

基于变形能的钢纤维混凝土断裂行为量化分析

董必钦, 李达谦, 张成杰, 王智毅, 洪舒贤

(深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 混凝土在其断裂过程中所消耗的能量一部分用来扩展新的断面, 另一部分需满足其内部发生弹塑性变形. 这部分能量由于难以观测, 在以往的混凝土断裂行为研究中常被忽视掉, 进而带来不稳定的测试结果. 本研究基于数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC)与三维扫描技术(Three-dimensional Scanning System, TSS), 通过获取钢纤维混凝土表面位移场与断裂面模型, 计算断裂进程的能量消耗与断裂面积, 同时分析与量化钢纤维混凝土的断裂行为, 最终确定钢纤维混凝土断裂能. 本中重点讨论此方法针对不同尺寸、不同缝高比的钢纤维混凝土断裂能修正情况. 结果表明: 改进后的断裂能计算方法相较于原方法在数值上平均下降了 28%; 同时, 改进后的计算方法显著降低了断裂能对试样尺寸与缝高比的敏感性, 得到了更稳定、准确的断裂能计算值, 从而弱化了纤维混凝土断裂能的尺寸效应现象.

关键词: 钢纤维混凝土; 断裂能; 数字图像相关; 变形能; 尺寸效应

中图分类号: TU192

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0475-09

Quantitative analysis of fracture behaviour of steel fibre concrete based on deformation energy

DONG Biqin, LI Daqian, ZHANG Chengjie, WANG Zhiyi, HONG Shuxian

(College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The energy consumed by the concrete during its fracture process is partly used to expand the new section, and the other part is required to meet the elastic-plastic deformation inside the concrete. This part of energy is often overlooked in previous research on concrete fracture behavior due to its difficulty in observation, resulting in unstable test results. In this study, digital image correlation (DIC) and three-dimensional scanning system (TSS) were employed to obtain the displacement field and fracture surface model of steel fiber-reinforced concrete. Through these techniques, the energy dissipation during the fracture process and the fracture area were calculated, and the fracture behavior of steel fiber reinforced concrete was analyzed and quantified, ultimately determining the fracture energy of steel fiber reinforced concrete. The focus of this study was to discuss the correction of this method for the fracture energy of steel fiber reinforced concrete with different sizes and different crack height ratios. The results showed that the improved fracture energy calculation method was reduced by an average of 28% compared with the original method. Furthermore, the improved method significantly decreased the sensitivity of fracture energy to specimen size and crack-height ratio, providing more stable and accurate fracture energy values, thereby weakening the size effect phenomenon of fiber reinforced concrete fracture energy.

Key words: steel fiber concrete; fracture energy; digital image correlation; deformation energy; size effect

作为当今世界用途最广, 用量最大的建筑材料, 混凝土以其出色的力学性能在建筑领域备受关注. 随着混凝土在滨海、高温等极端复杂环境下引起的裂缝对建筑结构的耐久性带来巨大挑战, 有关混凝土结构的设计研究逐渐从传统的强度控制过渡到混凝土的断裂控制. 因此, 断裂力学中

的失效理论被引入至混凝土领域^[1]. 目前对于混凝土断裂行为的研究主要基于虚拟裂缝模型^[2]. 其中, “断裂能”作为该模型的重要参数, 从能量的角度量化了混凝土准脆性材料的抗裂能力. 并与“应力强度因子”共同组成描述混凝土断裂行为研究的断裂参数, 用以客观评价不同类型混凝土的

收稿日期: 2022-11-27

修回日期: 2023-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52122907, U1801254, 51925805)

第一作者: 董必钦(1975—), 男, 教授, 博士. 主要从事土木工程结构耐久性研究. E-mail: incise@szu.edu.cn

通信作者: 洪舒贤(1982—), 女, 教授, 博士. 主要从事滨海混凝土结构耐久性研究. E-mail: sxhong@szu.edu.cn

断裂性能^[3]。

断裂能作为一种描述断裂能量耗散的材料参数,理论上应该为一常数。然而,目前的断裂能测试方法所得到的结果并不稳定,其中最突出的现象为断裂能的尺寸效应。即断裂能在不同尺寸、不同缝高比的混凝土试件中展示出不同的计算数值^[4]。关于尺寸效应的成因目前尚无定论,众多学者认为混凝土断裂过程中复杂的能量交互影响了断裂能的实验与计算结果。例如 Guinea、Elises、Planas 等^[5-6]曾将这种变化归因于支座摩擦、变形耗散,以及测试设备中的滞后现象。其中,支座摩擦与测试设备带来的问题可以通过改变实验方案或设备进行优化与改进。而混凝土在断裂过程中带来的变形耗散由于其在整个断裂过程中占比例过小且难以测算,在素混凝土的断裂能计算中常被忽视掉^[3]。然而,对于钢纤维混凝土这一类延性材料,其断裂过程中存在着大量变形,当试件完全断裂后,构件内部依然存在一定的残余应变^[7],这部分变形也消耗了一部分输入功,却未被大多数试验和方法考虑。大量研究表明,在确定断裂能时不应忽视这部分塑性变形能^[8,9]。学者 Yuan F 等^[10]曾利用 DIC 测得混凝土表面应变场,计算出半圆型试件变形能计算值。钢纤维的引入同样改变了开裂过程中的能量耗散途径^[11]。对于钢纤维混凝土而言,纤维的加入会放大测试值之间的差异^[12-13],因为基体中的纤维可以有效阻碍混凝土内部微裂缝的扩展及宏观裂缝的形成,并将应力传递到更广泛的区域,因此与普通混凝土相比,钢纤维混凝土变形能力更强。为了准确确定钢纤维混凝土的断裂能,应考虑变形能对断裂能的影响。变形能的忽视可能造成钢纤维混凝土断裂能的过高预测,进而对其工程应用造成了不利影响。

综上所述,目前需要一种适用于高延性混凝土的断裂能测试方法,以考虑其在整个断裂过程

中变形能的发展情况。以往在混凝土变形能计算时需依靠试件自身的荷载-位移曲线^[14],但该方法无法获取试件断裂过程中整个截面的应变分布信息。而 DIC 技术可以获取纤维混凝土断裂过程全域应变分布,提高了变形能结果的准确性。因此,本文建立了一种基于 DIC 技术的纤维混凝土断裂能测试方法,选取钢纤维混凝土作为研究对象,分别对不同试样尺寸、不同缝高比的钢纤维混凝土试样进行研究,并对钢纤维混凝土试件从加载到破坏进行应变分析,结合弹塑性力学知识,计算试件断裂后所释放变形能的大小,进而得到优化后的纤维混凝土断裂能计算数据,为纤维混凝土断裂能的计算提供了一种新的思路与方法。

1 实验

1.1 样品制备

本实验选用型号为 P. O. 42.5 的硅酸盐水泥、天然河砂、水及镀铜钢纤维作为实验材料。水泥采购自深圳市守信建材有限公司,按照表 1 所示配合比准备好试样材料。所取钢纤维采用史尉克工程纤维公司提供的镀铜钢纤维作为增强纤维,纤维长度 13 mm,直径 0.2 mm,抗拉强度约 2 500 MPa。采用粒径 5~10 mm 的天然鹅卵石作为粗骨料,其表观密度为 1 748 kg/m³。采用天然河沙作为细骨料,堆积密度为 1 480 kg/m³,细度模数为 2.700。表 2 为该纤维混凝土基本力学参数。本实验根据两种实验变量(尺寸、缝高比)设计两组样品,在制备过程中,先将水泥,沙石和水放入搅拌机搅拌 1 min,再将钢纤维均匀撒入新拌混凝土中,以得到分散均匀的钢纤维增强混凝土。浇筑后 24 h 内脱模并移至养护室进行标准养护(95%±5%,20±2℃),并进行分类标号,样品养护 28 d 后用金属切割机预设切口,切口宽度保持在 1.4 mm。

表 1 钢纤维混凝土配合比

Tab. 1 Composite ratio of steel fiber concrete

水灰比	纤维掺量/%	水/kg·m ⁻³	水泥/kg·m ⁻³	粗骨料/kg·m ⁻³	砂/kg·m ⁻³	钢纤维/kg·m ⁻³
0.63	0.67	212	336	1 145	750	78.5

表 2 钢纤维混凝土力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of rigid fiber concrete

抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比/ ν
26.4	3.96	24.5	0.19

表 3 展示了本实验中样品的尺寸、缝高比以及编号等相关信息。为探究不同断裂区域对纤维混凝土断裂能的影响,将试验样品分为两组。即仅改变样品尺寸,不改变缝高比的截面高度组;仅改变样品缝高比,不改变与样品尺寸的缝高比组。

标号完毕后, 将切口端置于下方, 样品上端作为加载端. 切割后喷涂白色哑光喷漆, 待白漆干后, 用特定的散斑滚筒在试件表面制出供 DIC

设备使用的黑色散斑, 以适用于接下来 DIC 的应变测量.

表 3 实验样品与基本信息
Tab. 3 Basic information of experimental samples

样品编号	样品尺寸/mm ³	缝高比	样品编号	样品尺寸/mm ³	缝高比
S50-0.15	50×50×200	0.15	S100-0.05	100×100×400	0.05
S75-0.15	75×75×300	0.15	S100-0.10	100×100×400	0.10
S100-0.15	100×100×400	0.15	S100-0.15	100×100×400	0.15
S125-0.15	125×125×500	0.15	S100-0.20	100×100×400	0.20
S150-0.15	150×150×600	0.15	S100-0.25	100×100×400	0.25

注: 1. 编号形式设置为 SA-B, 其中 A 表示样品横截面高度 (mm), B 表示样品缝高比, 每类型样本含有 3 个平行试样.
2. 两组样品中, 编号为 S100-0.15 的系列样品为同一组试件.

1.2 DIC 实验布置

DIC, 全称为 Digital Image Correlation, 是一种无接触的光学测量技术, 通过高清相机逐帧采集试件材料的加载过程, 对比加载前后图像, 匹配不同组图像中的相关散斑, 比较散斑灰度值的变化, 并确定不同子集在实验前后的位移大小, 最终得出构件在整个加载过程中不同阶段的应变云图^[15].

本次实验采用两台 CCD 相机进行图像采集, 分辨率为 1280×800 像素, 对于不同的样品尺寸, CCD 相机采集单个像素对应试样尺寸为 0.091 mm×0.091 mm. 采集频率设置为 5 Hz. 同时, 本实验采用两台 200 W 的 LED 照明灯以保证实验具有稳定光照. 两台照明灯对称布置在试件两侧, 高清相机布置在试件的正前方, 并与试样高度保持一致, 通过 Vic-Snap 软件调整好角度以避免拍摄过程中发生阴影与过曝现象, 进而避免影响拍照质量. 子集大小设置为 35 pixel, 步长设置为 7 pixel. 在利用 DIC 特定的散斑滚筒进行散斑制作时, 要保证散斑点分布随机、各项异性, 散斑直径控制在 1~2 mm, 并保证散斑边缘锐利、清晰, 黑色、白色覆盖率各占试样的 50%, 以降低噪声, 进而提高测量质量.

1.3 三点弯曲加载试验

实验采用微机控制电子万能试验机 (ETM305D) 进行三点弯曲试验. 试验机的最大测试力为 300 kN,

采样频率为 30 Hz. 加载方式为位移控制, 其位移控制的速度范围是 0.001~500 mm/min, 位移精度可达 0.001 mm.

本次实验加载速度设置为 0.3 mm/min, 以模拟准静态条件. 加载示意图如图 1 所示, 跨高比设

置为 3, 加载点位于裂缝正上方, 并根据不同试样尺寸, 调整实验过程中的跨度, 以满足相同跨高比要求. 在加载时, 保证试验机的启动与 DIC 摄像机数据收集同时进行, 并观察断裂过程中试样变化与断裂行为, 并得出试样的位移-荷载曲线.

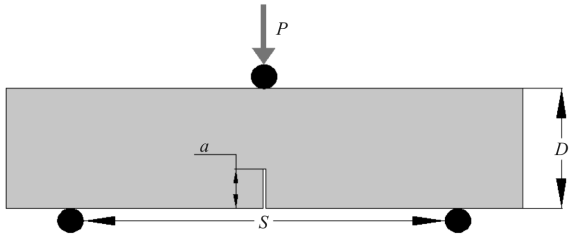


图 1 三点弯曲试验 (3PB) 示意图
Fig. 1 Schematic diagram of three-point bending test

1.4 三维激光扫描

纤维混凝土与素混凝土相比, 其断裂面以及开裂方式更为复杂、曲折. 对钢纤维混凝土而言, 仅仅采用韧带面积代替混凝土实际断裂面积来计算断裂能容易带来计算上的误差. 为准确计算断裂面, 本实验采用精度为 0.08 mm 的三维激光扫描系统对断裂面进行非接触式测量与计算. 扫描仪型号为 XTOM-MARTIX-9M, 其相机分辨率可达 900 万, 扫描精度为 400 μm. 投射光源为蓝光多频相移, 测量范围 400 mm×300 mm, 测量精度可达 0.01 mm.

考虑到断裂过程中会出现试件剥落, 所以需将每个裂块表面进行扫描, 将点云数据导入至点云数据分析软件 Geomagic Wrap, 并对齐每块裂缝表面, 观察有无剥落现象的出现. 在断面重构结果中, 断裂面重叠区域表明该处并未发生试块剥落, 因此只计算一次, 而非重叠区域表示该处出现局部剥落, 应将非重叠区域就计算到总断裂面积上, 以得到完整的断裂面面积. 图 2 展示了经三维扫描并导入至

Geomagic Wrap 数据分析软件的混凝土断面模型, 各样品的断裂面面积记录于表 5、表 6。

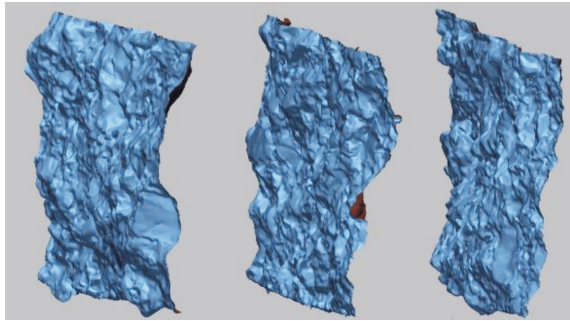


图 2 钢纤维混凝土断裂面模型

Fig. 2 Fracture surface of fiber-reinforced concrete

2 结果与讨论

2.1 DIC 实验结果

图 3 展示了两组实验部分样品的应变云图, 各

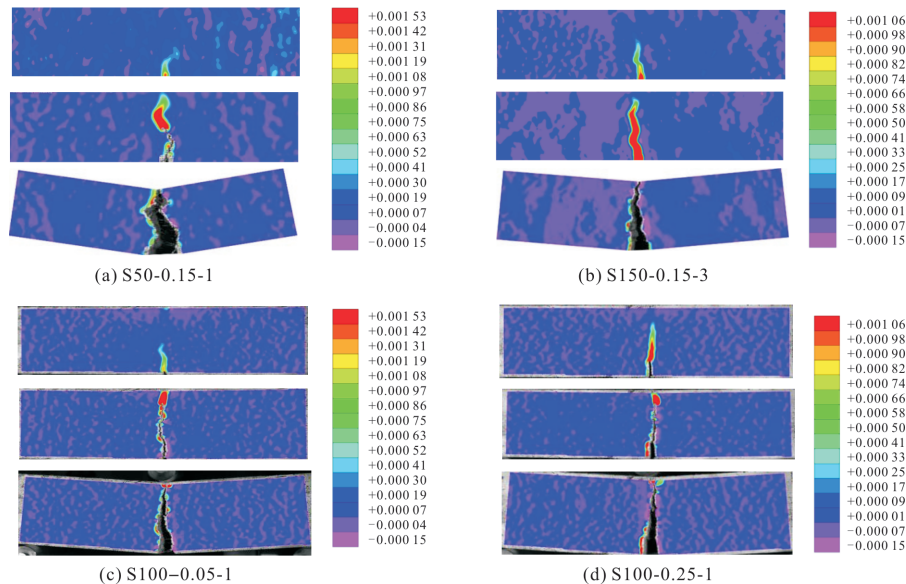


图 3 不同变量下钢纤维混凝土 DIC 实验应变图

Fig. 3 DIC experimental strain nephogram of steel fiber concrete under different sizes

2.2 位移-荷载曲线

图 4 展示了两组实验的荷载-位移曲线, 为简化结果, 仅选取了各组样品其中一组平行样, 由曲线可知, 不同尺寸的钢纤维混凝土力学响应大致相同, 不同缝高比、不同尺寸的试样均测出较为稳定的下降段曲线, 标志着裂缝在断裂过程中得到了稳定的发展。钢纤维混凝土的极限荷载随着样品缝高比的增大而减小, 且随着样品的尺寸增大而增大。结合荷载-位移曲线的包络面积, 即可以计算出对应试件完全开裂所需要的输入功。表 4 记录了不同尺寸的钢纤维混凝土试件的输入功。结果显示, 对于缝高比更小、截面尺寸更大的试块, 其未开裂区域面积更大, 承载能力强, 使其发生

组图中由上到下依次表现了样品在裂缝起裂、扩展、失稳的三个阶段。在各个阶段中, 裂纹尖端附近具有明显的应变集中现象, 随着荷载的增加, 裂缝沿着预裂缝的方向逐渐扩展至试件顶部。图 3(a)、图 3(b)展示了第一组实验中对应变样品的应变云图, 图 3(c)、图 3(d)展示了第二组实验中对应变样品的应变云图。受纤维混凝土试件样品骨料与截面高度相对关系的影响, 对于尺寸较小的样品, 裂纹表现出更为曲折的形态, 而对于尺寸较大的样品, 骨料与截面高度的影响较小, 裂纹发展路径更为平整与稳定。不过不同尺寸的试件在各个阶段的应变特征上大体一致。图中, 子集、步长设置不变, 应变结果也展现出相同的应变特征。将混凝土的应变云图以数据形式导出, 即可为后续实现变形能的量化分析提供数据支持。

断裂所需的输入功更大。随着荷载的不断增大, 加载装置对试块的输入功逐渐累积, 试块破坏时, 输入功依旧增加, 此时输入功的一部分促使裂缝扩展, 一部分满足试块变形, 直至试块彻底失去承载能力。因此, 混凝土试块的输入功与该试块的承载能力及断裂行为有关。

2.3 变形能计算

对于纤维混凝土而言, 混凝土受荷断裂产生的残余应变在整个变形过程占比可以忽略不计, 因此, 本文在计算钢纤维混凝土断裂过程中的变形能时, 采用混凝土弹性本构进行简化计算。试样的变形能用 W_d 表示, 根据弹塑性力学可知, 线弹性材料变形能计算公式为

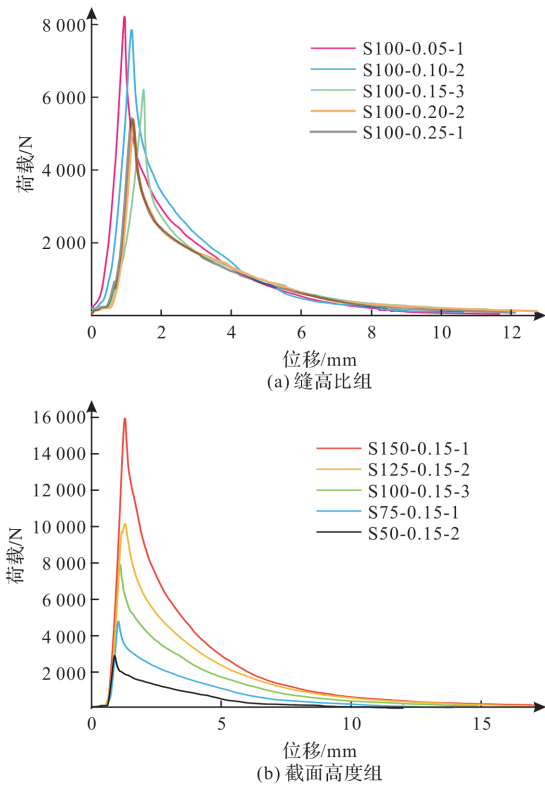


图 4 钢纤维混凝土荷载-位移曲线
Fig. 4 Load-displacement curve of steel fiber reinforced concrete

表 4 钢纤维混凝土输入功

Tab. 4 Input work of steel fiber concrete

样品类别	平行样	平行样	平行样	平行样均
	$A_1 / \text{N} \cdot \text{m}$	$A_2 / \text{N} \cdot \text{m}$	$A_3 / \text{N} \cdot \text{m}$	值 $A / \text{N} \cdot \text{m}$
S50-0.15	6.78	6.2	6.76	6.58
S75-0.15	12.29	12.54	12.88	12.57
S100-0.15	21.02	20.18	20.26	20.49
S125-0.15	28.64	29.67	29.22	29.18
S150-0.15	39.15	39.07	38.8	39.01
S100-0.05	25.2	26.7	25.8	25.9
S100-0.10	23.5	24.1	23.4	23.7
S100-0.15	21.8	20.9	21.2	21.3
S100-0.20	19.6	20.2	19.7	19.8
S100-0.25	18.5	18.0	18.8	18.4

注: A_n 表示样品类别的第 n 个平行样位移-荷载曲线与坐标轴包围面积, 代表输入功, 其对应样品编号为 SA-B-n, (A 代表各类样品位移-荷载包围面均值, 代表输入功均值)。

$$W_{d-0} = \frac{1}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \sigma_z \epsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) \quad (1)$$

带入弹塑性本构方程, 并考虑 DIC 设备只能观察到平面上的应变分布, 可将上式表示为

$$W_{d-0} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left[\frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y)^2 + \epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \frac{1}{2} \gamma_{xy}^2 \right] \quad (2)$$

试样总的变形能为

$$W_d = \iiint_V W_{d-0} dx dy dz \quad (3)$$

将 Vic-3D 所得的应变数据带入变形能计算公式中, 可得到各个样品在整个加载-卸载过程中变形能的大小, 而不同尺寸的试件的变形能占比具有很大的不同, 图 5 分别给出不同尺寸与缝高比下各个样品的变形能以及其能量占比情况, 随着试件尺寸的增大, 其变形能也逐步增大, 但变形能占输入功的比例随着试件的增大而减小, 当试件高度为 100 mm 以下时, 变形能占比随着试件高度增加而大幅减小, 当试件高度达到 100 mm 以上时, 变形能占比小幅下降, 并且逐步趋于稳定, 基本稳定在 8%。这意味着对于大尺寸试件, 变形能的影响逐渐稳定。而小尺寸试件变形能的能量占比可观, 因此, 对于小尺寸试件, 不考虑变形能的话会引起断裂能比较大的测试误差。

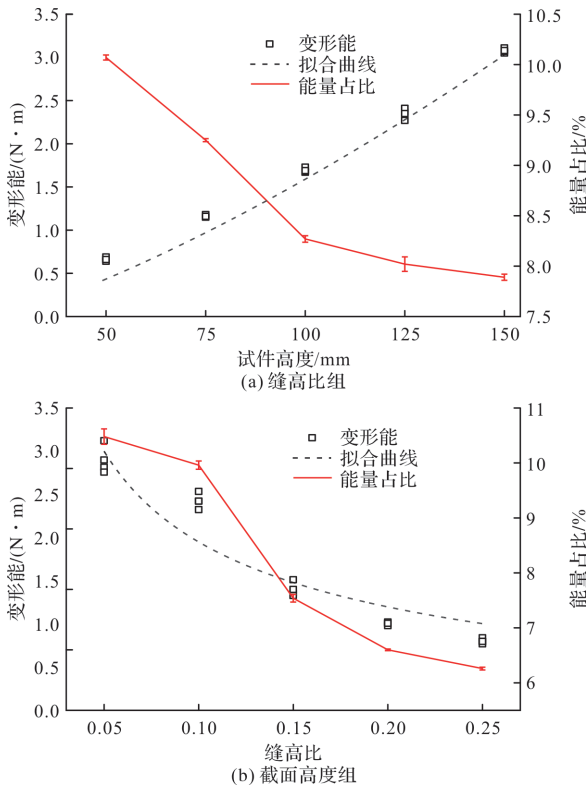


图 5 不同变量下的纤维混凝土变形能及其占总输入功的能量占比
Fig. 5 Deformation energy of fiber reinforced concrete under different variables and its energy proportion to total input work

随着缝高比的增加, 试件变形能与能量占比均呈现下降的趋势, 并稳定在 6% 附近。这主要是因为缝高比的增加导致断裂韧带的下降, 进而降

低了三点击加载下试件断裂所需的能量阈值,导致试样在加载过程中的变形降低,限制了变形能的发展,断裂后断裂面外变形能降低.同时,变形能相对于总输入能量的占比也逐渐降低.结合两种变量对于纤维混凝土变形能的改变,在计算纤维混凝土断裂能时,有必要考虑变形能的影响.

2.3 试样断裂面

通过 Geomagic Wrap 对断裂面进行重构,并计算出各个断裂面面积.与普通混凝土相比,纤维混凝土断裂面展现出更明显的曲折现象.并且随着尺寸的不同,这种曲折性有所差异.具体表现为:随着尺寸的增大,断裂面趋于平整,骨料尺寸对于断裂面的影响逐渐降低;随着尺寸的减

小,断裂面逐渐不规则,骨料尺寸对于断裂面的影响逐渐增加.钢纤维混凝土尺寸越小,其开裂后断裂面积造成误差越大,这与骨料尺寸与样品尺寸的相对大小有关.随着试件尺寸增大,这种影响被逐渐削弱,并且具有稳定的趋势.

表 5、6 分别展示了不同截面高度、不同缝高比下的断裂面与韧带面积的对比情况,其中, η 代表扫描后的断裂面与断裂韧带的面积差值比,用来反映两种面积的数值差异,其计算公式为

$$\eta=\frac{\overline{S}-S_{lig}}{S_{lig}}=\frac{\overline{S}}{B(D-a)}-1 \quad (4)$$

式中: S 为试样不同变量下经扫描得到断裂面的平均值; S_{lig} 为各变量下试样的裂韧带面积; D 为试样高度; a 为试样裂缝高度; B 为试样宽度.

表 5 不同截面高度下混凝土断裂面面积

Tab. 5 Area of fiber concrete fracture surface under different section dimensions

样品类别	平行样 S_1/mm^2	平行样 S_2/mm^2	平行样 S_3/mm^2	平行样均值 S/mm^2	韧带面积 S_{lig}/mm^2	面积差值比 $\eta/\%$
S-50-0.15	2 796	3 010	2 962	2 923	2 125	37.6
S-75-0.15	6 326	6 248	6 297	6 290	4 781.25	31.6
S-100-0.15	10 604	10 890	10 886	10 766	8 500	26.7
S-125-0.15	16 193	16 418	16 335	16 315	13 281	22.8
S-150-0.15	22 985	23 124	23 707	23 272	19 125	21.7

注: S_n 表示样品类别的第 n 个平行样经扫描后的断裂面面积,其对应样品编号为 S-A-0.15-n, S 代表各类样品断裂面平均值.

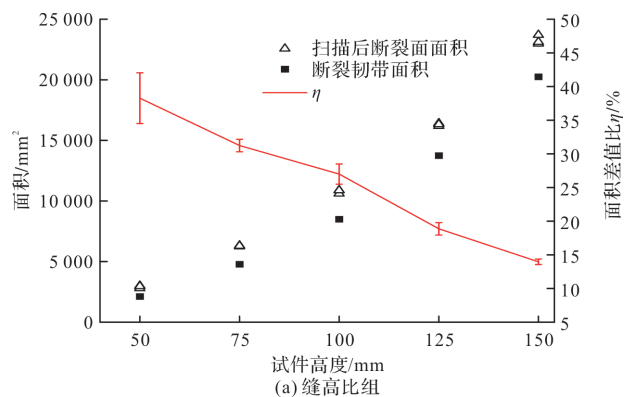
表 6 不同缝高比下断裂面面积

Tab. 6 Area of fiber concrete fracture surface under different crack depth ratio

样品类别	平行样 S_1/mm^2	平行样 S_2/mm^2	平行样 S_3/mm^2	平行样 S/mm^2	韧带面积 S_{lig}/mm^2	面积差值比 $\eta/\%$
S-100-0.05	11 864	12 040	11 846	11 917	9 500	25.4
S-100-0.10	11 074	11 291	11 621	11 329	9 000	25.9
S-100-0.15	10 900	10 990	10 916	10 935	8 500	28.6
S-100-0.20	10 377	9 964	10 778	10 373	8 000	29.7
S-100-0.25	9 989	10 092	9 373	9 818	7 500	30.9

注: S_n 表示样品类别的第 n 个平行样经扫描后的断裂面面积,其对应样品编号为 S-100-B-n.

由表 5、6 可知,经扫描后的纤维混凝土断裂面面积与韧带面积之间的差值比处于 20%~40%之间,并且这种差值随着试件高度的增大而下降,随着缝高比的增加而增加.图 6 展示了不同截面高度、不同缝高比下扫描后的断裂面与断裂韧度的变化关系曲线.综合来看,试件的实际断裂面积与韧带面积的差值随着开裂面积的减小而增大,这意味着对于纤维混凝土而言,若仍采用韧带面积计算混凝土断裂能,将会带来断裂能计算的误差.



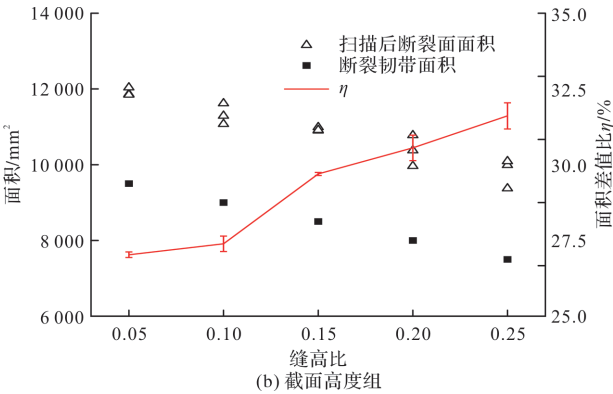


图 6 不同变量下扫描断裂面与断裂韧带的数值对比

Fig. 6 Comparison of scanning fracture surface and fracture ligament values under different variables

2.5 断裂能计算

断裂能，被定义为材料扩展单位面积裂缝所需的能量，是评估构件开裂后结构剩余承载力的重要参数，同时也是为评价混凝土断裂行为，并进行有限元模拟所需的重要输入参数。在以往的断

裂能测量实验中，常采用 RILEM 所推荐的基于断裂功原理的三点弯实验，实验公式^[3]为

$$G_f = \frac{A_1 + mg\delta_{\max}}{S} = \frac{A_1 + mg\delta_{\max}}{(D-a)B} \quad (5)$$

式中： G_f 为混凝土断裂能，N/m； A_1 为三点弯加载方式下，试样发生断裂的外部输入功，表现为试样位移-荷载曲线与坐标轴的包络面积； δ_{\max} 为试样最大挠度。

在考虑变形能与断裂面面积之后，该公式转化为

$$G'_f = \frac{A_1 + mg\delta_{\max}}{S'} - W_d \quad (6)$$

式中： W_d 为混凝土断裂过程中产生的变形能； S' 为试样经过三维扫描后得到的断裂面面积；在得到扫描后的断裂面积与变形能后，根据公式(6)断裂能计算方法，计算结果如表 7。该表列出了在考虑断裂面以及变形能的前提下，该方法对不同尺寸、不同缝高比的计算情况。

表 7 纤维混凝土在考虑断裂面积和变形能的断裂能计算数值 G_f

Tab. 7 Fracture energy calculation value of fiber concrete considering fracture area and deformation energy

样品类型	平行样 G_{f1} /N · m ⁻¹	平行样 G_{f2} /N · m ⁻¹	平行样 G_{f3} /N · m ⁻¹	平行样均值 (G_f /N · m ⁻¹)	(G_f 标准差 /N · m ⁻¹)	原方法均值 (G'_f /N · m ⁻¹)	原方法(G'_f 标准差)/N · m ⁻¹
S50-0.15	2 238.53	1 894.80	2 097.58	2 076.97	141.08	3 162.89	126.04
S75-0.15	1 847.80	1 908.92	1 943.87	1 900.20	39.70	2 742.94	49.90
S100-0.15	1 948.43	1 826.88	1 833.78	1 869.70	55.74	2 572.46	43.85
S125-0.15	1 827.24	1 832.40	1 872.61	1 844.08	20.28	2 442.38	35.07
S150-0.15	1 836.15	1 825.82	17 70.13	1 810.70	29.00	2 363.72	6.41
S100-0.05	1 913.91	1 991.87	1 969.78	1 958.59	32.84	2 726.59	64.95
S100-0.10	1 921.28	1 930.65	1 828.61	1 893.47	46.11	2 630.85	34.47
S100-0.15	1 855.36	1 768.29	1 809.14	1 810.58	35.54	2 506.24	44.41
S100-0.20	1 771.48	1 907.52	1 714.59	1 797.66	80.96	2 479.26	32.73
S100-0.25	1 742.16	1 678.25	1 894.84	1 771.52	90.59	2 363.14	42.09

注： G_{fn} 表示不同样品类别下的第 n 个试样的断裂能计算值，其对应样品编号为 SA-B-n， G_f 代表各类样品平行样断裂能计算均值。

可以看出，在不同试件高度、不同缝高比的断裂能实验中，与原方法相比，在准确考虑了混凝土断裂面积与变形能条件下，断裂能的平均值相较原方法下降了 28.3%。改进后的计算方法将变形能从原有的断裂能计算公式中分离出来，更加接近纤维混凝土断裂能的物理定义，进而降低了对纤维混凝土断裂能的高估。值得注意的是，在使用新方法对断裂面积计算时，由于利用了真实的断裂面积，而裂缝的扩展与断裂面的形成具有一定的偶然性，进而导致相同变量下断裂能数

值离散性依赖于实际的断裂面形态。经计算，改进后的断裂能数值在同一高度、同一缝高比的离散系数均控制在 6% 以内，证明这种离散性带来的影响尚可接受。

为了直观描述新方法对断裂能结果稳定性的优化，图 7 绘制了表 7 中的数据结果。不难看出，新方法降低了断裂能对尺寸、缝高比的敏感性。表 8 展示了在不同试件高度、不同缝高比下，改进前后两种方法计算断裂能所得拟合曲线的斜率对比。其中， k 代表不同尺寸、缝高比条件下，原方

法的断裂能拟合曲线斜率; k' 代表不同尺寸、缝高比条件下, 经改进后的断裂能拟合曲线斜率。

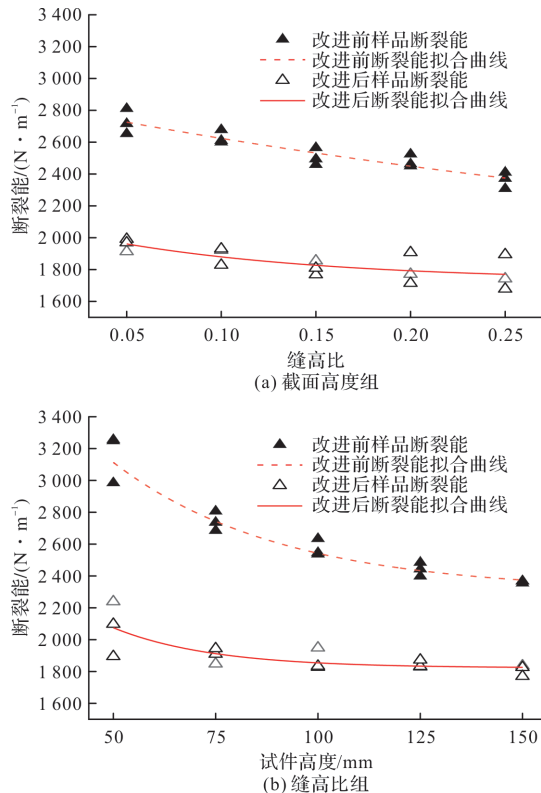


图7 不同变量下优化前后对两组实验断裂能测试情况

Fig. 7 Fracture energy test of two groups of experiments before and after optimization under different variables

表8 不同变量下纤维混凝土断裂能计算结果稳定性分析
Tab. 8 Stability analysis of fracture energy calculation results for fiber reinforced concrete under different variables

截面高度/mm	50	75	100	125	150
k'/k	0.52	0.35	0.23	0.15	0.10
缝高比	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
k'/k	0.93	0.67	0.49	0.35	0.68

由表8可知, 新方法降低了不同高度、不同缝高比间纤维混凝土断裂能测试结果的差异, 当截面高度大于75 mm时, 改进后的断裂能计算结果拟合曲线更平缓, 代表断裂能测试结果更稳定; 同样在不同缝高比的样品中, 断裂能的稳定性得以略微提升, 若采用更大的截面高度, 可能会获得更明显的实验结果。由此, 可认为改进后的断裂能计算方法降低了不同尺寸间断裂能的离散性, 进一步弱化了钢纤维混凝土断裂能的尺寸效应现象。

3 结论

本文提出了一种基于DIC应变分析与三维扫描技术的方法, 以解决钢纤维混凝土由于其变形

能耗散占比大、断裂面曲折所引起断裂能计算结果不准确的问题。并应用此方法计算了不同尺寸、不同缝高比下纤维混凝土的断裂能值, 结合文中数据分析, 现得主要结论如下:

(1) 经过三维扫描后的钢纤维混凝土断裂面反映了混凝土断裂过程中实际的断裂面面积。而韧带面积往往与实际断裂面面积平均相差28%, 这种差距在较小的断裂面积处存在变大的趋势, 因此, 在计算纤维混凝土断裂能时, 采用扫描后的面积, 可有效降低计算误差;

(2) 在钢纤维混凝土的断裂过程中, 变形能约占输入功的6%~11%。同时, 变形能的能量占比随着未开裂区域的减小而增大。在缝高比尺寸大, 截面尺寸小的试样中, 变形能的能量占比更大, 这影响了断裂能计算结果的稳定性。进而对钢纤维混凝土的尺寸效应产生不利影响, 因此在断裂能的计算中不可被忽略;

(3) 结果显示改进后的断裂能相较于原方法在数值上平均下降了28%; 在不同截面高度的系列样品中, 对于改进后的断裂能计算数值, 其拟合曲线斜率下降, 意味着该方法的断裂能计算结果降低了试样尺寸与缝高比的敏感性, 可以得到更稳定、准确的断裂能计算值, 进一步弱化了纤维混凝土断裂能的尺寸效应。从而获得相对稳定、真实的纤维混凝土断裂能测试方法, 使得实验室中断裂能测量值更符合真实的工程情况。

试件缝高比与试件尺寸是影响纤维混凝土断裂能的两个重要变量。本实验通过控制纤维混凝土“缝高比”、“试件尺寸”两个变量, 来验证新方法对于纤维混凝土断裂能数据计算的有效性。事实上, 纤维混凝土的基体强度、纤维强度、纤维掺量以及纤维端部形态等众多因素, 同样会对混凝土断裂进程的能量释放途径产生不同程度的影响, 进而影响断裂能的计算结果。因此, 为综合验证新方法对不同因素下断裂能的计算优化程度, 仍需对不同变量下的混凝土样品进行实验分析与归纳总结, 这一点将在后续的研究中展开并深入。

参考文献 References

- [1] JIA M, WU Z, HAN X, et al. Experimental investigation and modified calculation model of critical crack propagation length of concrete [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 121(1): 1-11.
- [2] 卿龙邦, 李庆斌, 管俊峰, 等. 基于虚拟裂缝模型的混凝土断裂过程区研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(9):

- 112-116.
- QING Longbang, LI Qingbin, GUAN Junfeng, et al. Study of concrete fracture process zone based on fictitious crack model[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(9): 112-116.
- [3] KHALILPOUR S, BANIASAD E, DEHESTANI M. A review on concrete fracture energy and effective parameters[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 120: 294-321.
- [4] PETERSON P E. Fracture energy of concrete: Method of determination[J]. *Cement and Concrete Research*, 1980, 10(1): 79-89.
- [5] ELICES M, GUINEA G V, PLANAS J. On the measurement of concrete fracture energy using three-point bend tests[J]. *Materials and Structures*, 1997, 200(30): 375-376.
- [6] PLANAS J, ELICES M, GUINEA G V. Measurement of the fracture energy using three-point bend tests; Part 2: Influence of bulk energy dissipation[J]. *Materials and Structures*, 1992, 149(25): 305-312.
- [7] 高丹盈, 王占桥, 钱伟, 等. 钢纤维高强混凝土断裂能及裂缝张开位移[J]. *硅酸盐学报*, 2006(2): 192-198. GAO Danying, WANG Zhanqiao, Qian Wei, et al. Fracture energy and crack opening displacement of steel fiber reinforced high strength concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2006(2): 192-198.
- [8] LOFGREN 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.
- [9] 胡若邻, 黄培彦. 钢纤维增强聚合物改性高强混凝土断裂韧性的试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(6): 963-970. HU Ruolin, HUANG Peiyan. Experimental Study on Fracture Toughness of Steel Fiber-reinforced and Polymer-modified High-strength Concrete[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(6): 963-970.
- [10] YUAN F, CHENG L, SHAO X X, et al. Full-field measurement and fracture and fatigue characterizations of asphalt concrete based on the SCB test and stereo-DIC[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 235: 1-12.
- [11] 李方元, 赵人达. 高强混凝土和钢纤维高强混凝土断裂性能试验研究[J]. *混凝土*, 2002(8): 29-32. LI Fangyuan, ZHAO Renda. The experimental research on the fracture performance of high strength concrete and steel fibers high strength concrete[J]. *Concrete*, 2002(8): 29-32.
- [12] KAZEMI M T, GOLSORKHTABAR H, BEYGI M H A, et al. Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 482-489.
- [13] ROSSI P, TAILHAN J L, LE MAOU F. Creep strain versus residual strain of a concrete loaded under various levels of compressive stress[J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 51: 32-37.
- [14] 傅强, 赵旭, 何嘉琦, 等. 基于能量转化原理的混杂纤维混凝土本构行为[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(8): 1670-1682. FU Qiang, ZHAO Xu, HE Jiaqi, et al. Constitutive response of hybrid basalt-polypropylene fiber-reinforced concrete based on energy conversion principle[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(8): 1670-1682.
- [15] 朱志辉, 冯乾朔, 肖权清, 等. 基于DIC技术和无网格法的裂尖应变场分析方法[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(6): 99-109. ZHU Zhihui, FENG Qianshuo, XIAO Quanqing, et al. An analysis method for strain field of crack tip based on DIC technology and meshless method[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(6): 99-109.

(编辑 郑晓龙 沈 波)