

# 裂纹尺寸对混凝土断裂韧度的影响

郑如杰, 毕贤顺

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 利用断裂力学方法对含有裂纹混凝土试件的断裂韧度进行了研究。通过预制不同裂纹深度的混凝土试件, 采用三点弯曲试验方法对含裂纹混凝土梁的断裂韧度进行实验, 同时利用 ABAQUS 软件, 采用最大主应力牵引损伤开裂准则与线性软化损伤模型进行数值模拟。结果表明, 实验结果和数值模拟比较一致, 最大误差不超过 15%, 当初始缝纹长度为 40~120 mm 时, 起裂断裂韧度  $K_{IC}^{ini}$  变化幅度较小, 失稳断裂韧度  $K_{IC}^{un}$  有明显的减小趋势。

**关键词:** 混凝土; 数值模拟; 三点弯曲试验; 裂纹; 断裂韧度

**中图分类号:** TU37

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2017)03-0224-05

## Effect of crack size on the fracture toughness of concrete

Zheng Rujie, Bi Xianshun

(College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The fracture toughness of concrete specimen with cracks was studied via fracture mechanic method. Through precasting concrete specimens of different crack depths, three-point bending test method was employed to study the fracture toughness of the concrete beam with cracks. Meanwhile, the maximum principal stress damage and fracture criterion and linear softening damage model in the ABAQUS software were adopted to conduct the experiment. The results show that the numerical simulation result is in agreement with the experimental result with the largest difference being less than 10%, that when the initial crack length is within 40mm and 120mm, the initial fracture toughness  $K_{IC}^{ini}$  has little change while the unstable fracture toughness  $K_{IC}^{un}$  is in an obvious decreasing trend.

**Keywords:** concrete; numerical simulation; three-point bending test; crack; fracture toughness

20 世纪 60 年代初南非的南安普敦大学教授 M.F.Kaplan<sup>[1]</sup>开始混凝土断裂力学的实验。1976 年, 瑞典隆德工学院的 A.Hillerborg<sup>[2]</sup>根据混凝土在宏观裂纹尖端存在一个卸载的应变软化区, 发现了混凝土的软化特性并提出了断裂过程区的概念, 同时提出了研究混凝土断裂问题的虚拟裂纹模型, 使得混凝土断裂力学进入一个崭新的发展阶段。在此之后, 国内外学者进行了大量的实验

研究, 徐世烺等<sup>[3]</sup>通过对混凝土试件断裂过程的研究, 提出了双 K 断裂模型。

目前, 有关裂纹尺寸对混凝土双 K 断裂参数的影响, 主要通过对跨高比为 4 的混凝土三点弯曲梁进行试验研究<sup>[4-5]</sup>, 对于跨高比不为 4 的混凝土试件, 则研究的相对较少, 因此, 本文在保持试件跨高比为 2.5 的情况下, 研究不同裂纹尺寸对混凝土双 K 断裂韧度的影响。

收稿日期: 2017-02-21

基金项目: 福建省科技厅项目(2013J01001)

通讯作者: 毕贤顺(1962-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士, 研究方向: 固体力学、断裂、损伤。

## 1 混凝土双 $K$ 断裂韧度参数的确定

通过试验,得到了起裂荷载  $P_{ini}$  之后,将其与初始裂纹深度  $a_0$  代入线弹性应力强度因子计算公式便可得到起裂韧度  $K_{IC}^{ini}$  的大小。对于三点弯曲梁,公式<sup>[6]</sup>如下:

$$K_{IC}^{ini} = \frac{3P_{ini}S}{2D^2B} \sqrt{a_0} F_2 \left( \frac{a_0}{D} \right) \tag{1}$$

其中,

$$F_2 \left( \frac{a_0}{D} \right) = \frac{1.99 - \left( \frac{a_0}{D} \right) \left( 1 - \frac{a_0}{D} \right) \left[ 2.15 - 3.93 \frac{a_0}{D} + 2.7 \left( \frac{a_0}{D} \right)^2 \right]}{\left( 1 + 2 \frac{a_0}{D} \right) \left( 1 - \frac{a_0}{D} \right)^{3/2}} \tag{2}$$

根据线性渐进叠加原理,当试件加载到最大值  $P_{max}$  时,其对应的有效裂纹深度  $a_e$  可通过以下公式计算得到<sup>[7]</sup>:

$$a_e = \frac{[\gamma^{1.5} + m_1(\beta)\gamma]D}{[\gamma^2 + m_2(\beta)\gamma^{1.5} + m_3(\beta)\gamma + m_4(\beta)]^{0.75}} \tag{3}$$

其中,

$$\gamma = \frac{D_{CCMO} \cdot t \cdot E}{6p_{max}} \tag{4}$$

$$m_1(\beta) = \beta(0.25 - 0.0505\beta^{0.5} + 0.0033\beta) \tag{5}$$

$$m_2(\beta) = \beta^{0.5}(1.155 + 0.215\beta^{0.5} - 0.0278\beta) \tag{6}$$

$$m_3(\beta) = 1.75\beta - 1.38 \tag{7}$$

$$m_4(\beta) = 0.506 - 1.057\beta + 0.888\beta^2 \tag{8}$$

式中:  $\beta = S/D$  (跨高比);  $t$  为试件厚度;  $E$  为弹性模量。

将试验测得的最大荷载  $P_{max}$ 、对应的临界裂纹口张开位移  $D_{CCMO}$ 、材性试验测得的抗压弹性模量  $E$ ,代入以上公式,通过计算得到临界等效裂纹深度  $a_e$ 。

关于失稳断裂韧度  $K_{IC}^u$  的确定,只需将最大荷载  $P_{max}$  和临界等效裂纹深度  $a_e$  代替公式(1)中的起裂荷载  $P_{ini}$  和初始裂纹深度  $a_0$ ,经过数值计算后得到。

## 2 混凝土三点弯曲梁试验

### 2.1 试件尺寸及参数

混凝土试件尺寸如图 1,本次试验共制备 5 根混凝土三点弯曲梁,跨高比  $S/D$  均为 2.5,混凝土设计强度等级为 C35,具体参数见表 1。

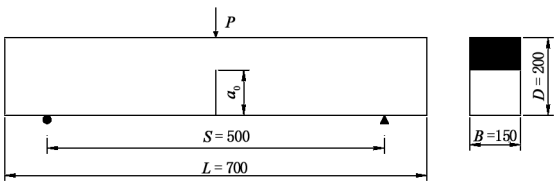


图 1 试件尺寸 (单位:mm)

Fig.1 Specimen size of 3-point concrete bending beam (unit:mm)

表 1 试件尺寸及参数

Tab.1 Specimen size and parameters

分组 编号	$L$ / mm	$S$ / mm	$B$ / mm	$D$ / mm	$a_0$ / mm	试件 数量/件
CLC40	700	500	150	200	40	1
CLC60	700	500	150	200	60	1
CLC80	700	500	150	200	80	1
CLC100	700	500	150	200	100	1
CLC120	700	500	150	200	120	1

### 2.2 加载和测试系统

本试验采用电子万能试验机 (DNS-300), 利用规格为 50 kN 的 BLR-1 拉压传感器采集跨中荷载 ( $P$ ), 利用量程为 50 mm 的位移计测量跨中挠度 ( $\delta$ ), 利用量程为 5 mm 的夹式引伸仪测定裂纹端口的开口位移 ( $D_{CMO}$ )。荷载、挠度及各测点的应变均采用 DH3816 型静态应变测试系统进行采集,图 2 为本次试验的加载示意图。

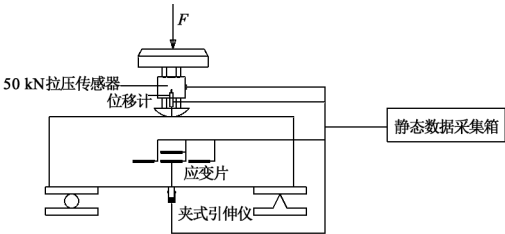


图 2 测试装置图

Fig.2 Test device figure of 3-point concrete bending beam

2.3 试验结果

试验测得各试件的  $P$ - $D_{\text{CMO}}$  全曲线如图 3, 试验结果见表 2。

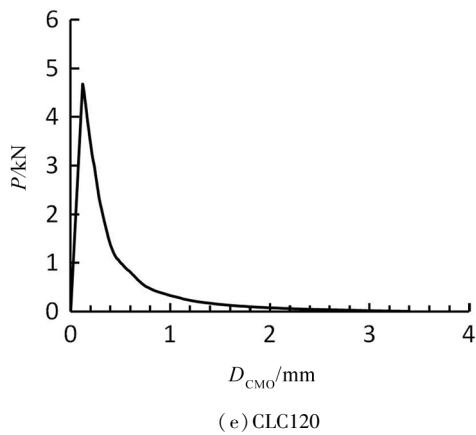
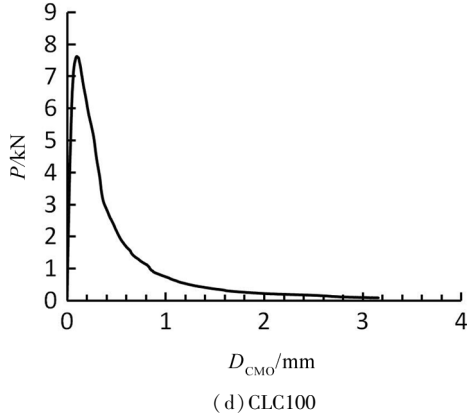
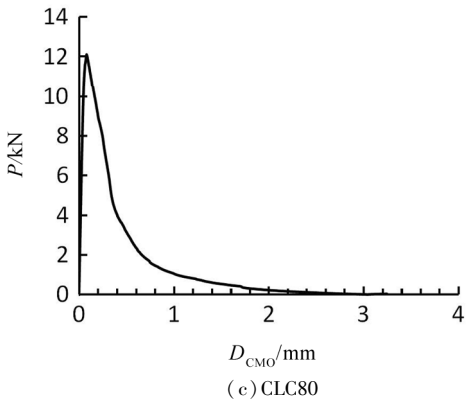
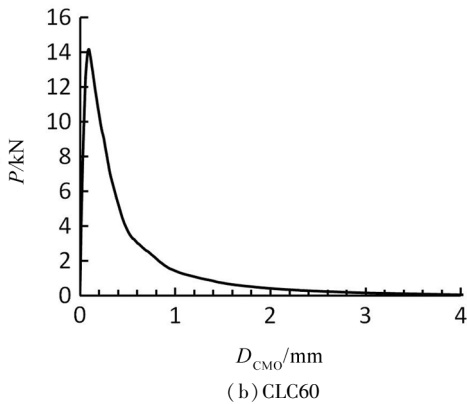
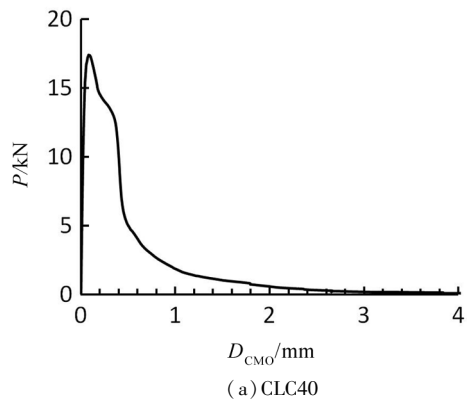


图 3 试件  $P$ - $D_{\text{CMO}}$  曲线

Fig.3  $P$ - $D_{\text{CMO}}$  curves of concrete 3-point bending beam specimen

表 2 试验结果

Tab.2 3-point concrete bending beam test results					
试件编号	$D_{\text{CCMO}}/\text{mm}$	$P_{\text{ini}}/\text{kN}$	$P_{\text{max}}/\text{kN}$	$P_{\text{ini}}/P_{\text{max}}$	$a_c/\text{mm}$
CLC40	0.083	15.871	17.387	0.91	87.47
CLC60	0.096	13.150	14.174	0.93	100.33
CLC80	0.080	11.176	12.119	0.92	112.23
CLC100	0.098	7.423	7.623	0.97	121.88
CLC120	0.119	4.575	4.677	0.98	141.15

3 混凝土三点弯曲梁数值模拟

3.1 模型的建立

在 ABAQUS 模型建立中,混凝土材性设置采用基于能量的线性软化损伤模型和最大主应力损伤开裂准则,材料参数见表 3。模型采用 C3D8R 实体单元,网格划分如图 4。

表 3 混凝土材料参数

Tab.3 Concrete material parameters				
密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比 $\mu$	极限抗 拉强度/ MPa	断裂能/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )
2 400	32.5	0.17	1.70	110.5

3.2 模拟结果

典型的裂纹扩展过程如图 5,从图中可得,在加载过程中,混凝土梁顶部中部加载区域为受压区,随着荷载的增大,裂纹不断发展,裂纹尖端区域存在较大拉应力,有局部应力集中现象的出现。

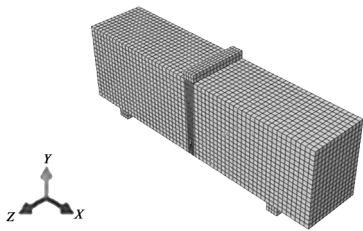


图 4 混凝土三点弯曲梁数值模型

Fig.4 Numerical model of three-point concrete bending beam

数值模拟结果见表 4。

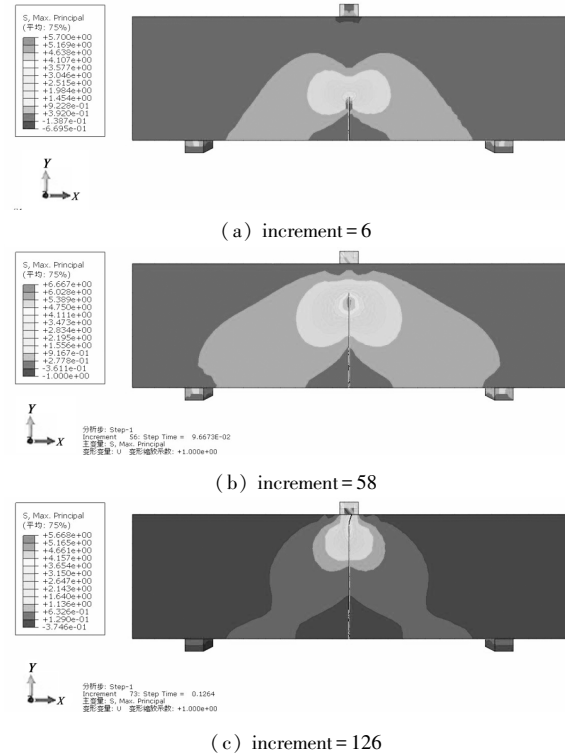


图 5 CLC60 试件最大主应力云图 (单位:MPa)  
Fig.5 The maximum principal stress nephogram of CLC60 specimen (unit:MPa)

表 4 数值模拟结果

Tab.4 The result of numerical simulation					
试件 编号	$D_{CCMO}/$ mm	$P_{ini}/$ kN	$P_{max}/$ kN	$P_{ini}/$ $P_{max}$	$a_c/$ mm
CLC40	0.089	17.974	19.537	0.92	106.12
CLC60	0.091	14.390	15.308	0.94	114.26
CLC80	0.095	11.017	11.358	0.97	124.86
CLC100	0.099	7.397	7.548	0.98	137.28
CLC120	0.135	4.344	4.388	0.99	156.52

4 结果分析

混凝土双  $K$  断裂韧度的计算结果见表 5。从表中可以得出:起裂断裂韧度  $K_{IC}^{ini}$ 、失稳断裂韧度  $K_{IC}^u$  的试验值与有限元模拟值的最大误差分别为 13.237%、-8.854%,满足有限元模拟的精度要求,说明该有限元模型能够较好地模拟混凝土梁三点弯曲试验。

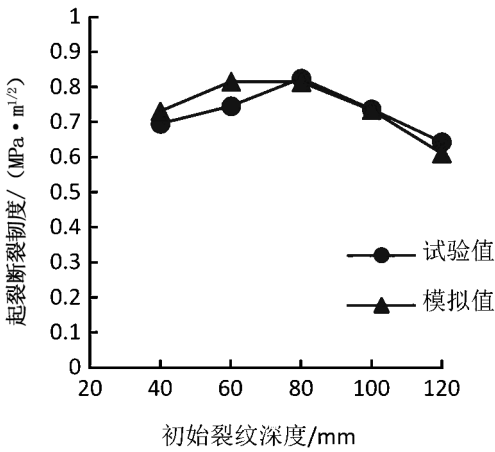
图 6 为混凝土起裂断裂韧度与失稳断裂韧度随初始裂纹尺寸变化的关系曲线。从图中可看出,  $40\text{ mm} \leq a_0 \leq 120\text{ mm}$  时,  $K_{IC}^{ini}$  变化幅度较小,与初始裂纹尺寸无关,  $K_{IC}^u$  有明显的减小趋势,随着初始裂纹深度的增大而减小。经分析,  $K_{IC}^u$  有减小趋势的原因是存在试件边界的约束效应,当裂纹发展区域在试件边界的影响范围中时,试件边界的约束效应使得混凝土断裂过程区范围缩小,亚临界扩展量减小。  $K_{IC}^{ini}$  没有随裂纹深度增大而减小的原因是起裂断裂韧度表征的是材料在裂纹发展前抵抗外力的能力,只有当  $K > K_{IC}^{ini}$  时,断裂过程区才开始形成,因此,  $K_{IC}^{ini}$  没有受到试件边界的约束效应。

表 5 试件试验值与数值模拟值对比

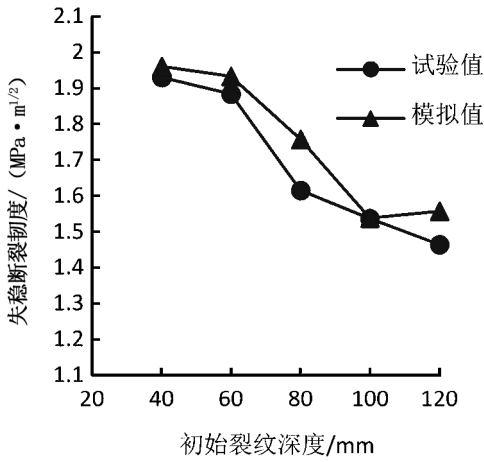
Tab.5 The comparison between test value and numerical simulation

试件编号	起裂断裂韧度			失稳断裂韧度		
	试验值	模拟值	偏差/%	试验值	模拟值	偏差/%
CLC40	0.695	0.787	13.237	1.931	1.961	1.554
CLC60	0.746	0.816	9.383	1.884	1.933	2.601
CLC80	0.825	0.814	-1.333	1.615	1.758	8.854
CLC100	0.737	0.734	-0.407	1.537	1.539	0.130
CLC120	0.643	0.611	-4.977	1.464	1.557	6.352

注:试件试验值与 XFEM 模拟值单位均为  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。



(a) 初始裂纹尺寸对起裂断裂韧度的影响



(b) 初始裂纹尺寸对失稳断裂韧度的影响

图 6 初始裂纹尺寸对混凝土断裂韧度的影响

Fig.6 The effect of initial seam size on the fracture toughness of concrete

5 结论

1)起裂断裂韧度  $K_{IC}^{ini}$ 、失稳断裂韧度  $K_{IC}^m$  的试验值与有限元值的最大误差分别为 13.237%、8.854%,满足有限元模拟的精度要求,说明该有

限元模型能够较好地模拟混凝土梁三点弯曲试验。

2)40 mm ≤  $a_0$  ≤ 120 mm 时,  $K_{IC}^{ini}$  变化幅度较小,与初始裂纹尺寸无关,  $K_{IC}^m$  有明显的减小趋势,随着初始裂纹深度的增大而减小。

参考文献:

[1] Kaplan M F. Crack propagation and the fracture of concret[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1961, 4(3): 497-519.

[2] Hilberborg A, Modeer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement Concrete Research, 1976, 6(6): 773-782.

[3] 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(2): 119-125.

[4] 荣华,董伟,吴智敏,等.大初始缝高比混凝土试件双 K 断裂参数的试验研究[J]. 工程力学, 2012(1): 162-167.

[5] 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(2): 166-171.

[6] 徐世烺.混凝土断裂力学[M].北京:科学出版社, 2011.

[7] Guinea G V, Pastor J Y. Stress intensity factor, compliance and CMOD for a general three-point beam[J]. International Journal of Fracture, 1998, 89: 103-116.

(责任编辑: 陈雯)