

钢纤维混凝土的断裂损伤过程分析

欧阳鹏^{1a}, 王利民^{1b,*}, 张春巍², 王玺德^{1a}, 陈凡秀^{1b}, 钟宜辰^{1b}

(1. 青岛理工大学 a. 土木工程学院; b. 理学院, 青岛 266525; 2. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 为探究钢纤维的掺入在混凝土断裂中发挥的作用, 通过应变片电测法和数字图像相关(DIC)法对楔入劈拉试件进行加载试验, 分析了素混凝土和钢纤维混凝土两种材料的裂纹扩展行为。利用应变片电测法得到断裂损伤区内虚拟裂纹张开位移随荷载的变化和不同荷载时的张开位移分布的变化, 绘制成曲线; 由 DIC 法得到试件的应变场变化云图, 并计算出张开位移, 与应变片电测数据对比分析。结果表明: 钢纤维能阻挡裂缝贯通发展, 钢纤维试件在破坏过程中承载能力变化更为平缓; DIC 法的运用在试件达到峰值荷载前是可靠的。另外, 基于双 K 断裂准则计算了试件的最大承载力, 与试验结果基本吻合; 通过非线性断裂的裂纹黏聚模型及损伤因子计算法, 结合试验数据, 给出黏聚裂纹张开位移与损伤变量在断裂过程区的分布规律。

关键词: 钢纤维混凝土; 断裂性能; 应变片; DIC 法; 断裂过程区; 损伤因子

中图分类号: TU528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0001-10

Fracture damage process analysis of steel fiber reinforced concrete

OUYANG Peng^{1a}, WANG Limin^{1b,*}, ZHANG Chunwei²,
WANG Xide^{1a}, CHEN Fanxiu^{1b}, ZHONG Yichen^{1b}

(1. a. School of Civil Engineering; b. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;
2. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to explore the role of steel fiber incorporation in concrete fracture, the wedge-split specimens were loaded by electric strain gauge method and digital image correlation(DIC) method, and the crack propagation behaviors of plain concrete and steel fiber reinforced concrete were analyzed. The variation of the virtual crack opening displacement in the fracture zone with load and the variation of the virtual crack opening displacement distribution under different loads were obtained by using the electric strain gauge method, and the curve was drawn. The strain field variation nephogram of the specimen was obtained by DIC method, and the opening displacement was calculated, which was compared with the electrical measurement data of the strain gauge. The results show that the steel fiber can prevent the crack development, and the bearing capacity of the steel fiber specimen changes more gently during the failure process. The application of DIC method is reliable before the specimen reaches the peak load. In addition, the maximum bearing capacity of the specimens is calculated based on the double K fracture criterion, which is basically consistent with the ex-

收稿日期: 2023-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12072170); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MA058)

作者简介: 欧阳鹏(1996-), 男, 湖南岳阳人。硕士, 研究方向为钢纤维混凝土。E-mail: 1084449576@qq.com。

* 通信作者: 王利民(1962-), 男, 山东济南人。博士, 教授, 主要从事材料与结构失效分析方面的研究。E-mail: wanglimin@qut.edu.cn。

perimental results. Based on the crack cohesion model of nonlinear fracture and the calculation method of damage factor, and combined with the experimental data, the distribution law of the crack opening displacement and the damage variables in the fracture process region is given.

Key words: steel fiber reinforced concrete; fracture properties; strain gauge; DIC method; fracture process zone; damage factor

钢纤维混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete,简称 SFRC)是以水泥为基体,加入适量的骨料及钢纤维组成的一种新型材料,相比于传统混凝土其性能已经发生改变,需要全面详细地分析才能更好地应用^[1]。郭光玲^[2]研究了在不同荷载作用下、不同纤维掺量时,单一混凝土和钢纤维混凝土的力学性能变化,认为纤维掺入能提高其韧性。也有学者从不同类型、长度的钢纤维对材料流动性、力学性能及韧性的影响等角度出发,给出了建议的钢纤维掺量和长度^[3-4]。同时通过冲击、循环冻融及水压力等试验,可知钢纤维能提高材料的抗冲击能力和耐久性,且明确了在1%的钢纤维掺量时材料抗渗性较好^[5-7]。亦有研究人员为更进一步分析材料的断裂性能及其中的纤维对混凝土裂纹的抑制作用,进行了三点切口梁断裂试验,研究不同体积分数、长度的钢纤维对材料的起裂韧度、失稳韧度和断裂能的影响,确定了最佳优化组合^[8-9]。

综上所述,当前对钢纤维混凝土的研究聚焦于改变钢纤维的掺量、类型和长度等,而对于材料的破坏行为分析不够。因此,为全面了解钢纤维混凝土断裂特性及破坏过程,本文以素混凝土作为参照进行了楔入劈拉试验,加载过程利用应变片和数字图像相关(DIC)进行全程追踪,并在试验研究的基础上,计算了试件极限承载力和损伤因子,与试验结果进行对比分析。

1 试验准备

1.1 试验材料

试件使用P·O 42.5型普通水泥作为胶凝材料,粗骨料是混合粒径为2.0~3.0 cm的章丘双山青石子,细骨料使用级配等级为中砂的水洗砂,配合比为水泥:砂:石子=1:2:3,纤维是25、35、60 mm 3种长度等量混合的普通端钩钢纤维,直径为0.55 mm。制备试件采用干拌法,即砂和水泥拌匀后加入其他材料搅拌再加水,然后浇注进模具中,振动台振实排气成型后脱模,常温下恒定湿度养护28 d。试验采用箔金系列BMB120-50AA-P300-D型号的应变片,电阻值为 $(120.0 \pm 0.5) \Omega$,灵敏系数是 2.0 ± 0.01 ,丝栅尺寸(长×宽)为50 mm×3 mm。

1.2 试件预处理

试件为带预制裂缝的劈拉试样,几何形状及尺寸如图1(a)所示,图中预制裂缝前端的6道横线表示粘贴的6道应变片中心的位置。试验以素混凝土试件为对照组,钢纤维体积分数为4%的试件作为试验组,每组为2个试样,2组试件尺寸一致,预制裂缝切口均为“I”字形,长度为100 mm。

为保证试验顺利和数据精度,需对楔形试件进行预处理。首先定义楔入劈拉试件一面为正面也叫应变片张贴面,在正面预制裂缝尖端的断裂韧带上按一定间隔粘贴12个绝缘“端子”,如图1(b)所示;对应另一侧为试件反面即散斑喷涂面,先以哑光白漆反复进行底色涂抹,待其自然风干后,以纱布包裹黑漆喷头,手持往上倾斜一定角度喷洒,使黑漆自然飘落至白色漆面,形成细密漆斑,再用黑色马克笔适当点涂,如图1(c)所示。

在楔形试件上粘贴应变片时,考虑到若应变片严丝合缝地粘贴在损伤区,可能会使应变片过早被拉断,无法对断裂全过程进行测量,故可采取中间悬空贴法,即损伤区两端先粘贴边长为5 mm的正方形绝缘端子,然后再将应变片粘贴其上,不与试件直接接触。素混凝土与钢纤维混凝土的应变片编号、散斑带标记的高度及对应关系如表1所示,散斑带说明详见第3章节。

1.3 试验加载

目前国内外主要通过带预制裂缝的三点弯曲断裂试验和四点弯曲断裂试验研究裂纹的发展过程及破坏规律,而LÖFGREN等以三点弯曲断裂试验为对照,指出楔入劈拉试验的结果离散程度小,且该试验能得到裂缝口张开位移的变化曲线,可以更好地反映试件的断裂性能^[10],故本试验采用楔入劈拉加载方案。

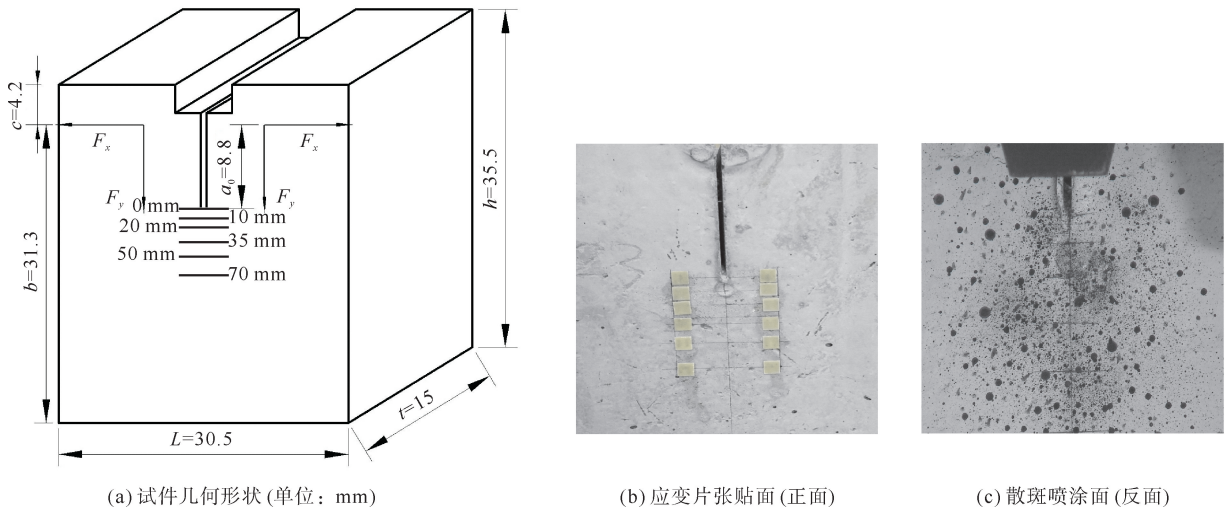


图 1 试件几何尺寸示意及测试面

表 1 楔形试件上应变片与散斑带位置

测点离预制裂缝 端点的距离/mm	素混凝土试件(对照组)		钢纤维混凝土试件	
	正面	反面	正面	反面
0	应变片 1	散斑带 1'	应变片 A	散斑带 A'
10	应变片 2	散斑带 2'	应变片 B	散斑带 B'
20	应变片 3	散斑带 3'	应变片 C	散斑带 C'
35	应变片 4	散斑带 4'	应变片 D	散斑带 D'
50	应变片 5	散斑带 5'	应变片 E	散斑带 E'
70	应变片 6	散斑点 6'	应变片 F	散斑点 F'

试验使用 WDW-100 电子万能试验机,楔入劈拉加载夹具如图 2(a)所示。试验机按固定速率 0.1 mm/min 向下加载,力由楔形板传到与其两侧相接触的 4 个滚轮,而滚轮轴所受的力又通过折板施加给与其平整接触的试件凹槽两侧。楔形板受力分析如图 2(b)所示,存在如下关系。

$$F_y = \frac{P}{2} = F \cdot \sin 15^\circ \quad (1)$$

$$F_x = F \cdot \cos 15^\circ = \frac{P}{2} \cdot \frac{\cos 15^\circ}{\sin 15^\circ} = 1.87P \quad (2)$$

式中: P 为试验机加载点的荷载; F_x 、 F_y 分别为楔形板加载架或试件受力的水平分力和竖直分力; F 为接触点合力。

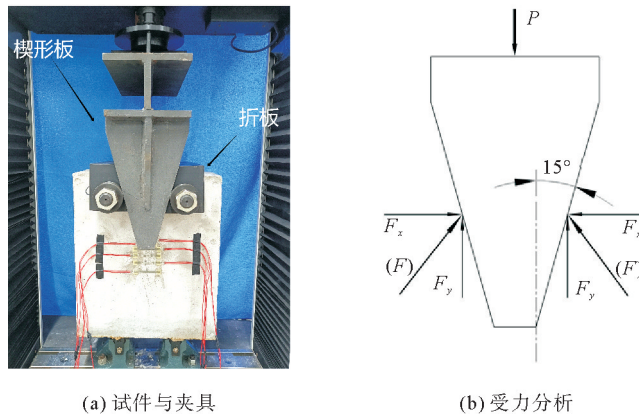


图 2 楔入劈拉试验加载装置与力的分析

2 应变片电测法数据处理及分析

将试件固定在试验机几何中心并安装好夹具,进行预加载后再继续加载试验。试验所得数据较多,考虑图像的简洁性且便于分析,除试验机导出的荷载-加载点位移曲线外,其余后续曲线取数据平均值分析。

2.1 荷载与加载点位移关系

试件施加的荷载与加载点位移关系曲线如图 3(a)所示,在固定速率的加载过程,素混凝土试件受力快速上升达到峰值,并在峰值后急速下降,表明其具有脆性材料的力学特征;而钢纤维混凝土受力峰值更高,对应的加载点位移更大,可见钢纤维掺入试件有明显的增韧和桥联作用,且在荷载下降段有更明显的表现。

2.2 荷载与张开位移关系

由应变片测试数据乘以应变片长度可得应变片两端相对位移量,即为裂缝尖端黏聚区的张开位移(COD),与对应的荷载构成关系曲线,如图 3(b)所示,图中各应变片位置参数见图 1 与表 1。从图 3(b)中可以看出,在固定速率的加载情况下,素混凝土与钢纤维混凝土在到达荷载峰值前都是趋近于斜直线,力与变形近似线性相关;峰值过后,两者都进入荷载缓慢下降阶段,此时试件还有承载能力,其中应变片 1、2、A、B 的曲线数据只有一半,是因为韧带区遭受过大的开口位移,应变片脱落丧失功能。

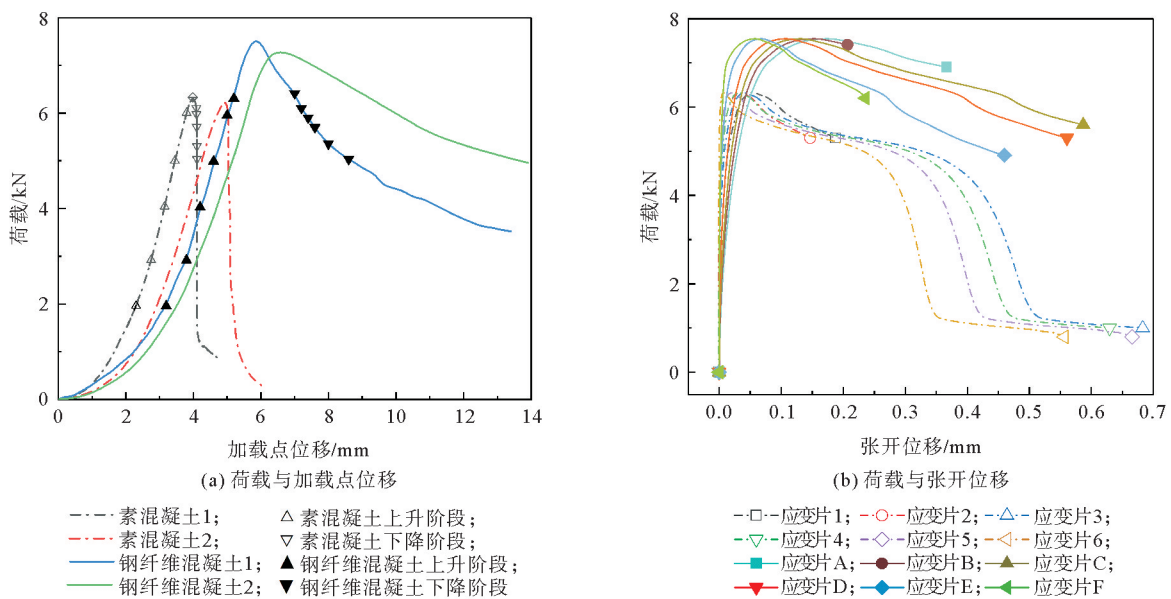


图3 素混凝土和钢纤维混凝土的荷载与位移关系曲线

由图 3(b)还可看到素混凝土在峰值荷载后并未按理想情况迅速下降,而是在张开位移 0.1~0.3 mm 出现“僵持”阶段,由应变片 3—6 的曲线看出其在张开位移为 0.3~0.5 mm 时瞬间丧失大量承载能力,进入急剧下降阶段,此瞬间最上端的应变片 3 处开口约为 0.5 mm,最下端的应变片 6 处开口约为 0.3 mm,裂缝形成“V”字形。该现象的出现,可认为是缓慢的加载速率和粗骨料的作用产生了这一“僵持”阶段。而钢纤维混凝土在同样的坐标系中,仍然处于缓慢下降趋势,可看出钢纤维材料的增韧与桥联效果。

2.3 张开位移与距裂纹尖端距离关系

随着断裂过程区的发展,不同荷载下断裂韧带上不同位置有张开位移的变化。为直观表示这种变化且对位移变化进行分析,对图 3(a)中素混凝土的曲线取 12 处位置,即荷载上升阶段 6 处,下降阶段 6 处,分析张开位移变化,钢纤维混凝土同样处理。曲线的标记以空心 and 实心作为试件类型的区分,实心三角形为钢纤维混凝土,空心三角形为素混凝土,在荷载上升阶段作“正三角”标记,三角形朝上,下降阶段取“倒三角”标记,三角形朝下。某一荷载时试件韧带不同位置与张开位移,如图 4 所示。

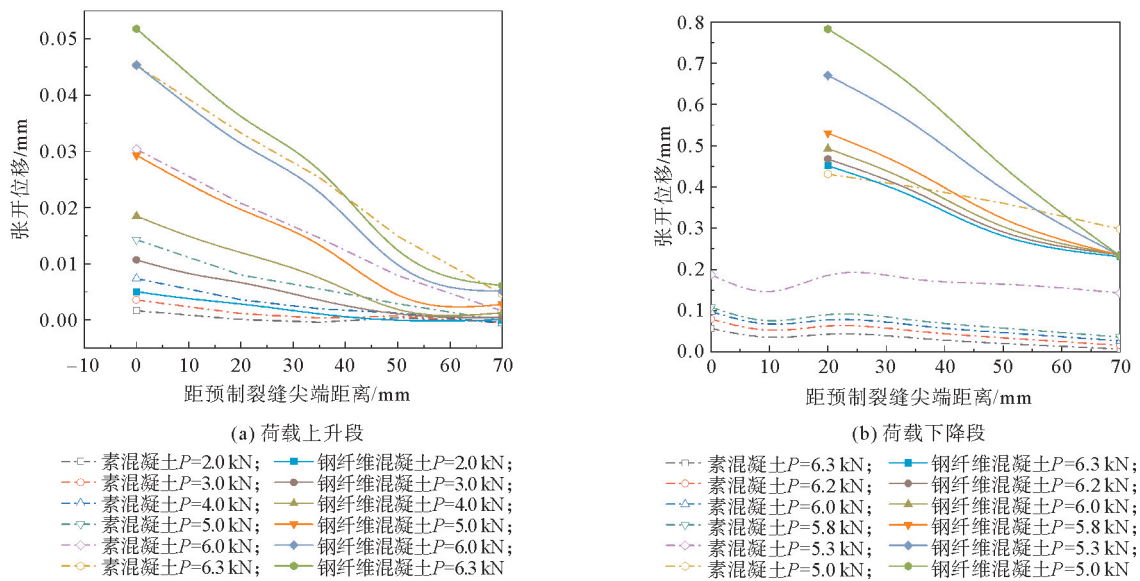


图 4 素混凝土和钢纤维混凝土的张开位移在韧带上的分布

从图 4 中可以看出,在荷载上升阶段,钢纤维混凝土的张开位移稍大于素混凝土;在荷载下降阶段,钢纤维混凝土的张开位移远大于素混凝土。又从图 3(a)知,荷载上升时钢纤维混凝土的加载点位移要大于素混凝土,而荷载下降时钢纤维混凝土的加载点位移远大于素混凝土。图 3(a)与图 4 的加载点位移和水平张开位移的大小对应关系表明,在试件劈拉张开时,水平张开位移与竖直加载位移呈正相关,同一荷载同一位置处,若其有更大的竖直加载点位移,因为试件会被荷载张拉得更开,故此时刻有更大的水平张开位移。对于该现象,文献[11]中的图 5 与文献[12]中的图 4(a),可佐证本文图(4)及其分析。

3 数字图像相关法测试及分析

数字图像相关(Digital Image Correlation,简称 DIC)法用来测量物体平面在变形前后的位移场,是一种基于图像处理和数值计算的变形测量技术。DIC 测量原理是利用数码相机记录试件散斑的位置分布,随着外力的变化试件发生形变,其散斑位置也在逐渐偏移,在足够小的时间里用照片记录下这种变化,然后在灰度照片中进行目标子区选取、匹配等处理,最终算出选定区域的应变场^[13]。

散斑喷涂区域范围大,摄影机图像数据收集较多,本试验研究重点为预制裂缝前方的断裂过程区,故在后处理中划定重点区域可提高处理效率,选定区域如图 5 所示,利用软件 VIC-2D 分析后可得该区域的

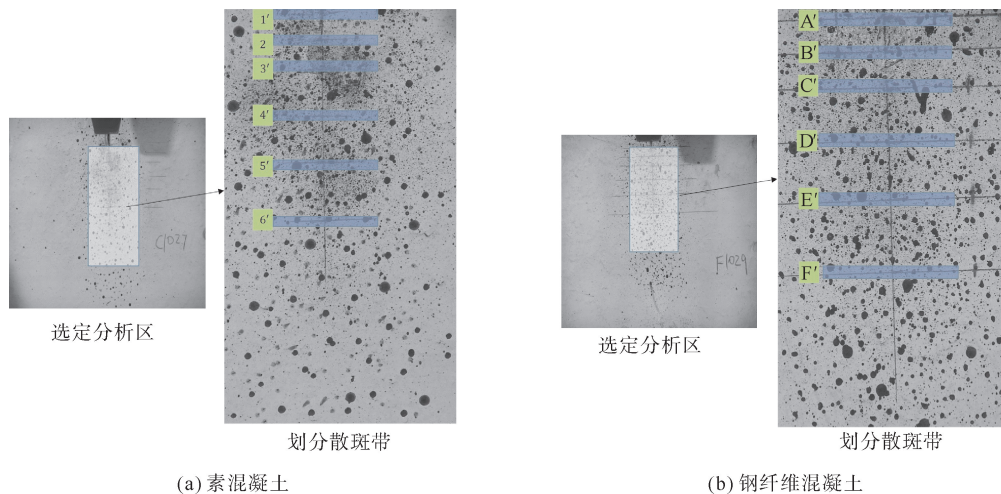


图 5 材料在后处理时选择的分析区域

相关数据。图像数据在导入软件后选定矩形区域进行数值分析,同时为分析材料的裂缝发展特性并验证 DIC 法在混凝土类材料上的适用性,在选定的矩形分析区中进一步标记与试件正面应变片位置相对应的散斑带,散斑带的具体位置信息如表 1 所示。

3.1 不同荷载时的应变场变化

图 6 显示了不同荷载时,素混凝土试件与钢纤维混凝土试件所选取区域的应变场变化,能直观看出不同发展阶段裂缝损伤区的扩展情况。横向观察同一试件不同荷载时的图片,可见裂纹损伤区曲折向前延伸,材料的不均匀性使断裂裂纹不再径直扩展、开裂,但总趋势与张开型(I型)裂纹一样向前发展;纵向对比观察,如图 6(c)与(g),在两类试件都处于峰值荷载的情况下,其高应变区(深红色区域)即主体裂缝长度一致,而图 6(g)中的高应变区有中断现象,其损伤区(高应变区前方黄色条形区域)更长,且从图 6(g)发展到图 6(h)后主裂缝出现分叉。综上,钢纤维使混凝土试件最大承载能力得到提升,且裂缝发展不再贯穿试件,主裂缝数增加,说明钢纤维分担了力,甚至对力的传递有一定偏移作用,而且延缓了裂缝的发展。

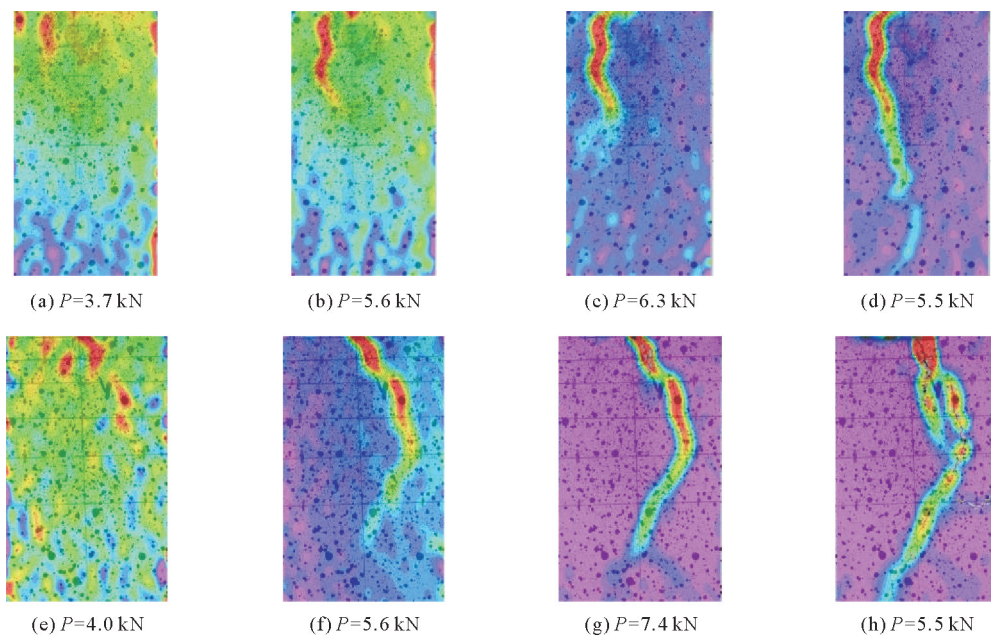


图 6 素混凝土和钢纤维混凝土水平方向的应变云图
(a)—(d)为素混凝土;(e)—(h)为钢纤维混凝土

3.2 DIC 与应变片电测技术比较

在素混凝土试件与钢纤维混凝土试件的散斑喷涂面,预处理时已经标好辅助线,在对应另一面应变片粘贴的相对位置处选择相同大小的区域划定为散斑带(图 5),位置见表 1,经软件后处理得到区域相关数据,取散斑带两端的水平应变差值,即垂直于预制裂缝的水平应变,然后与单像素点占据的位移相乘,可得散斑喷涂面张开位移。将应变片与散斑带的张开位移数据绘于图 7 中。

从图 7 可以看出,在荷载上升阶段,尤其是在近似线弹性阶段,两类混凝土试件在不同测试方法中得到的张开位移数据基本吻合;在达到非线性阶段后,有一定的偏差,但仍有较高的吻合度,且峰值荷载基本没有偏离。而在荷载下降阶段,不同测试方法测得的 COD 出现不同程度的偏离,其原因可能是在计算张开位移时散斑带两点间距过大,主黏聚裂缝附近微小裂缝被涵盖过多,导致 DIC 法所得张开位移比应变片电测法得到的结果更大。综合来看,两种测试方法得出的数据曲线趋势大体一致,且在达到峰值荷载之前曲线高度吻合,说明电测法和 DIC 法在素混凝土和钢纤维混凝土的荷载上升阶段可以互相验证参考。

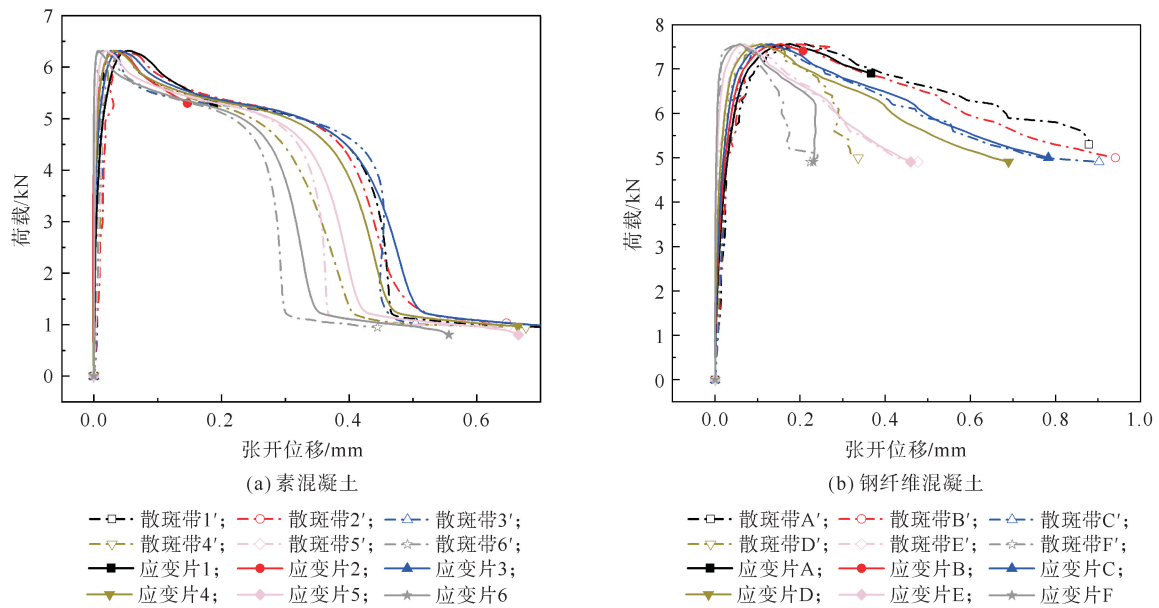


图7 由不同方法得到的荷载与张开位移关系曲线

4 双K断裂模型与承载力计算

4.1 断裂韧度的计算

按照线弹性断裂力学理论,对于含有裂纹或缺陷的理想弹性介质结构,裂纹前端存在应力奇异性分布,用应力强度因子 K 表征应力奇异性。对于楔入劈拉试件,TADA等总结了不同形状和尺寸试件的应力强度因子计算式^[14]。对于受垂直于预制裂缝拉力的楔入劈拉试样,在 $0.2 \leq a/b \leq 0.4$ 时,应力强度因子计算式如式(3)所示。

$$K = \frac{2F_x(2b+a)}{t(b-a)^{\frac{3}{2}}} \left[0.443 + 2.32\left(\frac{a}{b}\right) - 6.66\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 7.36\left(\frac{a}{b}\right)^3 - 2.8\left(\frac{a}{b}\right)^4 \right] \quad (3)$$

式中: b 为滚轴中心连线到试件底部的距离; t 为楔形试件的厚度; a 为滚轴中心点到黏聚裂纹尖端的竖直长度,该线平行于预制裂缝。

在加载点受力时,损伤区与未开裂区域以黏聚裂纹尖端位置为分界,而预制裂缝尖端是损伤区的起始点,故预制裂缝尖端与黏聚裂纹尖端的距离可引入裂纹损伤区长度 d ,则

$$a = a_0 + d \quad (4)$$

式中: a_0 为滚轴中心点到预制裂缝尖端的竖直长度。

通过式(2)一式(4)能够计算出试件最大荷载时的应力强度因子,即断裂韧度。2个素混凝土试件的断裂韧度为 0.398 和 $0.404 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,2个钢纤维混凝土试件的断裂韧度则分别为 0.474 和 $0.483 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

4.2 双K断裂准则与承载力计算

在断裂力学中,线弹性材料将应力强度因子作为重要评价指标。徐世焯对混凝土材料断裂提出了双K断裂准则,以应力强度因子 K 作为主要分析参数,见式(5)^[15]。

$$K^{\text{un}} = K^{\text{ini}} + K^{\text{c}} \quad (5)$$

式中: K^{un} 为试件受力到达极限状态时的失稳应力强度因子; K^{ini} 为起裂应力强度因子,通常认为是材料参量; K^{c} 为开裂到失稳状态时断裂过程区的黏聚力韧度增值,即黏聚应力强度因子,可按式(6)计算^[16-17]。

$$K^{\text{c}} = \eta \sqrt{\frac{d}{2\pi}} \quad (6)$$

式中: η 为具有应力量纲的材料参数,与材料的组分特点及极限拉伸应力密切相关; d 为裂纹损伤区长度。

将式(4)代入式(3),式(6)代入式(5),视 d 为变量,令式(5)与式(3)相等,于是得出基于双 K 断裂准则的理论承载力计算式。

$$P = \frac{t(b-a_0-d)^{3/2} \left(K^{\text{ini}} + \eta \sqrt{\frac{d}{2\pi}} \right)}{3.74(2b+a_0+d) \left[0.443 + 2.32 \left(\frac{a_0+d}{b} \right) - 6.66 \left(\frac{a_0+d}{b} \right)^2 + 7.36 \left(\frac{a_0+d}{b} \right)^3 - 2.8 \left(\frac{a_0+d}{b} \right)^4 \right]} \quad (7)$$

由式(3)计算的 K 知,素混凝土试件的断裂韧度应为 $0.398 \sim 0.404 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,钢纤维混凝土试件的断裂韧度应为 $0.474 \sim 0.483 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。经过对 K^{ini} 和 η 在式(7)中的试算,素混凝土试件取材料参数 $K^{\text{ini}}=0.221 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、 $\eta=4.422$ 时,钢纤维混凝土试件取 $K^{\text{ini}}=0.18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、 $\eta=5.71$ 时,各组试件的计算峰值与试验峰值平均值总体拟合效果最佳。于是通过式(7)得到荷载随裂纹损伤区长度变化的曲线,如图8(a)所示,图中曲线峰值附近的标记符号为试验所测得的最大荷载数据,素混凝土理论峰值与试验峰值高度吻合,而钢纤维混凝土理论与试验略有偏差。因为纤维的掺入对混凝土紧实程度有影响,且应变片粘贴过少,故拟合后吻合程度有一定偏差。对于断裂分析时使用的参数,发现素混凝土与钢纤维混凝土的起裂应力强度因子变化不大,而 η 在钢纤维混凝土上有明显增大,说明钢纤维在裂缝发展阶段起到了增韧作用。

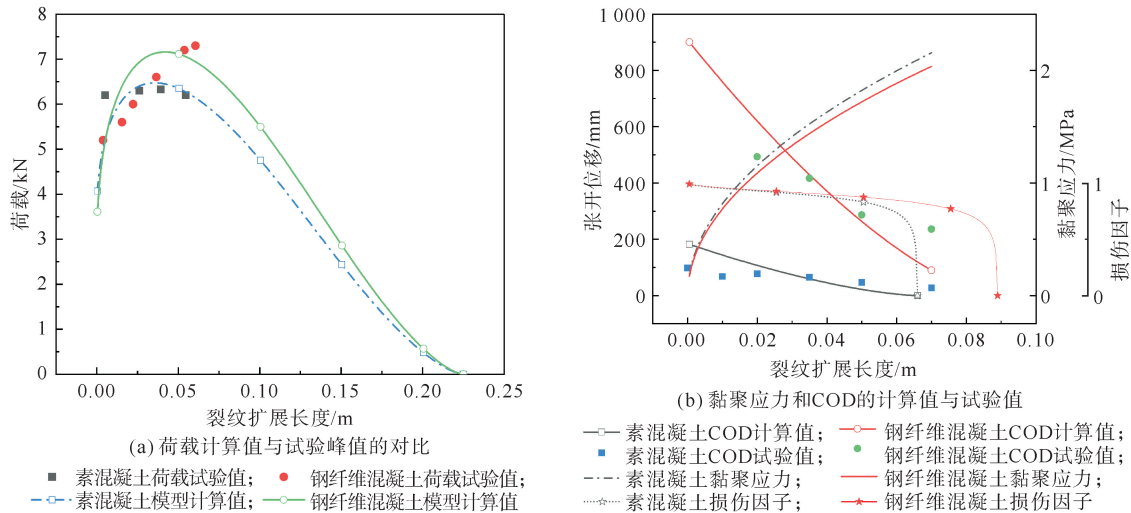


图8 素混凝土和钢纤维混凝土的理论值与试验值对比曲线

5 黏聚裂纹模型与损伤因子计算

5.1 黏聚应力及张开位移计算

试件受到外力荷载后,预制裂缝前端破坏区不是完全分开的,有微观裂纹存在,这段模糊的损伤裂纹带即为虚拟裂纹段,其作用力被简化成虚拟裂纹黏聚力。若一条虚拟裂纹带周边场的应力强度因子为 K_I ,该黏聚裂纹带的长度即损伤区长度为 d ,那么该段裂纹上的黏聚应力 σ 与张开位移 δ ,有如下计算式^[18]。

$$\sigma(\xi) = \frac{\sqrt{2}K_I}{\sqrt{\pi d}} \sqrt{\xi/d} \quad (8)$$

$$\delta(\xi) = \frac{16K_I}{3E} \sqrt{\frac{d}{2\pi}} \left(\frac{d-\xi}{d} \right)^{3/2} \quad (9)$$

式中: d 为损伤区长度; ξ 为损伤带中某点到宏观裂缝端点的距离, $0 < \xi < d$ 。

为分析断裂过程区的力学行为,通过式(3)计算试件荷载峰值后下降阶段为 6 kN 时的应力强度因

子,此时素混凝土的损伤区长度 $d_1=0.066$ m,钢纤维混凝土的损伤区长度 $d_2=0.089$ m,对应的应力强度因子中的 $a=(a_0+d_1)$ 与 (a_0+d_2) ,由此可计算得 $K_1=0.674$ MPa·m^{1/2}, $K_2=0.858$ MPa·m^{1/2}。将 (d_1, K_1) 和 (d_2, K_2) 分别代入式(8)与式(9),得张开位移 δ 和黏聚应力 σ 计算结果,绘制于图 8(b)中,张开位移的试验测试结果也放入图中作为比较,可知张开位移 COD 的计算值与试验值基本吻合。

5.2 损伤因子计算

基于连续介质有效承载面积的 Kachanov 和 Rabotnov 损伤变量,是以无损面积 A 与损伤后有效面积 \tilde{A} 计算的,以初始面积计算应力 $\sigma=F/A$,受损之后的有效应力为 $\tilde{\sigma}=F/\tilde{A}$,通过等应变假设,损伤参量与各物理量之间的关系如式(10)所示^[19]。

$$D=1-\frac{\tilde{A}}{A}=1-\frac{\sigma}{\tilde{\sigma}} \quad (10)$$

式中: D 为损伤因子。

结合黏聚裂纹模型解析计算式,可得宏观裂纹端部断裂过程区或裂纹黏聚区的损伤因子计算式如式(11)所示^[19-20]。

$$D(\xi)=\frac{8(1-\xi/d)^{3/2}}{3(h_0/d)(1-\xi/d)\sqrt{\xi/d}+8(1-\xi/d)^{3/2}} \quad (11)$$

式中: $D(\xi)$ 为损伤带内不同位置处的损伤因子; h_0 为宏观裂缝端部损伤区的宽度。

假设断裂损伤区的宽度为线性变化,取素混凝土损伤区的最大宽度为 $h_{01}=20$ mm,钢纤维混凝土为 $h_{02}=30$ mm,代入式(11)可得到损伤因子,其结果见图 8(b)。由图 8(b)可以看出,随裂纹扩展裂纹端部损伤因子逐渐降低,“0”是未到损伤状态,为弹性区,“1”为裂缝完全张开,损伤因子的变化表征断裂过程区的损伤分布变化程度。

6 结论

本文采用应变片电测法和数字图像相关(DIC)法对带预制裂缝的楔入劈拉试件进行试验,对比分析得出以下结论:

1) 钢纤维能加强混凝土的力学性能。在相同的加载条件下,相比素混凝土试件,钢纤维混凝土试件有更大的峰值荷载和变形量。

2) 钢纤维能抑制裂缝的扩大。钢纤维试件在破坏过程中的承载能力变化平缓,不会发生突变。荷载上升阶段,处于同一荷载时,钢纤维混凝土相比素混凝土试件有更小的张开位移。在固定速率的加载情况下,素混凝土与钢纤维混凝土在到达荷载峰值前力与变形近似成线性相关;峰值荷载过后,钢纤维混凝土仍具有较大承载能力,且荷载降低较慢,而素混凝土在此后快速失去承载能力。

3) 钢纤维能阻挡裂缝的贯通发展,分散了力的传递。DIC 法的应变云图中,素混凝土试件的裂缝径直开裂,而钢纤维试件的主裂缝向前发展时有中断现象,且在峰值荷载后主裂缝有分叉的趋势,体现了钢纤维的增韧和桥联作用。

4) 基于双 K 断裂准则的最大承载力计算式和基于黏聚裂纹模型的张开位移计算式,两者与试验测试结果基本吻合;结合损伤模型可用损伤因子表征断裂过程区的损伤变化。

参考文献(References):

- [1] 安明喆,马亚峰,贺奎,等. 钢纤维掺加方式对混凝土抗折强度影响研究[J]. 青岛理工大学学报,2007,28(3):27-31.
AN Mingzhe, MA Yafeng, HE Kui, et al. Study on the effect of steel fiber adding ways on concrete flexural strength[J]. Journal of Qingdao Technological of University, 2007, 28(3): 27-31.
- [2] 郭光玲. 钢纤维增强混凝土的制备及力学性能研究[J]. 功能材料, 2020, 51(11): 11165-11170.
GUO Guangling. Preparation and mechanical properties of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(11): 11165-11170.
- [3] YAN Xinyi, GAO Yuxin, LUO Yaoling, et al. Effect of different steel fiber types on mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1167(1): 012001.

- [4] 李茂,岳燕飞,钱觉时,等. 钢纤维增强磷酸镁水泥混凝土力学性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(7):691-698.
LI Mao,YUE Yanfei,QIAN Jueshi,et al. Investigation on the mechanical properties of steel fiber reinforced magnesium phosphate cement concrete[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2022,55(7):691-698.
- [5] JIN Liu,ZHANG Renbo,DU Xiuli,et al. Structural behavior of the steel fiber reinforced concrete beam under multiple impact loadings: An experimental investigation[J]. International Journal of Damage Mechanics,2019,29(3):503-526.
- [6] DONG Fangyuan,WANG Hanpeng,YU Jiangtao,et al. Effect of freeze-thaw cycling on mechanical properties of polyethylene fiber and steel fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials,2021,295(4):123427.
- [7] 尚刚,孟令其. 钢纤维对高性能混凝土抗压强度及抗渗性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2018(10):55-57.
SHANG Gang,MENG Lingqi. The influence of steel fiber on compressive strength and impermeability of high performance concrete[J]. China Concrete and Cement Products,2018(10):55-57.
- [8] 张鹏,李清富,朱海堂,等. 纳米 SiO₂ 和钢纤维增强混凝土的断裂韧度[J]. 建筑材料学报,2017,20(3):366-372.
ZHANG Peng,LI Qingfu,ZHU Haitang,et al. Fracture toughness of nano-SiO₂ and steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials,2017,20(3):366-372.
- [9] DING Yahong,MA Jinyi,XU Ping,et al. Experimental study and evaluation analysis on influence of steel fiber content on toughness properties of high performance concrete[J]. China Concrete and Cement Products,2018(2):50-54.
- [10] LÖFGREN I,STANG H,OLESEN J F. The WST method, a fracture mechanics test method for FRC[J]. Materials and Structures, 2008,41(1):197-211.
- [11] 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(1):34-42.
WANG Limin,SUN Mingyuan,DAI Xiangjun,et al. Analysis of concrete fracture process and size effect[J]. Journal of Experimental Mechanics,2008(1):34-42.
- [12] 王利民,戈晓霞,刘露,等. 钢纤维混凝土断裂过程测试与力学性能[J]. 水利学报,2009,40(8):995-1001.
WANG Limin,GE Xiaoxia,LIU Lu,et al. Measurement on fracture process and analysis on mechanical performance of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(8):995-1001.
- [13] HUANG Yijie,HE Xujia,WANG Qing,et al. Deformation field and crack analyses of concrete using digital image correlation method[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering,2019,13(5):17.
- [14] TADA Hiroshi, PARIS Paul C,IRWIN George R. The stress analysis of cracks handbook[K]. 3rd ed. New York:ASME Press, 2000:61-63.
- [15] 徐世焯. 混凝土断裂力学[M]. 北京:科学出版社,2011.
XU Shilang. Fracture mechanics of concrete[M]. Beijing:Science Press,2011.
- [16] 王利民,徐世焯,任传波. 黏聚裂纹阻抗的弯曲梁承载力[J]. 中国工程科学,2007(2):30-35.
WANG Limin,XU Shilang,REN Chuanbo. The loading capacity of three point bending beam with the resistant force of cohesive crack[J]. Engineering Science,2007(2):30-35.
- [17] DAI Xiangjun,YANG Fujun,WANG Limin,et al. Load capacity evaluated from fracture initiation and onset of rapid propagation for cast iron by digital image correlation[J]. Optics & Lasers in Engineering,2013,51(9):1092-1101.
- [18] 王利民,薛辉庭,张春巍,等. 准脆性材料断裂过程区中的圆饼微裂纹损伤计算[J]. 力学季刊,2020,41(2):288-296.
WANG Limin,XUE Huiting,ZHANG Chunwei,et al. Damage calculation of circular cake micro-cracks in fracture process zone of quasi-brittle materials[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2020,41(2):288-296.
- [19] 余寿文,冯西桥. 损伤力学[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
YU Shouwen,FENG Xiqiao. Damage mechanics[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1997.
- [20] WANG Limin,LI Xia,XU Shilang,et al. Micro-crack damage in strip of fracture process zone[J]. International Journal of Solids and Structures,2018,147(17):29-39.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)