{Ic}^{ini} / K_{Ic}^{un}$
10A	0.0219	20.002	0.7776	1.6390	0.4744
10B	0.0255	23.436	0.8590	1.7430	0.4928
10C	0.0182	20.809	0.6772	1.3324	0.5083
10D	0.0291	25.629	0.7807	1.8731	0.4168
20A	0.0277	31.428	0.8373	1.5868	0.5277
20B	0.0293	31.897	0.7975	1.5802	0.5047
20C	0.0232	33.781	0.7940	1.4734	0.5389
20D	0.0325	31.692	0.9963	1.7625	0.5653
40A	0.0394	48.942	0.7690	1.3477	0.5706
40B	0.0441	47.642	0.7919	1.5586	0.5081
40C	0.0503	48.420	0.7723	1.7440	0.4428
40D	0.0426	46.646	0.7580	1.5440	0.4909
60A	0.0622	71.083	0.5750	1.2450	0.4619
60B	0.0577	68.504	0.5959	1.2311	0.4840
60C	0.0551	62.014	0.7219	1.3763	0.5245
60D	0.0749	69.010	0.7026	1.5762	0.4458

图 7 为各组试件 K_{Ic}^{ini} 、 K_{Ic}^{un} 与相对切口深度 a_0/h 关系图。图 8 为 K_{Ic}^{ini} 、 K_{Ic}^{un} 与相对切口深度 a_0/h 关系图。根据表 3 以及图 7 图 8 可知, 各组试件起裂韧度和失稳韧度随着 a_0 的增大有略微减小的趋势, 但整体值比较稳定, 平均值 K_{Ic}^{ini} 在 0.65 ~ 0.8 之间, K_{Ic}^{un} 在 1.4 ~ 1.65 之间。两者比值 K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{un} 随 a_0/h 也无明显变化, 值在 0.45 ~ 0.55。说明当相对切口深度不大于 0.6 情况下, 混凝土初始裂缝长度 a_0 对其起裂韧度和失稳韧度并无直接影响。说明双 K 断裂参数 K_{Ic}^{ini} 与 K_{Ic}^{un} 是材料本身固有断裂特性的表征, 与切口深度无关。

3.3 细观分析

在立体显微镜下对不同初始裂缝深度试件进行切口尖端裂纹以及断裂面的观察, 运用电镜扫描, 得到试件断裂面细观图与试件切口尖端裂缝细观图如图 9、10 所示, 无切口试件三点弯曲试验后裂纹扩展路径全貌图如图 11 所示。

从图 9 断裂面分析可以看出, 切口尖端裂缝总是会绕开骨料继续扩展。这是由于从起裂到失稳裂缝发展会经历断裂过程区, 该阶段裂纹是稳定发展的, 它会沿着耗散能量较小的方式发展, 所以会寻求骨料与水泥浆的薄弱交界面扩展而不会穿透骨料。因此混凝土断裂时受骨料分布影响, 裂纹总是呈现出不规律的曲折型。

从图 10 中可以看出混凝土的起裂裂缝与扩展裂缝呈现出不规则性以及不连续性。图 10(a) 中可以看到扩展裂缝周围微开裂和表皮剥落现象; 图 10(b)、10(c) 中初始裂缝开展成为扩展裂缝最终导致了试件的破坏, 而图 10(d) 中的扩展裂缝则不是由初始裂缝发展而来, 即初始裂缝并不一定会发展成为扩展裂缝导致混凝土的最终破坏; 裂缝切口尖端为应力集中处, 导致试件破坏的主裂缝都由尖端开始逐渐扩展, 而其余微小裂缝的开展并不一定从尖端开始。

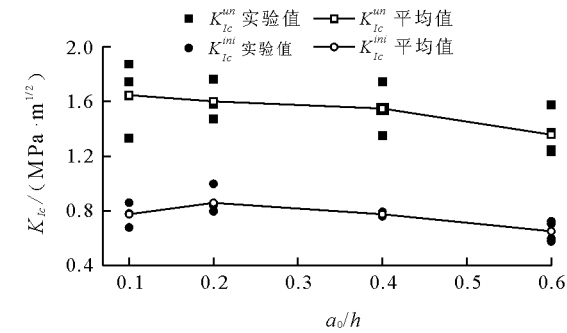


图7 K_{Ic}^{ini} 、 K_{Ic}^{un} 与相对切口深度 a_0/h 关系图

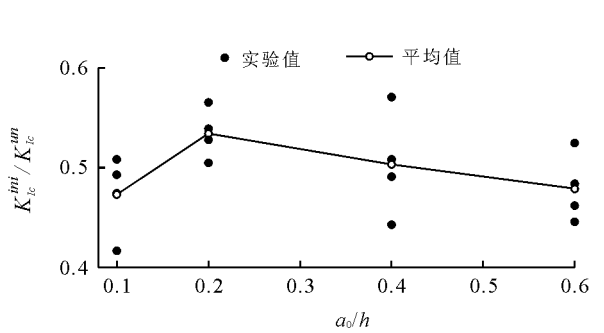


图8 K_{Ic}^{ini} 、 K_{Ic}^{un} 与相对切口深度 a_0/h 关系图

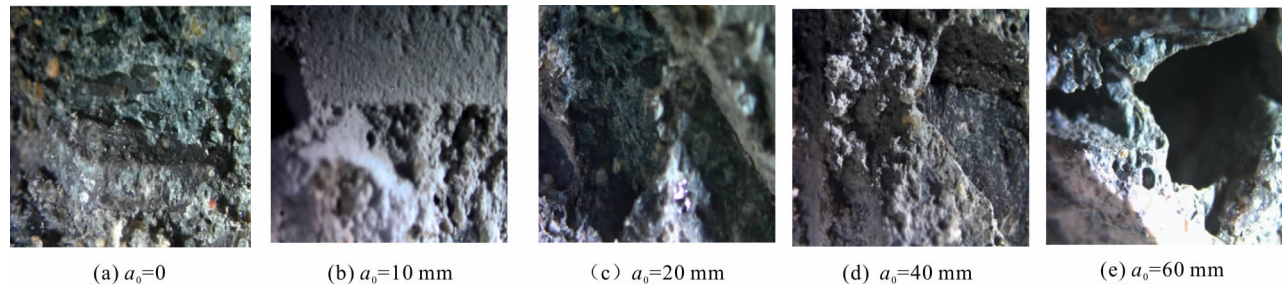


图9 试件断裂面细观图

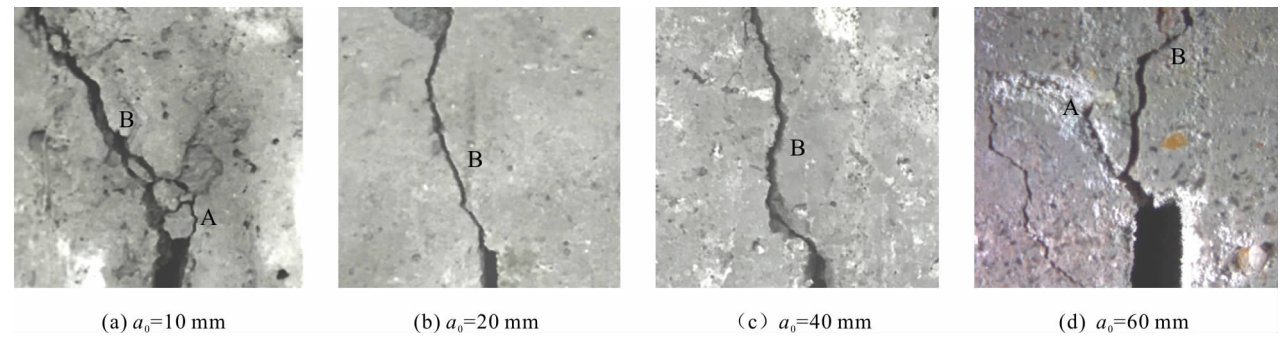


图10 试件切口尖端裂缝细观图(A为起裂裂缝,B为扩展裂缝)

发展过程中还出现穿透骨料现象。整个断裂过程中,裂纹的扩展路径呈现出不规则曲折型。

4 结 论

本文以双K断裂理论为基础,当相对切口深度 a_0/h 为0、0.1、0.2、0.4、0.6的标准三点弯曲混凝土试件进行了试验及细微观研究,得到以下结论:

(1) 相对切口深度越大,则试件起裂越早,起裂荷载越小。 P_{ini}/P_{max} 值随 a_0 的增大并无显著下降趋势,整体值均在0.65左右。当初始缝高比 $a_0/h \leq 0.6$ 时, P_{ini}/P_{max} 值不随 a_0 的增大而变化, a_0 对 P_{ini} 、 P_{max} 的影响呈线性相关。

(2) 起裂韧度 K_{Ic}^{ini} 平均值在0.65 ~ 0.80之间,失稳韧度 K_{Ic}^{un} 在1.40 ~ 1.65之间,随着 a_0 的增大有略微减小的趋势,但整体值比较稳定。两者比值



图11 无切口试件裂纹扩展全貌图

通过试验并结合图10、11可以发现,试件在失稳破坏前存在着明显的稳定扩展阶段,即亚临界扩展阶段。该阶段裂纹尖端微裂区扩展沿着材料薄弱面展开,绕开骨料且发展比较平缓,不断有微裂缝的产生接之闭合。而进入失稳阶段后,裂纹扩展加剧,

K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{un} 随相对切口深度 a_0/h 也无明显变化,在 $0.45 \sim 0.55$ 。当 a_0/h 不大于 0.6 情况下,混凝土初始裂缝长度 a_0 对其起裂韧度和失稳韧度并无直接影响。说明双 K 断裂参数是描述材料本身固有断裂特性的材料表征,与切口深度无关。

(3) 断裂过程中扩展裂缝并不一定由初始裂缝发展而来。混凝土在失稳破坏前存在着明显的亚临界扩展阶段,该阶段裂纹绕开骨料平稳发展。进入失稳阶段后,裂纹扩展加剧。整个断裂过程中,裂纹的扩展路径呈现出不规则的曲折型。

参考文献:

- [1] 张廷毅,高丹盈,郑光和,等. 三点弯曲下混凝土断裂韧度及影响因素[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 601 - 607.
- [2] 朱榆. 混凝土断裂及阻裂理论的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
- [3] 邵若莉. 混凝土断裂能和双 K 断裂参数的试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [4] 钟小青. 基于双 K 断裂理论的混凝土性能试验研究与分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
- [5] 徐世烺,赵艳华. 混凝土裂缝扩展的断裂过程准则与解析[J]. 工程力学, 2008, 25(S2): 20 - 33.
- [6] 范向前,胡少伟,陆俊,等. 不同类型混凝土断裂特性研究[J]. 混凝土, 2012(3): 46 - 51.

- [7] Xu Shiliang, Zhao Yanhua, Wu Zhimin. Study on the average fracture energy for crack propagation in concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2006, 18(6): 817 - 824.
- [8] 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.
- [9] 黄焕谦,吕黄,胡若邻. 混凝土双 K 断裂韧度的尺寸效应[J]. 混凝土, 2010(2): 7 - 9 + 13.
- [10] 荣华. 混凝土裂缝扩展过程中断裂过程区的特性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [11] 徐世烺,周厚贵,高洪波,等. 各种级配大坝混凝土双 K 断裂参数试验研究——兼对《水工混凝土断裂试验规程》制定的建议[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11): 50 - 62.
- [12] 胡少伟,安康. 不同尺寸混凝土三点弯曲梁试件断裂过程试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 120 - 125.
- [13] 李晓东,董伟,吴智敏,等. 小尺寸混凝土试件双 K 断裂参数试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 166 - 171.
- [14] 胡若邻,黄培彦,周绪平. 砼断裂韧度尺寸效应的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 47 - 51.
- [15] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [16] 安康,胡少伟. 双裂缝混凝土试件断裂过程试验研究[J]. 低温建筑艺术, 2014, 36(2): 5 - 8.

(上接第 186 页)

参考文献:

- [1] 商怀帅,欧进萍,宋玉普. 混凝土结构冻融损伤理论及冻融可靠度分析[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 70 - 74.
- [2] 王立久,汪振双,崔正龙. 基于冻融损伤抛物线模型的再生混凝土寿命预测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(1): 27 - 33.
- [3] 刘西拉,唐光普. 现场环境下混凝土冻融耐久性预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2412 - 2419.
- [4] 余红发,孙伟,麻海燕,等. 冻融和腐蚀因素作用下混凝土的损伤劣化参数分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 1 - 8.
- [5] 冀晓东,宋玉普,刘建. 混凝土冻融损伤本构模型研究[J]. 计算力学学报, 2011, 28(3): 461 - 467.
- [6] 程红强,高丹盈. 聚丙烯纤维混凝土冻融损伤试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(S2): 197 - 200.
- [7] 刘大鹏,霍俊芳. 纤维轻骨料混凝土冻融损伤模型研究

- [J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(3): 568 - 571.
- [8] 刘卫东,苏文梯,王依民. 冻融循环作用下纤维混凝土的损伤模型研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 124 - 128.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ55 - 2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50082 - 2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [11] Collins A R. Influence of minimum temperature on the scaling resistance of concrete[J]. Stockholm: Swedish National Testing and Research Institute, 1994.
- [12] 刘崇熙,汪在芹. 坝工混凝土耐久寿命的衰变规律[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(2): 18 - 21.
- [13] 关宇刚,孙伟,缪昌文. 基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型 I: 模型阐述和建立[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(6): 530 - 534.