【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

纤维掺量对玻璃纤维增强水泥板弯曲性能的影响

卢娟, 张亚芳, 程从密, 霍永杰

广州大学土木工程学院, 广东广州 510006

摘要: 为探究纤维掺量对定向玻璃纤维增强水泥 (glass fiber reinforced cement, GRC) 弯曲性能的影响, 在 GRC 板四点弯曲断裂试验的基础上, 采用 RFPA^{3D} 模拟软件建立三维数值模型, 对比不同玻璃纤维掺量下 GRC 板的破坏模式, 分析了试件荷载-位移曲线的发展规律, 并通过断裂能研究了纤维的增强增韧作用. 结果表明, 当掺杂的玻璃纤维的体积分数在 0.5% ~ 2.0% 时, 试件峰值荷载随着定向纤维体积分数的增加呈增大趋势; 添加纤维的试件在底部出现裂缝后, 仍具有一定的承载力, 此时纤维虽然发生损伤但未断裂; 随着纤维掺量的增加, 试件的裂缝扩展路径愈加曲折, 发生破坏时做的功更多, 韧性更好. 研究结果可为定向玻璃纤维增强水泥材料的加固提供参考.

关键词: 工程材料; 玻璃纤维增强水泥; 玻璃纤维; 弯曲性能; 数值模拟; 断裂能

中图分类号: TB333

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.04380

Effect of fiber content on bending performance of glass fiber reinforced cement slab

LU Juan, ZHANG Yafang, CHENG Congmi, and HUO Yongjie

School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: To investigate the effect of fiber content on the bending properties of oriented glass fiber reinforced cement (GRC), the four-point flexural test was used to get the fracture performance of oriented GRC slab, and a 3D numerical model is created by RFPA^{3D} simulation software. The failure modes of the GRC slab with different glass fiber content are compared. The load-displacement curve of the specimen is analyzed, and the strengthening and toughening effect of the fiber is investigated by fracture energy. The results show that the peak load of the specimens enhances with the increase of the oriented fiber within volume fraction of 0.5% and 2.0%. The specimen with added fibers still has a certain bearing capacity when cracks appear at the bottom, and the fibers are damaged but not broken. With the increase of fiber content, the crack propagation path becomes more tortuous, the more work is done when failure occurs, and the better the toughness is. The study can provide a reference for reinforcement of directional GRC.

Key words: engineering material; glass fiber reinforced cement; glass fiber; bending performance; numerical simulation; fracture energy

水泥是基建工程中应用最为广泛的胶凝材料, 具有耐久性好和抗压强度高优点, 也存在抗拉强度低、抗裂性差和延伸率较低等不足, 在一定程度上限制了应用. 因此, 研究者把纤维掺到水泥中,

Received: 2021-03-08; **Accepted:** 2021-05-17; **Online (CNKI):** 2021-06-11

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51878190)

Corresponding author: Professor ZHANG Yafang. E-mail: zhangyafang2004@163.com

Citation: LU Juan, ZHANG Yafang, CHENG Congmi, et al. Effect of fiber content on bending performance of glass fiber reinforced cement slab [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(4): 380-386. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

利用纤维来改善水泥的性能^[1-2].

在纤维增强水泥材料中,玻璃纤维是常见的水泥基材料的增强物质^[3-4],具有较低的比重和吸水率、较高的弹性模量、抗拉强度和重量^[5-7].很多学者对玻璃纤维增强水泥(glass fiber reinforced cement, GRC)的性能进行了研究^[8-11]. GRC被广泛应用于包覆板^[12]、电信塔^[13]和永久模板工程^[14]等领域中.其中,不少构件用来承受弯曲作用,但目前缺乏相应的对其进行较为完整有效理论分析的模型. GRC的抗弯性能可通过四点弯曲试验进行研究^[15-16],且性能受纤维方向分布的影响较大^[17-19].目前,有关GRC数值模拟的研究多是考虑处于随机分布状态的纤维,而涉及纤维取向/定向玻璃纤维对GRC力学性能影响的分析尚少有研究.本研究通过物理试验与数值模拟分析相结合的方法,在四点弯曲加载下,分析定向玻璃纤维的阻裂机理以及不同纤维掺量对GRC板力学性能的影响,建立了基于有限元分析并适用于玻璃纤维增强水泥的数值模型,并通过细-宏观多尺度结合的方法,研究了玻璃纤维对水泥板的增强增韧机理,为定向玻璃纤维增强水泥材料的加固提供了一种有效的分析方法.

1 物理试验

1.1 材料及配比

1.1.1 材料

试验中使用的GRC由以下部分组成:低碱度硫铝酸盐水泥、标准砂、水、高效减水剂和玻璃纤维.其中,玻璃纤维单股线密度为98 tex.

1.1.2 材料配合比

水泥砂浆基体材料的配比为 $m(\text{水泥}):m(\text{标准砂}):m(\text{水}):m(\text{减水剂})=1:1:0.36:0.01$.将不同体积分数的玻璃纤维制备入水泥砂浆,得到不同掺量的GRC试件.纤维的体积分数分别为0、0.5%、1.0%、1.5%和2.0%,对应的试件编号分别为GRC-0、GRC-1、GRC-2、GRC-3和GRC-4.为研究与加载方向平行的玻璃纤维对材料性能的影响,设计1组纤维体积分数为0.7%的试件,编号为GRC-5.其中,0.5%的纤维垂直于加载方向(纵向纤维),0.2%的纤维平行于加载方向(横向纤维).

1.1.3 玻璃纤维束的准备

图1为GRC试件的模型图,其中, F 为加载力,纵向纤维与加载方向垂直.图2为试件GRC-3与GRC-5中的纤维束分布.本实验使用330 mm ×

13 mm × 50 mm的砂浆板模具,用小木棍将长度为320 mm的玻璃纤维束进行粘接固定,如图2(a).图2(b)为试件GRC-5的玻璃纤维束分布.

图1 GRC试件的模型图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of fiber orientation of GRC specimen (unit: mm)

(a) GRC-3

(b) GRC-5

图2 GRC-3与GRC-5的纤维束分布

Fig. 2 (Color online) Fiber bundles of GRC-3 and GRC-5

1.2 试件的制备和养护

使用普通的砂浆搅拌机进行搅拌,旋转速度为80 r/min,并将试件分层浇筑.第1层浇筑后放入纤维束,继续浇筑第2层.每层浇筑后都用振动台压实,以去除空气间隙,最后将周围的多余浆体擦拭干净.静待1 h后,用保鲜膜密封,将试件转移到相对湿度大于95%的地方静置.24 h后脱模,将试件放入水中养护26 d,进行抗弯强度测试.

1.3 试验方法及测试内容

图3为GRC的抗弯强度试验.本试验依据GB/T 15231—2008^[20]标准进行,采用广州大学土木工程实验室的WHY-50微型控制全自动压力试验机,加载速度为0.5 mm/min,采集数据包括荷载和位移.

图 3 GRC 的抗弯强度试验

Fig. 3 (Color online) Bending test of GRC

2 试验结果与讨论

2.1 弯曲破坏形式

图 4 为试件 GRC-0 和 GRC-5 的断裂图. 在四点弯曲加载时, 试件断裂均发生在中间纯弯段. 由图 4 可知, 试件 GRC-0 未掺入玻璃纤维, 表现出明显的脆断特性. 当试件出现裂缝后, 裂缝迅速向上扩展直至断裂. 而掺入了玻璃纤维的 GRC-5, 在加载过程中会听到纤维被拉断的声音. 底部出现裂缝后, 裂缝向上扩展较为缓慢, 发展路径相对曲折, 同时, 试件产生较大变形. 当裂缝逐渐扩展到试件上边缘时, 试件仍可以承受一定的荷载, 没有发生脆断现象, 破坏形态表现为“裂而不断”.

试件的玻璃纤维掺量越多, 当微裂纹萌生后, 随着加载持续, 裂缝向上扩展的时间越长, 呈现的延性破坏特征越为明显.

图 4 不同玻璃纤维掺量试件的断裂图

Fig. 4 (Color online) Bending diagram of different glass fiber additives

2.2 纤维掺量对荷载-位移曲线的影响

图 5 (a) 为试件 GRC-0 至 GRC-4 的荷载-位移曲线. 对于未添加纤维的试件 GRC-0, 当拉应变达

到极值时, 试件底部首先出现裂缝, 随后裂缝迅速扩展到上面, 试件断裂. 荷载-位移曲线表现为荷载陡降到 0. 而对于添加纤维的试件 (GRC-1 至 GRC-4), 峰值荷载随着纤维掺量的增多而不断增大, 说明纤维对水泥的增强作用在不断提高, 同时荷载-位移曲线 AB 段 (此时处于纤维断裂时期) 的包络面积也随之增大, 说明试件的韧性也随玻璃纤维掺量的增加而增大. 图 5 (b) 与图 5 (c) 分别为试件 GRC-0 与试件 GRC-4 的破坏断面图. 从图 5 (b) 和图 5 (c) 可见, 试件 GRC-0 的断口较为平整, 而试件 GRC-4 断口处有因拔出而突出的纤维. 这是因为在试件裂缝扩展过程中, 纤维会跨过裂缝的两侧发生桥连现象. 由于纤维具有较高的弹性模量, 所以

(a) GRC-0 至 GRC-4 荷载位移曲线

(b) GRC-0 破坏断面

(c) GRC-4 破坏断面

图 5 GRC-0 至 GRC-4 荷载-位移曲线与破坏断面图

Fig. 5 (Color online) Load-displacement curve and sectional drawing of GRC-0 to GRC-4

未被拔出或拉断的纤维对微裂缝仍有一定的限制作用,可传递并承担其中的一部分拉力,使荷载-位移曲线与坐标轴的包络面积更大,文献[21]的研究也有相同的结果。

图6为试件 GRC-1 与 GRC-5 的荷载-位移曲线与破坏断面图。由图6可见,试件 GRC-5 与 GRC-1 的主要差别在于纤维呈网格状(即 GRC-5 存在横向纤维),但二者荷载峰值结果相差不大,说明横向纤维对荷载峰值影响不大。从图6(c)可见,横向纤维限制了受力纤维的滑移,因此试件 GRC-5 断裂后纤维更短,即为纤维断裂。而图6(b)试件断裂

后纤维较长,即为纤维拔出。

3 数值模型建立

本研究使用 RFPA^{3D} 软件进行数值模拟。图7为 GRC 数值模型,基体尺寸为 330 mm × 13 mm × 50 mm。对整体试件进行计算单元划分,均为边长 1 mm 的正六面体单元,总单元个数为 27 万。加载方式为位移加载,加载步长为 0.01 mm/步,共加载 400 步。

图7 GRC 数值模型 (单位: mm)

Fig. 7 (Color online) GRC numerical model (unit: mm)

RFPA^{3D} 软件采用 Weibull 双函数曲线^[22]对各相材料细观单元的强度、泊松比、弹性模量和密度等物理量进行非均匀性赋值,即

$$\varphi(x) = \frac{m}{x_0} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

其中, $\varphi(x)$ 为材料具有某一力学性质的细观微元体的概率密度; x 为材料细观单元的力学性质(弹性模量、抗压强度、泊松比和密度); x_0 为单元参数所对应的平均值; m 为材料的均质度系数, m 越大,表明材料分布越均匀。

表1为根据试验测得的三维数值计算模型中各组分材料力学参数赋值。

表1 数值模型各组分材料力学参数¹⁾

Table 1 Parameters of varied materials

组 分	弹性模量/MPa	极限抗压强度/MPa	泊松比
基 体	20 400(5)	50(5)	0.20(5)
玻璃纤维	75 000(15)	1 300(15)	0.22(15)

¹⁾ 基体的拉压比为 0.1, 玻璃纤维的拉压比为 1; 括号内为材料的均质度值。

本研究采用拉伸截断的摩尔库伦准则作为损伤判断依据^[23]。当单元满足最大拉应力准则时,该单元发生拉伸损伤,即

$$\sigma_1 \geq \sigma_t \quad (2)$$

其中, σ_1 为最大主应力; σ_t 为材料的极限拉应力。

(a) GRC-1和GRC-5的荷载位移曲线

(b) GRC-1的试件断面

(c) GRC-5的试件断面

图6 GRC-1 与 GRC-5 荷载-位移曲线与破坏断面图
Fig. 6 (Color online) Load-displacement curve and sectional drawing of GRC-1 and GRC-5

当单元满足摩尔库伦准则时, 该单元发生剪切损伤, 即

$$\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_1 - \sigma_3 \geq \sigma_c \quad (3)$$

其中, φ 为单元的摩擦角; σ_3 为最小主应力; σ_c 为材料的极限抗压强度值. 最大拉应力准则具有优先权.

4 数值模拟结果

4.1 纤维掺量对荷载-位移曲线的影响

图 8 为试件的荷载-位移曲线. 由图 8 (a) 可见, 随着纤维掺量的增加, 试件的峰值荷载逐渐提高. 在弹性阶段 (oA 段), 各试件曲线几乎完全重合, 表明纤维掺量对试件抗弯性能弹性阶段的影响甚微; 进入非弹性阶段 (AB 段) 后, 纤维掺量越大, 试件的抗弯能力越强, 峰值荷载越大; 试件达到峰值荷载 B 点后, 随荷载继续增大, 试件开始出现损伤, 承载力下降; B 点以后, 荷载主要由纤维来承

担; 当过 C 点后, 与 GRC-0 相比, 添加纤维试件的 CD 段出现荷载增大的现象, 因为此时纤维虽然发生损伤, 但未完全损坏, 纤维可承受一定的荷载, 并且纤维掺量越多, 试件韧性越强, 可承受荷载能力越强.

图 8 (b) 对比了试件 GRC-1 与 GRC-5 的荷载-位移曲线. 由图 8 (b) 可见, GRC-1 与 GRC-5 荷载-位移曲线发展趋势一致, 荷载峰值相近, 横向纤维对试件的承载力作用不大, 对韧性影响甚微, 与物理试验结果一致.

表 2 为各试件的物理试验与数值模拟峰值荷载结果. 由表 2 可见, 数值模拟分析中 GRC-4 的峰值荷载 f_2 最高达到 510.49 N, 物理试验中的峰值荷载 f_1 最高达到 515.43 N, 数值模拟与物理试验结果较吻合. 二者之差的绝对值 $|\Delta f| = |f_1 - f_2|$ 最大仅为 13.10 N. GRC-4 对 GRC-0 的相对韧度值最高可达 5.56, 表明掺加玻璃纤维对试件的韧性具有显著提高作用.

表 2 各试件物理试验与数值模拟峰值荷载结果

Table 2 Peak load results of numerical simulation and physical tests

试件	f_1/N	f_2/N	$ \Delta f /\text{N}$	对 GRC-0 的相对韧度值
GRC-0	299.82	300.29	0.47	1.00
GRC-1	370.92	373.20	2.28	1.86
GRC-2	418.83	420.13	1.30	2.55
GRC-3	484.63	480.77	3.86	3.99
GRC-4	515.43	510.49	4.94	5.56
GRC-5	400.42	413.52	13.10	2.32

(a) 试件GRC-0至GRC-4荷载-位移曲线

(b) 试件GRC-1和试件GRC-5荷载-位移曲线

图 8 试件荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve of specimen

断裂能 G_f 为描述混凝土断裂性能的参数, 即单位面积断裂时所需消耗的能量^[24], 计算公式为

$$G_f = (W_0 + W_1 + W_2)/A \quad (4)$$

其中, W_0 为荷载-位移曲线从开始加载直至拟合点时的包络面积; W_1 为两支座间试件的重力所做的功, 因此可忽略不计, 有 $W_1 \approx 0$; W_2 为拟合点前重力的附加功, $W_2 = mg\delta_{\max}$, m 为试件支座间的质量, g 为重力加速度, $\delta_{\max}$ 为跨中最大挠度; A 为断面的面积, $A = t(h - a_0)$, t 为试件宽度, h 为试件高度, a_0 为初始裂缝高度, 此处忽略不计.

表 3 为 GRC 板的物理试验和数值模拟断裂能及对比. 由表 3 可见, GRC 板断裂能随玻璃纤维掺

量的增大而显著提高. 当玻璃纤维体积分数为 2.0% 时, 物理试验所得断裂能 G_n 是素水泥试件的 5.6 倍, 数值模拟结果得到的断裂能 G_{f2} 是素水泥试件的 5 倍. CHENG 等^[25-26] 分析了随机分布玻璃纤维对水泥断裂能的影响, 实验结果表明, GRC 的断裂能随着纤维掺量的增加而显著增大, 这与本研究的研究结果一致.

表3 物理试验与数值模拟断裂能及其对比值

Table 3 Comparison of fracture energy between physical test and numerical simulation

试件	$G_n /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$G_{f2} /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\delta G_f =$ $\frac{ G_n - G_{f2} }{G_n}$
GRC-0	188.46	227.50	0.207
GRC-1	350.00	388.89	0.111
GRC-2	480.25	531.25	0.106
GRC-3	752.50	832.14	0.106
GRC-4	1 048.57	1 150.00	0.097
GRC-5	438.00	477.79	0.091

5 结 论

采用物理试验和数值模拟方法, 研究了不同掺量的定向玻璃纤维增强水泥板的四点弯曲断裂力学行为, 可知:

1) 纤维体积分数在 0.5% ~ 2.0% 时, 试件峰值荷载随着定向纤维掺量的增多而增大. 在物理试验中, 纤维体积分数为 2.0% 试件的峰值荷载为 515.43 N, 数值模拟的峰值荷载为 510.49 N. 添加横向纤维对承载力的提高影响甚微.

2) 所有试件均在纯弯段断裂. 素水泥板试件的荷载-位移曲线在峰值荷载后的劣化阶段急剧下降. 添加纤维试件的在试件底部出现裂缝后, 发生损伤但未完全损坏, 仍具有一定承载力, 荷载-位移曲线在峰值荷载后的劣化阶段呈现出延性破坏特征. 纤维掺量越大, 裂缝扩展模式愈加曲折, 承载能力越强. 数值模拟分析与物理试验结果吻合.

3) 通过断裂能分析, 纤维体积分数在 0.5% ~ 2.0% 时, 纤维掺量越多, 受荷载作用发生破坏时做的功越多, 韧性越好. 当玻璃纤维体积分数为 2.0% 时, 实验所得断裂能是素水泥板试件的 5.6

倍, 数值模拟分析得到的断裂能是素水泥板试件的 5 倍, 结果较为一致.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51878190)

作者简介: 卢娟 (1992—), 广州大学博士研究生. 研究方向: 纤维增强混凝土细观力学. E-mail: 1223497368@163.com

引文: 卢娟, 张亚芳, 程从密, 等. 纤维掺量对玻璃纤维增强水泥板弯曲性能的影响[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(4): 380-386.

参考文献 / References:

- [1] EVANS A G, ZOK F W, DAVIS J. Role of interfaces in fiber-reinforced brittle matrix composites [J]. Composites Science and Technology, 1991, 42(1/2/3): 3-24.
- [2] MCSWAIN A C, BERUBE K A, CUSATIS G, et al. Confinement effects on fiber pullout forces for ultra-high-performance concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 91: 53-58.
- [3] PRATHIPATI S R R T, RAO C B K. A study on the uniaxial behavior of hybrid graded fiber reinforced concrete with glass and steel fibers [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 32(4): 764-770.
- [4] WU Tao, SUN Yijia, LIU Xi, et al. Flexural behavior of steel fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars [J]. Journal of Composites for Construction, 2019, 23(2): 04018081.1-04018081.13.
- [5] PEDROSO A G, MEI L H I, AGNELLI J A M, et al. Properties that characterize the propagation of cracks of recycled glass fiber reinforced polyamide [J]. Polymer Testing, 1999, 18(3): 211-215.
- [6] PEYVANDI A, SOROUSHIAN P. Structural performance of dry-cast concrete nanocomposite pipes [J]. Materials and Structures, 2015, 48(1/2): 461-470.
- [7] PRATHIPATI S R R T, RAO C B K. A study on the uniaxial compressive behaviour of graded fiber reinforced concrete using glass fiber/steel fiber [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 6(2): 1-14.
- [8] TASSEW S T, LUBELL A S. Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 51(31): 215-224.
- [9] ALGBURI A, SHEIKH M N, HADI M. Mechanical the properties of steel, glass, and hybrid fiber reinforced reactive powder concrete [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13(4): 998-1006.
- [10] LI Shengbin, HU Bingxu, ZHANG Fan. Preparation and properties of glass fiber/plant fiber reinforced cementitious

- composites [J]. *Science of Advanced Materials*, 2018, 10(7): 1028-1035.
- [11] LASSILA L V J, NOHRSTR M T, VALLITTU P K. The influence of short-term water storage on the flexural properties of unidirectional glass fiber-reinforced composites [J]. *Biomaterials*, 2002, 23(10): 2221-2229.
- [12] CORREIA J R, FERREIRA J, BRANCO F A. A rehabilitation study of sandwich GRC facade panels [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(8): 554-561.
- [13] FERREIRA J G, BRANCO F A. Structural application of GRC in telecommunication towers [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(1): 19-28.
- [14] PÉRA J, AMBROISE J. New applications of calcium sulfoaluminate cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(4): 671-676.
- [15] KIZILKANAT A B, KABAY N, AKYÜNCÜ V, et al. Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete; an experimental study [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 100: 218-224.
- [16] ALMERICH A, FENOLLOSA E, MARTIN P. Reinforced lime concrete with FRP: an alternative in the restoration of architectural heritage [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, 851: 751-756.
- [17] 张 勤, 巩苏苏, 赵永胜, 等. 多尺度纤维复合增强水泥基材料的力学性能[J]. *土木与环境工程学报*, 2021, 43(2): 123-129.
- ZHANG Qin, GONG Susu, ZHAO Yongsheng, et al. Mechanical properties of multi-scale fiber composite reinforced cement-based materials [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(2): 123-129. (in Chinese)
- [18] 吴昊宇, 侯云芬, 李地红. 玻璃纤维珠链增强水泥砂浆力学性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2018, 45(3): 4-8.
- WU Haoyu, HOU Yunfen, LI Dihong. Research on mechanical properties of glass fiber bead chain reinforced cement mortar [J]. *New Building Materials*, 2018, 45(3): 4-8. (in Chinese)
- [19] MEGEL M, KUMOSA L, ELY T, et al. Initiation of stress-corrosion cracking in unidirectional glass/polymer composite materials [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(2): 231-246.
- [20] GB/T 15231—2008. 玻璃纤维增强水泥性能试验方法 [S].
- GB/T 15231—2008. Test methods for the properties of glass fibre reinforced cement [S]. (in Chinese)
- [21] 高丹盈, 陈 刚, HADI M N S, 等. 钢筋与钢纤维混凝土的黏结-滑移性能及其关系模型[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(7): 132-139.
- GAO Danying, CHEN Gang, HADI M N S, et al. Bond-slip behavior and constitutive model between rebar and steel fibre reinforced concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(7): 132-139. (in Chinese)
- [22] 张亚芳, 郭中祥, 刘 浩, 等. 钢纤维对双丝拉拔试件动态破裂性能的影响[J]. *深圳大学学报理工版*, 2021, 38(2): 136-143.
- ZHANG Yafang, GUO Zhongxiang, LIU Hao, et al. Influence of steel fiber on dynamic failure property of twin fibers pull-out specimens [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2021, 38(2): 136-143. (in Chinese)
- [23] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂: 数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- TANG Chun'an, ZHU Wancheng. Concrete damage and fracture: numerical tests [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [24] 罗素蓉, 林扬兴, 肖建庄. 钢-PVA 混杂纤维高强再生骨料混凝土断裂性能[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(12): 93-102.
- LUO Surong, LIN Yangxing, XIAO Jianzhuang. Fracture behavior of high strength recycled aggregate concrete with steel-PVA hybrid fiber [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(12): 93-102. (in Chinese)
- [25] CHENG Congmi, HONG Silei, ZHANG Yafang, et al. Effect of expanded polystyrene on the flexural behavior of lightweight glass fiber reinforced cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120328.
- [26] 程从密, 张 健, 甘 伟, 等. 玻璃纤维增强水泥断裂能的试验研究[J]. *华南理工大学学报自然科学版*, 2018, 46(11): 53-58, 73.
- CHENG Congmi, ZHANG Jian, GAN Wei, et al. Experimental study on the fracture energy of glass fiber reinforced cement [J]. *Journal of South China University of Technology Natural Science*, 2018, 46(11): 47-52, 67. (in Chinese)

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】