

# 试件形式对混凝土失稳韧度 $K_{IC}$ 的影响

周美伶 朱为玄

( 河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098 )

摘要 :为了确定用三点弯曲梁和楔入劈拉两种形式试件所测的混凝土失稳韧度  $K_{IC}$  是否相同以及有多大差异 ,从两种形式试件  $K_{IC}$  的比值入手 ,对二者失稳韧度的关系进行了分析 .结果表明 ,当试件的混凝土材料相同、高度也相同时 ,用三点弯曲梁和楔入劈拉试件测得的混凝土失稳韧度差异甚小 .

关键词 混凝土 ;失稳韧度 ;三点弯曲试验 ;楔入劈拉试验

中图分类号 :TV313 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X( 2006 )06-0693-04

断裂韧度  $K_{IC}$  是由材料的固有特性决定的 ,它可以用来衡量材料抵抗裂纹失稳扩展的能力 .目前 ,材料的断裂韧度  $K_{IC}$  已成为破损安全设计和选用新材料的重要参数<sup>[1]</sup> .通常 ,混凝土断裂韧度  $K_{IC}$  的测定采用三点弯曲梁<sup>[2-3]</sup> 和楔入劈拉<sup>[4-5]</sup> 两种不同几何形式的试件 .然而 ,对于两种试件测定的断裂韧度是否一致 ,即材料的断裂韧度是否存在试件形式效应 ,仍不是十分明确 .本文对具有相同混凝土材料、相同试件高度的三点弯曲梁和楔入劈拉两种试件的失稳韧度之间的关系进行了分析和讨论 .

## 1 混凝土断裂韧度的计算

徐世烺等<sup>[2-4]</sup> 提出的双  $K$  准则明确将混凝土裂缝扩展分为裂缝不扩展(  $K_I < K_{IC}^{ini}$  )、裂缝起裂(  $K_I = K_{IC}^{ini}$  )、裂缝稳定扩展(  $K_{IC}^{ini} < K_I < K_{IC}^{un}$  )、裂缝开始失稳(  $K_I = K_{IC}^{un}$  )和裂缝失稳扩展(  $K_I > K_{IC}^{un}$  )5 个过程<sup>[6-8]</sup> .其中 ,起裂韧度  $K_{IC}^{ini}$ 、失稳韧度  $K_{IC}^{un}$  为 2 个判断参数 ,但本文的讨论仅涉及  $K_{IC}^{un}$  .

测试混凝土断裂韧度所采用的三点弯曲梁和楔入劈拉两种典型试件形式如图 1 所示( 试件厚度分别为  $t_1$  和  $t_2$  ) .

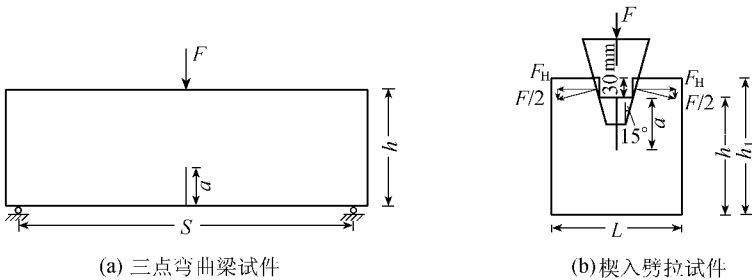


图 1 两种典型试件  
Fig.1 Typical specimens

按双  $K$  准则 ,混凝土断裂韧度  $K_{IC}$  的计算公式如下 :

a. 三点弯曲梁试件

$$K_{IC} = \frac{1.5 F_c S}{t_1 h^2} \sqrt{a f_1 \left( \frac{a}{h} \right)} \tag{1}$$

其中  $f_1 \left( \frac{a}{h} \right) = \left\{ 1.99 - \frac{a}{h} \left( 1 - \frac{a}{h} \right) \left[ 2.15 - 3.93 \frac{a}{h} + 2.7 \left( \frac{a}{h} \right)^2 \right] \right\} / \left[ \left( 1 + 2 \frac{a}{h} \right) \left( 1 - \frac{a}{h} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$

式中: $a$ ——裂缝长度; $h$ ——试件高度; $F_c$ ——临界荷载,计算时应计入试件跨中部分自重的1/2及传感器等附加设备的自重; $S$ ——试件跨度, $S=4h$ .

计算失稳韧度 $K_{IC}^{un}$ 时, $F_c$ 取最大荷载 $F_{max}$ , $a$ 取等效临界缝长 $a_{c1}$ ,按下式计算:

$$a_{c1} = \frac{2}{\pi}(h + h_0)\arctan \sqrt{t_1 ED_C/32.6 F_{max} - 0.1135} - h_0 \tag{2}$$

式中: $h_0$ ——装置位移计刀口钢板的厚度,即附加厚度,mm; $D_C$ ——裂缝口的张开位移临界值, $\mu m$ ;  $E$ ——弹性模量,GPa.

b. 楔入劈拉试件

$$K_{IC} = 3.675 \left[ 1 - 0.12 \left( \frac{a}{h} - 0.45 \right) \right] F_{He} / \left[ t_2 \sqrt{h} \left( 1 - \frac{a}{h} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \tag{3}$$

其中 $F_{He}$ 为临界水平荷载,按下式计算:

$$F_{He} = \frac{F_c}{2 \tan 15^\circ} \tag{4}$$

式中 $F_c$ 为临界竖向荷载,计算时应计入楔形加载架的重量.

计算失稳韧度 $K_{IC}^{un}$ 时, $a$ 取临界等效缝长 $a_{c2}$ , $F_{He}$ 为最大荷载 $F_{max}$ 对应的水平分力.临界等效缝长 $a_{c2}$ 按下式计算:

$$a_{c2} = (h + h_0) \left( 1 - \sqrt{13.18 / \left( \frac{D_C E t_2}{F_{max}} + 9.16 \right)} \right) - h_0 \tag{5}$$

2 两种形式试件失稳韧度比值的分析

为了得到混凝土在材料相同、试件高度也相同情况下三点弯曲梁和楔入劈拉两种形式试件的失稳韧度 $K_{IC}^{un}$ 之间的关系,取 $S=4h$ ,可由式(1)和(3)得到两种形式试件的失稳韧度的比值为

$$\frac{K_{IC}^{un}}{K_{IC}^{拉}} = \frac{6 \left\{ 1.99 \sqrt{\frac{a_{c1}}{h}} - \left( \frac{a_{c1}}{h} \right)^{3/2} \left( 1 - \frac{a_{c1}}{h} \right) \left[ 2.15 - 3.93 \left( \frac{a_{c1}}{h} \right) + 2.7 \left( \frac{a_{c1}}{h} \right)^2 \right] \right\} / \left[ \left( 1 + 2 \frac{a_{c1}}{h} \right) \left( 1 - \frac{a_{c1}}{h} \right)^{3/2} \right] \frac{F_{max}/t_1}{3.675 \left[ 1 - 0.12 \left( \frac{a_{c2}}{h} - 0.45 \right) \right] / \left( 1 - \frac{a_{c2}}{h} \right)^{3/2} \frac{F_{Hmax}/t_2}} \tag{6}$$

式中: $K_{IC}^{un}$ ——三点弯曲梁试件的失稳韧度, $MPa \cdot m^{1/2}$ ;  $K_{IC}^{拉}$ ——楔入劈拉试件的失稳韧度, $MPa \cdot m^{1/2}$ ;  $F_{max}$ ——三点弯曲梁承受的最大荷载,kN;  $F_{Hmax}$ ——楔入劈拉试件承受的最大水平荷载,kN;  $t_1$ ——三点弯曲梁试件的厚度,mm;  $t_2$ ——楔入劈拉试件的厚度,mm.

显然式(6)可以表示为

$$\frac{K_{IC}^{un}}{K_{IC}^{拉}} = \frac{\varphi_1 \left( \frac{a_{c1}}{h} \right)}{\varphi_2 \left( \frac{a_{c2}}{h} \right)} \frac{F_{max}/t_1}{F_{Hmax}/t_2} \tag{7}$$

其中

$$\varphi_1 \left( \frac{a_{c1}}{h} \right) = 6 \left\{ 1.99 \sqrt{\frac{a_{c1}}{h}} - \left( \frac{a_{c1}}{h} \right)^{3/2} \left( 1 - \frac{a_{c1}}{h} \right) \left[ 2.15 - 3.93 \left( \frac{a_{c1}}{h} \right) + 2.7 \left( \frac{a_{c1}}{h} \right)^2 \right] \right\} / \left[ \left( 1 + 2 \frac{a_{c1}}{h} \right) \left( 1 - \frac{a_{c1}}{h} \right)^{3/2} \right] \tag{8}$$

$$\varphi_2 \left( \frac{a_{c2}}{h} \right) = 3.675 \left[ 1 - 0.12 \left( \frac{a_{c2}}{h} - 0.45 \right) \right] / \left( 1 - \frac{a_{c2}}{h} \right)^{3/2} \tag{9}$$

为了明确 $K_{IC}^{un}/K_{IC}^{拉}$ 的可能变化范围,取两种形式试件的等效临界缝高比 $a_c/h$ 的可能范围均为0.4~0.7,从而得到函数 $\varphi_1 \left( \frac{a_c}{h} \right)$ 和 $\varphi_2 \left( \frac{a_c}{h} \right)$ 的曲线,如图2所示.

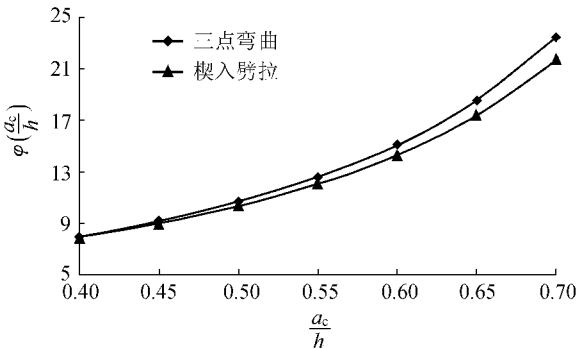


图2  $\varphi \left( \frac{a_c}{h} \right) \sim \frac{a_c}{h}$ 关系曲线

Fig.2 Curve for  $\varphi \left( \frac{a_c}{h} \right)$  vs.  $\frac{a_c}{h}$

由图 2 可知,在两种试件  $a_c/h$  相等时,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  的值十分接近且  $\varphi_1 > \varphi_2$ ,但是在两种试件  $a_c/h$  不相等且孰大孰小不明确时,  $\varphi_1/\varphi_2$  的变化规律难以确定.此外,由式(7)可知,  $K_{IC}^{\equiv}/K_{IC}^{拉}$  的值除与  $\varphi_1/\varphi_2$  有关外,还与单位厚度荷载比值  $(F_{max}/t_1)/(F_{Hmax}/t_2)$  有关,而在实际试验中,当两种试件的高度相同时,厚度也不一定相同,因此单位厚度荷载比  $(F_{max}/t_1)/(F_{Hmax}/t_2)$  也不是一个定值.因而,仅从式(7)分析很难确定比值  $K_{IC}^{\equiv}/K_{IC}^{拉}$  的变化范围.

3 根据实测结果分析  $K_{IC}^{\equiv}/K_{IC}^{拉}$  的大小

结合试验结果,按上述思路分析如下.试验采用 9 对满足高度相同、混凝土材料也完全相同的试件,这 9 对试件有关数据及试验成果<sup>①②</sup>见表 1.其中,每一对试件的  $K_{IC}^{\equiv}/K_{IC}^{拉}$  均是由式(7)计算的.

表 1 试验数据

Table 1 Experimental data

| 试件编号   | 试件尺寸          |               |               | $a_c/h$ | $\varphi$ | $\varphi_1/\varphi_2$ | 单位厚度荷载/<br>( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ) | $\frac{F_{\max}/t_1}{F_{H\max}/t_2}$ | $K_{IC}^{un}/$<br>( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) | $K_{IC}^{\equiv}/K_{IC}^{拉}$ |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------|-----------|-----------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------|
|        | $L/\text{mm}$ | $h/\text{mm}$ | $t/\text{mm}$ |         |           |                       |                                              |                                      |                                                       |                              |
| TPB150 | 600           | 150           | 200           | 0.593 8 | 14.733 0  | 1.159 3               | 20.287 0                                     | 0.782 5                              | 0.773 33                                              | 0.898 6                      |
| WS150  | 180           | 150           | 200           | 0.566 8 | 12.708 5  |                       | 25.926 5                                     |                                      | 0.860 55                                              |                              |
| TPB200 | 800           | 200           | 200           | 0.595 6 | 14.837 0  | 1.152 9               | 33.463 8                                     | 0.975 8                              | 1.130 50                                              | 1.145 8                      |
| WS200  | 240           | 200           | 200           | 0.570 5 | 12.868 8  |                       | 34.295 1                                     |                                      | 0.986 67                                              |                              |
| TPB400 | 1 600         | 400           | 200           | 0.593 5 | 14.713 4  | 1.051 3               | 53.095 6                                     | 0.846 1                              | 1.276 36                                              | 0.953 6                      |
| WS400  | 480           | 400           | 200           | 0.594 7 | 13.995 4  |                       | 62.755 7                                     |                                      | 1.338 52                                              |                              |
| SL1    | 1 300         | 300           | 120           | 0.525 4 | 11.564 8  | 0.707 8               | 60.022 5                                     | 1.335 4                              | 1.362 6                                               | 1.018 3                      |
| WS12   | 300           | 300           | 200           | 0.635 7 | 16.338 9  |                       | 44.946 5                                     |                                      | 1.338 1                                               |                              |
| SL5    | 1 300         | 300           | 120           | 0.510 5 | 11.014 0  | 0.679 5               | 80.694 2                                     | 1.327 7                              | 1.702 8                                               | 0.944 8                      |
| WS13   | 300           | 300           | 200           | 0.633 7 | 16.209 3  |                       | 60.776 1                                     |                                      | 1.802 3                                               |                              |
| SL8    | 1 300         | 300           | 120           | 0.516 6 | 11.236 0  | 0.807 7               | 87.353 3                                     | 1.241 7                              | 1.872 6                                               | 1.042 6                      |
| WS18   | 300           | 300           | 200           | 0.593 0 | 13.910 7  |                       | 70.350 9                                     |                                      | 1.796 1                                               |                              |
| SL9    | 1 300         | 300           | 120           | 0.479 4 | 9.985 6   | 0.689 4               | 90.964 2                                     | 1.457 6                              | 1.733 1                                               | 1.123 4                      |
| WS19   | 300           | 300           | 200           | 0.604 2 | 14.485 5  |                       | 62.408 0                                     |                                      | 1.542 7                                               |                              |
| SL10   | 1 300         | 300           | 120           | 0.511 9 | 11.064 0  | 0.804 8               | 91.370 8                                     | 1.227 6                              | 1.933 9                                               | 1.033 5                      |
| WS20   | 300           | 300           | 200           | 0.589 7 | 13.747 1  |                       | 74.433 2                                     |                                      | 1.871 3                                               |                              |
| SL11   | 1 300         | 300           | 120           | 0.518 3 | 11.296 9  | 0.738 4               | 87.689 2                                     | 1.188 8                              | 1.825 8                                               | 0.933 7                      |
| WS21   | 300           | 300           | 200           | 0.618 8 | 15.298 2  |                       | 73.764 5                                     |                                      | 1.955 4                                               |                              |

注:TPB 及 SL 表示三点弯曲梁试件,WS 表示楔入劈拉试件.

如令  $K_{IC}^{\equiv}/K_{IC}^{拉}=z$ ,  $\varphi_1/\varphi_2=x$  ( $F_{\max}/t_1$ )( $F_{H\max}/t_2$ )= $y$ , 则式(7)可表示为  $z=xy$ .以  $x$  为横坐标,  $y$  为纵坐标,建立坐标系,将表 1 中试验数据对应的点绘入坐标系中,并根据试验点的分布规律拟合出回归曲线<sup>[9]</sup>,如图 3 所示.曲线方程为

$$y=0.9701x^{-0.9213} \tag{10}$$

则函数  $z$ (记为  $F(x)$ )的表达式可写为

$$z=F(x)=yx=0.9701x^{-0.9213}x=0.9701x^{0.0787} \tag{11}$$

由试验结果可知,  $a_c^{\equiv}/h$  的可能变化范围为 0.45~0.70,  $a_c^{拉}/h$  的可能变化范围也为 0.45~0.70.根据式(8)和式(9),可以分别算得  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  的取值范围,进而可以计算出  $\varphi_1/\varphi_2$  即  $x$  可能的最大变化范围为 0.4~2.6.以  $x$  为横坐标,  $F(x)$  为纵坐标,在  $x$  的可能变化范围内绘出  $F(x) \sim x$  曲线,如图 4 所示.

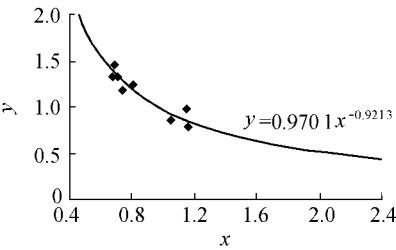


图 3 拟合曲线与实测点分布

Fig.3 Fitting curve and distribution of measured points

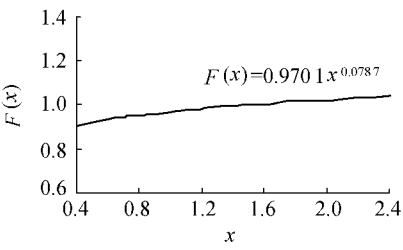


图 4  $F(x) \sim x$  关系曲线

Fig.4 Curve for  $F(x)$  vs.  $x$

① 徐世烺, 张秀芳, 郑爽. 小骨料混凝土双  $K$  断裂参数的实验测定. 大连: 大连理工大学, 2005.

② 徐世烺, 高洪波, 周厚贵, 等. 混凝土双  $K$  断裂参数试验研究. 大连: 大连理工大学, 2005.

由图4可以看出,  $F(x)$  的值随  $x$  的增大在直线  $F(x)=1.0$  的附近单调递增, 且曲线在  $F(x)=1.0$  直线以下 ( $F(x)<1.0$ ) 部分的面积略大于直线以上 ( $F(x)>1.0$ ) 部分的面积, 这说明  $K_{IC}^{\equiv} < K_{IC}^{\text{拉}}$  出现的几率比  $K_{IC}^{\equiv} > K_{IC}^{\text{拉}}$  的几率大. 根据面积加权平均计算出在  $\varphi_1/\varphi_2$  的可能变化范围内  $K_{IC}^{\equiv}/K_{IC}^{\text{拉}}$  的均值为 0.9834. 由表1试验数据得到的  $K_{IC}^{\equiv}/K_{IC}^{\text{拉}}$  的范围为 0.8986~1.1458, 均值为 1.0105, 二者十分接近, 且均接近于 1.

## 4 结 语

本文仅讨论了两形式试件的失稳韧度  $K_{IC}^{\text{III}}$  之间的关系. 从实测数据和分析计算结果来看, 三点弯曲梁和楔入劈拉两种形式试件的失稳韧度之比  $K_{IC}^{\equiv}/K_{IC}^{\text{拉}}$  接近于 1.0, 可近似认为二者的失稳韧度是相等的, 因而用这两种试件所测得的失稳韧度值差异甚小, 相互间无需换算.

## 参考文献:

- [1] 范天佑. 断裂力学基础[M]. 南京: 江苏教育出版社, 1978: 6-12.
- [2] 徐世烺. 混凝土双  $K$  断裂参数计算理论规范化测试方法[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2002, 24(1): 1-8.
- [3] 徐世烺, 吴智敏, 丁生根. 混凝土双  $K$  断裂参数的实用解析方法[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 54-60.
- [4] XU Shi-lang, REINHARDT H W. Determination of double- $K$  criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Par III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 179-193.
- [5] XU Shi-lang, REINHARDT H W, WU Zhi-min, et al. Comparison between the double- $K$  fracture model and the two parameter fracture mode[J]. Otto-Graf-Journal, 2003, 14: 131-157.
- [6] 吴智敏, 徐世烺, 王金来. 基于虚拟裂缝模型的混凝土双  $K$  断裂参数[J]. 水利学报, 1999(7): 13-16.
- [7] 吴智敏, 徐世烺, 王金来. 混凝土断裂韧度及临界裂缝尖端张开位移[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2002, 24(1): 29-34.
- [8] 赵志方, 徐世烺, 周厚贵. 混凝土软化本构关系对双  $K$  断裂参数的影响[J]. 工程力学, 2002, 19(4): 149-153.
- [9] 周纪芈. 实用回归分析方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990: 42-50.

## Influence of shape of specimens on unstable fracture toughness $K_{IC}^{\text{III}}$ of concrete

ZHOU Mei-ling, ZHU Wei-xuan

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

**Abstract:** Two kinds of specimens with different geometric shapes, i.e. three-point bending beam and wedge splitting specimen, are often used to test unstable fracture toughness  $K_{IC}^{\text{III}}$  of concrete. The study was performed to investigate the difference between unstable fracture toughness  $K_{IC}^{\text{III}}$  obtained by the two kinds of specimens, and their relationship was analyzed. The result shows that there is little difference between unstable fracture toughness tested by three-point bending beam and wedge splitting specimen with the same material and height.

**Key words:** concrete; unstable fracture toughness; three-point bending test; wedge splitting test