

文章编号: 1000-4750(2012)01-0162-06

大初始缝高比混凝土试件 双 K 断裂参数的试验研究

荣 华, 董 伟, 吴智敏, 范兴朗

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁, 大连 116024)

摘 要: 双 K 断裂准则能够定量描述混凝土裂缝的起裂、稳定扩展和失稳断裂。该文采用混凝土三点弯曲梁试件, 通过在试验中测得的起裂荷载 P_{ini} 、最大荷载 P_{max} 及临界裂缝口张开位移 $CMOD_C$ 计算了初始缝高比为 0.3~0.9 共 7 组试件的起裂断裂韧度 K_{IC}^{ini} 和失稳断裂韧度 K_{IC}^{un} 。结果表明, 当初始缝高比为 0.3~0.7 时, 混凝土裂缝扩展经历起裂、稳定扩展和失稳破坏 3 个阶段, 双 K 参数均是与初始缝高比无关的材料参数; 当初始缝高比大于或等于 0.8 时, 混凝土裂缝起裂后便进入失稳扩展阶段, 起裂荷载即为最大荷载, 且计算得到的 K_{IC}^{un} 仍与初始缝高比无关。因此, 在确定 K_{IC}^{un} 时, 仅需测得初始缝高比大于或等于 0.8 试件的 P_{max} , 将 P_{max} 作为 P_{ini} 直接计算得到 K_{IC}^{un} 。同以往的试验方法相比, 其结果更为准确且试验方法简单。

关键词: 混凝土; 初始缝高比; 起裂荷载; 裂缝扩展; 双 K 断裂参数

中图分类号: TU37 **文献标志码:** A

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DOUBLE- K FRACTURE PARAMETERS FOR LARGE INITIAL CRACK-DEPTH RATIO IN CONCRETE

RONG Hua, DONG Wei, WU Zhi-min, FAN Xing-lang

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The fracture process including crack initiation, stable crack propagation and unstable fracture in concrete can be described quantitatively by the double- K fracture criterion. In this paper, the three-point bending concrete beam specimens are classified in 7 groups, with the initial crack-depth ratios set from 0.3 to 0.9, respectively. The initial fracture toughness K_{IC}^{ini} and unstable fracture toughness K_{IC}^{un} are calculated from the initial load P_{ini} , the maximum load P_{max} and critical crack mouth open displacement $CMOD_C$. The results indicate that if the initial crack-depth ratios are between 0.3 and 0.7, the concrete crack propagation process will go through crack initiation, crack propagation and unstable fracture, and the double- K fracture parameters are independent of an initial crack-depth ratio. If the initial crack-depth ratio is greater than 0.8, the concrete crack enters the stage of unstable fracture when initial cracking happens, and the initial load is equal to the maximum load, and K_{IC}^{un} is still independent of an initial crack-depth ratio. Therefore, K_{IC}^{un} can be calculated from P_{ini} , which equals to P_{max} when the initial crack-depth ratio equals to or greater than 0.8. Compared to the previous method, the results are more accurate, and the test method is simpler.

Key words: concrete; initial crack-depth ratio; initial load; crack propagation; double- K fracture parameters

收稿日期: 2010-04-29; 修改日期: 2010-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878036, 51109026)

通讯作者: 董 伟(1978—), 男, 盘锦人, 讲师, 博士, 国家一级注册结构师, 从事混凝土断裂力学研究(E-mail: dlutdw@yahoo.com.cn).

作者简介: 荣 华(1985—), 女(满族), 葫芦岛人, 博士生, 从事混凝土断裂力学研究(E-mail: ronghuakeke@163.com);

吴智敏(1963—), 男, 仙居人, 教授, 博士, 从事混凝土断裂力学及结构加固理论的研究(E-mail: zhiminwu2002@yahoo.com.cn);

范兴朗(1983—), 男, 温州人, 博士生, 从事混凝土断裂力学研究(E-mail: xlfan1983@126.com).

混凝土作为一种准脆性材料,其破坏与断裂机理非常复杂。关于混凝土断裂模型的研究,众多学者做了大量工作。目前国内外常用的混凝土断裂模型主要有 Hillerborg^[1]的虚拟裂缝模型(FCM)、Bažant^[2]的裂缝带模型(CBD)、Jeng 和 Shah^[3]的双参数模型(TPFM)、Refai 与 Swart^[4]和 Kalihallo^[5]等提出的等效裂缝模型(ECM)等。文献[6]在大量试验观测的基础上提出了双 K 断裂准则,将起裂断裂韧度 K_{IC}^m 和失稳断裂韧度 K_{IC}^c 作为混凝土的断裂参数。 K_{IC}^m 可通过在试验中测得混凝土试件的 P_{ini} ,再根据应力强度因子公式计算得到。起裂荷载 P_{ini} 可用光弹贴片法^[7]、激光散斑法^[8]、超声波法^[9]测定,但这种方法对试验技术及设备条件的要求都较高,试验过程复杂,在普通实验室很难实现。目前应用较多的是电阻应变片法^[10],该方法根据 $P-\varepsilon$ 曲线中发生应变滞回现象确定 P_{ini} 。

有关不同初始缝高比混凝土试件双 K 参数的尺寸效应问题,学者们进行了大量的试验研究。文献[11]采用尺寸为 $400\text{mm}\times 400\text{mm}\times 200\text{mm}$,初始缝高比为 0.2、0.4、0.5、0.6 的四组楔入劈拉试件研究了初始缝高比对双 K 断裂参数的影响,利用在试验中测得的最大荷载 P_{max} 及对应的裂缝口张开位移 $CMOD_C$,计算了双 K 断裂参数。结果表明在此初始缝高比范围内,双 K 断裂参数是与初始缝高比无关的材料参数。文献[12]依据了试件尺寸为 $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 100\text{mm}$,初始缝高比为 0.3~0.6 的四组楔入劈拉试件测得的 $P-COD$ 曲线数据,计算了四组试件的双 K 断裂参数,结果表明初始缝高比对双 K 断裂参数的影响较小。文献[13]采用试件尺寸为 $800\text{mm}\times 200\text{mm}\times 200\text{mm}$,初始缝高比为 0.2~0.6 的三点弯曲梁,和试件尺寸为 $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 200\text{mm}$,初始缝高比为 0.2~0.7 的楔入劈拉试件进行试验研究,分别计算了两种试件型式在不同初始缝高比时的双 K 断裂参数,得到双 K 断裂参数对初始缝高比不敏感的结论。

上述文献中有关双 K 参数的研究,初始缝高比主要设定在 0.2~0.6,在此范围内初始缝高比对双 K 参数的影响不大。然而,对初始缝高比大于 0.7 时双 K 参数的研究,所做工作较少。针对这一问题,本文采用尺寸为 $360\text{mm}\times 80\text{mm}\times 40\text{mm}$,初始缝高比为 0.3~0.9 的标准三点弯曲梁试件,计算了不同初始缝高比混凝土的双 K 参数,分析了初始缝高比对双 K 参数的影响。根据本文的研究成果,只需测

量初始缝高比等于 0.8 试件的 P_{max} ,即可将其作为 P_{ini} 直接计算得到 K_{IC}^m 。

1 试验研究

1.1 试件制作及材料参数

本文采用标准三点弯曲梁试件,如图 1 所示。试件尺寸为 $l\times h\times t=320\text{mm}\times 80\text{mm}\times 40\text{mm}$,设计了初始缝高比 $a_0=0.3\sim a_0=0.9$ 共 7 组试件。

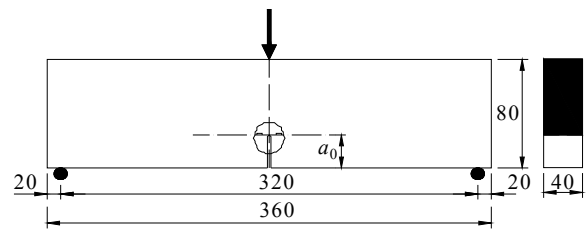


图 1 标准三点弯曲梁试件示意图

Fig.1 Sketch of the standard three-point bending beams

试件混凝土所用材料为大连产河砂;石灰岩碎石,最大骨料粒径为 10mm;325#普通硅酸盐水泥。混凝土配合比为水泥:水:砂子:石子=1:0.48:1.33:2.47。浇筑时用厚 2mm 的钢板预制裂缝,浇筑后约 3h 抽出钢板,试件养护 28d。试验时测得混凝土立方体抗压强度为 46.8MPa,弹性模量为 36.7GPa。

1.2 起裂荷载的测量

本文采用电阻应变片法测起裂荷载,所用应变片标距为 10mm,裂缝尖端应变片具体布置方式如图 2 所示。

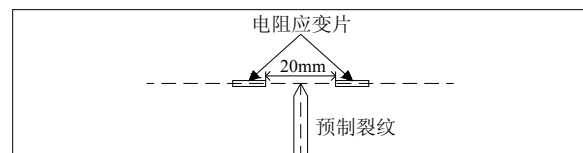


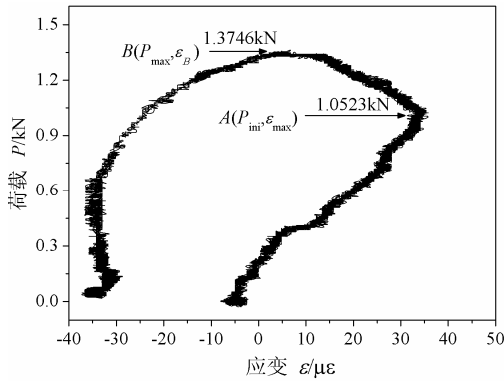
图 2 裂缝尖端应变片布置示意图

Fig.2 Sketch of strain gauges on the tip of crack

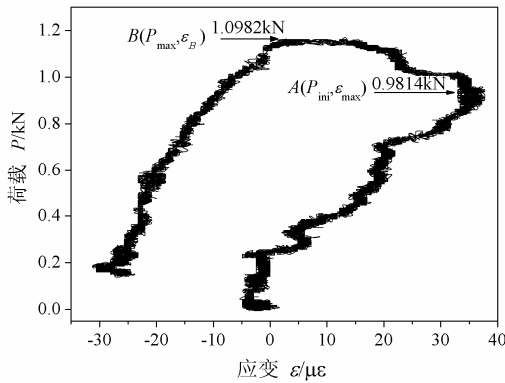
起裂前,在较低荷载作用下预制裂缝尖端混凝土只产生弹性变形,此时应变片所反映的荷载-应变($P-\varepsilon$)关系基本是线性的。当荷载继续增加,预制裂缝尖端由于应力高度集中而开裂。这时,随着微裂缝的产生,初始裂缝尖端两侧混凝土应变能得到释放,混凝土应变产生回缩,在 $P-\varepsilon$ 曲线上表现为其应变达到最大值时出现折回,随后应变值开始减小,而该应变转折点所对应的荷载即为起裂荷载 P_{ini} 。试验中为了准确捕捉应变开始回缩时刻,每个试件在其较光滑一面的预制裂缝尖端以初始裂缝为中轴线左右两侧 10mm 处各布置一个电阻应变

片。图 3 即是初始缝高比分别为 0.3~0.8 的 6 个试件对应的荷载-应变(P - ε)曲线, 图 3 中 A 点处即是根据上述方法得到的起裂点位置, 其对应的荷载即是起裂荷载值 P_{ini} 。

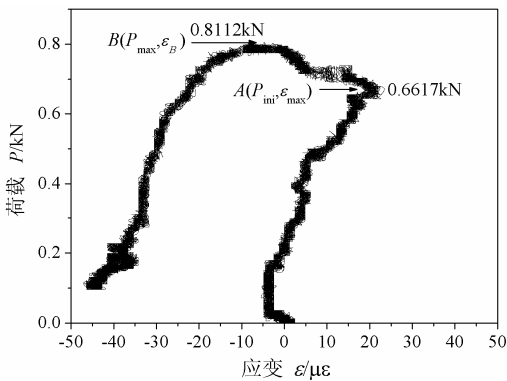
图 3 中 P - ε 曲线的 B 点处是试件的断裂失稳点, 对应最大荷载值 P_{max} 。所有试件测得的 P_{ini} 、 P_{max} 、 $CMOD_C$ 值列于表 1。初始缝高比为 0.9 的试件因其韧带较短, 对试件制作工艺要求较高, 故试验中只测得一个试件的数据; 同时因其峰值荷载较小, P - ε 曲线上升段和下降段基本重合而不易分辨, 故未列出其 P - ε 曲线。



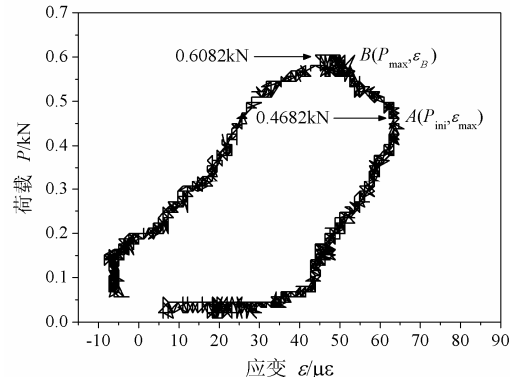
(a) 试件 TPB24-4($a_0/h=0.3$)



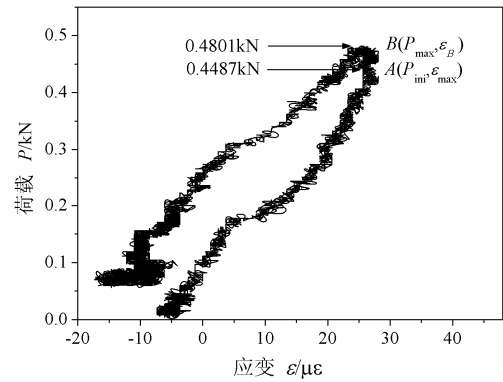
(b) 试件 TPB32-2($a_0/h=0.4$)



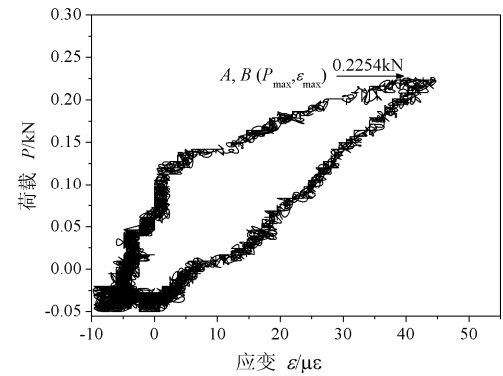
(c) 试件 TPB40-2($a_0/h=0.5$)



(d) 试件 TPB48-1($a_0/h=0.6$)



(e) 试件 TPB56-3($a_0/h=0.7$)



(f) 试件 TPB64-1($a_0/h=0.8$)

图 3 不同初始缝高比试件的 P - ε 曲线

Fig.3 The P - ε curves of specimens with different initial crack-depth ratios

表 1 起裂荷载及峰值荷载值
Table 1 The values of P_{ini} and P_{max}

试件编号	a_0/h	$CMOD_C/mm$	P_{ini}/N	P_{max}/N	P_{ini}/P_{max}	P_{ini}/P_{max} 均值
TPB24-1		0.0414	1160.1	1409.6	0.8229	
TPB24-2	0.3	0.0450	1136.3	1513.9	0.7506	0.8050
TPB24-3		0.0399	1219.7	1398.4	0.8812	
TPB24-4		0.032	1052.3	1374.6	0.7655	

(续表)

试件编号	a_0/h	$CMOD_C/mm$	P_{ini}/N	P_{max}/N	P_{ini}/P_{max}	P_{ini}/P_{max} 均值
TPB32-1		0.0436	1008.2	1334.9	0.7551	
TPB32-2	0.4	0.0444	981.4	1098.2	0.8936	0.8098
TPB32-3		0.0432	971.0	1184.0	0.8201	
TPB32-4		0.0503	948.1	1230.7	0.7704	
TPB40-1	0.5	0.0530	754.2	886.1	0.8511	0.8334
TPB40-2		0.0572	661.7	811.2	0.8157	
TPB48-1		0.0600	468.2	608.2	0.7698	
TPB48-2	0.6	0.0548	504.8	609.6	0.8281	0.8015
TPB48-3		0.0524	445.25	552.22	0.8067	
TPB56-1		0.0841	441.3	475.6	0.9279	
TPB56-2	0.7	0.0806	386.7	426.6	0.9065	0.9371
TPB56-3		0.0905	448.7	480.1	0.9328	
TPB56-4		0.0774	424.5	416.5	0.9812	
TPB64-1	0.8	0.0913	225.4	225.4	1.000	1.000
TPB64-2		0.1200	202.9	202.9	1.000	
TPB72-1	0.9	0.2310	79.9	79.9	1.000	1.000

注:表 1 中试件编号栏中 TPBaa-b 的含义: TPB 为三点弯曲梁试件, aa 为初始缝长, b 为试件编号。

2 试验结果

2.1 试验现象

图 3 中 A 点对应于试件预制裂缝尖端的起裂时刻, A 点对应的荷载值为试件的起裂荷载, 对应的应变值是应变片所在测点在整个加载过程中所能达到的最大值, 记为 ϵ_{max} 。过了 A 点后预制裂缝尖端两侧混凝土应变能得到释放, 应变产生回缩。图 3 中 B 点为试件的峰值荷载点, 该点是裂纹失稳扩展的临界点, 对应的应变值 ϵ_B 小于 A 点的应变值 ϵ_{max} 。此外, 当试件的初始缝高比为 0.3 时, $P_{ini}=0.76P_{max}$; 当试件的初始缝高比为 0.5 时, $P_{ini}=0.82P_{max}$; 而当初试件的始缝高比增至 0.7 时, P_{ini} 趋近于 P_{max} 并达到 $P_{ini}=0.94P_{max}$ 。但是, 当初始缝高比为 0.8 时, 从图 3(f)中可见 A、B 两点对应的应变值都为 ϵ_{max} , 此时 ϵ_{max} 对应 P_{max} , A、B 两点重合, 即 $P_{ini}=P_{max}$ 。

图 4 是初始缝高比为 0.3~0.9 每组试件 $(P_{max}-P_{ini})/P_{max}$ 的平均值随 a_0/h 变化的关系曲线。

图 4 中可见, 当 $0.3 \leq a_0/h \leq 0.6$, $(P_{max}-P_{ini})/P_{max}$ 基本不随初始缝高比的变化而变化; 当 $a_0/h=0.7$ 时, $(P_{max}-P_{ini})/P_{max}$ 值有明显减小趋势; 当 $a_0/h=0.8、0.9$ 时, $(P_{max}-P_{ini})/P_{max}=0$ 即 $P_{ini}=P_{max}$ 。

2.2 双 K 参数的计算

1) 失稳断裂韧度 K_{IC}^m 的确定。

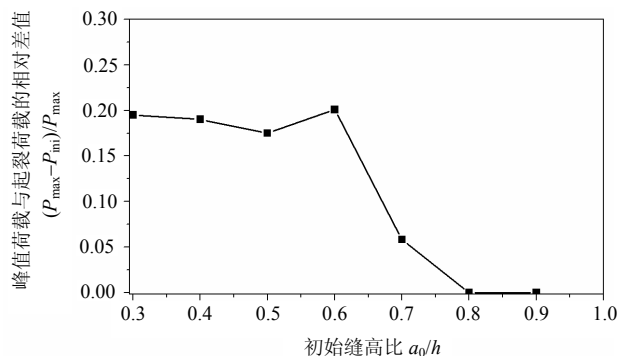


图 4 $(P_{max}-P_{ini})/P_{max}$ 与试件初始缝高比的关系曲线

Fig.4 The variation of $(P_{max}-P_{ini})/P_{max}$ with initial crack-depth ratios

根据线性渐近叠加原理, 将试验测得 P_{max} 和 $CMOD_C$ 代入式(1)计算得临界裂缝长度:

$$a_c = \frac{2}{\pi} (h+H_0) \arctan \sqrt{\frac{tE}{32.6P_{max}} CMOD_C - 0.1135 - H_0} \quad (1)$$

式中: H_0 为刀口厚度; h 为梁高; t 为梁厚; E 为弹性模量; a_c 为临界裂缝长度。该公式适用于跨高比等于 4 的标准三点弯曲梁, 当 $0.2 \leq a/h \leq 0.75$ 时公式误差小于 2%; $0.75 \leq a/h \leq 0.8$ 时, 公式最大误差小于 3.5%^[14]。

把 P_{max} 和 a_c 代入式(2), 计算得 K_{IC}^m :

$$K_I = \frac{3Ps}{2h^2t} \sqrt{a} F_1 \left(\frac{a}{h} \right) \quad (2)$$

$$F_1 \left(\frac{a}{h} \right) = \frac{1.99 - a/h(1-a/h)[(2.15 - 3.93a/h + 2.7(a/h)^2]}{(1+2a/h)(1-a/h)^{3/2}} \quad (3)$$

S 为梁的跨度, Srawley^[15]指出, 式(3)在 $0 < a/h < 1$ 范围内, 其误差小于 0.2%。

2) 起裂断裂韧度的确定。

将实测的 P_{ini} 和预制缝长 a_0 代入式(2)得:

$$K_{IC}^{ini} = \frac{3P_{ini}S}{2h^2t} \sqrt{a_0} F_1 \left(\frac{a_0}{h} \right) \quad (4)$$

式中, 函数 $F_1(a_0/h)$ 由 a_0 代入式(3)得到。

当 $a_0/h \geq 0.8$ 时, 从试验结果得到 $P_{ini}=P_{max}$, 可以推出裂缝亚临界扩展长度值等于零, 即 $a_0=a_c$, 把 (P_{ini}, a_0) 和 (P_{max}, a_c) 分别代入 K_{IC}^{ini} 和 K_{IC}^m 的计算公式, 可得 $K_{IC}^{ini}=K_{IC}^m$ 。将试验测得的 P_{ini} 、 P_{max} 、 $CMOD_C$ 、 E 等参数代入上述计算公式, 计算得到 K_{IC}^{ini} 和 K_{IC}^m 值列于表 2。

表 2 a_c 、 K_{IC}^{ini} 和 K_{IC}^{un} 的计算结果

Table 2 The calculated results of a_c , K_{IC}^{ini} and K_{IC}^{un}

试件编号	a_0/h	a_c/mm	a_c/h	$K_{IC}^{ini}/(MPa \cdot m^{1/2})$	$K_{IC}^{un}/(MPa \cdot m^{1/2})$
TPB24-1		41.47	0.5184	0.6239	1.4475
TPB24-2	0.3	41.65	0.5206	0.6112	1.5662
TPB24-3		41.04	0.5130	0.6560	1.4104
TPB24-4		38.30	0.4788	0.5660	1.2433
TPB32-1		42.96	0.5370	0.7064	1.4590
TPB32-2	0.4	45.89	0.5736	0.6876	1.3661
TPB32-3		44.51	0.5564	0.6804	1.3843
TPB32-4		46.04	0.5755	0.6443	1.5418
TPB40-1	0.5	50.93	0.6366	0.7100	1.4120
TPB40-2		52.90	0.6612	0.6300	1.4397
TPB48-1		56.61	0.7076	0.6243	1.3508
TPB48-2	0.6	55.62	0.6953	0.6731	1.2715
TPB48-3		56.21	0.7026	0.5998	1.20
TPB56-1		62.11	0.7764	0.9128	1.5870
TPB56-2	0.7	62.65	0.7831	0.7999	1.4913
TPB56-3		62.61	0.7826	0.9281	1.6766
TPB56-4		62.36	0.7795	0.878	1.4474
TPB64-1	0.8	64	1.0000	0.8609	0.8609
TPB64-2		64	1.0000	0.7750	0.7750
TPB72-1	0.9	72	1.0000	0.8703	0.8703

图 5 为混凝土 K_{IC}^{ini} 及 K_{IC}^{un} 随试件初始缝高比变化的关系曲线。由图 5 可见, $0.3 \leq a_0/h \leq 0.7$ 时, K_{IC}^{ini} 和 K_{IC}^{un} 均与初始缝高比无关; $0.7 < a_0/h < 0.8$ 时, K_{IC}^{un} 有明显减小趋势, 最后 K_{IC}^{ini} 线与 K_{IC}^{un} 线相交于一点。当 $a_0/h > 0.8$ 时, $K_{IC}^{un} = K_{IC}^{ini}$ 。由图 5 可见, K_{IC}^{ini} 在 $0.3 \leq a_0/h \leq 0.9$ 的范围内是与初始缝高比无关的材料参数。分析失稳断裂初度 K_{IC}^{un} 减小的原因是由于试件后边界的约束效应, 当裂缝扩展到试件后边界的影响范围时, 后边界的约束作用使混凝土断裂过程区的长度和高度均减小, 进而混凝土在失稳扩展前的亚临界扩展量逐渐减小, 直至减小到零, 而后不再变化。而 K_{IC}^{ini} 之所以没有受到试件边界效应的影响, 是因为 K_{IC}^{ini} 是混凝土材料在裂缝开展前抵抗

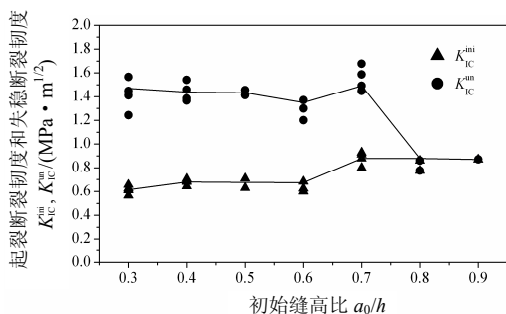


图 5 K_{IC}^{ini} 、 K_{IC}^{un} 与试件初始缝高比的关系曲线
Fig.5 The variation of K_{IC}^{ini} and K_{IC}^{un} with initial crack-depth ratios

外力的能力, 当 $K = K_{IC}^{ini}$ 时裂缝才开始稳定扩展, 断裂过程区逐渐形成, 故裂缝断裂过程区的尺寸变化对 K_{IC}^{ini} 没有产生明显的影响。

2.3 不同初始缝高比时的裂缝扩展过程

由试验结果分析可得, 随着初始缝高比的增大, 混凝土裂缝的扩展过程发生了变化。当 $0.3 \leq a_0/h \leq 0.7$ 时, 试件裂缝的扩展可分为 3 个明显不同的阶段: 当 $K = K_{IC}^{ini}$ 时, 初始裂缝起裂; 当 $K_{IC}^{ini} \leq K \leq K_{IC}^{un}$ 时, 裂缝稳定扩展; 当 $K > K_{IC}^{un}$ 时, 裂缝失稳破坏。当 $a_0/h \geq 0.8$ 时, 试验测得的 P_{max} 与 P_{ini} 相等, 计算可得到 $K_{IC}^{ini} = K_{IC}^{un}$, 裂缝起裂后直接进入失稳扩展阶段。因此, 当 $a_0/h \geq 0.8$ 时, 在试验中只需测得试件的最大荷载 P_{max} , 把 (P_{max}, a_0) 代入式(2), 计算就可得到 K_{IC}^{ini} 。

2.4 测量 P_{ini} 新的试验方法

以往测定试件的 P_{ini} 多采用激光散斑、光弹贴片、电阻应变片等测量技术, 这些方法需要大量的前期准备工作, 同时受试件表面粗糙程度等因素的影响, 得到的测量结果难以反映材料真实的起裂状态。而根据本文的研究, 当 $a_0/h \geq 0.8$ 时, $P_{ini} = P_{max}$ 。因此, 可直接测定 $a_0/h = 0.8$ 试件的最大荷载, 即为起裂荷载, 进而把 (P_{max}, a_0) 代入到式(2), 计算混凝土材料的 K_{IC}^{ini} 。与以往测量 P_{ini} 的试验方法相比, 该方法操作简单, 很大程度上简化了试验过程, 并得到更为准确的测量结果。

3 结论

本文通过对初始缝高比为 0.3~0.9 的三点弯曲梁试件的试验研究和双 K 断裂参数的计算分析, 可以得到如下主要结论:

- (1) 当 $0.3 \leq a_0/h \leq 0.7$ 时, 混凝土裂缝的扩展过程经历初始裂缝起裂、稳定扩展和失稳破坏 3 个阶段; 当 $a_0/h \geq 0.8$ 时, 亚临界扩展长度为零, 裂缝起裂后直接进入失稳扩展阶段。
- (2) 起裂断裂初度 K_{IC}^{ini} 在 $0.3 \leq a_0/h \leq 0.9$ 的范围内, 是与初始缝高比无关的材料参数; 当 $0.3 \leq a_0/h \leq 0.7$ 时, 初始缝高比对 K_{IC}^{un} 影响不大。
- (3) 当 $a_0/h \geq 0.8$ 时, $P_{ini} = P_{max}$, 因此可直接测定 $a_0/h = 0.8$ 试件的最大荷载, 即为起裂荷载, 进而计算 K_{IC}^{ini} 。该方法操作简单, 测量结果准确, 但对试件制作要求较高。

参考文献:

- [1] Hillerborg A, Modéer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773—782.
- [2] Bažant Z P, Oh B H. Crack band theory for fracture of concrete [J]. Materials and Structures, 1983, 16(3): 155—177.
- [3] Jeng Y S, Shah S P. Two parameter fracture model for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(10): 1227—1241.
- [4] Refai T M E, Swart S E. Fracture behavior of concrete beams in three-point bending considering the influence of size effects [R]. Kansas State University Engineering Experiments Station, Report No.190, 1987.
- [5] Karihaloo B L, Nallathambi P. An improved effective crack model for the determination of fracture toughness of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1989, 19(4): 603—610.
- [6] 徐世焱, 赵国藩. 混凝土结构裂缝扩展的双 K 断裂准则[J]. 土木工程学报, 1992, 25(2): 32—38.
Xu Shilang, Zhao Guofan. A double- K fracture criterion for the crack propagation in concrete structures [J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(2): 32—38. (in Chinese)
- [7] 吴智敏, 徐世焱, 刘佳毅. 光弹贴片法研究混凝土裂缝扩展过程及双 K 断裂参数的尺寸效应[J]. 水利学报, 2001, 32(4): 34—39.
Wu Zhimin, Xu Shilang, Liu Jiayi. Study on crack propagation process of concrete and size effect of double- K fracture parameter by means of photoelastic coatings [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(4): 34—39. (in Chinese)
- [8] 徐世焱, 赵国藩. 混凝土裂缝的稳定扩展过程与临界裂缝尖端张开位移[J]. 水利学报, 1989, 20(4): 33—44.
Xu Shilang, Zhao Guofan. The stable propagation of crack in concrete and the determination of critical crack tip opening displacement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 20(4): 33—44. (in Chinese)
- [9] 张明剑, 叶见曙, 赵新铭. 混凝土梁起裂荷载确定的试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(增刊): 295—298.
Zhang Mingjian, Ye Jianshu, Zhao Xinming. Experimental study on the damage and fracture characteristics of notched concrete beams [J]. Industrial Construction, 2006, 36(Supplement): 295—298. (in Chinese)
- [10] 李晓东, 董伟, 吴智敏, 常清睿. 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, 185.
Li Xiaodong, Dong Wei, Wu Zhimin, Chang Qingrui. Experimental investigation on double- K fracture parameters for small size specimens of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2): 166—171, 185. (in Chinese)
- [11] 吴智敏, 徐世焱, 卢喜经, 刘毅. 试件初始缝高比对混凝土双 K 断裂参数的影响[J]. 水利学报, 2000, 31(4): 35—39.
Wu Zhimin, Xu Shilang, Lu Xijing, Liu Yi. Influence of specimen initial crack length on double- K fracture parameter of concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(4): 35—39. (in Chinese)
- [12] Xu Shilang, Reinhardt H W. Determination of double- K criterion for crack propagation in quasi-brittle materials part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 179—193.
- [13] Xu Shilang, Reinhardt H W, Wu Zhimin, Zhao Yanhua. Comparison between the double- K fracture model [J]. Otto Graf Journal, 2003, 24: 131—157.
- [14] Xu Shilang, Reinhardt H W. A simplified method for determining double- K fracture parameters for three-point bending tests [J]. International Journal of Fracture, 2000, 104(2): 181—209.
- [15] Srawley J E, Grass B. Stress intensity factors for bend and compact specimens [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1972, 4(3): 587—589.