

楔入劈拉试验支承形式对混凝土断裂韧度的影响

赵艳华 韩 飞 陈 晋

(大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室 辽宁 大连 116024)

摘要 :针对楔入劈拉试件支座位置的不同 ,包括双线支座与单线支座 ,分析不同竖向荷载对断裂性能参数测试可能造成的影响 ,并通过试验数据进行验证。通过分析比较 ,认为对于实验室进行混凝土楔入劈拉试件的常用尺寸 ,支承体与传力装置所传荷载在一个竖向平面内可抵消竖向荷载和一部分构件自重 ,从而得到较为接近真实值的断裂性能参数。

关键词 :楔入劈拉试验 ;支承 ;混凝土 ;断裂力学 ;断裂韧度

中图分类号 :O346 ;TU528 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)04-0010-04

The effect of support on concrete fracture toughness in wedge-splitting test//ZHAO Yan-hua , HAN Fei , CHEN Jin(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering , Dalian University of Technology , Dalian 116024 , China)

Abstract : According to different support positions , including single support and dual support , the effects of different vertical loads on parameter tests of fracture properties are analyzed. The results have been verified by experimental data. Analysis and comparison of the results shows that for ordinary wedge-splitting specimens used in the laboratory , the fracture properties estimated will be close to the true values when the support is fixed vertically in the same plane with the force transferred , which can offset part of the weight.

Key words : wedge-splitting test ; support ; concrete ; fracture mechanics ; fracture toughness

对于准脆性材料的断裂性能测定 ,要求能提供稳定的试验过程 ,尤其是测试混凝土断裂能过程中需要得到稳定可靠的荷载~位移曲线的下降段。在目前混凝土断裂性能测试常采用的试件几何形式中 ,楔入劈拉试件虽然出现较晚 ,但由于明显的优势而日渐受到重视^[1-4]。在 2005 年颁布的电力行业标准《水工混凝土断裂韧度试验规程》^[5]中 ,采用了楔入劈拉试件作为断裂韧度确定的一种试验形式。

图 1 是目前采用较多的楔入劈拉试验加载形式^[6]。其中加载工具为一工字形钢 ,然后通过 2 个带有滚轴的传力钢板将荷载加在切口混凝土试件块上。通过选取合适的型钢楔形角 ,使竖向荷载低于水平荷载 ,人为地提高了试验机的刚度 ,从而在实际操作中降低对试验机本身刚度的要求 ,这是楔入劈拉试件较为明显的一个优点。在试验过程中 ,通过记录荷载 F 和裂缝口张开位移 d_{COD} 计算断裂韧度等混凝土断裂参数。

在应力强度因子手册中没有楔入劈拉试件的强度因子表达式 ,有学者通过有限元模拟计算给出了

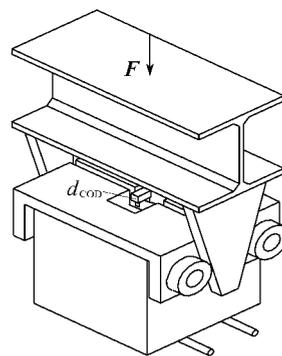


图 1 楔入劈拉试验装置

楔入劈拉试件应力强度因子的经验表达式^[7] ,但由于各类条件的限制并没有广泛地得到应用。而楔入劈拉与紧凑拉伸试件由于几何形式以及受力特性有一定的相似性 ,故在采用楔入劈拉试验确定混凝土断裂韧度时 ,一般的做法是借用紧凑拉伸试件的应力强度因子公式^[8]。由于没有统一的标准 ,在楔入劈拉试验过程中 ,采用了不同试件尺寸、不同加载位置以及不同的支承形式。对于支承形式 ,国外常用单线支承 ,即将支座放置在试件底边的中点 ;国内一

基金项目 :国家自然科学基金(50708014)

作者简介 :赵艳华(1974—) ,女 ,山西大同人 ,副教授 ,博士 ,从事混凝土断裂性能研究。E-mail :zyhua74@tom.com

般选用双线支承,即将支座放置在试件底部四分点处或与传力位置在同一竖向平面内。在楔入劈拉试验中,对裂缝尖端应力场有影响的不仅有水平荷载和竖向荷载,还包括加载装置、传力装置以及试件自重的作用。而支承位置的不同,会导致以上因素对断裂性能参数的计算产生较大的影响,从而对借用紧凑拉伸试件计算公式的适用性产生疑问,因为紧凑拉伸试验中仅考虑水平力对断裂的作用。文献[9]研究了支承形式对断裂韧度的影响,不过双线支承位置仅考虑了四分点一种情况。支承位置的合理选择是进行混凝土断裂性能研究的一个先决条件,这正是笔者试图探讨的问题。

1 楔入劈拉试验采用的支承形式

因为试件尺寸以及受力对称,故取一半作为研究对象(图2)。其中,传力板采用固定大小和间距的钢板组合。该项研究进行试验时所采用的钢板组合经过计算发现其重心位置与滚轴重心比较接近,为简化计算,传力板 G_2 的重心位置与滚轴重心重合,即 G_2 与 P_V 作用在同一竖向平面内。对试件的一半进行分析,韧带上作用力的平衡条件为

$$\begin{cases} N = P_H \\ M = P_H \left(D - \frac{D-a}{2} \right) + (P_V + G_2)H_1 + \frac{G_3}{2} \frac{H}{2} - R_Y H_2 \\ R_Y = P_V + G_2 + \frac{G_3}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_H 为水平荷载; P_V 为竖向荷载; D 为试件有效高度; a 为试件初始缝长; H 为试件半宽; H_1 为传力装置重心到试件中心线的距离; H_2 为支座反力到试件中心线的距离; R_Y 为支座反力; G_2 为传力装置质量; G_3 为试件质量。

将支座反力 R_Y 公式带入弯矩公式可得

$$M = P_H \left(D - \frac{D-a}{2} \right) + (P_V + G_2)(H_1 - H_2) + \frac{1}{2} G_3 \left(\frac{1}{2} H - H_2 \right) \quad (2)$$

从韧带的受力分析看,对混凝土裂缝扩展起作用的荷载不仅包括 P_H , P_V (G_1 的影响通过 P_V 体现), G_2 和 G_3 都在起作用。这一点与紧凑拉伸试件仅考虑水平荷载是不同的,因此在采用紧凑拉伸试验的公式时需要慎重考虑以上因素的影响。不过由于支承位置的不同,这些荷载的影响程度也不同。本文所考虑的3种支承形式为:① $H_2 = H_1$; ② $H_2 = H/2$, 试件的四分点位置; ③ $H_2 = 0$, 单支座。其中,前2种为双线支承形式,第3种为单线支承形式。

从图2的受力情况可以发现,对于第1种支承形式, R_Y 可以抵消同线上的 P_V 和 G_2 , 以及部分 G_3 对断裂性能的影响,而第2种支承形式,由于支座与一半构件的重心位置竖向同线,所以 R_Y 可抵消全部 G_3 和部分 P_V 与部分 G_2 的影响。而第3种支承形式, P_V , G_2 和 G_3 的影响都不能忽略。

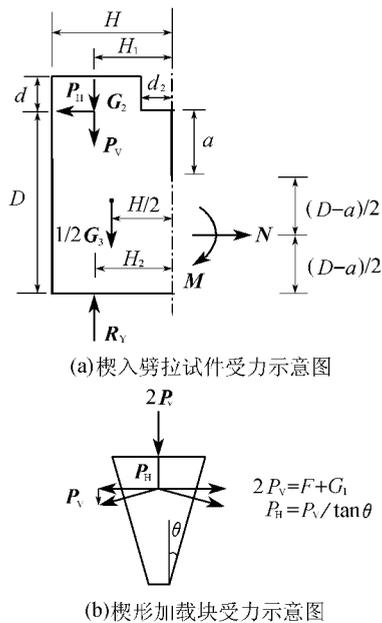


图2 楔入劈拉试件

2 不同支承形式下竖向荷载对断裂性能的影响

用于判定裂缝扩展的应力强度因子 K 表征了裂缝前端的应力场强弱,因此在采用楔入劈拉试件确定断裂韧度等参数时,可以通过裂缝前端的应力场来分析竖向荷载的影响。假定在滚轴轴心处作用一假想等效水平力 P'_H , 在韧带产生拉弯作用使裂缝扩展。而且 P'_H 在裂缝前端韧带部分产生的最大拉应力与所有竖向荷载 (P_V , G_2 和 G_3) 引起的最大应力相等。等效后,对裂缝扩展有贡献的荷载就仅为水平方向的力 $P_H + P'_H$ 。如果 P'_H 与 P_H 的比值在一个可接受的范围内时,就可忽略竖向荷载对裂缝扩展的影响,直接采用紧凑拉伸的断裂参数公式。

若记试件厚度为 B , 试件有效高度为 D , 预制裂缝长度即初始裂缝长度为 a , 令初始裂缝相对长度 $\alpha = a/D$, 那么 P'_H 在试件韧带部分产生的最大应力为

$$\sigma'_{\max} = \frac{P'_H}{B(D-a)} + \frac{6P'_H \left(a + \frac{D-a}{2} \right)}{B(D-a)^2} = \frac{2P'_H}{DB(1-\alpha)^2} (2 + \alpha) \quad (3)$$

根据线弹性力学,由式(2)可得所有竖向荷载在韧带部位产生的最大应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{6[(P_V + G_2)(H_1 - H_2) + \frac{1}{2}G_3(\frac{1}{2}H - H_2)]}{BD^2(1 - \alpha)^2} \quad (4)$$

根据等效原则 $\sigma'_{\max} = \sigma_{\max}$ 可得假想水平荷载 P'_H 为

$$P'_H = \frac{3[(P_V + G_2)(H_1 - H_2) + \frac{1}{2}G_3(\frac{1}{2}H - H_2)]}{D(2 + \alpha)} = \frac{\frac{3}{D(2 + \alpha)}(P_V + G_2)(H_1 - H_2) + \frac{3}{2D(2 + \alpha)}G_3(\frac{1}{2}H - H_2)}{1} \quad (5)$$

从式(5)可以直观地看到,对于第1种支承形式,即 $H_2 = H_1$ 时,等式右边只剩下关于 G_3 的表达式,即只有试件自重对裂缝扩展起作用;对于第2种支承形式, P'_H 包括 P_V 和 G_2 2项,即竖向传递荷载和传力板自重都对试件断裂有贡献;同理对于单支座的第3种支承形式, P_V 、 G_2 和 G_3 3类竖向荷载都对裂缝扩展有影响,在计算断裂性能参数时都应考虑。

为研究混凝土断裂性能单线支承,试验设计了若干组不同尺寸的楔入劈拉试件,分别为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ($2H \times D \times B$), $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 以及 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 楔形角 $\theta = 15^\circ$ 。但加载工具和传力钢板采用1套, $G_1 = 0.18 \text{ kN}$, $G_2 = 0.16 \text{ kN}$, 混凝土密度采用 2500 kg/m^3 , 弹性模量 $E = 28.7 \text{ GPa}$, 试件缺口槽宽度 $2d_2 = 50 \text{ mm}$, 高度 $d = 30 \text{ mm}$, $H_1 = 65 \text{ mm}$ 。图3给出了在不同尺寸情况下3种支承形式的 P'_H 与 P_H 比值(无量纲,假定 $P_H = 1$)随 α 的变化。其中:第1种支承形式($H_2 = H_1$),即 R_Y 与 G_2 和 P_V 作用在同一竖向平面内;第2种支承形式($H_2 = H/2$),支座在试件的四分点位置;第3种支承形

式($H_2 = 0$)单线支承。

从图3可以看出,单线支承情况下竖向荷载对不同尺寸的楔入劈拉断裂试验结果影响最大,且 $P'_H > 0$ 表明其作用都是有助于裂缝的扩展。对于第1种和第2种双线支承形式,随着试件尺寸的增大, P'_H 的绝对值在增大,表明竖向荷载的影响在增加,但情况稍有不同。对于第2种支承形式,在试件尺寸不大时($D = 200 \text{ mm}$), $P'_H < 0$, 意味着试件自重的存在可使裂缝有闭合的趋势。而随着试件尺寸的增大,由于重心向外移, $P'_H > 0$ 。如果是支承位于试件四分点处的第2种支承形式,对于小尺寸试件($D = 200 \text{ mm}$), $P'_H > 0$, 说明 P_V 和 G_2 的作用使裂缝开展。随着试件尺寸的增大,试件重心外移, P_V 和 G_2 的作用导致 $P'_H < 0$ 。另外值得一提的是对于实验室通常采用的 200 mm 的楔入劈拉试件,第1种支承形式的竖向荷载等效水平力绝对值小于第2种支承形式的等效水平力,大约在 25% 附近。因此如果在实验室进行小尺寸的楔入劈拉试验,选用第1种支承形式较为合理。

从图3还可以看出,虽然不同尺寸、不同支撑形式对 P'_H/P_H 的影响不同,如曲线斜率大小不同,且有的为正、有的为负,但是所有的 $P'_H/P_H \sim \alpha$ 曲线都有随初始裂缝相对长度 α 的增大而接近于 x 轴的趋势,即当试件尺寸一定时, α 越大,竖向荷载对楔入劈拉试验结果的影响越小。

下面选取第1种支承形式,以 $D = 200 \text{ mm}$, $G_3 = 0.2225 \text{ kN}$ 的1组试件测得的最大荷载 $P_{H\max}$ 和对应的裂缝张口位移 d_{COD} 计算断裂韧度,以此分析竖向荷载对其的影响。其中 $P_{H\max}$ 是试验过程中 F 与 G_1 之和并经楔形角 θ 的转化得到的。裂缝尖端应力强度因子 K_I 的计算采用经验公式^[8]:

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{D}}F(\alpha) \quad (6)$$

其中 $F(\alpha) = 3.675[1 - 0.12(\alpha - 0.45)][1 - \alpha]^{-3/2}$, $0.2 \leq \alpha \leq 0.8$, 式(6)的误差范围在 2% 以内。

在采用式(6)计算断裂韧度 K_{Ic} 时,对应的荷载和裂缝长度应采用最大荷载 P_{\max} 以及临界状态的裂缝相对长度 α_c 。根据双 K 断裂准则中引入的线形渐进叠加原则^[10], α_c 的值由 P_{\max} 以及与其对应的 d_{COD} 确定^[8]:

$$d_{\text{COD}} = \frac{P}{BE} [13.18(1 - \alpha)^2 - 9.16] \quad (7)$$

式中 E 为材料的弹性模量。当 $0.3 \leq \alpha \leq 0.7$ 时,式(7)的误差范围在 2.9% 以内。

从式(5)和式(7)可以看出,如果要考虑试件自重的影响, α 与 P'_H 是相互影响的,可以通过联立方

①第1种支承形式 ②第2种支承形式 ③第3种支承形式

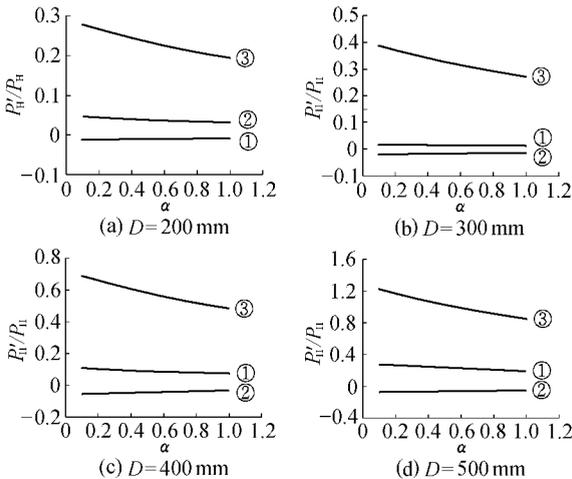


图3 不同支承形式的 P'_H 和 P_H 比值随 α 的变化曲线

表 1 竖向荷载对断裂韧度的影响

α	$P_{Hmax}/$ kN	$d_{con}/$ mm	不考虑竖向荷载作用			考虑竖向荷载作用		
			α_c	$K_{Ic} / (MPa \cdot m^{1/2})$	α'_c	$P_H / 10^{-3} \text{ kN}$	P'_{Hmax} / kN	$K'_{Ic} / (MPa \cdot m^{1/2})$
0.2	11.183	0.112	0.555	1.530	0.555	-9.80	11.173	1.527
0.2	10.714	0.102	0.546	1.420	0.546	-9.83	10.704	1.421
0.2	11.256	0.127	0.578	1.660	0.578	-9.71	11.246	1.660
0.2	11.416	0.081	0.486	1.267	0.486	-10.07	11.406	1.266
0.3	9.414	0.138	0.624	1.644	0.624	-9.54	9.404	1.641
0.3	9.035	0.124	0.613	1.511	0.613	-9.58	9.025	1.510
0.3	8.966	0.102	0.579	1.329	0.579	-9.71	8.956	1.326
0.3	9.313	0.104	0.576	1.364	0.576	-9.72	9.303	1.364
0.4	7.234	0.102	0.618	1.231	0.618	-9.56	7.224	1.232
0.4	7.481	0.172	0.694	1.766	0.695	-9.29	7.472	1.769
0.4	6.585	0.137	0.680	1.452	0.68	-9.34	6.576	1.451
0.4	6.800	0.096	0.618	1.158	0.618	-9.56	6.790	1.158
0.5	4.844	0.182	0.758	1.609	0.758	-9.08	4.835	1.607
0.5	4.672	0.138	0.728	1.311	0.729	-9.17	4.663	1.313
0.5	5.689	0.135	0.699	1.372	0.699	-9.27	5.680	1.371
0.5	5.045	0.130	0.710	1.288	0.711	-9.23	5.036	1.290

程组求解。表 1 列出了考虑以及不考虑竖向荷载作用下第 1 种支承形式的断裂韧度。

从表 1 可以看出,对于第 1 种支承形式,竖向荷载中对裂缝扩展有影响的只有构件质量 G_3 ,而且其 P'_H 非常小,不超过 1%,因此对临界缝裂有效长度和断裂韧度的影响可忽略。另外,由以上分析可知,对于 $D = 200 \text{ mm}$ 的试件来说,在第 1 种支承形式下,竖向荷载有使裂缝闭合的趋势,因此考虑竖向荷载作用的 K'_{Ic} 应小于 K_{Ic} ,但由于两者数值相差极小以及试验数据误差的影响,有个别 K'_{Ic} 的计算值略大于 K_{Ic} 。

3 结 语

楔入劈拉试件形式是一种较为理想的进行稳定混凝土断裂试验的试件形式。但在采用紧凑拉伸试件的公式计算分析混凝土断裂参数时,需要考虑竖向荷载对结果的影响。本文以竖向荷载的等效水平力为比较参数,分析了 3 种支承形式下竖向荷载的影响。结果表明单线支承影响最大,而对于小尺寸试件,当支承与传力装置重心位于同一竖向平面内时,竖向荷载对混凝土断裂性能的影响较小,在计算分析中可忽略不计,可完全参照紧凑拉伸试件计算。

参考文献:

[1] BRUHWILEER E, WITTMANN F H. The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests [J]. Journal of Engineering Fracture Mechanics, 1988, 5 :117-125.

[2] 徐世昝,卜丹,张秀芳.楔入式紧凑拉伸法确定混凝土的断裂能 [J].水利学报,2007,38(6):683-689.

[3] KARIHALOO B L, ABDALLA H M, XIAO Q Z. Deterministic size effect in the strength of cracked concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(1):171-188.

[4] LEITE J P B, SLOWIK V, APEL J. Computational model of mesoscopic structure of concrete for simulation of fracture processes [J]. Computers and Structures, 2007, 85(17/18):1293-1303.

[5] DL/T 5332—2005, 水工混凝土断裂韧度试验规程 [S].

[6] XU Shi-lang, ZHAO Yan-hua, WU Zhi-min. Study on the average fracture energy for crack propagation in concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2006, 18(6):817-824.

[7] GUINEA G V, ELICES M, PLANAS J. Stress intensity factors for wedge-splitting geometry [J]. International Journal of Fracture, 1996(2):113-124.

[8] 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(2):179-193.

[9] 黄闽莉,王向东,曹亮.支承形式对楔入劈拉试件断裂 K_{Ic} 的影响 [J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(4):435-439.

[10] XU Shi-lang, REINHARDT H W. Crack extension resistance and fracture properties of quasi-brittle softening materials like concrete based on the complete process of fracture [J]. International Journal of Fracture, 1998(1):71-99.

(收稿日期 2008-10-29 编辑:方宇彤)

