

文章编号:0559-9350(2009)08-0995-07

钢纤维混凝土断裂过程测试与力学性能

王利民^{1,2}, 戈晓霞¹, 刘露¹, 张东焕¹

(1. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266033)

摘要:为了研究钢纤维混凝土的断裂过程和承载力的估算方法,分别对4种不同尺寸的钢纤维混凝土试件进行楔入式劈裂断裂试验,并对其中2个试件粘贴应变片进行断裂过程的跟踪监测。试验得到了一系列荷载位移关系曲线,由数据计算获得各个试件的荷载与张开位移关系曲线,以及断裂损伤区变形随荷载变化曲线。结合黏聚裂纹应力强度因子与断裂准则,对各组试件的承载力进行估计,并将其计算值与试验结果的平均值作比较,两者较吻合。表明用断裂力学原理分析该类材料结构的初期失效,和估计中小尺寸构件的承载能力是可行的。

关键词:钢纤维混凝土;劈裂断裂试验;应变片电测;双K断裂准则;承载力计算

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

1 研究背景

钢纤维混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete,简称 SFRC)是在普通混凝土中掺入乱向分布的细短钢纤维所形成一种新型多相混杂材料,这些随机分布的短纤维可以阻碍混凝土内部微裂纹和宏观裂缝的发生与发展。许多学者对该材料进行了研究,包括纤维混凝土的力学分析模型、材料的抗压疲劳特性和热性能、纤维对混凝土裂纹的抑制以及抗渗性能等^[1-6]。文献[7-8]分别通过单轴疲劳拉伸试验和抗拉试验分析了纤维横跨裂缝的桥联作用和力学性能。最近几年也有关于该材料在特定环境下的试验研究,如高丹盈等^[9]试验研究了该材料在冻融环境下的Ⅱ型断裂性能,徐世等^[10]试验测定了在水压作用下的双K断裂参量。目前,国内学者大多侧重于纤维混凝土材料基本力学性能的试验研究,尤其是材料强度分析,而对于材料的破坏过程,特别是后裂缝阶段力学性能的试验研究相对较少。由于在混凝土中加入了纤维,使得复合后的材料结构破坏和断裂机理非常复杂^[11],因此本文对钢纤维混凝土试件进行劈裂试验,由应变数据计算试件预制裂纹前端的张开位移,并绘制荷载与张开位移的关系曲线,以及损伤端点位置随荷载的变化关系曲线;结合阻抗强度因子与断裂准则得到该类结构的最大承载力,并与试验数据比较分析。

2 钢纤维混凝土断裂过程试验

试验是4种不同尺寸的钢纤维混凝土试件的劈裂试验,并且分别选取第Ⅱ组和第Ⅳ组中各一个试件进行电测跟踪断裂过程。

2.1 钢纤维混凝土试件的制作 试验所用的水泥为山东省交通厅水泥厂生产的42.5#普通水泥,砂子是山东莱芜河滩砂,骨料为济南章丘双山青石子。纤维为上海产真强牌钢纤维,长度分别为50mm、

收稿日期:2008-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10272086);山东省自然科学基金资助项目(Y2006A29)

作者简介:王利民(1962—),男,山东章丘人,博士,教授,主要从事材料与结构失效研究。E-mail: wanglimin@qtech.edu.cn

30mm 和 25mm, 两端带有弯钩。纤维混凝土试件的配合比为水泥:水:砂子:石子=1:0.35:1.67:1.93, 掺入的钢纤维重量占试件总重量的 4%。采用干拌法, 即先将砂子和水泥混合搅拌均匀, 然后加入纤维和石子, 搅匀后再加水一起搅拌成混凝土。混凝土浇筑进模具后, 放在振动台上振动 5~10min。试件成型采用木制模具, 内表面贴塑料纸防水, 浇筑后 3~4h 脱模。脱模后的试件在常温下保持恒定湿度养护 28d 后进行试验。

2.2 试件尺寸及加载装置 试验所用钢纤维混凝土试件按其外观尺寸分为 4 组, 共 10 个。试件几何形状如图 1(a) 所示, 图中 a 表示荷载加载点到裂纹尖端的距离, b 表示荷载加载点到试件韧带底边的距离, c 表示荷载加载点到试件顶部的距离, h 、 L 分别表示试件的总高度、宽度, t 表示厚度。第 I 组试件的切口为“V”字形, 其余 3 组的切口均为“|”字形; 4 组试件的 t 、 L 、 b 、 h 和 a 等不同数据列于表 1 中。采用微机控制万能试验机对已制备好的 4 组钢纤维混凝土试件用位移控制方式进行加载试验, 加载速度为 0.05mm/min , 其加载装置如图 1(b) 所示。加载原理为试验机的压头把力传给与其螺纹连接的楔形板, 楔形板下移将力传到滚轮轴上; 再由滚轮轴将力传到与其连为一体的折板上, 折板是卡在试件凹槽上的, 于是来自压头的力就施加到试件上。

试验采用类似紧凑拉伸试件几何形式的楔入劈拉法加载方式。与紧凑拉伸相比, 一个合适楔形角的选取就可以使较小的竖向荷载产生较大的水平力^[8]。试验机施加的荷载 P 与将力 F 分解成水平分力 F_x 和铅垂分力 F_y 构成平衡力系。而且有力的关系存在: $F_y = \frac{P}{2} = F \sin 15^\circ$; $F = \frac{P}{2 \sin 15^\circ}$; $F_x = F \cos 15^\circ$

$$= \frac{P}{2} \cot 15^\circ = 1.87 P。$$

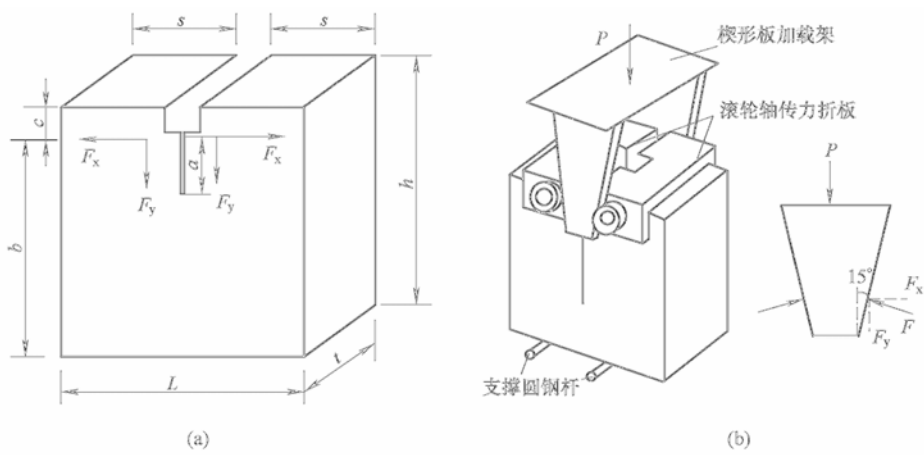


图 1 试件几何形状和加载装置

由试验得到的各个试件最大荷载 P 和加载点最大位移 f 均列于表 1 中。

表 1 试件的几何尺寸和试验荷载及位移

试件组号	φ mm	D mm	b mm	h mm	a mm	最大荷载 P kN	最大位移 f mm
I	150	500	520	560	160	12.406	9.1788
						15.316	
II	150	310	320	350	95	10.936	12.06
						7.477	7.4348
						9.893	
III	150	250	230	270	75	6.140	2.86
						6.328	6.2
						6.389	
IV	150	150	135	175	50	2.859	5.0322
						3.761	

2.3 劈裂试验的荷载—位移关系曲线 试验过程中, 通过试验机与电脑自动绘制荷载—加载点位移关系曲线, 如图 2。对比素混凝土断裂过程, 从图 2 显示钢纤维混凝土具有更大的断裂延性, 承载能力略有提高^[12]。荷载变化曲线有下降段, 即荷载达到最大值时试件没有立即断开, 与素混凝土断裂特征表

现不同。说明纤维对混凝土有增韧和桥联作用,且增加了材料控制裂缝张开与扩展的能力。这种短纤维的作用机理也可以从相关文献的模型分析中看到,事实上短纤维在裂纹前方几乎不起作用,只是在裂纹张开时发挥桥联作用^[13]。

2.4 布片方案与应变片的粘贴 在对第 II 组和第 IV 组中取出的一个试件进行应变片跟踪电测前,根据每组已断裂试件的裂缝轨迹情况对要电测的试件规划布片方案。第 II 组试件均粘贴型号 BX120-50AA、规格 50mm×3mm、电阻 120±0.2Ω、灵敏系数 2.10±1% 的应变片;而第 IV 组试件仅在裂纹尖端处粘贴 50mm×3mm 的应变片,其余应变片型号为 BX120-20AA、规格 20mm×3mm、电阻 120.1±0.2Ω、灵敏系数 2.08±1%,粘贴位置如表 2 数据所示。试件前后两面采取相同的布片方案。

因为试件贴片处主要承受拉应力作用,若应变片完全粘贴在预制裂纹前端的表面上,可能使得应变片随着裂纹扩展而过早的被拉断,导致无法测出断裂过程区的变形情况,所以本文试验应变片采用中间悬空贴法。先用 502 胶将接线端子固定在试件上,然后粘贴应变片,粘贴时将气泡排出,粘贴完毕后焊接测试线,焊线前后需要用万能表检查应变片以及导线是否符合绝缘电阻要求^[14]。

将试件上的应变片接入电桥 AB 桥臂,另外在补偿块上粘贴一个与工作片规格相同的电阻应变片称为温度补偿片,接入电桥 BC 桥臂,这样组成单臂半桥。第 II 组采用 4 个应变仪,第 IV 组采用 3 个应变仪,然后分别人工记录下在某些荷载下相应的应变值数据以便于后来分析。

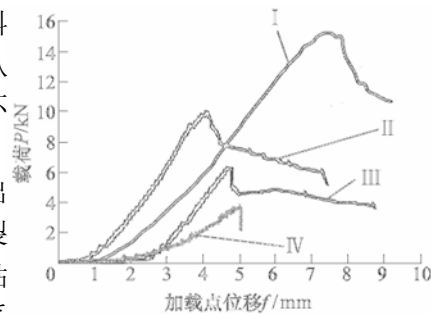


图 2 荷载—加载点位移关系曲线

表 2 应变片粘贴位置

试件类型	距切口端部距离 a/mm	应变片编号
II	0	① 或 A
	20	② 或 B
	40	③ 或 C
	55	④ 或 D
	70	⑤ 或 E
	85	⑥ 或 F
	100	⑦ 或 G
	120	⑧ 或 H
	140	⑨ 或 I
	160	L 或 J
180	瓏 或 K	
IV	5	① 或 A
	15	② 或 B
	25	③ 或 C
	45	④ 或 D
	70	⑤ 或 E

3 电测试验的数据分析

3.1 荷载和张开位移变化关系曲线 通过记录下来的应变值可以换算出被测处的位移,即应变值乘以应变片的长度为应变片两端相对张开位移^[12]。以应变片粘贴位置处的张开位移为横坐标,相应荷载为纵坐标,可以描绘出荷载随裂纹张开位移变化的关系曲线,如图 3 所示。由于应变片‘7’和‘K’与混凝土剥落未能有效地测到相应位置的应变值,故缺少相应的曲线。从图 3 看出,试件 II 两侧张开位移分布基本相同,而 IV 两侧变形差别较大。曲线在峰值荷载前存在直线段,即力与变形成线性关系,表明此时材料处于弹性变形阶段。由图 3 中的第 II 组试件的荷载与裂纹张开位移可以看出,在荷载达到最大值前的上升阶段,随着荷载的增加,各应变片处位移增加不是很大;而在荷载达到峰值之后的下降阶段,各应变片处位移却迅速增加,并且离预制裂纹尖端越近的应变片处位移越大。另外从图 3 中所示的第 IV 组荷载与裂纹张开位移的关系曲线可以发现,荷载过某一值时,荷载几乎不变而位移变化却较大。

3.2 位移与位置关系曲线 由试验所得数据可以计算出应变片处相应于不同荷载下的黏聚裂纹张开位移,并绘制于图 4 中。从图 4 曲线数据也可以看出,随着荷载的增大,同一应变片处的张开位移也相应地增加,而在荷载达到峰值后下降时,应变片处位移并非是减少而是增加,表明材料的非线性力学行为。试验过程中观察到,裂纹扩展的轨迹并非沿混凝土预制切口所在方向,有的则是偏到一侧发展。由图 4 中的 4 组曲线很容易发现随着荷载的增加,裂纹尖端逐渐移向试件底部边缘,当荷载过峰值后时下降表现的更为明显。2 组曲线都表明离裂纹端部越近的位置处张开位移越大。

3.3 黏聚裂纹端点位置随荷载变化曲线 材料的断裂过程总要经历起裂,裂纹缓慢扩展,然后试件失

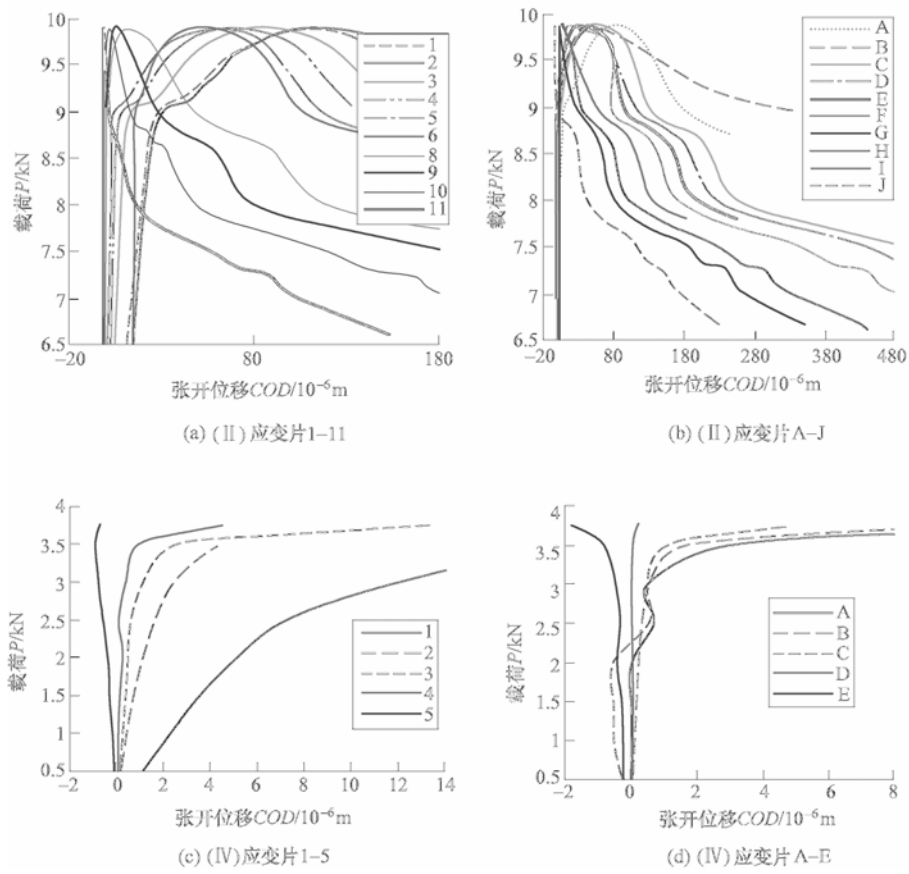


图3 荷载—裂纹张开位移关系曲线

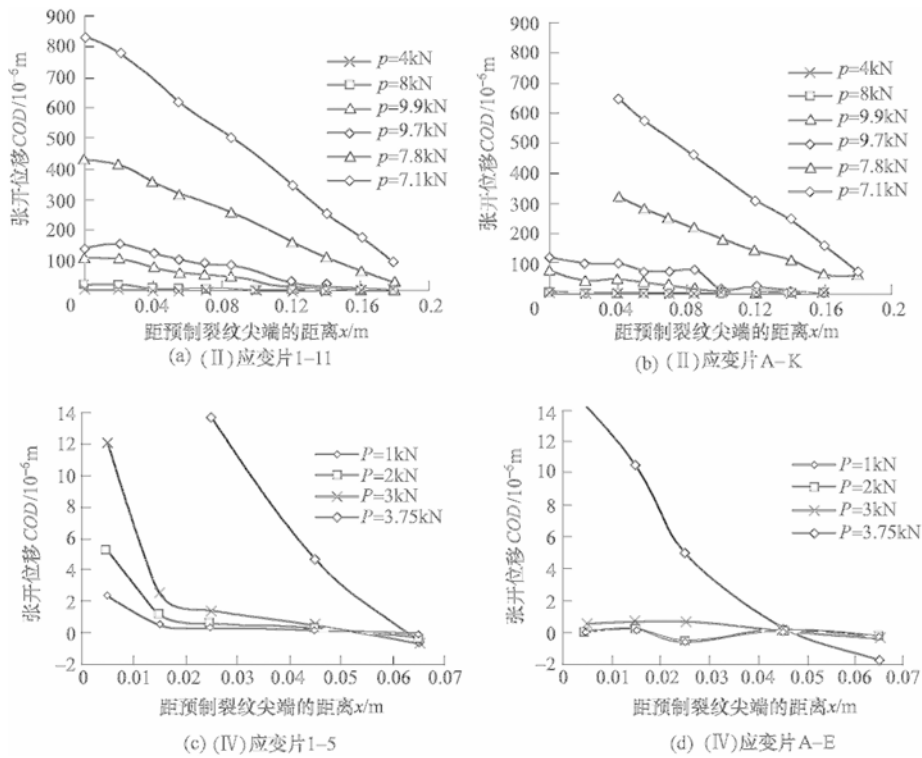


图4 不同荷载下张开位移随应变片位置变化曲线

稳断裂。当裂纹尖端的应力应变场达到裂纹开始扩展的临界状态时,此时的裂纹张开位移称之为临界张开位移。一般认为混凝土的张开位移在大于或等于 0.03mm 时,便可以观测到裂纹的存在^[16]。若将与裂纹张开位移 0.03mm 对应的应变记为 ϵ_c ,其位置称为黏聚裂纹或非线性裂纹的端点。两个相邻应变片在某一荷载下的张开位移,如果一个小于 ϵ_c 另一个大于 ϵ_c ,可以确定黏聚裂纹端点在两者中间。第 II 组的电测试件由两面应变片得到的荷载与黏聚裂纹端点位置的关系曲线,表示在图 5。第 IV 组被测试件发生突然断裂,因而应变片没有得到黏聚裂纹端点位置。由图 5 可见,前一阶段荷载增加而非线性裂纹端点缓慢移动;后一阶段却是荷载大幅下降而黏聚裂纹端点位置明显迅速向试件边缘移动。

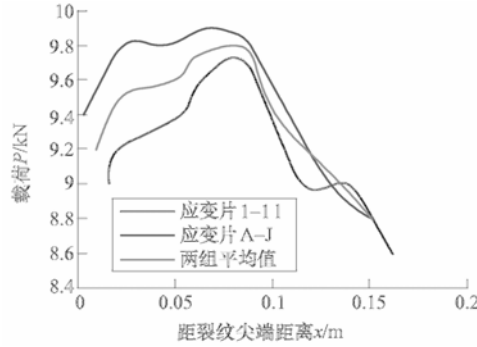


图 5 黏聚裂纹端点位置随荷载的变化曲线

4 承载力计算

本试验中纤维混凝土试件的裂纹体主要受垂直于裂缝面的拉力作用,即属于张开型断裂问题,显然该材料裂纹结构的断裂参量也存在尺寸效应。关于材料结构的非线性断裂有许多分析模型,Xu Shilang 等提出用起裂应力强度因子 K_{Ic}^{nl} 和失稳强度因子 K_{Ic}^m 作为参量描述断裂过程的双 K 裂纹扩展模型^[16],即裂缝起裂后随荷载缓慢扩展,临界失稳断裂前的裂纹应力强度因子 K_I 满足如下条件:

$$K_{Ic}^{nl} \leq K_I \leq K_{Ic}^m \quad (1)$$

对于混凝土以及纤维混凝土,通过大量多尺寸试件的全过程断裂试验观测表明,试件在失稳破坏前存在一段应变软化的裂纹发展过程区,也正是预制裂纹的开裂参数与失稳指标的数值差别较大的主要原因^[17]。该类材料断裂特性与完全张开的裂缝前端材料破损过程区内微裂纹的出现、材料颗粒之间以及纤维的相互作用密切相关。这种作用的力学简化就是所谓阻止裂纹发展的黏聚力,使得不同韧带长度的结构承载力发生变化^[18]。事实上,裂纹结构在失稳断裂前,预制裂纹前端已经历了损伤开始和损伤区缓慢扩展的过程,裂纹准静态扩展过程可以看作是由无数个暂态平衡所形成。当裂纹静止时由远场荷载产生的强度因子与损伤过程区分布力形成的阻力强度因子保持某种平衡。通过双 K 断裂准则有

$$K_I = K_0 + K_I^c \quad (2)$$

式中: K_0 为起裂应力强度因子,一般认为起裂断裂参数不依赖于裂纹结构和尺寸,是材料参量; K_I^c 为裂纹扩展时黏聚力的韧度增值,即黏聚应力强度因子,由文献^[19]能够得到近似计算式为

$$K_I^c = \eta \sqrt{\frac{d}{2\pi}} \quad (3)$$

式中: η 是具有应力量纲的参量,它与材料的组分特点以及极限承载力密切相关。

断裂过程区与未受损区的分界点是非线性裂纹的尖点,而预制裂纹尖端割痕切口根部是断裂过程区的起始点,两者之间的距离为裂纹扩展长度,设为 d ,参照图 1(a)可知 d 与 a 、 a_0 、 b 的关系为

$$a = a_0 + d \quad (0 \leq d \leq b - a_0) \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(2),参照文献^[20]可得到荷载的计算式

$$F_x = \frac{t [b - a_0 - d]^{\frac{3}{2}} \left(K_0 + \eta \sqrt{\frac{d}{2\pi}} \right)}{2 [2b + a_0 + d] \left[0.443 + 2.32 \left(\frac{a_0 + d}{b} \right) - 6.66 \left(\frac{a_0 + d}{b} \right)^2 + 7.36 \left(\frac{a_0 + d}{b} \right)^3 - 2.8 \left(\frac{a_0 + d}{b} \right)^4 \right]} \quad (5)$$

式中： t 为试件的厚度。

通过式(5)能够画出 F_x-d 单峰曲线,可得到 F_x 最大值,即结构的承载力。由图4可知试验最大荷载和预制切口尺寸得到的应力强度因子的值在 $0.654 \sim 1.518 \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{3}{2}}$ 之间,又由式(2)可知作为起裂应力强度因子 K_0 应小于最小值。为保证各组试件的试验峰值平均值与对应的计算峰值基本相等或相对误差比较小,取参数 $K_0 = 0.3017 \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{3}{2}}$, $\eta = 15.5347 \text{MPa}$; 所得计算数值与试验平均值列入表3中。由式(5)计算的承载力与试验结果平均值的误差百分比也列入表3中。从表3可见,理论峰值和试验峰值的相对误差小于4%。

对于断裂过程分析用的参数 K_0 和 η ,对比本文钢纤维混凝土的数值和文献[12]中相应参数不难发现, K_0 几乎对素混凝土和钢纤维混凝土没有什么变化,而钢纤维混凝土的 η 数值增加了两倍,这也说明钢纤维只是起到了阻止裂纹发展的增韧作用。

表3 试件理论峰值与试验荷载峰值的比较

试件组号	试验峰值平均值 $1.87 \times P$ kN	理论计算峰值 F_x kN	相对误差 %
I	25.92007	25.85789	-0.23987
II	17.64407	17.08642	-3.16057
III	11.75420	11.69100	-0.53769
IV	6.18970	6.433431	3.93769

5 结论

通过对带预制裂纹的钢纤维混凝土试件进行楔入式劈裂试验及应变片跟踪电测数据分析,得出以下结论:(1) 钢纤维混凝土比素混凝土的断裂过程有更大的断裂延性。在即将达到荷载峰值前,荷载加载点位移关系曲线出现非线性,这是由于在切口前端的微裂纹和损伤区出现所致。随着荷载达到和超过峰值以后,裂纹逐渐扩展,切口的张开位移增大,而荷载减小,表现出材料结构的软化特性和钢纤维的桥联机制;(2) 在贴有应变片试件的 I 型断裂过程中,随着荷载逐渐增加或变化,试件预制裂纹前端的损伤区端点,即黏聚裂纹端点位置相应向试件边沿移动,并且移动的幅度越来越大;(3) 通过双 K 断裂准则和裂纹黏聚应力强度因子的关系,得到荷载与裂纹扩展长度的关系式;从而能够计算出构件的最大承载力,其理论结果与试验数据符合良好。表明用断裂力学原理,可以分析纤维增韧水泥制品的力学行为和破坏初始阶段材料结构强度。

致谢:本文试验工作得到山东理工大学刘灿昌、代祥俊、华珍老师与研究生任鹏、何敏等人的大力帮助,在此深表谢意;同时衷心感谢审稿人与编辑对本文提出的宝贵意见。

参 考 文 献:

- [1] Li Victor C. A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1992, 14(2): 131—141.
- [2] Kazemi M, Fazileh F, Ebrahimezhad M A. Cohesive crack model and fracture energy of steel fiber reinforced concrete notched cylindrical specimens [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(10): 884—890.
- [3] 董振英,李庆斌,王光纶,等. 钢纤维混凝土轴拉应力—应变特性的试验研究[J]. *水利学报*, 2002(5): 47—50.
- [4] 邓宗才. 碳纤维钢纤维混凝土低周抗压疲劳特性的试验研究[J]. *水利学报*, 2001(2): 39—43.
- [5] 梅明荣,杨勇,王山山,等. 钢纤维混凝土热性能及其防裂作用的研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(增刊): 111—

- 117.
- [6] 易成,谢和平,高伟.钢纤维对混凝土裂纹的抑制及其对抗渗性能的影响[J].土木工程学报,2004,37(3): 19—25.
- [7] Zhang Jun, Stang Henrik, Li Victor C. Experimental study on crack bridging in FRC under uniaxial fatigue tension [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2000, 12 (1): 66—273.
- [8] 韩嵘,赵顺波,曲福来.钢纤维混凝土抗拉性能试验研究[J].土木工程学报, 2006,39(11): 63—67.
- [9] 高丹盈,程红强.冻融循环作用下钢纤维混凝土 II 型断裂性能[J].水利学报, 2007,38(8): 998—1002.
- [10] 徐世 ,王建敏.静水压力下混凝土双 K 断裂参数试验测定[J].水利学报,2007,38(7):792—798.
- [11] 赵国藩,彭少民,黄承逵.钢纤维混凝土结构[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [12] 王利民,孙明远,代祥俊,等.混凝土断裂过程及尺寸效应分析[J].实验力学,2008,23(1): 34—42.
- [13] 王利民,徐世 ,陈浩然.裂纹端部短纤维的应力分析[J].力学学报,2002,34(2): 200—207.
- [14] 蒲琪,李舜铭,谢小鹏.工程实验力学[M].西安:西安交通大学出版社,1996.
- [15] 徐世 ,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.
- [16] Xu Shilang, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture [J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 98(2): 111—193.
- [17] 王宝庭,徐道远.混凝土拉伸软化曲线折线近似的逆解方法[J].力学学报,2001,33(4): 535—541.
- [18] 王利民,徐世 ,任传波.黏聚裂纹阻抗的弯曲梁承载力[J].中国工程科学,2007,9(2): 30—35.
- [19] 王利民,徐世 ,赵熙强.考虑软化效应的黏聚裂纹张开位移分析[J].中国科学 G 辑, 2006, 36(1): 59—71.
- [20] Hiroshi Tada, Paul C Paris, George R. Irwin. The stress analysis of cracks handbook [M]. Third edition, New York, ASME, 2000: 61—63.

Measurement on fracture process and analysis on mechanical performance of steel fiber reinforced concrete

WANG Li-min, GE Xiao-xia, LIU Lu, ZHANG Dong-huan

(Shandong university of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: For investigating the fracture process of steel fiber reinforced concrete and establishing the method for estimating the bearing capacity, a set of wedge-splitting experiment with 4 sizes of steel fiber reinforced concrete specimen was carried out, in which the fracture process of two specimens was monitored using strain gauges. A series of experimental curves were obtained. According to these data the relationship between load and displacement of loading point, relationship between load and opening of crack as well as the relationship between load and fracture damaged zone deformation are calculated. The bearing capacity of specimens is estimated by formula for stress intensity factor and double-K fracture criterion. The calculated results are in good agreement with the experimental data. It shows that the analysis on this kind of material based on the principle of fracture mechanics and estimating the bearing capacity accordingly is feasible.

Key words: steel fiber reinforced concrete; wedge-splitting experiment; fracture process; measurement; double-K fracture criterion; bearing capacity

(责任编辑:王冰伟)