

钢纤维混凝土 K_{IC} 计算公式初探

程秀菊 朱为玄

(河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 通过对钢纤维混凝土一组典型试验数据的分析 ,发现按 ASTM 建议的公式计算钢纤维混凝土的 K_{IC} ,所得结果不能真正反映钢纤维混凝土的断裂特性. 为此 ,从理论上分析了考虑缝端前缘断裂过程区的必要性 ,并应用双 K 断裂准则导出了钢纤维混凝土 K_{IC} 的计算公式.

关键词 钢纤维混凝土 ;双 K 断裂准则 ;裂缝口张开位移 ;有效长度 ;断裂韧度

中图分类号 :TV431 ;O346.1 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2005)04- 0452- 03

钢纤维混凝土是被广泛采用的可明显改善混凝土脆性的建筑材料. 但目前对它的普通力学性能研究得较多 ,而对它的断裂性能研究还不多见. 已有研究表明 ,钢纤维的掺入使钢纤维混凝土的非线性及峰值后软化特性得到显著改善 ,作为工程材料 ,钢纤维混凝土的应用远比素混凝土的应用历史短 ,其断裂特性的研究远不能满足工程应用的要求 ,直接将 ASTM 建议的公式应用于钢纤维混凝土 K_{IC} 的计算还存在一定问题. 本文对钢纤维混凝土的断裂韧度测试及其成果计算方法进行了分析研究 ,并从理论上分析了考虑钢纤维混凝土的非线性及峰值后软化特性的必要性 ,同时提出了应用双 K 断裂准则计算钢纤维混凝土 K_{IC} 的方法.

1 试验成果分析

文献 [1] 研究了钢纤维混凝土试件(图 1)厚度、基体强度、纤维掺量、纤维类型对断裂参数 K_{IC} 和 J_{IC} 的影响 ,表 1 给出了其中的一组试验数据. 其各组试件的混凝土强度等级为 CF28 ,所掺钢纤维为剪切纤维 ,长径比为 60 ,钢纤维掺量为 0 ~ 1.5% .

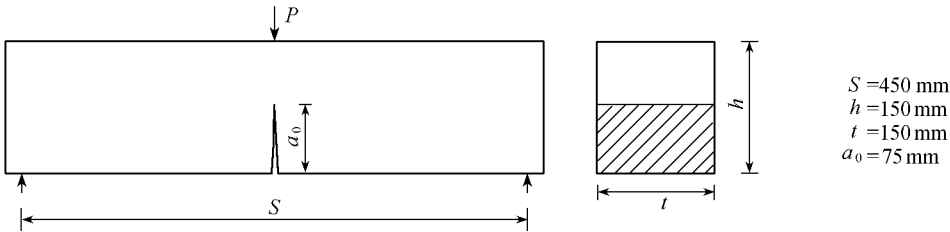


图 1 3 点弯曲梁试件

Fig.1 Configuration of a three-point bending beam

表 1 K_{IC} 是按 ASTM 建议的公式计算的 ,即

表 1 文献 [1] 的一组试验数据

Table 1 Results of tests in literatur[1]

试件组 编号	纤维掺量 $V_f/\%$	$K_{IC}/$ ($10^{-1/2}MN \cdot m^{-3/2}$)	$J_{IC}/$ ($N \cdot m^{-1}$)
B ₀	0.0	2.57	105.0
B ₁	0.5	2.89	156.1
B ₂	1.0	3.41	263.0
B ₃	1.5	4.01	341.0

式中 : S , h , t , a_0 ——试件跨度、高度、厚度和缝长 ;

$$f(a_0/h) = 2.9(a_0/h)^{1/2} - 4.6(a_0/h)^{3/2} + 21.8(a_0/h)^{5/2} - 37.6(a_0/h)^{7/2} + 38.2(a_0/h)^{9/2}$$

J_{IC} 是根据 Zaverl 等提出的公式计算的 ,即

$$J_{IC} = \frac{2}{K(h - a_0)} (A_t - A_u) \quad (2)$$

式中: A_l ——不带初始裂缝试件的荷载-位移曲线下的面积; A_u ——带初始裂缝试件的荷载-位移曲线下的面积。
由断裂力学理论知,在线弹性条件下, J_{IC} 和 K_{IC} 的关系为

$$J_{IC} = K_{IC}^2/E$$

(3)

表 1 中的 4 组试件,由于其基体强度等级相同,故假定 E 也相同。但由于钢纤维的掺量不同, E 会略有不同。因此,各组的 K_{IC} 的增长率应和 $\sqrt{J_{IC}}$ 的增长率相同。验算结果并非如此,如表 2 所示。其中各增长率均以 B_0 组为基准。

由表 2 可见,按式(1)计算的 K_{IC} 的增长率小于按式(3)计算的增长率,更小于 J_{IC} 的增长率。其原因

表 2 J_{IC} 及 K_{IC} 的增长率

Table 2 Increase rate of J_{IC} and K_{IC}

试件 编号	J_{IC} 增长率	按式(1)计算的 K_{IC} 增长率	按式(3)计算的 K_{IC} 增 长率,即 $\sqrt{J_{IC}}$ 的增长率
B_0	0	0	0
B_1	0.49	0.12	0.22
B_2	1.50	0.33	0.58
B_3	2.25	0.54	0.80

因是按式(1)计算的 K_{IC} 没有考虑断裂过程中的微开裂及非线性位移等因素。研究表明,钢纤维混凝土的增韧机理就是它在破坏前有大范围的缓慢稳定裂缝扩展并且裂缝尖端存在微裂区域。所以,用式(1)计算的 K_{IC} 是不太合理的。而 J_{IC} 是按荷载-位移曲线下的面积计算的,包括了非线性因素,更能说明混凝土的断裂过程。再者,式(1)也没有体现纤维对混凝土断裂性能的影响。综上可知,按式(1)所求的 K_{IC} 不能真正体现钢纤维混凝土的断裂特性。因此,为了求出更能说明钢纤维混凝土断裂特性的 K_{IC} ,应对 K_{IC} 的计算公式进行改进。

2 改进的 K_{IC} 计算方法

2.1 钢纤维混凝土的断裂分析

在素混凝土裂缝扩展过程中,缝端前缘将萌生微裂纹并产生微裂纹区,即断裂过程区。由于混凝土材料的随机性,裂缝扩展的前方随机分布着粗细骨料、硬化水泥浆和孔隙等,因此裂缝在扩展过程中遇到的阻力也随之变化,所要耗散的能量也会不同,而裂缝必然朝着所需耗散能量最小的路径方向扩展。控制断裂过程区最大尺寸的关键是控制最大粗骨料的粒径。研究表明,素混凝土断裂过程区的最大尺寸近似地等于最大骨料粒径的 $1/2^{[2]}$ 。试验表明,钢纤维混凝土断口处的纤维几乎全部因黏结破坏而拔出,很少有纤维拉断现象。据此可推断裂缝扩展必然是绕过纤维而行。所以,可以认为钢纤维混凝土断裂过程区的最大尺寸近似地等于钢纤维长度的 $1/2$ 。通常,钢纤维混凝土中纤维的长度比最大粗骨料的粒径大,甚至大得多。因此,钢纤维混凝土的断裂过程区将比素混凝土的断裂过程区大,故考虑其断裂过程区的影响就尤为必要了。

Hillerborg 等^[3]提出的虚拟裂缝模型是将微裂纹区概化为一条仍可传递部分应力的虚拟裂缝,并且虚拟裂缝上的应力按软化曲线 $\sigma = f(w)$ (w 为虚拟裂缝的宽度,即微裂纹区的附加变形量)的规律分布,如图 2(a)所示。徐世烺等^[4]提出的双 K 断裂准则将作用于虚拟裂缝上的应力理解为微裂纹区的混凝土黏聚力,并简化为线性分布,如图 2(b)所示。

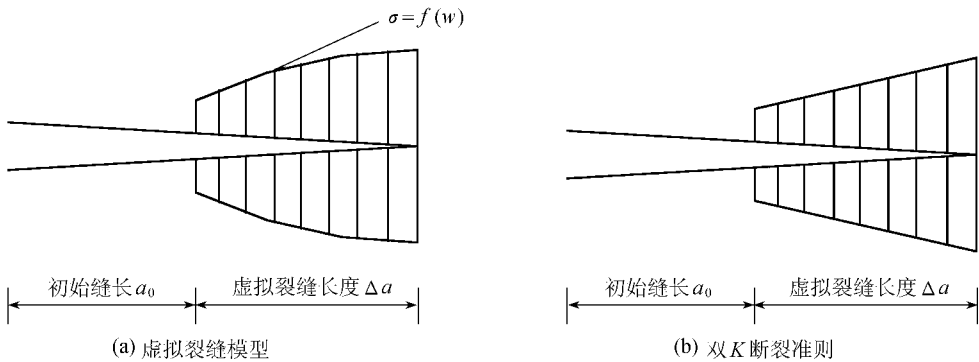


图 2 虚拟裂缝上的分布力

Fig.2 Stress distribution in fictitious crack

对钢纤维混凝土而言,在微裂纹区,除有混凝土的黏聚力外,还有纤维的黏结力,如一并加以考虑,则双 K 断裂准则的概念也可用于钢纤维混凝土。但无论是采用虚拟裂缝模型还是采用双 K 断裂准则,都无法直接得出虚拟裂缝的长度 Δa 。但可以通过有效裂缝长度 a 间接求出。

2.2 有效裂缝长度 a

在双 K 断裂准则中, $a_0 + \Delta a$ 称为有效裂缝长度 a . 对于 3 点弯曲梁, 如从实测的 P - δ 曲线上得到 $P_{\max}$ 和 δ_c , 则将其代入下式即可迭代求得临界有效缝长 a_c [5].

$$\delta_c = \frac{6P_{\max} S a_c}{th^2 E} f_1(\alpha) \quad (4)$$

式中: E ——弹性模量; $\alpha = a/h$; $P_{\max}$ ——试验测得的最大荷载; δ_c ——裂缝口张开位移; $f_1(\alpha)$ 的表达式为 [6]

$$f_1(\alpha) = 1.45 - 2.18\alpha + 13.71\alpha^2 - 5.96\alpha^3 - 36.9\alpha^4 + 70.7\alpha^5$$

必须说明的是, 对同样尺寸的试件而言, 钢纤维混凝土试件和素混凝土试件实测的 P - δ 曲线、 $P_{\max}$ 值和 δ_c 值都是不同的, 有无钢纤维的影响(即钢纤维的效应)必将在其中反映出来.

2.3 断裂韧性 K_{IC} 的确定

对于跨高比等于 4 的标准 3 点弯曲梁, 在求得了临界有效缝长 a_c 后, 由双 K 断裂准则可按下式直接计算 K_{IC} .

$$K_{IC} = \frac{3P_{\max} S}{2h^2 t} \sqrt{a_c} f_2\left(\frac{a_c}{h}\right) \quad (5)$$

$$f_2\left(\frac{a_c}{h}\right) = \left\{ 1.99 - \frac{a_c}{h} \left(1 - \frac{a_c}{h} \right) \left[2.15 - 3.93 \frac{a_c}{h} + 2.7 \left(\frac{a_c}{h} \right)^2 \right] \right\} \left[\left(1 + 2 \frac{a_c}{h} \right) \left(1 - \frac{a_c}{h} \right)^{3/2} \right]^{-1}$$

式中: $P_{\max}$ ——试验测得的最大荷载; a_c ——临界有效缝长.

式(5)就是本文所建议的钢纤维混凝土 3 点弯曲梁试件 K_{IC} 的计算公式.

3 结 语

本文通过对文献 [1] 试验数据的分析, 发现按 ASTM 建议的公式计算钢纤维混凝土 3 点弯曲梁的断裂韧性 K_{IC} 时未考虑裂缝前缘微裂纹区和纤维黏结力的影响, 会出现较大误差, 因此应用双 K 断裂准则导出了钢纤维混凝土 K_{IC} 的一种计算公式.

参考文献:

- [1] 程庆国, 高路彬. 钢纤维混凝土理论及应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999. 29—34.
- [2] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土断裂力学研究[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1991. 35—46.
- [3] HILLERBORG A. 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.
- [4] 徐世烺, 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.
- [5] XU Shi-lang, REINHARDT H W. Determination of double- K criterion for crack propagation in quasi-brittle Materials, part II: Analytically evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 151—177.
- [6] JENGQ Y S, SHAH S P. Two parameter fracture model for concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1985, 111(4): 1227—1241.

Calculation formula for K_{IC} of steel fiber reinforced concrete

CHENG Xiu-ju, ZHU Wei-xuan

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: It is found from an analysis of a group of typical experimental data about steel fiber reinforced concrete that the formula for calculation of K_{IC} of steel fiber reinforced concrete, presented by ASTM, is ineffective to reflect the fracture characteristic of the reinforced concrete. Therefore, the necessity for consideration of the precritical crack propagation length was theoretically discussed, and a new formula for calculation of K_{IC} of steel fiber reinforced concrete was derived by use of the double- K fracture criterion.

Key words: steel fiber reinforced concrete; double- K fracture criterion; crack mouth opening displacement; effective crack length; fracture toughness