

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.04.014

混凝土 I-II 复合型拉剪断裂试验研究

邓爱民,徐道远

(河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要:通过混凝土 I-II 复合型拉剪断裂试验设计及成果分析,基于双 K 断裂准则,分别计算了混凝土 I-II 复合型拉剪断裂试件失稳断裂破坏时考虑断裂过程区影响的临界有效裂缝长度 a_c 及其对应的应力强度因子 K_I 和 K_{II} ,建立了考虑断裂过程区影响的混凝土 I-II 复合型拉剪断裂判据,并用二次抛物线拟合了其临界曲线.与不考虑断裂过程区影响的判据临界曲线相比,考虑断裂过程区的影响,可提高裂缝稳定性计算的安全度,降低材料抗裂性能的要求.

关键词:混凝土 断裂试验;断裂过程区 临界有效裂缝长度 断裂判据 临界曲线

中图分类号:TU37-02 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2010)04-0428-05

混凝土结构中的大多数裂缝是复合型裂缝,其中 I-II 复合型裂缝问题比较普遍.研究混凝土结构在复合型荷载作用下的破坏机理并建立结构失稳断裂判据是准确安全地分析和设计混凝土结构的基础和关键.

关于混凝土结构中的裂缝问题,徐道远等^[1-6]进行了大量研究,解决了许多工程实际问题,但大多数研究基于线弹性断裂理论,建立断裂判据时所用的断裂韧度是根据初始裂缝长度和峰值荷载确定的.研究表明,混凝土与金属材料的断裂特性不同,混凝土结构受力后,在宏观裂缝尖端出现一个微裂纹区,即断裂过程区,结构失稳断裂时,宏观裂缝已经有了一定的扩展,峰值荷载对应的裂缝长度不再是初始裂缝长度,因此用峰值荷载与初始裂缝长度确定断裂韧度是不合适的.这也表明,在建立混凝土断裂判据的过程中,断裂韧度的确定必须考虑断裂过程区的影响^[7-9].关于 I 型裂缝,一些学者通过大量试验,研究了考虑断裂过程区影响的断裂韧度的测定问题,也得到了许多研究成果.如 Xu 等^[10-12]基于线性渐进叠加假定,提出在理论上等同于考虑黏聚力分布的 K_R 阻力曲线准则的双 K 断裂准则.该准则能描述和预测混凝土结构裂缝的开裂扩展与断裂破坏过程.但是,对于 I-II 复合型裂缝问题,如何确定考虑断裂过程区影响的应力强度因子临界值尚少有研究.

本文通过混凝土 I-II 复合型断裂试验设计及成果分析,建立了考虑断裂过程区影响的混凝土 I-II 复合型拉剪断裂判据,并用二次抛物线拟合了其临界曲线,同时与不考虑断裂过程区影响的判据进行了比较.

1 试验概况

试验采用梁式试件,如图 1 所示.其中图 1(a)为 I 型断裂试验的 3 点弯曲对称加载方式, $L=400\text{ mm}$, $b=h=100\text{ mm}$;图 1(b)为 II 型及 I-II 复合型断裂试验的反对称加载方式. $e=0$ 时, $S=10S'=220\text{ mm}$,为 II 型.通过移动裂缝的位置即改变 e 的大小,获得 I 型和 II 型权重不同组合的复合型,共进行了 2 组,各组的 e 分别为 20 mm 和 10 mm , $S=3S'=180\text{ mm}$.

所有试件采用同一配合比,即水泥、砂、碎石的质量分数分别为

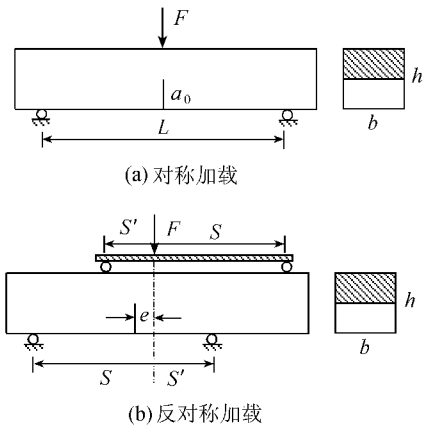


图 1 试件及加载方式

Fig. 1 Specimens and loading modes

18.80% ,28.76% ,52.44% ,水灰比为 0.47 水泥为 325 # 普通硅酸盐水泥 碎石为一级配石灰岩碎石,最大骨料粒径为 20 mm 砂为普通建筑中砂.试模采用钢模,试模净尺寸为 100 mm × 100 mm × 515 mm,初始裂缝用厚度为 2 mm 的薄钢板(其前端磨出不大于 1°的尖角)预制,薄钢板平面尺寸为 40 mm × 100 mm,预制裂缝长度控制在 38 ~ 42 mm 之间.试件分 3 批浇筑.第 1 批为切口居中的梁试件,即浇筑前将预制裂缝钢板放置于试模任一长边中点内侧,成型 6 根,用于 I 型断裂试验,有效试件 5 根;第 2 批为切口距跨中 20 mm 的梁试件,即浇筑前将预制裂缝钢板放置于试模任一长边距离中点 20 mm 的内侧,成型 6 根,用于 II 型断裂试验,有效试件 3 根;第 3 批为切口距跨中分别为 20 mm 和 40 mm 的梁试件,即浇筑前将预制裂缝钢板放置于试模任一长边距离中点分别为 20 mm 和 40 mm 的内侧,各成型 6 根,用于 I - II 复合型断裂试验,有效试件各 3 根.试件浇筑完待混凝土初凝后约 3 h 取出预制裂缝的钢板,24 h 后拆模并送入标准养护室进行养护,28 d 后从养护室取出直接送至实验室进行试验^[13].

试验在 200 kN 电子万能试验机上进行,力的加载由计算机控制,采用位移控制进行加载.荷载和位移分别由直接与计算机相连的力传感器和位移传感器量测,全部数据采集由计算机完成.同组试件的试验连续完成.

2 混凝土试件基本力学性能试验结果

混凝土立方强度 $f_{cu,k}$ 根据断后试件端头(尺寸按 100 mm × 100 mm × 100 mm 计算)在 1 000 kN 液压万能试验机上进行的压缩试验结果,换算至标准尺寸(150 mm × 150 mm × 150 mm)即乘 0.95 获得^[14].轴心抗压强度 f_{ck} 、弹性模量 E 和轴心抗拉强度 f_{tk} 由 $f_{cu,k}$ 按 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》^[15] 换算获得.端头轴压试验结果见表 1.从该批混凝土试件力学性能试验结果可以看出,其强度是偏低的,这也印证了后面 I 型裂缝的断裂韧度较普通混凝土的为低.

表 1 混凝土力学性能试验结果

Table 1 Test results of mechanical properties of concrete							
试件编号	轴向压缩荷载/kN	$f_{cu,k}$ /MPa	f_{ck} /MPa	试件编号	轴向压缩荷载/kN	$f_{cu,k}$ /MPa	f_{ck} /MPa
1-1	122.5	11.6375	7.783 2	2-4	156.0	14.82	9.911 6
1-2	116.0	11.02	7.370 2	3-1	106.5	10.117 5	6.766 6
1-3	100.5	9.547 5	6.385 4	3-3	109.0	10.355	6.925 4
1-5	113.5	10.782 5	7.211 3	3-4	108.9	10.345 5	6.919 1
1-6	112.5	10.687 5	7.147 8	3-5	112.5	10.687 5	7.147 8
2-1	133.5	12.682 5	8.482 1	3-6	97.0	9.215	6.163 0
2-2	117.5	11.162 5	7.465 5	3-7	101.0	9.595	6.417 1

按 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》^[15],根据立方强度由公式

$$E = 10^5 / (2.2 + 34.7 / f_{cu,k}) \tag{1}$$

计算 E ,则得到 3 批混凝土的弹性模量分别为 18.432 GPa,17.884 GPa 和 20.591 GPa. 根据立方强度由公式

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645 \times 0.21)^{0.45} \tag{2}$$

计算 f_{tk} ,则得到 3 批混凝土的轴心抗拉强度分别为 1.061 MPa,1.032 MPa 和 1.181 MPa.

3 断裂试验结果及分析

I 型、II 型和 I - II 复合型断裂试验典型的荷载-加力点位移曲线(F - δ 曲线)如图 2 所示.同时,根据线性渐进叠加假定^[10],通过数值计算,可以得到各种试件裂缝扩展过程中 δ 和 F 的关系,并将之转换成 $bE\delta/F$ 与缝高比 a/h 的关系.本次试验 I 型、II 型和 I - II 复合型断裂试件可分别拟合成如下表达式^[16]:

$$bE \frac{\delta}{F} = 21.899 + 36.202 \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{a}{h} \right)$$

(3)

$$bE \frac{\delta}{F} = 5.758 5 + 0.3586 \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{a}{h} \right)$$

(4)

$$\begin{cases} bE \frac{\delta}{F} = 5.826 5 + 0.917 6 \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{a}{h} \right) \\ bE \frac{\delta}{F} = 5.649 8 + 0.438 2 \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{a}{h} \right) \end{cases}$$

(5)

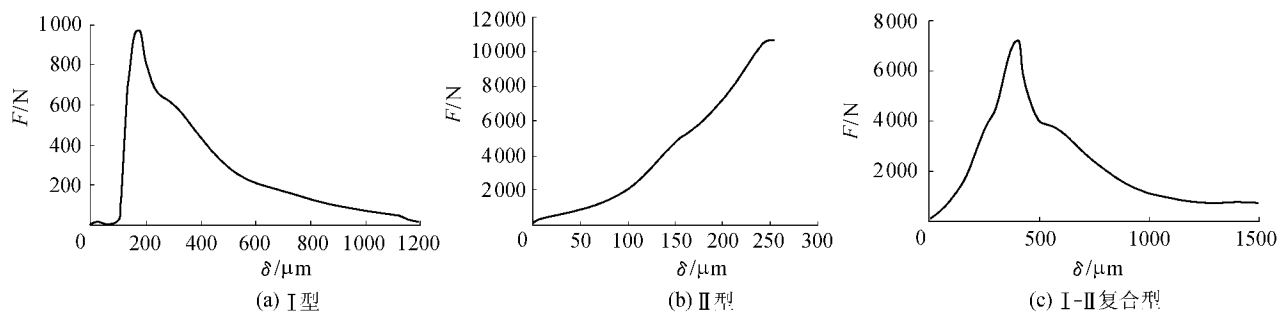


图2 加力点位移 δ 与荷载 F 关系曲线

Fig. 2 Typical F - δ curves measured from tests

根据每根实测断裂试验曲线,由文献[16]方法计算其在失稳断裂时的临界有效裂缝长度 a_c ,将每根试件的临界有效裂缝长度 a_c 和峰值荷载 $F_{\max}$ 分别代入相应的应力强度因子公式计算其考虑断裂过程区影响的应力强度因子,结果见表2.为了进行对比,本文按传统计算应力强度因子的方法(即根据初始裂缝长度 a_0 和峰值荷载 $F_{\max}$ 计算应力强度因子)计算了每根试件未考虑断裂过程区影响的应力强度因子 K_I^0, K_{II}^0 ,结果也列于表2.

由计算结果可以看出,该混凝土的Ⅰ型断裂韧度 K_{IC} 较低,并且Ⅱ型断裂韧度 K_{IIC} 略高于Ⅰ型断裂韧度 K_{IC} .这可能与本次混凝土试件材料的抗拉强度较低有关,也说明材料的抗拉强度对Ⅰ型断裂韧度 K_{IC} 的影响十分显著,但对Ⅱ型断裂韧度 K_{IIC} 的影响相对小得多.从断裂过程区的影响来看,不论材料的抗拉强度高低,Ⅰ型断裂韧度 K_{IC} 增加的幅度都明显高于Ⅱ型断裂韧度 K_{IIC} 增加的幅度.

采用抛物线拟合其变化规律,所得数学表达式为

$$K_I K_{IC} + 0.8844 K_{II}^2 = K_{IC}^2 \quad R = 0.982$$

(6)

表2 断裂试验成果

Table 2 Results of fracture tests

组别	$F_{\max}/$ N	$a_c/$ mm	$K_I/$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	$K_I^0/$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	$K_{II}/$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	$K_{II}^0/$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
Ⅰ型	825.3	60.8	0.3916	0.2835	0	0
Ⅱ型	10757.2	57.4	0	0	0.4262	0.3715
Ⅰ-Ⅱ复合型 ($e=20\text{ mm}$)	4603.3	58.2	0.2959	0.2214	0.1646	0.1303
Ⅰ-Ⅱ复合型 ($e=10\text{ mm}$)	6199.0	57.9	0.2097	0.1630	0.2519	0.2057

为了进行比较,同时采用抛物线拟合了未考虑断裂过程区影响的临界曲线,其数学表达式为

$$K_I K_{IC} + 0.6076 K_{II}^2 = K_{IC}^2 \quad R = 0.981$$

(7)

图3为考虑断裂过程区影响和未考虑断裂过程区影响的Ⅰ-Ⅱ复合型断裂拉剪区临界曲线.可以看出,考虑断裂过程区影响的临界曲线位于未考虑断裂过程区影响的临界曲线外侧,这说明考虑断裂过程区影响的Ⅰ-Ⅱ复合型断裂判据提高了裂缝稳定性计算的安全度,即降低了对材料抗裂性能的要求.同时由式(6)和式(7)相关系数发现,用二次抛物线拟合临界曲线有很好的精度,这也说明二次抛物线能很好地反映Ⅰ-Ⅱ复合型断裂判据临界曲线的一般规律.

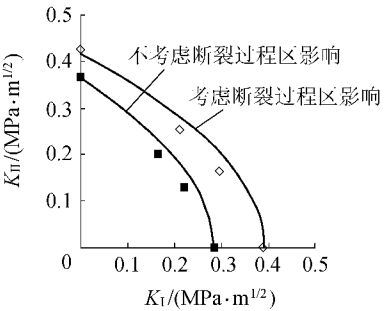


图3 Ⅰ-Ⅱ复合型断裂判据临界曲线
Fig. 3 Critical curves for criterion of I-II mixed fracture

4 结 语

本文首先对混凝土Ⅰ-Ⅱ复合型断裂试验成果进行了分析,并基于线性渐进叠加假定,根据试验曲线计算了各试件对应峰值荷载时的裂缝长度即临界有效裂缝长度 a_c ,然后将峰值荷载和临界有效裂缝长度代入相应的应力强度因子计算公式,计算了各试件的临界有效应力强度因子,根据临界有效应力强度因子计算结果,建立了考虑断裂过程区影响的混

混凝土 I-II 复合型拉剪断裂判据,并用二次抛物线拟合了其临界曲线。

试验分析结果表明,无论是 I 型、II 型还是 I-II 复合型裂缝的断裂,各 $F-\delta$ 曲线均在峰值荷载前出现曲线段。这说明裂缝端部都出现微裂纹区,即断裂过程区,因此其断裂参数的确定需考虑断裂过程区的影响。

由 I-II 复合型裂缝各类试件的临界有效裂缝长度 a_c 与初始裂缝长度 a_0 的比值增长情况可见, I 型比 II 型增长的幅度大,在 I-II 复合型中, I 型权重大的比 I 型权重小的增长幅度大,这是由于 I 型加载下缝端的断裂过程区比 II 型加载下缝端的断裂过程区更为发育所致。

与不考虑断裂过程区影响的判据相比,计及断裂过程区影响所得的临界曲线位于不考虑断裂过程区影响所得的临界曲线外侧。这说明,考虑断裂过程区的影响后,提高了裂缝稳定性计算的安全度,降低了材料抗裂性能的要求,同时也可以看出,对 I 型、II 型裂缝,计及断裂过程区影响所得的断裂韧度比不考虑断裂过程区影响的大,但 K_{IC} 的增大程度大于 K_{IIC} 的增大程度,在 I-II 复合型中, K_I 权重大的试件断裂韧度的增大程度大于 K_I 权重小的试件断裂韧度的增大程度。

参考文献:

- [1] 徐道远,符晓陵.用四点剪切试样确定混凝土 I、II 复合型裂纹断裂判据的测试研究[J].水利学报,1984(9):63-71. (XU Dao-yuan, FU Xiao-ling. Experimental research on I-II mixed-mode crack fracture criterion for concrete with a four-point shear specimen [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984(9):63-71. (in Chinese))
- [2] JENQ Y S, SHAH S P. Mixed-mode fracture of concrete [J]. International Journal of Fracture, 1988, 38(2):123-142.
- [3] SWARTZ S E, LU L W, TANG L D. Mixed-mode fracture toughness testing of concrete beams in three-point bending [J]. Materials and Structures, 1988, 21(1):385-406.
- [4] SWARTZ S E, TAHA N M. Mixed-mode crack propagation and fracture in concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(1/2/3):137-144.
- [5] 许斌,江见鲸.混凝土 I-II 复合型断裂判据研究[J].工程力学,1995,12(2):13-21. (XU Bin, JIANG Jian-jing. Study of I-II mixed-mode fracture of criterion for concrete [J]. Engineering Mechanics, 1995, 12(2):13-21. (in Chinese))
- [6] 胡蓓雷,赵国藩.混凝土 I-II 复合型裂纹有效断裂准则[J].大连理工大学学报,1996,36(6):776-781. (HU Bei-lei, ZHAO Guo-fan. Effective mixed-mode fracture criterion for concrete [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996, 36(6):776-781. (in Chinese))
- [7] BAZANT Z P. Asymptotic matching analysis of scaling of structural failure due to softening hinges I: theory [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2003, 129(6):641-650.
- [8] 鞠杨,刘彩平,谢和平.混凝土断裂及亚临界扩展的细观机制[J].工程力学,2003,20(5):1-9. (JU Yang, LIU Cai-ping, XIE He-ping. The mesomechanism of fracture process and subcritical crack growth in concrete [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(5):1-9. (in Chinese))
- [9] 徐世烺,张秀芳.混凝土结构裂缝扩展全过程的新 G_R 阻力曲线断裂判据[J].土木工程学报,2006,39(10):19-28. (XU Shi-lang, ZHANG Xiu-fang. The new G_R crack extension resistance as a fracture criterion for complete crack propagation in concrete structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10):19-28. (in Chinese))
- [10] XU Shi-lang, 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):181-208.
- [11] 徐世烺.混凝土双 K 断裂参数计算理论及规范化测试方法[J].三峡大学学报:自然科学版,2002,24(1):1-8. (XU Shi-lang. The calculation approaches of double- K fracture parameters of concrete and a possible coding standard test method for determining them [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2002, 24(1):1-8. (in Chinese))
- [12] 徐世烺,吴智敏,丁生根.砼双 K 断裂参数的实用解析方法[J].工程力学,2003,20(3):54-61. (XU Shi-lang, WU Zhi-min, DING Sheng-gen. A practical analytical approach to the determination of double- K fracture parameters of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3):54-61. (in Chinese))
- [13] DL/T 2006 水工混凝土断裂试验规程[S].
- [14] 余天庆,熊健民.工程材料与桥梁结构的力学性能测试[M].北京:国防工业出版社,1997.
- [15] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
- [16] 邓爱民,徐道远,朱为玄.考虑断裂过程区的混凝土 I-II 复合型断裂判据研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2007,30(12):1674-1677. (DENG Ai-min, XU Dao-yuan, ZHU Wei-xuan. Study on the K criterion of I-II mixed mode fracture of concrete considering the fracture process zone [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2007, 30(12):1674-1677. (in

Chinese))

Tensile-shear fracture tests on I - II mixed model of concrete

DENG Ai-min, XU Dao-yuan

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Based on the double- K fracture criterion, the critical effective crack length a_c and the corresponding stress intensity factors K_I and K_{II} of I - II mixed tensile-shear fracture specimens at failure were calculated through the design and the analysis of tensile-shear fracture tests on I - II mixed model of concrete. A new I - II mixed tensile-shear fracture K criterion was established considering the influences of fracture process zone. The critical curve of the new fracture K criterion was fitted with the quadratic parabola. Compared with the critical curve without consideration of the influences of fracture process zone, the critical curve of the proposed model indicate that the safety of calculating the stability of cracks is improved and the requirements of crack-resistant behaviors of material are reduced.

Key words : concrete ; fracture test ; fracture process zone ; critical effective crack length ; fracture criterion ; critical curve

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32-1521/C, ISSN1671-4970, 季刊, 自办发行)

《河海大学学报(哲学社会科学版)》以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和‘三个代表’重要思想为指导,认真贯彻落实科学发展观,坚持实事求是的思想路线,贯彻‘双百’方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务.

《河海大学学报(哲学社会科学版)》为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、语言学、法学、社会学、经济学、管理学等社会科学方面的学术性文章,可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考.《河海大学学报(哲学社会科学版)》为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊.

《河海大学学报(哲学社会科学版)》由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行.2010 年每本定价 10 元,每本邮费 1 元,全年订费 44 元,欢迎广大读者直接向编辑部订阅.

联系地址 南京市西康路 1 号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部

邮政编码 210098

电话/传真 025-83786376

E-mail :sxb@hhu.edu.cn

网址 :http://kbb.hhu.edu.cn/sxb/index_sxb.htm