

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.12.005

纤维混凝土断裂性能试验研究与数值模拟

马银华¹, 马海啸¹, 官馨¹, 彭宗志², 任俊杰³

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 广东清连公路发展有限公司, 广东 清远 511518;
3. 西藏自治区重点公路建设项目管理中心, 西藏 拉萨 850000)

摘要:为研究纤维对水泥混凝土断裂性能的影响, 选用几种不同类型、不同规格的纤维, 在各种纤维的常规掺量下, 对带切口的单掺或混掺纤维混凝土试件进行了三点弯曲试验, 并与素混凝土试件进行了对比。试验得到素混凝土、单掺PVA纤维混凝土、单掺普通钢纤维混凝土、单掺超细钢纤维混凝土及三元混杂纤维混凝土共5组试件的荷载-张口位移曲线, 理论计算得到各组试件的断裂能、断裂韧度及临界张口位移等断裂特征参数。利用Abaqus软件基于扩展有限单元法模拟了各组试件三点弯曲加载时的开裂行为, 追踪了裂纹的扩展情况。试验及数值模拟结果表明: 在常规纤维掺量下, 不同类型的纤维混凝土表现出的断裂韧性差异显著; 相对于素混凝土和PVA纤维混凝土, 钢纤维和三元混杂纤维混凝土的荷载-变形曲线更加饱满, 部分试件的曲线在达到峰值荷载进入下降段后甚至会再次上升并出现二次峰值现象, 表现出良好的断裂韧性; 扩展有限元法也能较好地模拟纤维混凝土的开裂行为, 且由数值模拟得到的各组混凝土试件的加载曲线、破坏形态及断裂参数与试验情况都能吻合较好; 扩展有限元法可以时刻追踪裂纹扩展情况, 从而确定裂纹长度随加载时间和加载点位移的变化关系, 合理地预测裂纹潜在的扩展途径。

关键词:道路工程; 断裂性能; 扩展有限元法; 纤维混凝土; 三点弯曲试验

中图分类号: U416.216; TU528.58

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2019)12-0037-10

Experimental Study and Numerical Simulation on Fracture Properties of Fiber Reinforced Concrete

MA Yin-hua¹, MA Hai-xiao¹, GUAN Xin¹, PENG Zong-zhi², REN Jun-jie³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Guangdong Qingyuan-Lianzhou Highway Development Co., Ltd., Qingyuan Guangdong 511518, China;

3. Tibet Autonomous Region Key Road Construction Project Management Center, Lhasa Tibet 850000, China)

Abstract: In order to study the influence of fiber on the fracture properties of cement concrete, selecting several types of fibers with different specifications, under the conventional proportion of those fibers, three-point bending test on single fiber or hybrid fiber concrete specimens with notches is carried out, and the result is contrasted with that of plain concrete specimens. The curves of load vs. crack opening displacement of 5 groups of specimens, including plain concrete, PVA fiber concrete, ordinary steel fiber concrete, ultra-fine steel fiber concrete and ternary hybrid fiber concrete, are obtained by the test. The parameters of the fracture properties such as fracture energy, fracture toughness and critical opening displacement of each group of specimens are calculated theoretically. The cracking behaviors of each group of the specimens during three-point loading are simulated by Abaqus software based on the extended FE method to track the crack expansion. The test and numerical simulation results show that (1) the fracture toughness of different types of

收稿日期: 2018-05-04

基金项目: 重庆市科技人才培养计划项目 (cstc2013kjrc-qnrc30002); 重庆市科委应用开发计划项目 (cstc2013yykfA30002); 重庆交通大学土木建工程材料国家地方联合工程实验室开放基金项目 (LHSYS-2014-003)

作者简介: 马银华 (1978-), 男, 湖北仙桃人, 教授. (cqjtu@126.com)

fiber concrete is significantly different under the normal fiber proportion; (2) the load-deformation curves of steel fiber concrete and ternary hybrid fiber concrete are fuller than those of plain concrete and PVA fiber concrete, and the curves of some specimens rose again and reached the second peaks after reaching the peak load and entering the descending section, showing good fracture toughness; (3) the cracking behavior of fiber concrete can be simulated preferably by the extended FE method, and the load curves, the failure modes and the fracture parameters of each group of concrete specimens obtained from the numerical simulation have the high degree of coincidence with the experimental result; (4) the extended finite element method can track the crack expansion at any time, so as to determine the variation relation of crack length with the loading time and displacement, and to predict the potential routes of crack expansion reasonably.

Key words: road engineering; fracture property; extended finite element method; fiber concrete; three-point bending test

0 引言

纤维可以抑制混凝土内部微裂纹和宏观裂缝的扩展,被认为是提高混凝土抗裂韧性的有效措施,常用于各级公路面层和桥面铺装层中。近年来,国内外大量专家学者对纤维混凝土的断裂性能展开了研究。文献[1-5]利用三点弯曲或四点弯曲试验分别研究了钢纤维、碳纤维、聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维及玄武岩纤维对混凝土断裂性能的影响,并通过多个指标与普通混凝土进行了比较。邓宗才等^[6]通过单轴直接拉伸全曲线研究了聚丙烯纤维对混凝土断裂能的影响。文献[7-9]从断裂韧度、断裂能等方面分别对钢纤维与碳纤维混杂混凝土、钢纤维与聚丙烯纤维混杂混凝土及钢纤维与聚乙烯醇纤维混杂混凝土的断裂性能进行了评价,分析了混杂纤维对混凝土断裂韧性的影响。在试验研究的基础上,越来越多的人开始尝试通过有限元软件来模拟纤维混凝土的开裂行为。唐春安等^[10]采用自主研发的材料破坏分析系统,数值模拟了短纤维增强水泥基复合材料在加载过程中裂纹的萌生、扩展至最终破坏失稳全过程。黄俊等^[11]建立了包含软弱区随机分布的短纤维砂浆拉伸数值模型,研究了纤维细观力学参数及分布特征对纤维混凝土拉伸破坏过程的影响。Ren等^[12]建立了多尺度损伤模型来模拟钢纤维混凝土单轴拉伸破坏过程,分析了钢纤维混凝土内部应力分布状况和裂缝区域纤维桥联效应。

在总结前人的研究现状后发现,对纤维混凝土断裂性能方面的试验研究虽然有很多,但研究内容多集中在对加载曲线和断裂特征参数,如断裂能、断裂韧度、临界张口位移的研究上,而对于加载时混凝土的破坏形态及开裂后裂纹长度随加载时间或加载点位移的变化情况研究很少。在对纤维混凝土

开裂行为数值模拟方面,常采用的方法是先按照特定概率分布模型将纤维分散到基体材料中,确定各相介质的强度和软弱区域,然后利用断裂损伤准则判断裂纹的萌生和扩展,再利用力学模型分析因纤维断裂而引起的应力重新分布,最终得到纤维混凝土破坏的全过程。但这种方法建立的模型较为复杂,且不能合理预测纤维混凝土的宏观力学性能和潜在裂纹扩展方式及途径。扩展有限元法作为一种新兴的模拟裂纹扩展的方法,能够时刻追踪裂纹的扩展情况并合理地预测裂纹潜在的扩展途径,近年来也常用于模拟混凝土的开裂行为^[13-16],但是研究对象基本上都是素混凝土,而对于纤维混凝土开裂行为的模拟研究较少,且研究内容多集中在数值分析和试验结果的对比上,没有进一步深入研究模拟加载过程中裂纹的扩展规律和长度变化情况。李魏魏^[17]结合单轴拉伸试验研究结果,基于扩展有限元法对UHTCC(超高韧性水泥基复合材料)的裂纹扩展进行了仿真分析与试验结果对比,验证了利用扩展有限元法模拟UHTCC断裂问题的可行性。覃源等^[18]基于扩展有限元法模拟了混凝土三点弯曲梁开裂的全过程,结合线性叠加原理和双K断裂准则计算断裂参数,并与已有的断裂规律进行比较,验证了扩展有限元的合理性。史宏飞^[19]利用扩展有限元法数值模拟了PVA增强水泥基的裂纹扩展,并与试验做对比分析,结果证明了扩展有限元模拟纤维混凝土裂缝扩展的准确性。

基于上述研究现状中的不足,本研究采用带切口的混凝土梁三点弯曲试验,通过设置多个对照组,测定各组试件荷载-裂缝张口位移曲线,理论计算得出各对照组的断裂特征参数,对比分析不同纤维混凝土的断裂性能。考虑到纤维品种繁多,选取了工程上常用的3种纤维来建立对照组,并与3种纤

纤维混凝土作对比。在试验的基础上, 利用 Abaqus 软件基于扩展有限单元法数值模拟各组试件在三点弯曲时的真实开裂行为, 追踪裂纹的扩展情况和长度变化, 对比分析软件模拟的加载曲线和断裂参数与实际情况的差别, 评价这种方法用于模拟纤维混凝土开裂行为的可行性。

1 原材料及材料配合比组成

1.1 原材料技术性能

水泥: P. O 42.5R 普通硅酸盐水泥; 砂: 普通河砂, 细度模数为 2.80, 表观密度为 2.60 g/cm^3 。石子: 石灰石碎石, 最大公称粒径 31.5 mm , 级配 $10 \sim 30 \text{ mm}: 5 \sim 10 \text{ mm} = 4: 1$; 水: 重庆市本地饮用水; 外加剂: 聚羧酸类高效减水剂、消泡剂; 纤维: 熔抽型超细钢纤维、波浪状普通钢纤维、聚乙烯醇纤维, 相应的技术指标见表 1。

表 1 纤维技术指标

Tab. 1 Technical indicators of fiber

钢纤维品种	长度/ mm	直径/ mm	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa
普通钢纤维	35	0.8	7.8	210	380
超细钢纤维	13	0.2	7.8	240	$\geq 2\ 850$
聚乙烯醇纤维 (PVA)	12	0.012 ~ 0.014	1.29	≥ 35	$\geq 1\ 200$

1.2 材料配合比组成

素混凝土配合比如表 2 所示。

表 2 素混凝土配合比 (单位: kg/m^3)

Tab. 2 Mixing ratio of plain concrete (unit: kg/m^3)

水泥	水	砂	粗石子	细石子	减水剂	消泡剂
501.8	170.6	707.5	893.5	223.4	6.021	0.036

纤维的掺入方式较多, 本试验拟设置 5 个对照组来研究纤维混凝土的断裂性能。工程上常用的钢纤维体积掺量在 $0.6\% \sim 2\%$ 之间, 张廷毅等^[20]通过试验研究表明, 钢纤维混凝土的断裂韧性随着钢纤维体积掺量的增加而提高, 但考虑到纤维掺量对混凝土施工性的影响, 本试验采用的钢纤维体积掺量为 1.5% 。现有 PVA 纤维混凝土抗裂性能研究中, 常用的 PVA 纤维体积掺量在 $0.08\% \sim 0.3\%$ 之间, 本试验中选用的 PVA 纤维体积掺量为 0.15% 。各对照组纤维体积掺量如表 3 所示, 每组试件为 3 个。

2 试验方法

本试验采用的小梁试件尺寸为: 长 $\times$ 高 $\times$ 厚 = $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 测试龄期为 28 d。试模

表 3 各对照组纤维体积掺量 (单位: %)

Tab. 3 Fiber volume content of each control group (unit: %)

组别	聚乙烯醇	普通钢纤维	超细钢纤维
A1	0	0	0
A2	0.15	0	0
A3	0	1.5	0
A4	0	0	1.5
A5	0.15	0.75	0.75

浇注混凝土后, 在中间位置垂直插入薄铁片用来预制裂缝, 裂缝相对缝深为 0.5。约 2 h 后拔出薄铁片并置于 $20 \sim 23 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下养护 28 d。试件脱模以后, 利用 MTS 试验系统进行加载及加载点位移 (挠度) 数据采集, 同时通过引伸计采集裂缝张口位移。试验加载采用位移控制模式, 加载速度为 0.1 mm/min , 底部支座间距为 390 mm , 预制裂缝口方向朝下, 裂缝张口位移采集频率为 20 Hz 。

3 试验结果与分析

3.1 荷载 - 裂缝张口位移曲线及条件荷载

通过三点弯曲梁试验可以得到各组试件的荷载 - 裂缝张口位移 (P - $CMOD$) 曲线, 如图 1 所示。为便于分析各条曲线的斜率, 只画出了裂缝张口位移为 0.5 mm 内的图像。条件荷载包括起裂荷载 P_{ini} 、临界荷载 F_Q 。参照我国《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T 5332—2005)^[21] 的规定, 起裂荷载 P_{ini} 为 P - $CMOD$ 曲线上升段中从直线段转变为曲线段的转折点对应的荷载值, 利用 Origin 软件的直线功能插件 Tangent 可以从图像中获得。临界荷载 F_Q 是裂纹发生失稳扩展的临界点, 依据线弹性断裂力学的规定, 过原点 O 作一条斜率比 P - $CMOD$ 曲线的线性段斜率低 5% 的割线, 其与 P - $CMOD$ 曲线的交点设为 P_s , 将 P_s 点之前曲线上的最大值作为临界荷载 F_Q 。各组试件条件荷载的试验结果如表 4 所示。

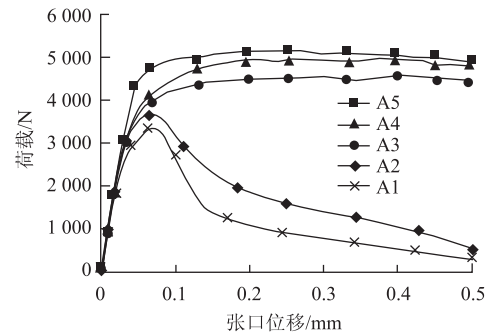


图 1 荷载 - 裂缝张口位移曲线

Fig. 1 Curves of load vs. crack opening displacement

表 4 条件荷载试验结果
Tab. 4 Result of conditional load test

对照组	A1	A2	A3	A4	A5
起裂荷载/N	2 800	3 167	3 725	3 887	4 313
起裂荷载增益比/%	0	13.10	33.03	38.8	54.03
临界荷载/N	3 360	3 672	4 223	4 415	4 864
临界荷载增益比/%	0	9.28	25.68	31.39	44.76

结合图 1 和表 4 可知, (1) 在常用的纤维掺量下, 混凝土的起裂荷载和临界荷载都能够得到一定的提升, 但提升效果差异较明显: 其中 0.15% 体积掺量的 PVA 纤维混凝土相对于素混凝土, 起裂荷载与临界荷载提升了 13.1% 和 9.28%; 1.5% 体积掺量的普通钢纤维和超细钢纤维混凝土起裂荷载分别提升了 33.03% 和 38.82%, 临界荷载分别提升了 25.68% 和 31.39%; 而三元混掺纤维混凝土起裂荷载与临界荷载提升了 54.03% 和 44.76%。(2) 对比起裂荷载与临界荷载的增益比发现, 增益比(起裂荷载) > 增益比(临界荷载), 这说明纤维对延缓混凝土的起裂效果更明显。(3) 素混凝土和 0.15% 体积掺量的 PVA 纤维混凝土加载曲线在达到峰值荷载后都迅速下降, 混凝土表现为脆性断裂, 而掺入混杂纤维或单一钢纤维的混凝土, 达到峰值荷载后荷载-张口位移会出现屈服平台现象, 即荷载维持在高位的峰值水平附近而位移(变形)不断增大, 体现出钢纤维及混杂钢纤维混凝土优良的持荷能力和抗裂能力。开裂后的试验曲线显示, 随着加载点位移持续增加, 张口位移进一步增大, 曲线在经过屈服平台后逐渐开始缓慢下降, 部分试件的曲线在初次下降后甚至会再次上升, 出现二次峰值现象, 表现出良好的裂后承载性能和韧性。

3.2 断裂特征参数

混凝土断裂特征参数是用来评定混凝土断裂性能的指标, 主要包括: 断裂能 G_F 、断裂韧度 K_{IC} 、临界裂缝张口位移 V^* 等。

3.2.1 断裂能

断裂能指混凝土试件完全断裂所需要的能量, 是表征混凝土断裂特性的重要参数之一。通常采用三点弯曲试验, 得到带切口梁的荷载-挠度 ($P-\delta_0$) 曲线来计算混凝土的断裂能。计算公式为:

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A_{lig}}, \quad (1)$$

式中, W_0 为荷载-挠度 ($P-\delta$) 全曲线下的面积; m 为支座间梁的质量, 其中 A1 和 A2 组试件取为

9.75 kg, A3, A4, A5 组试件取为 10 kg; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; δ_0 为试件加载时的最大挠度; A_{lig} 为断裂韧带面积, 本试验中 $A_{lig} = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$; 由于含钢纤维组试件的荷载-挠度 ($P-\delta$) 曲线下降段达到荷载为 0 时很困难, 因此取其荷载值降到峰值荷载的 5% 时对应的曲线段作为荷载-挠度全曲线。

各配合比下断裂能平均值计算结果如表 5 所示。

表 5 不同配合比混凝土试件断裂能

Tab. 5 Breaking energy of concrete specimens with different mixing ratios

对照组	A1	A2	A3	A4	A5
压头做功/(N·mm)	1 638	1 894	24 219	27 445	28 653
自重做功/(N·mm)	76	147	955	1 022	1 051
断裂能/(N·m ⁻¹)	343	408	5 035	5 694	5 941
断裂能增益比/%	0	18.9	1 368	1 560	1 632

3.2.2 断裂韧度

在 I 型裂缝条件下, 当混凝土的应力强度因子 K_I 达到其临界值 K_{IC} 时, 裂纹发生失稳扩展, 这个临界应力场强度因子 K_{IC} 被称为断裂韧度, 它也是用来表征混凝土断裂特性的重要参数之一。采用三点弯曲梁试验确定断裂韧度的计算公式有很多, 目前在国内使用较为普遍的公式有两个: 一个是由金属断裂专家陈箴提出的断裂韧度计算公式^[22]; 一个是由美国材料与试验协会 (ASTM) 建议的断裂韧度计算公式^[23]。而河海大学郑光俊研究表明, 当缝高比在 0.4~0.6 之间时, 这两个公式计算出来的断裂韧度基本一致, 而当缝高比超过 0.7 后, 用陈箴给出的公式计算得到的断裂韧度具有奇异性^[24]。因此本研究采用美国材料与试验协会建议的公式计算断裂韧度, 计算公式为:

$$K_{IC} = \frac{F_Q S}{BW^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (2)$$

式中, K_{IC} 为断裂韧度; F_Q 为临界荷载, 裂纹失稳扩展时对应的荷载; S 为支座间距离, 本试验为 0.39 m; B 为试件厚度, 本试验为 0.1 m; W 为试件高度, 本试验为 0.1 m; a 为预制裂缝长度, 本试验为 0.05 m。

式 (2) 中 $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 的表达式为:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 2.9 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} - 4.6 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}} + 21.8 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{5}{2}} - 37.6 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{7}{2}} + 38.7 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{9}{2}}. \quad (3)$$

按照上述公式计算得到断裂韧度试验结论见表 6。

表 6 断裂韧度试验结果

Tab. 6 Result of fracture toughness test

对照组	A1	A2	A3	A4	A5
断裂韧度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3/2}$)	1 098.72	1 200.74	1 380.92	1 443.71	1 590.53
断裂韧度增益比/%	0	9.28	25.68	31.39	44.76

3.2.3 临界裂缝张口位移

在三点弯曲梁试验中，当荷载值达到临界荷载 F_Q 时裂纹发生失稳扩展，此时对应的裂缝张口位移值称为临界裂缝张口位移 V^c ，它也是表征混凝土断裂特性的基本参数之一，可以根据临界荷载 F_Q 的大小从荷载 - 裂缝张口位移曲线中获取。各对照组对应的临界裂缝张口位移 V^c 值如表 7 所示。

表 7 临界裂缝张口位移

Tab. 7 Critical crack opening displacements

对照组	A1	A2	A3	A4	A5
临界裂缝张口位移/mm	0.066	0.069	0.075	0.086	0.091
临界裂缝张口位移增益比/%	0	4.54	13.63	30.30	37.87

由表 5 ~ 表 7 可知，(1) 掺入纤维后，混凝土的断裂能、断裂韧度及临界裂缝张口位移等断裂特征参数都得到了提升，这说明纤维可以有效改善混凝土的断裂性能。(2) 在常规纤维掺量下，不同类型的纤维混凝土表现出的断裂韧性差异显著，其中 0.15% 体积掺量的 PVA 纤维混凝土相对于素混凝土，断裂能增加了 18.9%，断裂韧度增加了 9.28%，临界裂缝张口位移增加了 4.54%；1.5% 体积掺量的普通钢纤维和超细钢纤维混凝土断裂能增加了 1 386% 和 1 560%，断裂韧度增加了 25.68% 和 31.39%，临界裂缝张口位移增加了 13.63% 和 30.3%；而三元混杂纤维混凝土的断裂能增加了 1 632%，断裂韧度增加了 44.76%，临界裂缝张口位移增加了 37.87%。(3) 超细钢纤维增益比 > 普通钢纤维增益比，这是因为同体积掺量下超细钢纤维的根数要多于普通钢纤维，参与抑制混凝土开裂的纤维数量也更多，对断裂韧性的提升效果更好。(4) 对比混杂纤维混凝土和单一超细钢纤维混凝土的断裂能增益比，发现其差异性并不明显，且从 P - $CMOD$ 曲线上也直观看出后半段下降部分趋于一致，这是因为三元混杂纤维的组合效应不仅要看组合纤维的类别，还要看达到最佳增强增韧效果时每种纤维的混掺比例，对于最优断裂韧性混杂纤维混凝土的纤维混掺配合比，需要进一步的试验研究。

4 数值模拟

扩展有限单元法与传统有限元法相比，将非连续

位移引入有限元位移场近似插值表达中，从而可以准确描述裂纹两边非连续的变形模态。在模拟开裂行为时，可以不考虑裂纹的任何内部细节，因为裂纹是独立于有限单元网格的，而且扩展有限元能够跟踪裂纹的生长，确定裂纹的位置，随着裂纹的扩展也不需对网格进行重新划分，大大减少了计算量。

4.1 混凝土梁有限元模型建立

在试验基础上，基于扩展有限单元法，利用 Abaqus 软件建立三维模型，模拟混杂纤维混凝土与单一纤维混凝土及素混凝土梁三点弯曲时的不同开裂行为。模型尺寸为 400 mm × 100 mm × 100 mm，梁支座间距 S 为 390 mm，预制裂缝的缝高比为 0.5，如图 2 所示。

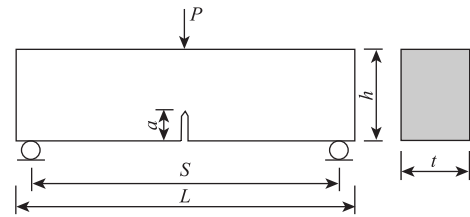


图 2 三点弯曲梁模型

Fig. 2 Three-point bending beam model

模型采用基于损伤力学演化的失效准则，损伤判据为最大主应力失效准则。刁浩峰^[25]指出利用扩展有限元模拟裂纹扩展时，网格的密集程度对计算结果影响并不大，所以在本研究的模型中对裂纹周围的单元不再细化。加载点通过竖向位移来控制。基于前期研究成果^[26]，各对照组模型材料属性如表 8 所示，泊松比统一为 0.2。

表 8 不同配比混凝土材料属性

Tab. 8 Properties of concrete material with different mixing ratios

组别	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	断裂能/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
A1	59.7	3.4	3.47×10^4	343
A2	62.5	3.5	3.49×10^4	408
A3	66.3	3.7	3.79×10^4	5 035
A4	73.7	4.0	3.87×10^4	5 694
A5	75.6	4.1	3.83×10^4	5 941

4.2 计算结果与分析

4.2.1 荷载 - 张口位移特性曲线对比

图 3 (a) ~ (e) 是软件模拟的 5 组混凝土梁荷载 - 张口位移 (P - $CMOD$) 曲线与实际试件加载曲线的对比图。通过对比可知，软件模拟曲线能够较好地拟合实际加载曲线。曲线的发展趋势大致分为 3

个阶段：(1) 直线上升阶段，该阶段荷载值小于起裂荷载，裂纹还没开始扩展。(2) 曲线上升阶段，该阶段荷载超过起裂荷载，裂纹开始稳定向上扩展。(3) 曲线下降阶段，该阶段荷载值超过了失稳荷载，

裂纹开始偏离原来方向快速扩展直到裂纹贯穿整个试件。图 3 (f) 是将各对照组软件模拟的荷载 - 张口位移曲线绘制在一起，其反映的规律与实际荷载 - 张口位移曲线 (图 1) 的规律基本吻合。

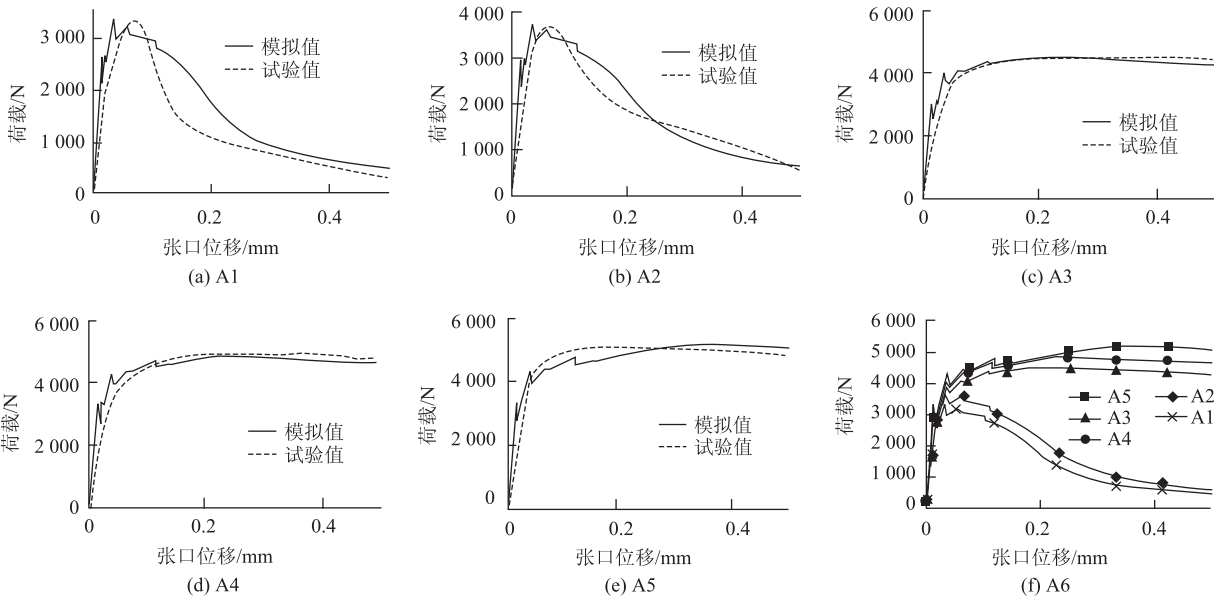


图 3 荷载 - 裂缝张口位移曲线对比

Fig. 3 Comparison of curves of load vs. crack opening displacement

4. 2. 2 断裂参数对比

由 Abaqus 模拟得到荷载 - 张口位移 (P - $CMOD$) 曲线后，利用 Origin 软件参照 3. 1 节中提出的方法来确定起裂荷载 P_{ini} 与临界荷载 F_Q ，并将临界荷载值代入美国材料与试验协会建议的断裂韧性公式中计算得到断裂韧性 K_{IC} 。各组试件由软件模拟得到的断裂参数值与试验值的对比情况如表 9 所示。

表 9 断裂参数对比

Tab. 9 Comparison of fracture parameters

参数	对照组	A1	A2	A3	A4	A5
起裂荷载	试验值/N	2 800	3 167	3 725	3 887	4 313
	模拟值/N	2 658	3 072	3 960	4 186	4 410
	误差/%	5.07	2.99	6.30	7.69	2.24
临界荷载	试验值/N	3 360	3 672	4 223	4 415	4 864
	模拟值/N	3 326	3 722	4 087	4 374	4 477
	误差/%	1.01	1.36	3.22	0.93	7.95
断裂韧性	试验值/ ($kN \cdot m^{-3/2}$)	1 098.72	1 200.74	1 380.92	1 443.71	1 590.53
	模拟值/ ($kN \cdot m^{-3/2}$)	1 087.60	1 217.09	1 336.4	1 430.29	1 463.98
	误差/%	1.01	1.36	3.22	0.93	7.95

由表 9 可知，由 Abaqus 软件模拟三点弯曲梁试

验得到的起裂荷载 P_{ini} 、临界荷载 F_Q 及断裂韧性值与试验值误差均不超过 10%，其中最重要断裂参数 K_{IC} 的模拟值与试验值误差基本在 3% 以内，仅三元混杂纤维组的误差接近 8%。导致误差的原因可能是由于软件在模拟混凝土试件时将其看作是均质连续体，而实际的混凝土材料特别是三元混杂纤维混凝土材料内部结构复杂，纤维分散不完全均匀。

4. 2. 3 试件加载时破坏形态与裂纹长度变化

图 4 (a) ~ (d) 模拟了其中 1 组试件加载时部分裂纹的扩展。可以看出，在加载初期裂纹还没有扩展，裂缝张口位移却在慢慢增加，初始裂缝尖端出现应力集中现象。随着荷载的增加，裂纹尖端应力强度因子 K_I 在逐渐增大，基于徐世烺等提出的双 K 断裂模型，当 $K_I = K_{IC}^{ini}$ (起裂韧性) 时，裂纹起裂；当 $K_{IC}^{ini} < K_I < K_{IC}^{un}$ (失稳韧性) 时，裂缝稳定向上扩展一小段距离；当 $K_I = K_{IC}^{un}$ 时，裂纹开始偏离原来方向继续向上失稳扩展^[27]。整个模拟加载过程中，裂纹尖端的应力集中使得裂纹不断向上扩展并发生方向偏转，而远离裂尖部分的应力不断得到释放直至消失。试件最终的破坏形态与实际加载的破坏形态对比效果如图 4 (e) ~ (f) 所示。可以看出，软件模拟的试件最终破坏形态与试验情况吻合较好，

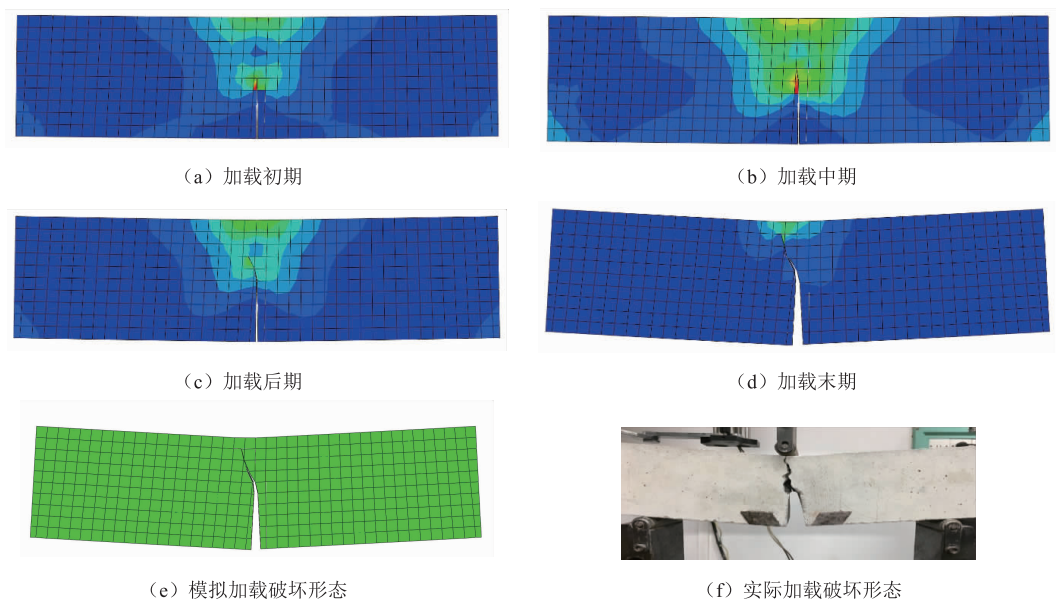


图 4 裂纹扩展图

Fig. 4 Diagrams of crack expansion

裂缝均是向上扩展一小段距离后发生偏转, 最终贯穿整个试件。因此, 在以后的实际工程中, 可以考虑利用这种方法来合理地预测混凝土构件上裂纹潜在的扩展途径。

混凝土试件在实际加载过程中裂纹扩展非常快, 很难捕捉到裂纹长度随着时间和加载点位移的变化关系, 而扩展有限元在模拟混凝土开裂行为时可以时刻跟踪裂纹的生长, 确定裂纹的位置, 从而得到裂纹长度随时间和随加载点位移的变化关系。图 5

(a) ~ (b) 分别为软件模拟的各组混凝土试件裂纹扩展高度随加载时间和加载点位移的变化曲线 (时间长度设为 1, 无单位)。表 10 记录了裂纹贯穿试件时的加载时间、加载点位移。

表 10 裂纹贯穿试件的时间和加载点位移
Tab. 10 Time of crack penetrating specimens and displacements of loading point

组别	A1	A2	A3	A4	A5
加载时间	0.062	0.088	0.397	0.599	0.881
增益比/%	0	41.93	540.32	866.13	1 320.96
加载点位移/mm	3.977	6.091	18.003	27.705	44.609
增益比/%	0	53.15	352.67	596.63	1 021.67

注: 设加载全过程时间为 1, 无单位。

由图 5 可以看出, 素混凝土与掺入少量 PVA 纤维的混凝土试件裂纹迅速扩展并贯穿整个试件, 而掺入钢纤维或三元混杂纤维的混凝土试件裂纹慢慢扩展至试件顶部。表 10 的数据显示, 与素混凝土相比, 0.15% 体积掺量的 PVA 纤维混凝土试件的裂纹贯穿时间增加了 41.93%, 1.5% 体积掺量的单一普通钢纤维和超细钢纤维混凝土试件裂纹贯穿时间分别增加了 540.32% 和 866.13%, 而三元混杂纤维混凝土试件裂纹贯穿所需时间最长, 比素混凝土增加了 1 320.96%。从裂纹贯穿试件时加载点的位移看, 0.15% 体积掺量 PVA 纤维混凝土、1.5% 体积掺量普通钢纤维混凝土、超细钢纤维混凝土及三元混杂纤维混凝土试件的加载点位移, 相比于素混凝土试件分别增加了 53.15%, 352.67%, 596.63%, 1 021.67%。

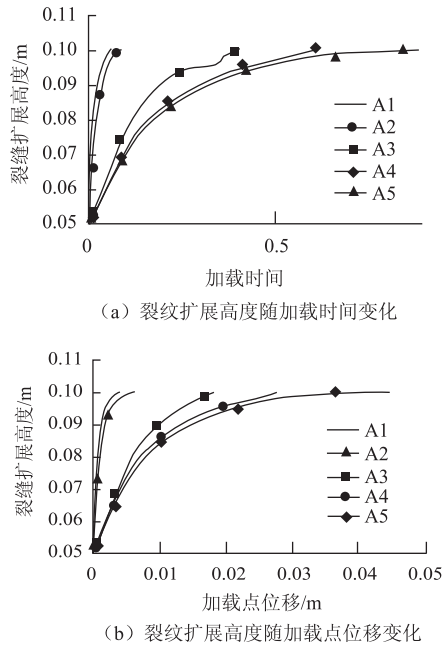


图 5 裂纹长度变化曲线
Fig. 5 Curves of crack length change

可见,三元混杂纤维混凝土裂纹贯穿时的适应变形能力最强,其次是超细钢纤维混凝土、普通钢纤维混凝土,PVA 纤维混凝土相对素混凝土的适应变形能力虽然也有提高,但在各组纤维混凝土中相对最弱。

裂缝扩展高度随加载时间变化曲线的斜率用 $\Delta h/\Delta t$ 表示, $\Delta h/\Delta t$ 从一定程度上可以反映出裂纹扩展速度的大小,斜率越大,裂纹扩展速度越快。裂纹扩展到 0.08 m 以前,素混凝土和 0.15% 体积掺量的 PVA 纤维混凝土裂纹曲线几乎垂直上升,裂纹扩展速度非常快且没有明显变化,而 1.5% 体积掺量的钢纤维混凝土和三元混杂纤维混凝土裂纹曲线斜率较小,裂纹扩展速度较慢且随着加载时间不断减小。裂纹扩展到 0.08 m 时,素混凝土和 PVA 纤维混凝土的裂纹扩展速度约为普通钢纤维混凝土的 6 倍,为超细钢纤维混凝土的 9 倍,为三元混杂纤维混凝土的 10 倍。裂纹长度超过 0.08 m 后,素混凝土和 PVA 纤维混凝土的裂纹扩展速度开始有减小趋势,但速度仍然很大。而钢纤维混凝土和混杂纤维混凝土的裂纹扩展速度则继续在减小,曲线变得越来越平缓。

综合裂纹曲线斜率的变化规律及裂纹贯穿试件所需时间和加载点位移分析可知,三元混杂纤维混凝土裂纹的扩展速度最慢,表现出的阻裂能力和断裂韧性最好,其次是 1.5% 体积掺量的超细钢纤维混凝土和普通钢纤维混凝土,而 0.15% 体积掺量的 PVA 纤维混凝土和素混凝土裂纹扩展速度较快,表现出的阻裂能力及断裂韧性最弱。数值模拟反映出的上述规律与试验实测表现出的规律是一致的。

4.2.4 数值模拟方法应用评价

由软件模拟得到的各组混凝土试件加载曲线、断裂参数及破坏形态与试验情况都吻合较好,且反应规律也基本一致,说明扩展有限元法不仅可以用来模拟素混凝土的开裂行为,对于模拟纤维混凝土的开裂行为也是可行的。此外,扩展有限元法还可以时刻追踪裂纹的位置,从而确定裂纹长度随加载时间和加载点位移的变化关系,合理地预测裂纹潜在的扩展途径。因此,可以结合实际混凝土工程结构的受力特点,考虑将这种数值模拟方法应用于混凝土结构的开裂行为分析。如模拟水泥混凝土路面结构的裂纹扩展问题(面层板受力与小梁弯曲类似),为今后研究水泥混凝土及纤维混凝土路面在车辆荷载作用下裂缝的扩展情况提供新的思路和方法。

5 结论

通过对带切口的混凝土试件进行三点弯曲试验,得到素混凝土、单掺 PVA 纤维混凝土、单掺普通钢纤维混凝土、单掺超细钢纤维混凝土及三元混杂纤维混凝土共 5 组试件的荷载-挠度数据及荷载-张口位移数据,理论计算得出各组试件的断裂能、断裂韧度及临界张口位移等断裂特征参数,并利用 Abaqus 软件基于扩展有限单元法数值模拟各组试件 3 点加载时的开裂行为,追踪裂纹的扩展情况。主要研究结论如下:

(1) 在常规纤维掺量下,不同类型的纤维混凝土表现出的断裂韧性差异显著,其中 0.15% 体积掺量的 PVA 纤维混凝土相对于素混凝土,断裂能增加了 18.9%,断裂韧度增加了 9.28%,临界裂缝张口位移增加了 4.54%;1.5% 体积掺量的普通钢纤维和超细钢纤维混凝土断裂能增加了 1386% 和 1560%,断裂韧度增加了 25.68% 和 31.39%,临界裂缝张口位移增加了 13.63% 和 30.3%;而三元混杂纤维混凝土断裂能增加了 1632%,断裂韧度增加了 44.76%,临界裂缝张口位移增加了 37.87%。

(2) 相对于素混凝土和 0.15% 体积掺量的 PVA 纤维混凝土荷载-张口位移曲线,钢纤维混凝土和三元混掺纤维的加载曲线更加饱满,峰值荷载后出现屈服平台现象,其中部分曲线在下降段甚至再次上升而出现了二次峰值现象,表现出良好的抗裂性能和韧性。

(3) 基于扩展有限元法模拟三点弯曲试验得到的各组纤维混凝土试件加载曲线、断裂特征参数和破坏形态与试验情况都吻合较好,反映规律基本一致,证明了扩展有限元法用于模拟本研究中各种纤维混凝土开裂行为的可行性。

(4) 扩展有限元法能够时刻追踪到裂纹的位置,从而确定裂纹长度随加载时间和加载点位移的变化关系。数值模拟计算中,各组混凝土试件的裂纹扩展速度不同,其中素混凝土的裂纹扩展速度明显快于纤维混凝土,约为 0.15% 体积掺量 PVA 纤维混凝土的 1.4~1.6 倍,为 1.5% 体积掺量钢纤维混凝土的 6~9 倍,为三元混杂纤维混凝土的 11~14 倍。

参考文献:

References:

- [1] 邓宗才,王辉,刘岩.生态钢纤维混凝土弯曲韧性和断裂性能[J].建筑科学与工程学报,2017,34

- (2): 111-118.
DENG Zong-cai, WANG Hui, LIU Yan. Flexural Toughness and Fracture Properties of Ecological Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34 (2): 111-118.
- [2] 杜向琴. 碳纤维混凝土断裂性能研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
DU Xiang-qin. Research on Fracture Performance of Carbon Fiber Reinforced Concrete [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.
- [3] 王占桥, 高丹盈, 朱海堂, 等. 聚丙烯纤维高强混凝土断裂性能试验研究 [C] //第十届全国纤维混凝土学术会议. 上海: 同济大学出版社, 2004: 447-455.
WANG Zhan-qiao, GAO Dan-ying, ZHU Hai-tang, et al. Experimental Study on Fracture Performance of Polypropylene Fiber High Strength Concrete [C] // The Tenth National Conference on Fiber Concrete. Shanghai: Tongji University Press, 2004: 447-455.
- [4] 杜修力, 田予东, 李晓欣, 等. PVA 纤维高强混凝土的力学性能试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2008 (4): 46-49.
DU Xiu-li, TIAN Yu-dong, LI Xiao-xin, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of PVA Fiber Reinforced High Strength Concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2008 (4): 46-49.
- [5] 金祖权, 高嵩, 侯保荣, 等. 玄武岩纤维增强路面用混凝土力学与开裂性能 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40 (增2): 160-164.
JIN Zu-quan, GAO Song, HOU Bao-rong, et al. Mechanics and Crack Resistance Capacity of Basalt Fiber Reinforced Concrete Pavements [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40 (S2): 160-164.
- [6] 邓宗才, 李建辉, 傅智, 等. 聚丙烯纤维混凝土直接拉伸性能的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (7): 45-48.
DENG Zong-cai, LI Jian-hui, FU Zhi, et al. The Uniaxial Tension Test of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (7): 45-48.
- [7] 姚武, 蔡江宁, 陈兵, 等. 混杂纤维增韧高性能混凝土的研究 [J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2002, 24 (1): 42-44.
YAO Wu, CAI Jiang-ning, CHEN Bing, et al. Study of High Performance Concrete Reinforced with Hybrid Fibers [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Science Edition, 2002, 24 (1): 42-44.
- [8] 朱海堂, 孙丽萍, 王占桥. 钢-聚丙烯混杂纤维高强混凝土断裂性能的混杂效应 [J]. 新型建筑材料, 2009, 36 (2): 24-27.
ZHU Hai-tang, SUN Li-ping, WANG Zhan-qiao. Hybrid Effect of Steel-polypropylene Fiber on Fracture Property of High Strength Concrete [J]. New Building Materials, 2009, 36 (2): 24-27.
- [9] 姜锦磊, 孙敏, 李风雷. 海水腐蚀环境下 PVA-钢混杂纤维混凝土弯曲韧性研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2018 (12): 53-56.
JIANG Jin-lei, SUN Min, LI Feng-lei. Research on Flexural Toughness of PVA-steel Hybrid Fiber Concrete under Marine Corrosion Environment [J]. China Concrete and Cement Products, 2018 (12): 53-56.
- [10] 唐春安, 傅宇方, 林鹏, 等. 短纤维增强复合材料破坏过程的数值模拟 [J]. 力学学报, 2000, 32 (3): 373-378.
TANG Chun-an, FU Yu-fang, LIN Peng. Numerical Simulation of Failure Process in Short Fiber Reinforced Composite Material [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 32 (3): 373-378.
- [11] 黄俊, 姜弘道. 短纤维水泥基复合材料的拉伸数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (9): 1913-1922.
HUANG Jun, JIANG Hong-dao. Numerical Analysis of Short Fiber reinforced Cement-based Composites in Direct Tension [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (9): 1913-1922.
- [12] REN X D, LI J. Multi-scale Based Fracture and Damage Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 35: 253-261.
- [13] 胡少伟, 米正祥. 基于扩展有限元法的混凝土裂缝扩展过程数值模拟 [J]. 水利学报, 2014, 45 (增1): 51-56.
HU Shao-wei, MI Zheng-xiang. Numerical Simulation of Concrete Crack Propagation Process on Extended Finite Element Method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (S1): 51-56.
- [14] 曲蒙, 金南国, 金贤玉, 等. 早龄期混凝土三点弯曲试验梁断裂的数值分析 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40 (7): 1224-1229.
QU Meng, JIN Nan-guo, JIN Xian-yu, et al. Numerical Simulation of Cracking of Early-age Concrete Three-point Beams [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2006, 40 (7): 1224-1229.
- [15] FANG X J, JIN F, WANG J T. Simulation of Mixed-Mode Fracture of Concrete Using Extended Finite Element Method [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (S1): 46-52.
- [16] NGO D, SCORDELIS A C. Finite Element Analysis of

- Reinforced Concrete Beams [J]. Journal of American Concrete Institute, 1967, 64 (3): 152-163.
- [17] 李魏魏. 基于 XEFM 超高韧性水泥基复合材料裂纹扩展的数值模拟分析 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
LI Wei-wei. Numerical Simulation Analysis of Crack Propagation in Ultra-high Toughness Cement-based Composites Based on XEFM [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [18] 覃源, 易勇生, 柴军瑞, 等. 基于扩展有限元法的混凝土三点弯曲梁裂缝扩展模拟研究 [J]. 水利水电技术, 2018, 49 (3): 46-52.
QING Yuan, YI Yong-sheng, CHAI Jun-rui, et al. Study on X-FEM-based Simulation on Crack-propagation of Three-point Bending Concrete Beam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (3): 46-52.
- [19] 史宏飞. 带缝 PVA-ECC 抗 (盐) 冻性及 (盐) 冻融循环后断裂特性研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
SHI Hong-fei. Frost Resistance and Fracture Characteristics of Slit PVA-ECC after Freeze-thaw Cycle [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [20] 张廷毅, 李庆斌, 汪自力, 等. 钢纤维高强混凝土断裂韧性及影响因素 [J]. 硅酸盐学报, 2012, 40 (5): 639-650.
ZHANG Ting-yi, LI Qing-bin, WANG Zi-li, et al. Fracture Toughness of Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete and Influencing Factors [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40 (5): 639-650.
- [21] DL/T 5332—2005, 水工混凝土断裂试验规程 [S].
DL/T 5332—2005, Norm for Fracture Test of Hydraulic Concrete [S].
- [22] 杨广里. 断裂力学及应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990.
- YANG Guang-li. Fracture Mechanics and Its Application [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990.
- [23] 尹双增. 断裂损伤理论及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
YIN Shuang-zeng. Theory and Application of Fracture Damage [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.
- [24] 郑光俊, 朱为玄, 徐道远. 混凝土三点弯曲试样 K_{IC} 的计算公式研究 [J]. 淮海工学院学报: 自然科学版, 2004, 13 (2): 67-70.
ZHENG Guang-jun, ZHU Wei-xuan, XU Dao-yuan. A Study on the Formulae to Test K_{IC} in Three-point Concrete Bending Beams [J]. Journal of Huaihai Institute of Technology: Natural Science Edition, 2004, 13 (2): 67-70.
- [25] 刁浩峰. 基于 XFEM 的裂缝扩展分析 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
DIAO Hao-feng. Analysis on Crack Propagation Based on XFEM [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014.
- [26] 任俊杰. 混杂纤维超早强混凝土的路用性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
REN Jun-jie. Study on Road Performance of Hybrid Fiber Super-early-strength Concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [27] 徐世烺, 周厚贵, 高洪波, 等. 各种级配大坝混凝土双 K 断裂参数试验研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39 (11): 50-62.
XU Shi-zhao, ZHOU Hou-gui, GAO Hong-bo, et al. An Experimental Study on Double-K Fracture Parameters of Concrete for Dam Construction with Various Grading Aggregates [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (11): 50-62.