

支承形式对楔入劈拉试件断裂韧度 K_{IC} 的影响

黄闽莉, 王向东, 曹 亮

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 对楔入劈拉试验中试件的受力状况进行了分析. 结果表明: 除水平力会对裂缝的失稳扩展产生影响外, 外载的竖向分力、传力装置自重及试件自重也会对裂缝的失稳扩展产生影响. 竖向力对断裂韧度 K_{IC} 的影响与楔入劈拉试验所采用的支承形式有关, 即在双支座情况下, 自重和竖向分力的影响均可忽略不计, 而在单支座情况下, 应考虑自重和竖向分力的影响.

关键词 混凝土; 楔入劈拉试验; 单支座; 双支座; 断裂韧度 K_{IC}

中图分类号 : O346.1 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-198X(2006)04-0435-05

断裂韧度 K_{IC} 是判别裂缝是否失稳扩展的一种参数. 目前, 该参数是通过试验(如 3 点弯曲梁试验、紧凑拉伸试验和楔入劈拉试验) 所得到的最大荷载 P_{max} 和 K_{IC} 的计算公式算得的^[1-8]. 其中, 通过楔入劈拉试验得到的 P_{max} 来计算 K_{IC} 时所采用的公式是紧凑拉伸试验公式. 该公式没有考虑竖向力的影响. 实际上, 竖向力对 K_{IC} 有一定的影响, 影响大小与试件的支承形式有关. 目前, 我国在进行混凝土楔入劈拉试验时多采用双支承形式, 而国外大多采用单支承形式, 但在计算 K_{IC} 时都采用了相同的计算公式, 这是不合适的. 为此, 本文首先分析了支承形式对楔入劈拉试件断裂韧度 K_{IC} 的影响, 然后导出了相应的计算公式.

1 试件受力分析

根据文献 [5] 给出的混凝土楔入劈拉试验装置(图 1)分析竖向力对楔入劈拉试件(图 2)裂缝扩展的影响.

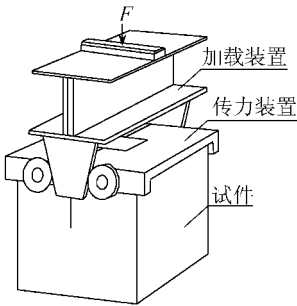


图 1 试验装置

Fig.1 Experimental set-up

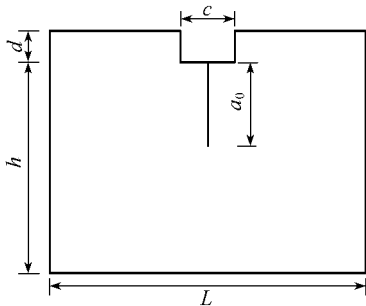


图 2 试件截面

Fig.2 Cross section of specimen

加载过程中, 荷载 F 和加载架自重 W_1 通过圆轮对传力装置(图 3)施加斜向力, 传力装置又通过盖板将该斜向力分解为水平力 P_H 和竖向力 P_V , 受力简图如图 4 所示. 由图 4 可知, $P = F + W_1$, $P_H = P/2 \tan 15^\circ = 1.866P$, $P_V = P/2$. 试件除受到这 2 个力的作用外, 还受到传力装置自重 W_2 、试件自重 W_3 和支座反力的作用. 其中, 试件自重 W_3 可分解为作用于试件左右两侧的 2 个力. 在受力分析中, 本文将试件看作拉弯组合变形构件. 单、双支座下楔入劈拉试件的受力计算

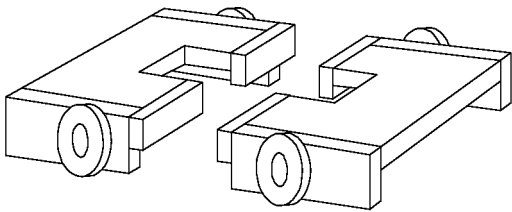


图 3 传力装置

Fig.3 Stress transfer device

当试件处于失稳扩展状态时,由材料力学弯曲应力公式可得 M 在 a_c 尖端处的最大名义应力,即

$$\sigma_{Nmax1} = \frac{M}{\frac{\pi(1-\alpha)^2 h^2}{6}} = \frac{6M}{\pi(1-\alpha)^2 h^2} = \frac{\alpha(M_1 + M_2 + M_3)}{\pi(1-\alpha)^2 h^2} \quad (5)$$

由材料力学拉弯组合变形应力公式可得 P'_H 在 a_c 尖端处的最大名义应力,即

$$\sigma_{Nmax2} = \frac{P'_H}{\pi(1-\alpha)h} + \frac{P'_H \frac{d + (\alpha + 1)h}{2}}{\frac{\pi(1-\alpha)^2 h^2}{6}} = \frac{3d + 2\alpha + 2}{\pi(1-\alpha)^2 h^2} P'_H \quad (6)$$

式中 $\alpha = a_c/h$.

当 $\sigma_{Nmax1} = \sigma_{Nmax2}$ 时,由式(5)(6)可得

$$P'_H = \frac{6M}{3d + 2\alpha + 2}h = \frac{\alpha(M_1 + M_2 + M_3)}{3d + 2\alpha + 2}h \quad (7)$$

设与 M_1 , M_2 和 M_3 所对应的等效水平力为 P'_{H1} , P'_{H2} 和 P'_{H3} , 则根据式(7)及以上分析,在单支座情况下,

$$P'_{H1} = \frac{3b_1 P \cdot 2\tan 15^\circ}{[3d + 2\alpha + 2]h} P_H = \frac{6b_1 2\tan 15^\circ}{3d + 2\alpha + 2} P_H = \beta_1 P_H \quad (8)$$

$$P'_{H2} = \frac{3b_2 W_2}{3d + 2\alpha + 2}h = \beta_2 W_2 \quad (9)$$

$$P'_{H3} = \frac{0.75 W_3 L}{3d + 2\alpha + 2}h = \beta_3 W_3 \quad (10)$$

在双支座情况下,

$$P'_{H1} = \frac{3\left(b_1 - \frac{L}{4}\right) P \cdot 2\tan 15^\circ}{[3d + 2\alpha + 2]h} P_H = \frac{6\left(b_1 - \frac{L}{4}\right) 2\tan 15^\circ}{3d + 2\alpha + 2} P_H = \beta_1 P_H \quad (11)$$

$$P'_{H2} = \frac{3\left(b_2 - \frac{L}{4}\right) W_2}{3d + 2\alpha + 2}h = \beta_2 W_2 \quad (12)$$

$$P'_{H3} = 0 \quad (13)$$

因此, P'_H 的表达式可以写为

$$P'_H = P'_{H1} + P'_{H2} + P'_{H3} = \beta_1 P_H + \beta_2 W_2 + \beta_3 W_3 \quad (\text{单支座}) \quad (14)$$

$$P'_H = P'_{H1} + P'_{H2} = \beta_1 P_H + \beta_2 W_2 \quad (\text{双支座}) \quad (15)$$

于是,考虑竖向力的影响后,楔入劈拉试件断裂韧度的计算公式可写为

$$K_{IC} = \frac{3.675 \left[1 - 0.12 \left(\frac{a_c}{h} - 0.45 \right) \right]}{t \sqrt{h} \left(1 - \frac{a_c}{h} \right)^{\frac{3}{2}}} (P_H + P'_H) \quad (16)$$

由式(16)可见,如果 P'_H 相对于 P_H 较小,可以略去不计,则式(16)就是式(3),即可近似用紧凑拉伸试件的 K_{IC} 公式计算楔入劈拉试件的 K_{IC} . 如果 P'_H 与 P_H 相比,不能忽略,则应按式(16)计算楔入劈拉试件的 K_{IC} .

3 双支座情况下 P'_H 对 K_{IC} 的影响

由式(15)可知,通过对 β_1 和 β_2 变化趋势的分析就可以看出 P'_H 对 K_{IC} 影响的大小. 因此,本文根据徐世烺等^{①②}所做的楔入劈拉试验并通过式(11)(12)计算出了 9 种试件 $a_c/h = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 时的 β_1 和 β_2 , 其数值范围及均值见表 1.

其中:一次试验^①所做试件共 7 组 25 个,试件厚度为 200 mm,高度为 150 ~ 1 200 mm,根据试验数据算得的各组 a_c/h (即 α) 的平均值 (a_c 由式(4)计算)为 0.532 5 ~ 0.594 7;另一次试验^②所做试件共 19 组 62 个,试

① 徐世烺,张秀芳,郑爽.小骨料混凝土双 K 断裂参数的试验测定.大连:大连理工大学,2004.

② 徐世烺,高洪波,周厚贵,等.各种级配混凝土双 K 断裂参数试验研究.大连:大连理工大学,2004.

表1 β_1 、 β_2 计算值

Table 1 Calculated results of β_1 and β_2

试件编号	L/mm	h/mm	t/mm	β_1		β_2	
				数值范围	均值	数值范围	均值
1	150	150	200	0.0546~0.0491	0.0518	0.0648~0.0583	0.0615
2	200	200	200	0.0230~0.0206	0.0218	0.0143~0.0128	0.0135
3	300	300	200	-0.0105~-0.0094	-0.0099	-0.0392~-0.0351	-0.0371
4	400	400	200	-0.0280~-0.0250	-0.0265	-0.0672~-0.0600	-0.0635
5	500	500	200	-0.0387~-0.0346	-0.0366	-0.0843~-0.0735	-0.0797
6	600	600	200	-0.0460~-0.0410	-0.0435	-0.0960~-0.0856	-0.0906
7	800	800	200	-0.0552~-0.0492	-0.0521	-0.1107~-0.0986	-0.1045
8	1000	1000	200	-0.0608~-0.0542	-0.0574	-0.1196~-0.1066	-0.1129
9	1200	1200	200	-0.0646~-0.0575	-0.0610	-0.1256~-0.1119	-0.1186

件厚度为 200 mm(部分为 250 mm) ,高度为 300 ~ 1 200 mm ,根据试验数据算得的各组 a_c/h (即 α)的平均值为 0.5643 ~ 0.6862. 计算所取的试验装置参数为 $b_1 = 0.065\text{ m}$, $b_2 = 0.055\text{ m}$, $d = 0.03\text{ m}$, $W_1 = 0.228\text{ kN}$, $W_2 = 0.142\text{ kN}$, W_3 根据试件体积算得.

从表 1 可知:

a. β_1 的变化范围为 - 0.0610 ~ 0.0518. β_1 为正时 , P'_{HI} 有助于裂缝的扩展 ,而 β_1 为负时 , P'_{HI} 将抑制裂缝的扩展. 有助于裂缝扩展的 P'_{HImax} 仅为 P_{H} 的 5.18% ,而抑制裂缝扩展的 P'_{HImin} 也仅为 P_{H} 的 6.1% ,均可以忽略不计.

b. β_2 的变化范围为 - 0.1186 ~ 0.0615. 由式(12)可知 $P'_{\text{H2}} = \beta_2 W_2$,而 W_2 仅为 0.142 kN ,远小于 P_{H} ,故相对于 P_{H} 而言 , P'_{H2} 可忽略不计.

c. 由式(13)可知 ,自重全由支座承担 ,故 $P'_{\text{H3}} = 0$.

综上所述 ,对双支座楔入劈拉试件而言 ,式(16)中的 P'_{H} 可略去不计 ,即其 K_{IC} 可用式(3)进行计算.

4 单支座情况下 P'_{H} 对 K_{IC} 的影响

由式(14)可知 ,通过对 β_1 、 β_2 和 β_3 变化趋势的分析就可以看出 P'_{H} 对 K_{IC} 影响的大小. 因此 ,本文根据徐世烺等^{①②}所做的楔入劈拉试验并通过式(8) (9) (10)计算出了 9 种试件 $a_c/h = 0.4$ 、0.5、0.6、0.7 时的 β_1 、 β_2 和 β_3 ,其数值范围及均值见表 2. 计算中所取的试验装置参数同前.

表2 β_1 、 β_2 、 β_3 计算值

Table 2 Calculated results of β_1 、 β_2 and β_3

试件编号	L/mm	h/mm	t/mm	β_1		β_2		β_3	
				数值范围	均值	数值范围	均值	数值范围	均值
1	150	150	200	0.1290~0.1161	0.1224	0.2037~0.1833	0.1933	0.1389~0.1250	0.1318
2	200	200	200	0.0995~0.0893	0.0943	0.1571~0.1410	0.1489	0.1429~0.1282	0.1354
3	300	300	200	0.0683~0.0611	0.0646	0.1078~0.0965	0.1020	0.1471~0.1316	0.1391
4	400	400	200	0.0520~0.0464	0.0491	0.0821~0.0733	0.0776	0.1493~0.1333	0.1411
5	500	500	200	0.0420~0.0375	0.0397	0.0663~0.0591	0.0626	0.1506~0.1344	0.1423
6	600	600	200	0.0352~0.0314	0.0332	0.0556~0.0495	0.0525	0.1515~0.1351	0.1431
7	800	800	200	0.0266~0.0267	0.0251	0.0420~0.0374	0.0396	0.1527~0.1361	0.1442
8	1000	1000	200	0.0214~0.0190	0.0202	0.0337~0.0301	0.0319	0.1534~0.1366	0.1448
9	1200	1200	200	0.0179~0.0159	0.0169	0.0282~0.0251	0.0266	0.1538~0.1370	0.1452

从表 2 可知:

a. β_1 的变化范围为 0.0169 ~ 0.1224. 当 $L > 300\text{ mm}$ 时 , P'_{HI} 对裂缝扩展的影响均在 P_{H} 的 5% 以下 ,可忽略不计 ;当 $L < 300\text{ mm}$ 时 , P'_{HI} 对裂缝扩展的影响约为 P_{H} 的 10% ,即可按 $\beta_1 = 0.1$ 考虑 P'_{HI} 的影响.

b. β_2 的变化范围为 0.0266 ~ 0.1933. 由式(9)可知 $P'_{\text{H2}} = \beta_2 W_2$,而 W_2 仅为 0.142 kN ,远小于 P_{H} ,故相

① 徐世烺,张秀芳,郑爽.小骨料混凝土双 K 断裂参数的试验测定.大连:大连理工大学,2004.

② 徐世烺,高洪波,周厚贵,等.各种级配混凝土双 K 断裂参数试验研究.大连:大连理工大学,2004.

对于 P_H 而言, P'_{H2} 可忽略不计.

c. β_3 的变化范围为 0.1318~0.1452. 由于 W_3 随试件尺寸的增大而较快地增大, 故应考虑试件自重的影响, β_3 可取上述数值的中间值, 即 1/7 左右.

综上所述, 在计算单支座楔入劈拉试件的 K_{IC} 时可采用如下公式:

$$\left\{ \begin{aligned} K_{IC} &= \frac{3.675 \left[1 - 0.12 \left(\frac{a_c}{h} - 0.45 \right) \right]}{t \sqrt{h} \left(1 - \frac{a_c}{h} \right)^{\frac{3}{2}}} \left(1.1 P_H + \frac{1}{7} W_3 \right) & (L \leq 300 \text{ mm}) \\ K_{IC} &= \frac{3.675 \left[1 - 0.12 \left(\frac{a_c}{h} - 0.45 \right) \right]}{t \sqrt{h} \left(1 - \frac{a_c}{h} \right)^{\frac{3}{2}}} \left(P_H + \frac{1}{7} W_3 \right) & (L > 300 \text{ mm}) \end{aligned} \right. \quad (17)$$

5 结 论

- a. 双支座楔入劈拉试件可以用式(3)计算其断裂韧度 K_{IC} , 而不需要考虑竖向力对 K_{IC} 的影响.
- b. 单支座楔入劈拉试件断裂韧度 K_{IC} 应用式(17)进行计算.
- c. 从试验的实施和 K_{IC} 计算公式的应用角度看, 楔入劈拉试验采用双支承形式较好.

参考文献:

[1] 王铎. 断裂力学[M]. 北京: 哈尔滨工业大学出版社, 1989: 31-36.

[2] 邓爱民, 王向东, 朱为玄, 等. 混凝土 K 判据及 K_{IC} 计算公式的讨论[J]. 机械强度, 2004, 26(增刊): 188-191.

[3] YU Xiao-zhong. Fracture mechanics of rock and concrete[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991: 270-284.

[4] 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: 181-208.

[5] 徐世烺, 赵国藩, 黄承逵, 等. 混凝土大型试件断裂能 G_F 及缝端应变场[J]. 水利学报, 1991(11): 17-24.

[6] 徐世烺, 赵燕华, 吴智敏, 等. 楔入劈拉法研究混凝土断裂能[J]. 水力发电学报, 2003(4): 15-22.

[7] 吴智敏, 赵国藩. 混凝土裂缝扩展的 CTOD_c 准则[J]. 大连理工大学学报, 1995, 35(5): 699-702.

[8] 焦辉. 混凝土 I 型裂缝断裂性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1990.

[9] 高泉. 混凝土断裂参数的测试方法及复合型断裂判据的试验情况[D]. 大连: 大连理工大学, 1992.

[10] XU Shi-lang, REINHARDT H W. Determination of double- K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98: 179-193.

Effect of support forms on fracture toughness K_{IC}
of wedge splitting specimens

HUANG Min-li, WANG Xiang-dong, CAO Liang

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

Abstract Stress analysis performed on wedge splitting specimens shows that, besides the horizontal component of external loads, the vertical component of external loads, the self-weight of stress transfer device, and the self-weight of specimens, are of certain impacts on instable development of cracks, and that the impact of the vertical component on the fracture toughness K_{IC} in wedge splitting experiments is related to the support form: with double supports, the impacts of self-weight and vertical component could be neglected, while the above factors should be considered under single support.

Key words: concrete; wedge splitting experiment; single support; double supports; fracture toughness K_{IC}