

### 基于竹纤维和钢丝网增强的玄武岩钢筋混凝土梁抗弯延性试验研究

陈伟, 袁青, 马浩瀚, 朱子充, 覃国辉, 田政

### Experimental Study on the Flexural Ductility of BFRP Bar Concrete Beams With Bamboo Fiber and Steel Wire Mesh

CHEN Wei, YUAN Qing, MA Haohan, ZHU Zichong, QIN Guohui, and TIAN Zheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.21656/1000-0887.430302>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 尖锐V型切口混凝土梁的应力强度因子研究

Study on Stress Intensity Factors of Concrete Beams With Sharp V Notches

应用数学和力学. 2018, 39(3): 300–310 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.380159>

#### 波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板连续组合箱梁的剪力滞效应

Shear Lag Effects of Continuous Corrugated Steel Web-Steel Bottom-Concrete Top Composite Box Girders

应用数学和力学. 2020, 41(5): 517–529 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.400236>

#### 混凝土轴拉加卸载随机损伤模型的建立与试验验证

A Stochastic Tensile Damage Model for Loading/Unloading of Concrete and Experimental Validation

应用数学和力学. 2017, 38(6): 652–662 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.370254>

#### 吸湿老化影响下天然纤维增强复合圆柱壳屈曲分析的辛方法

A Symplectic Approach for Buckling Analysis of Natural Fiber Reinforced Composite Shells Under Hygrothermal Aging

应用数学和力学. 2021, 42(12): 1238–1247 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.420018>

#### 分数阶热弹理论下重力场对二维纤维增强介质的影响

Effects of the Gravity Field on 2D Fiber-Reinforced Media Under the Fractional Order Theory of Thermoelasticity

应用数学和力学. 2021, 42(5): 452–459 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.410125>

#### 基于曲梁弹性理论的弯曲覆岩变形及应力分析

Analysis on Deformation and Stress of Bending Stratum Based on the Elastic Theory for Curved Beams

应用数学和力学. 2020, 41(3): 302–318 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.400081>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

# 基于竹纤维和钢丝网增强的玄武岩筋混凝土梁 抗弯延性试验研究\*

陈伟, 袁青, 马浩瀚, 朱子充, 覃国辉, 田政

(四川农业大学 土木工程学院, 四川 都江堰 611830)

**摘要:** 为研究竹纤维和钢丝网对玄武岩纤维钢筋混凝土梁抗弯延性的影响, 该研究以竹纤维长度 (0 mm、30 mm、45 mm) 及钢丝网布置范围 (无、1/2 最大弯矩点间布置、全梁段布置) 为变量, 对 7 根基于竹纤维和钢丝网增强的玄武岩纤维钢筋混凝土梁进行了弯曲破坏试验, 对其初裂荷载、裂缝开展、极限荷载、变形情况等进行了检测, 通过试验数据分析了纤维长度和钢丝网布置范围对试件抗裂、抗变形性能的影响; 借助函数模型得到 7 根试验梁的等效屈服点, 计算出了试件的延性系数, 结果表明竹纤维和钢丝网的掺入使玄武岩纤维钢筋混凝土梁的开裂荷载提高了 12%~68%, 减小了裂缝分布间距及长度发展速度, 同等荷载下试验梁的变形减小, 延性系数增大了 1.58%~31.75%.

**关键词:** 钢丝网; 竹纤维; 玄武岩纤维筋; 混凝土梁; 延性

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.430302

## Experimental Study on the Flexural Ductility of BFRP Bar Concrete Beams With Bamboo Fiber and Steel Wire Mesh

CHEN Wei, YUAN Qing, MA Haohan, ZHU Zichong, QIN Guohui, TIAN Zheng  
(School of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan, Sichuan 611830, P.R.China)

**Abstract:** To study the effects of bamboo fiber and steel wire mesh on the flexural ductility of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bar concrete beams, 7 BFRP bar concrete beams with bamboo fiber and steel wire mesh were tested with different bamboo fiber lengths (0 mm, 30 mm and 45 mm) and different steel wire mesh layout ranges (0, 1/2 maximum bending moment point layout and full beam length layout). The flexural failure tests of the 7 beams were carried out, and the initial crack loads, the crack developments, the ultimate loads and the deformations were detected. The effects of the fiber length and the wire mesh layout range on the crack resistance and the deformation resistance of the specimens were analyzed based on the test data. With the function model, the equivalent yield points of the 7 test beams were obtained, and their ductility coefficients were calculated. The results show that, the addition of bamboo fiber and steel wire mesh increases the cracking loads of BFRP bar concrete beams by 12%~68%, decreases the crack spacings and the crack length development speed, reduces the test beam deformation under the same load, and increases the ductility coefficient by 1.58%~31.75%.

**Key words:** wire mesh; bamboo fiber; BFRP rebar; concrete beam; ductility

\* 收稿日期: 2022-10-04; 修订日期: 2022-10-28

作者简介: 陈伟(1986—), 女, 硕士生导师(通讯作者). E-mail: [chenwei@sicau.edu.cn](mailto:chenwei@sicau.edu.cn).

引用格式: 陈伟, 袁青, 马浩瀚, 朱子充, 覃国辉, 田政. 基于竹纤维和钢丝网增强的玄武岩筋混凝土梁抗弯延性试验研究[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(2): 209-219.

## 0 引言

玄武岩纤维增强复合材料(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)筋简称玄武岩纤维筋,是一种具有质量轻、耐腐蚀、抗拉强度高和抗疲劳性能好等优点的新型复合材料.用 BFRP 筋替代普通钢筋可以有效地解决钢筋在混凝土结构中易腐蚀和结构自重大的问题<sup>[1-3]</sup>,被广泛应用于桥梁、道路、码头等对抗震性能要求较高的混凝土结构中<sup>[4]</sup>.

诸多专家学者对 BFRP 筋混凝土梁的力学性能、破坏形态、黏结性能等进行了深入研究和分析. Shamass 等<sup>[5]</sup>研究发现 BFRP 筋混凝土梁的变形能力高于相同配筋率的钢筋混凝土梁;但国内外大量试验研究证明, BFRP 筋由于弹性模量低导致混凝土构件变形大、裂缝宽度增大,且其应力-应变关系为线性关系,不存在屈服阶段会导致脆性破坏,在一定程度上限制了其应用范围<sup>[1,5]</sup>.朱海堂等<sup>[6-8]</sup>研究发现将纤维掺入 BFRP 筋混凝土梁中可以提高延性、有效抑制裂缝的开裂及深层扩展、减小裂缝间距和宽度; Qeshta 等<sup>[9]</sup>研究得出钢丝网层的增加可显著提高混凝土梁的抗弯强度、开裂性能和能量吸收能力.结合以上研究结论可知,短切纤维与钢丝网复合的构件能起到显著的互补增强作用<sup>[10-13]</sup>.

我国“十四五”规划中明确指出,要深入推进工业、建筑等领域低碳转型,因此需加强对绿色建材的使用以降低建筑全生命周期耗能与碳排<sup>[14]</sup>.竹材是我国重要的可持续利用资源,具有生长周期短、韧性好、强度高、易降解、可循环利用等特质<sup>[14]</sup>. Kumarasamy 等<sup>[15-17]</sup>研究发现在混凝土中均匀掺入适量竹纤维,可以提升混凝土的抗拉性能,控制其早期裂缝的发展,在延性和韧性上均有明显提升.综合考虑结构性能及环保、成本等因素,本文选用竹纤维与钢丝网共同对 BFRP 筋混凝土梁进行增强,探索此类构件的抗弯延性性能.结构的延性是指在承载力不显著降低的情况下其结构变形的能力.建筑中对结构的延性要求较高,因延性较好的构件在破坏前具有很明显的征兆,破坏过程缓慢<sup>[18]</sup>,有利于抗震,可以更好地保证人民生命和财产安全.诸多学者利用数学模型对复合材料的理论和应用进行了研究<sup>[19-20]</sup>,因此本文欲借助函数模型研究分析试验梁的延性性能,为 BFRP 筋混凝土的工程应用推广提供一定的理论参考.

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

本次试验基体混凝土强度等级为 C40.水泥选用都江堰水泥厂生产的 P.O42.5R 硅酸盐水泥,粗骨料选用粒径分布从 5 mm 到 25 mm 之间的碎石,细骨料选用中砂,基体混凝土配合比如表 1 所示.纤维选用长细杆型竹纤维,相关参数如表 2 所示.钢丝网选用直径为 1 mm 的钢丝编制而成,网孔尺寸为 10 mm × 10 mm.构件纵向受力筋选用直径为 20 mm 的 BFRP 筋,相关力学性能如表 3 所示.箍筋和架立筋采用直径为 8 mm 的 HPB300 钢筋.

表 1 基体混凝土配合比

Table 1 Mix proportions of concrete

water	cement	crushed stone	medium sand
185 kg/m <sup>3</sup>	420 kg/m <sup>3</sup>	1 273 kg/m <sup>3</sup>	572 kg/m <sup>3</sup>

表 2 竹纤维性能参数

Table 2 Performance parameters of bamboo fiber

material	fiber diameter	fiber length	density
bamboo fiber	1.5 mm	30 mm, 45 mm	848.826 kg/m <sup>3</sup>

表 3 BFRP 筋力学性能

Table 3 Mechanical properties of BFRP bars

diameter	tensile strength	elastic modulus
20 mm	1 010.77 MPa	44 GPa

### 1.2 试验梁设计

本试验共设计 7 根试验梁,根据《混凝土结构设计规范》和试验室加载装置的情况,试验梁截面尺寸

$b \times h$ (截面宽度  $\times$  截面高度)均为  $200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 截面有效高度  $h_0=262 \text{ mm}$ , 跨度  $L=2\ 300 \text{ mm}$ , 计算跨度  $L_0=2\ 000 \text{ mm}$ , 根据文献 [17] 的研究结论, 本文竹纤维体积率选取为 1%。为达到试验受弯破坏的目的, 通过计算配筋在满足适筋梁的条件下, 剪跨段配足够的箍筋, 以确保试验过程中不发生由于抗剪承载力不足而导致试验梁斜截面破坏的情况。各试验梁参数如表 4 所示, 其中包括 1 根 BFRP 筋混凝土对比梁; 1 根加入体积率为 1%, 长度为 30 mm 的竹纤维 BFRP 筋混凝土梁; 2 根在集中力与其对应边支座的两个中点之间布置钢丝网, 且分别加入长度为 30 mm 和 45 mm, 体积率为 1% 的竹纤维 BFRP 筋混凝土梁; 3 根在全梁段长度范围内布置钢丝网, 且分别加入长度为 0 mm、30 mm 和 45 mm 的体积率为 1% 的竹纤维 BFRP 筋混凝土梁。所有试验梁均配置 2 根直径为 20 mm 的 BFRP 筋作为底部受力筋, 2 根直径为 8 mm 的 HPB400 带勒钢筋作为架力筋, 通长布置直径为 8 mm 的 HPB400 带勒箍筋, 间距为 100 mm, 截面配筋图如图 1 所示, 钢丝网布置情况如图 2 所示。

表 4 试验梁参数  
Table 4 Parameters of test beams

test beam	steel wire mesh layout	bamboo fiber length /mm
L-0-0	-	0
L-0-30	-	30
L-1/2-30	between the 1/2 maximum bending moment points	30
L-1/2-45	between the 1/2 maximum bending moment points	45
L-1-0	the whole beam section	0
L-1-30	the whole beam section	30
L-1-45	the whole beam section	45

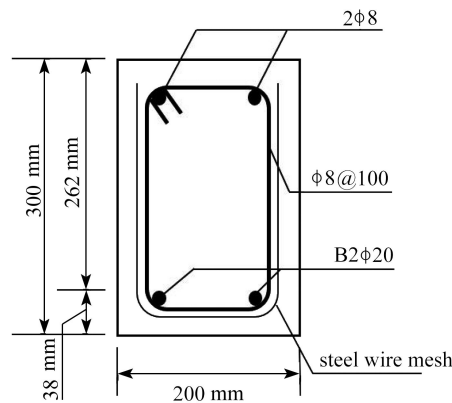


图 1 截面配筋图

Fig. 1 The sectional reinforcement configuration

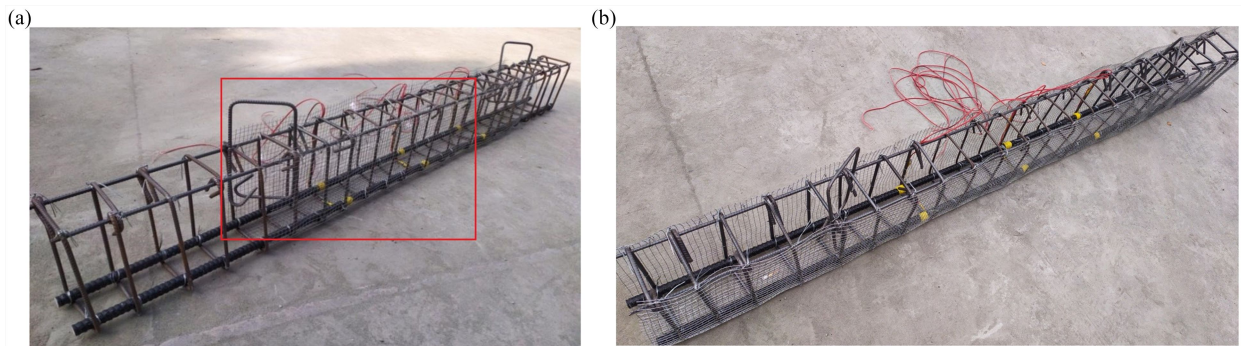


图 2 钢丝网布置情况: (a) 1/2 最大弯矩点间布置钢丝网; (b) 全梁段布置钢丝网

Fig. 2 The layout of the wire mesh: (a) the wire mesh is arranged between the points of 1/2 maximum bending moment; (b) the wire mesh arranged over the full beam length



### 1.3 试验装置及加载测试方案

本次试验采用 500 kN 单轴电液伺服加载装置, 加载底座的一端采用滑动铰支座, 另一端采用固定铰支座, 形成简支梁形式. 为防止受力点的局部应力集中而发生局部混凝土压碎, 在梁支座和加载点处放置了立方体垫块. 根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012) 对验证性试验的分级加载要求, 本试验前期采用分级加载, 出现裂缝前每级荷载 5 kN; 裂缝出现后每级荷载 10 kN, 每级加载完毕持荷 10 min; 待荷载达到试验方案预估极限荷载的 85% 时, 采用位移控制法加载, 直至破坏. 图 3 为试验梁加载装置. 位移计监测跨中、受力点和支座位移, 应变片 (S1 ~ S5) 测量梁截面不同高度的应变情况 (其中应变片 S4 和 S5 分别布置在梁跨中的上下表面), 钢筋应变片 S6 ~ S11 布置在底部两根 BFRP 筋的跨中及加载点对应位置, 应变片数据均通过 DH3818Y 应变测试仪采集.

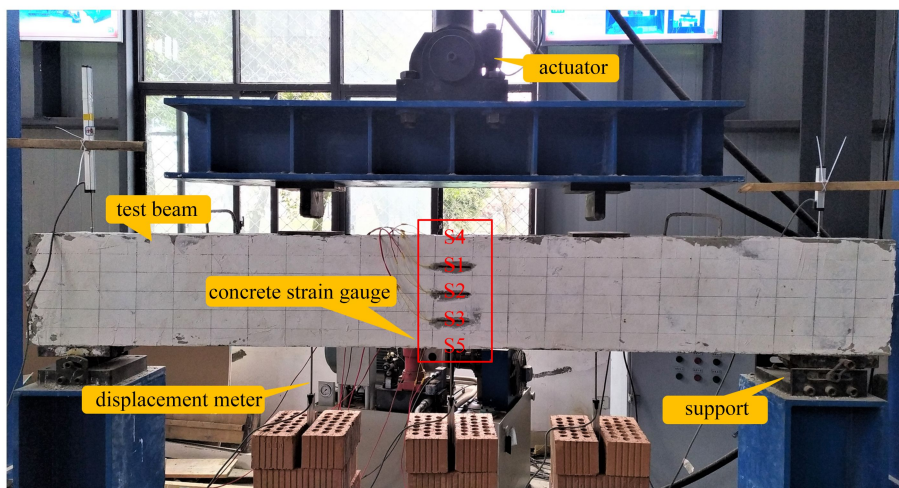


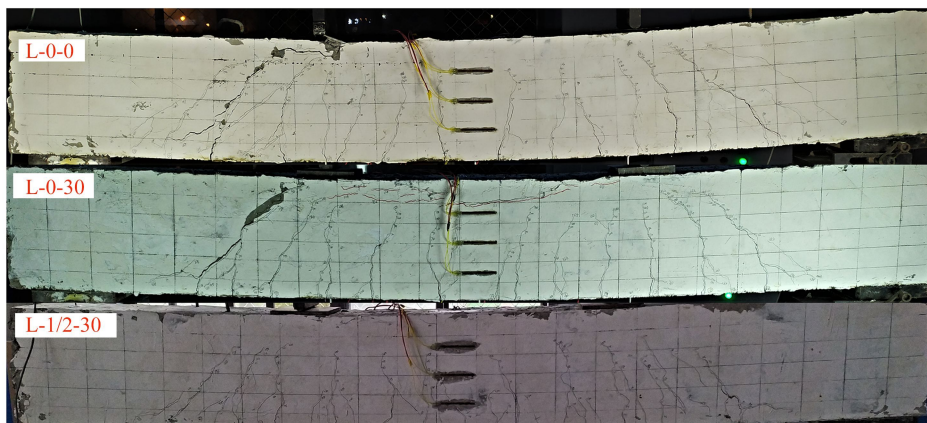
图 3 试验梁加载装置示意图

Fig. 3 The test set-up

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象及破坏过程

试验过程中, 7 根混凝土试验梁的破坏过程基本相同. 加载到  $0.08P_u \sim 0.12P_u$  (极限荷载), 在梁的纯弯段出现竖向裂缝, 高度在 20 ~ 72 mm 之间; 加载到  $0.12P_u \sim 0.16P_u$ , 梁的两侧出现竖向裂缝, 高度在 32 ~ 70 mm 间; 当加载到  $0.22P_u \sim 0.33P_u$ , 梁底部出现非常明显的贯通裂缝; 荷载继续增大, 多数裂缝会不断变宽并向上延伸, 同时穿透梁底部的贯通裂缝数量也迅速增加; 荷载增加到  $0.47P_u \sim 0.71P_u$  时, 纯弯曲段分布的裂缝几乎是均匀的, 并且贯通裂缝仍然不断出现; 当荷载达到  $0.83P_u \sim 0.91P_u$ , 裂缝不再继续向上发展; 当达到极限荷载  $P_u$ , 试件很难承受荷载, 混凝土被压碎, 试件破坏. 试验梁的破坏特征和裂缝分布形态如图 4 所示.



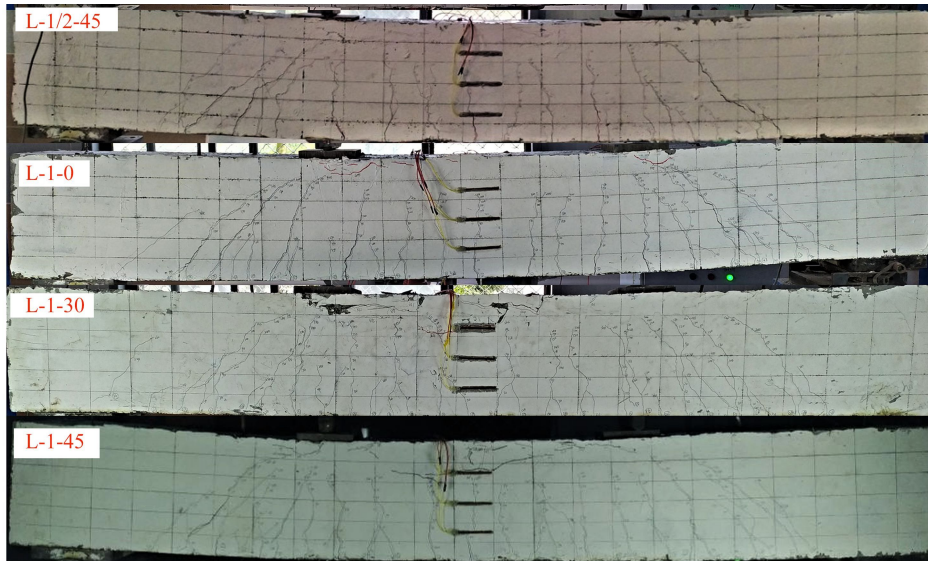


图 4 试验梁的破坏特征和裂缝分布形态

Fig. 4 Failure characteristics and fracture distribution patterns of the test beams

## 2.2 试验结果分析

试验中对初裂荷载、每级荷载下裂缝宽度及梁各点位移等做了详细记录, 其中初裂荷载  $P_{cr}$ 、极限荷载  $P_u$  及其对应挠度  $\Delta_u$  如表 5 所示。

表 5 主要试验结果  
Table 5 Main test results

test beam	$P_{cr}/kN$	$P_u/kN$	$\Delta_u/mm$
L-0-0	25	340	38
L-0-30	38	329	36
L-1/2-30	32	284	35
L-1/2-45	31	337	37
L-1-0	42	397	32
L-1-30	30	340	43
L-1-45	28	343	35

### 2.2.1 初裂荷载

如表 5 所示, 与普通 BFRP 筋混凝土梁相比, 竹纤维和钢丝网的掺入使 BFRP 筋混凝土梁的开裂荷载提高了 12%~68%, 这是因为竹纤维与钢丝网有着较好的抗拉性能, 一定程度上承担了试件中基体混凝土应当承担的拉应力。竹纤维长度一定的条件下, 当竹纤维长度为 30 mm、全梁段布置钢丝网时, 较只在 1/2 最大弯矩点间布置时, 开裂荷载降低了 6.25%, 说明在全梁段布置钢丝网一定程度上反而会降低 BFRP 筋梁的开裂荷载。分析其原因主要是梁在受弯开裂时, 在跨中纯弯段底部混凝土的受拉强度较高, 而在全梁段布置钢丝网后, 会将非纯弯段的部分拉应力分散到纯弯段来, 从而导致其开裂荷载反而降低。在竹纤维体积掺率一定的条件下, 试验梁 L-1/2-45 比 L-1/2-30 的开裂荷载降低了 3.13%, 梁 L-1-45 比 L-1-30 的开裂荷载降低了 6.67%。这是因为纤维过长不容易通过钢丝网, 造成保护层处纤维混凝土的纤维体积含量低于设计值, 使其抗拉强度降低, 从而降低了梁的开裂荷载。

### 2.2.2 裂缝发展

试验梁平均裂缝间距及最大裂缝宽度如图 5、6 所示, 综合分析图 4~6 可知, 7 根梁的裂缝开展过程都经历了裂缝形成阶段、裂缝稳定发展阶段及构件屈服至破坏阶段。梁 L-0-0 较其他 6 根梁来说, 其初裂荷载较低, 裂缝数量少但宽度较大, 向上延伸速度快, 证明钢丝网和竹纤维的添加提高了梁的变形能力。对比 L-0-30、L-1/2-30、L-1-30 和 L-1-0、L-1-30、L-1-45 两组梁, 发现钢丝网的布置在减小平均裂缝间距方面效果显著, 竹

纤维越长其最大裂缝宽度越小,考虑钢丝网的布置范围和掺入竹纤维长度的综合影响,梁 L-1-30 开裂荷载较高,裂缝数量最多,平均裂缝间距最小,向上延伸速度较慢,在临近破坏状态时,其控裂性能较其他梁好,裂缝宽度没有出现明显的突增,只有主裂缝不断扩大,其余裂缝变化很小,多数属于无害裂缝。

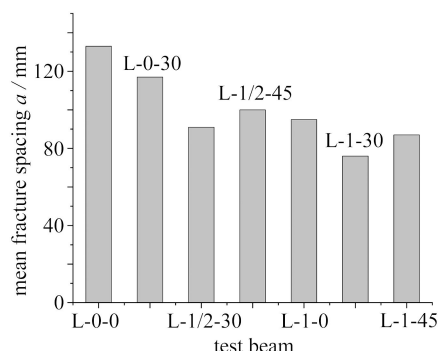


图5 平均裂缝间距

Fig. 5 Average fracture spacings

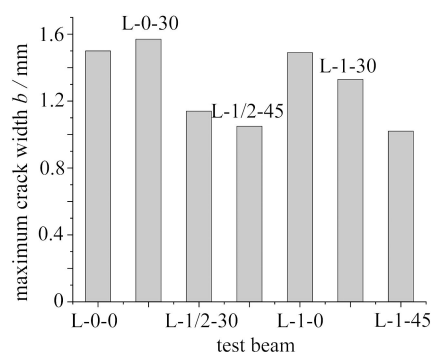


图6 最大裂缝宽度

Fig. 6 Maximum crack widths

### 2.2.3 荷载挠度曲线

通过比较所有试验梁的荷载-跨中挠度曲线(图7)可以看出,对比梁 L-0-0 的变形发展情况,基于竹纤维和钢丝网增强的 BFRP 筋梁的荷载-跨中挠度曲线与其保持一致。

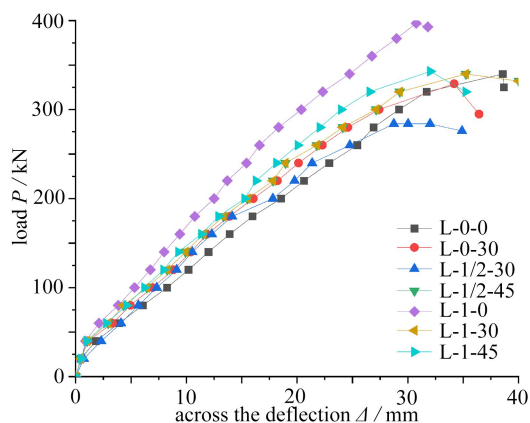


图7 各试验梁变形曲线对比图

Fig. 7 Comparison of deformation curves of various experimental beams

未开裂前,试件的变形曲线基本重合,各试验梁均处于弹性变形阶段,此时,竹纤维及钢丝网对梁的变形影响较小;开裂后,试验梁进入了弹塑性阶段,相同荷载下,掺有竹纤维和钢丝网的试验梁变形较小,说明竹纤维和钢丝网的掺入,能够有效提高 BFRP 筋混凝土梁的整体刚度,并在裂缝出现后真正发挥其作用,并且随着荷载的不断增大,变形的差距愈加明显,其中在只加钢丝网的情况下其挠度变形最小,说明这种增强方式对梁的整体刚度提升最为明显.这是因为竹纤维和钢丝网的掺入,能够有效阻止裂缝进一步蔓延,与混凝土共同承受拉应力, BFRP 筋混凝土梁在裂缝处的应力降低,从而使其产生的裂缝宽度得到缩减,更大程度上提高了梁的整体刚度,因此梁的挠度明显降低.同时也可以看出,竹纤维和钢丝网的加入并未改变梁结构本身的性质,竹纤维和钢丝网可以较好地与混凝土共同工作。

### 2.2.4 延性性能

钢筋混凝土梁通常用极限状态时和钢筋屈服时的曲率比来衡量其延性<sup>[21]</sup>; Qin 等<sup>[22]</sup>借鉴钢筋混凝土梁延性衡量的方法提出了用极限挠度与钢筋屈服时的挠度比来衡量混合配筋混凝土梁的延性:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}, \quad (1)$$

其中,  $\mu$  为延性系数;  $\Delta_u$  为梁的极限挠度;  $\Delta_y$  为钢筋屈服时的挠度。



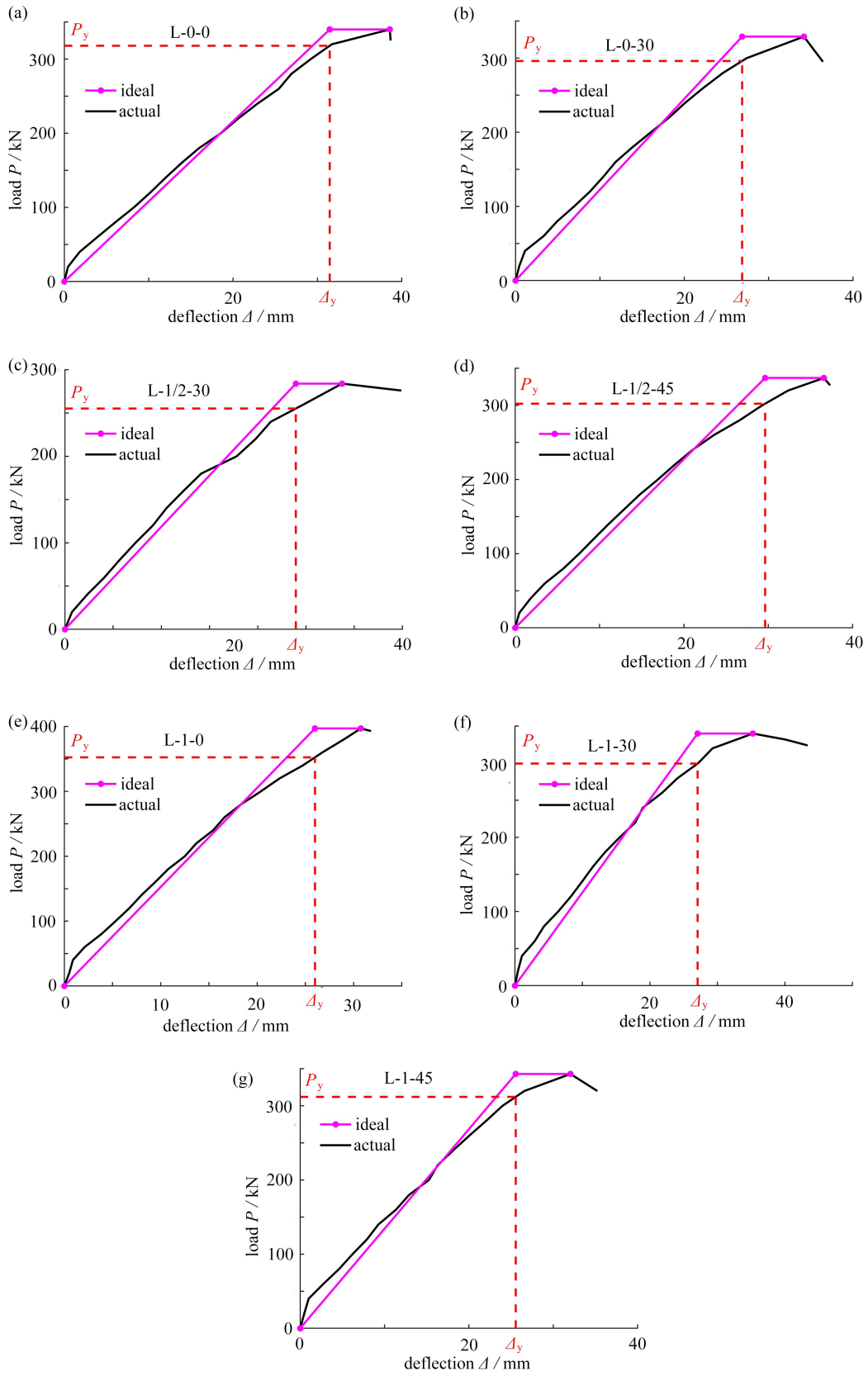


图 8 等效弹塑性能量法

Fig. 8 The equivalent elastic-plastic energy method

对于 BFRP 钢筋混凝土梁来说, 其荷载挠度曲线上没有明显的屈服点, 故屈服荷载和屈服位移不能直接获



得,大多数学者从能量的角度去衡量其延性.参考文献[23],通过MATLAB建立函数模型得到了7根试验梁的等效屈服点,从而找到了屈服荷载 $P_y$ 和屈服挠度 $\Delta_y$ ,利用等效弹塑性能量法计算得到的结果如图8所示(其中图例“ideal”代表理想弹塑性荷载-位移曲线,“actual”代表实际荷载-位移曲线),所得数据如表6所示.

表6 主要试验结果  
Table 6 Main test results

test beam	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$\mu$
L-0-0	318	38	31.47	1.21
L-0-30	298	36	27.06	1.33
L-1/2-30	256	35	24.13	1.45
L-1/2-45	301	37	29.37	1.26
L-1-0	353	32	26.09	1.23
L-1-30	299	43	27.03	1.59
L-1-45	313	35	25.71	1.36

从表6可以看出,掺入竹纤维与布置钢丝网的BFRP筋混凝土梁具有更好的延性,其延性指标提升了1.58%~31.75%.

如图9所示,对比L-0-0与L-0-30两根试验梁,发现掺入长度为30mm的竹纤维时,梁的延性指标提高了10.18%,得益于竹纤维优异的抗裂性和增韧性,改善了梁的韧性,进而提高了梁的延性;仅布置钢丝网的BFRP筋混凝土梁L-1-0比普通BFRP筋混凝土梁L-0-0延性指标只提高了1.58%,其原因是钢丝网具有良好的整体性和均匀分布性,使得梁在受力性能上具有更好的抵抗力,其包裹作用提升了梁的整体刚度,能够减小同等荷载下梁的挠度变形,但对其延性的提升不显著.

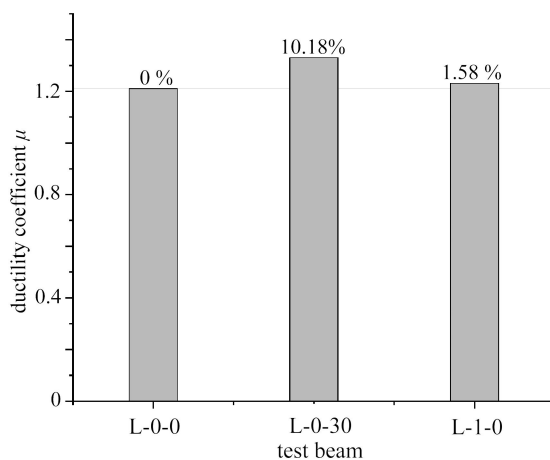


图9 单掺钢丝网与竹纤维对梁延性系数的影响

Fig. 9 The respective effects of the wire mesh and the bamboo fiber on the beam ductility coefficient

如图10所示,当全梁段布置钢丝网时,对比试验梁L-1-0、L-1-30与L-1-45可知,掺入竹纤维比未掺入竹纤维的延性系数提高了11%~29.7%,说明竹纤维和钢丝网共同作用时,竹纤维在混凝土内的分布形成网状整体结构,增加了与基体之间接触的连续性和黏结力,更有利于发挥竹纤维的增韧性,对混凝土梁韧性改变更显著,更好地提高了梁的抗震性能.

当钢丝网在1/2最大弯矩点间布置时,掺入竹纤维长度为45mm的梁相对掺入长度为30mm的梁延性指标降低了13.15%;当钢丝网在全梁段布置时,掺入竹纤维长度45mm的梁相比纤维长度30mm的梁延性指标降低了14.43%,故试验梁的钢丝网布置范围相同时,并不是掺入竹纤维长度越长就对提高延性越有利.其原因是在竹纤维体积率一致的情况下,长度越长,其对应纤维数量的减少会降低其纤维在协同变形过程中承

担的荷载. 当混凝土内部的裂缝较小时, 纤维与混凝土之间的黏结力和骨料之间的咬合力较好, 当裂缝较大时, 竹纤维增强作用就会削弱, 从而达不到提高延性的最佳效果. 由此可见竹纤维与钢丝网共同作用时, 其延性和韧性不会由长度的增加而一直保持提高的趋势, 在实际工程应用中, 应找到发挥其竹纤维韧性的最佳长度, 保证其混凝土梁的延性处于最佳状态, 充分发挥结构的抗震性能.

如图 11 所示, 当掺入长度为 30 mm 的竹纤维时, 布置钢丝网比无钢丝网的 BFRP 筋混凝土梁延性系数提高了 9.03%~19.58%, 其延性提升效果相对仅布置钢丝网更显著. 综合图 10、11 可知, 竹纤维与钢丝网共同作用时, 钢丝网的布置可以较大程度地提高梁的延性, 且全梁布置钢丝网的提升效果比在 1/2 最大弯矩点间布置更为显著, 其原因在于全梁布置钢丝网时, 梁具有更好的整体性和均匀性, 包裹作用更好, 当裂缝出现后, 其掺入的竹纤维和钢丝网共同承担拉应力, 把裂缝的宽度限制在较小的范围内, 同时延缓了梁的破坏突发性. 从表 6 可知, 梁 L-1-30 相较于梁 L-0-0, 延性指标提高了 31.75%, 因此在实际工程应用中, 对延性指标及抗震性能有较高要求的 BFRP 筋混凝土结构, 建议采用全梁布置钢丝网.

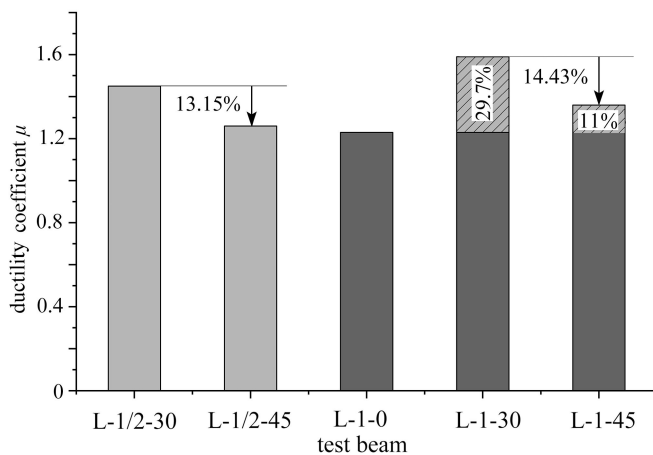


图 10 竹纤维长度对梁延性系数的影响

Fig. 10 The effect of the bamboo fiber length on the beam ductility coefficient

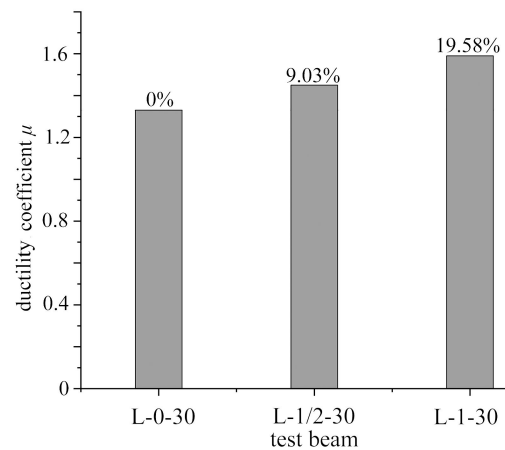


图 11 钢丝网布置范围对梁延性系数的影响

Fig. 11 The effect of the wire mesh layout range on the beam ductility coefficient

### 3 结 论

本文对基于竹纤维和钢丝网增强的 BFRP 筋混凝土梁进行了抗弯试验研究, 分析其抗裂和延性性能. 试验结果表明, 基于竹纤维和钢丝网复合的玄武岩钢筋混凝土梁中, 竹纤维和钢丝网能起到显著的互补增强作用, 可以弥补 BFRP 筋代替传统钢筋的不足, 有效提高混凝土构件的抗弯能力和抗裂性能, 延缓裂缝延伸和开展, 保证梁的整体刚度, 改善基体材料的脆性, 从而提高构件的整体延性和抗震性能.

综合试验数据及数值计算发现, 竹纤维长为 30 mm、全梁布置钢丝网的 BFRP 筋混凝土梁在不会显著降低极限荷载的情况下抗裂能力和延性性能提升效果最佳, 其延性指标较普通 BFRP 筋混凝土梁提升了 31.75%, 可为此类构件的工程应用提供一定理论数据参考.

#### 参考文献 (References):

- [1] 姜浩, 朱思宇. 玄武岩纤维筋的性能及应用研究综述[J]. 四川建材, 2017, 43(8): 1-2. (JIANG Hao, ZHU Siyu. Review on properties and application of basalt fiber reinforcement[J]. *Sichuan Building Materials*, 2017, 43(8): 1-2.(in Chinese))
- [2] 吴刚, 朱莹, 董志强, 等. 碱性环境中BFRP筋耐腐蚀性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 32-41. (WU Gang, ZHU Ying, DONG Zhiqiang, et al. Experimental study on corrosion resistance of BFRP bars in alkaline

- environment[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, **47**(8): 32-41.(in Chinese))
- [3] MONALDO E, NERILLI F, VAIRO G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering[J]. *Composite Structures*, 2019, **214**: 246-263.
- [4] 尹世平, 华云涛, 徐世焯. FRP配筋混凝土结构研究进展及其应用[J]. *建筑结构学报*, 2021, **42**(1): 134-150. (YIN Shiping, HUA Yuntao, XU Shilang. Research progress and application of FRP reinforced concrete structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, **42**(1): 134-150.(in Chinese))
- [5] SHAMASS R, CASHELL K A. Experimental investigation into the flexural behaviour of basalt FRP reinforced concrete members[J]. *Engineering Structures*, 2020, **220**: 110950.
- [6] 朱海堂, 程晟钊, 高丹盈, 等. 玄武岩纤维增强聚合物筋钢纤维高强混凝土梁受弯试验及裂缝宽度计算方法研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, **41**(6): 133-142. (ZHU Haitang, CHENG Shengzhao, GAO Danying, et al. Flexural test and crack width calculation method of basalt fiber reinforced polymer reinforced steel fiber high-strength concrete beam[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, **41**(6): 133-142.(in Chinese))
- [7] LI Z, ZHU H, ZHEN X, et al. Effects of steel fiber on the flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with BFRP rebars under repeated loading[J]. *Composite Structures*, 2021, **270**: 114072.
- [8] ABED F, ALHAFIZ A R. Effect of basalt fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars[J]. *Composite Structures*, 2019, **215**: 23-34.
- [9] QESHITA I M I, SHAFIGH P, JUMAAT M Z, et al. The use of wire mesh-epoxy composite for enhancing the flexural performance of concrete beams[J]. *Materials & Design*, 2014, **60**: 250-259.
- [10] 吴智深, 汪昕, 史健喆. 玄武岩纤维复合材料性能提升及其新型结构[J]. *工程力学*, 2020, **37**(5): 1-14. (WU Zhishen, WANG Xin, SHI Jianzhe. Improvement of properties and new structures of basalt fiber composites[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, **37**(5): 1-14.(in Chinese))
- [11] 李浪, 王清远, 董江峰. 纤维增强地聚物混凝土高温后抗折性能[J]. *应用数学和力学*, 2014, **35**(S1): 290-294. (LI Lang, WANG Qingyuan, DONG Jiangfeng. Flexure performance of fiber-reinforced geopolymer concrete after high temperature[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(S1): 290-294.(in Chinese))
- [12] 董志强, 吴刚. FRP筋增强混凝土结构耐久性性能研究进展[J]. *土木工程学报*, 2019, **52**(10): 1-19. (DONG Zhiqiang, WU Gang. Research progress on durability of FRP bars reinforced concrete structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, **52**(10): 1-19.(in Chinese))
- [13] 周杰, 赵婷婷, 陈青青, 等. 基于GoogLeNet的混凝土微观模型应力-应变曲线预测[J]. *应用数学和力学*, 2022, **43**(3): 290-299. (ZHOU Jie, ZHAO Tingting, CHEN Qingqing, et al. Prediction of concrete meso-model stress-strain curves based on GoogLeNet[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(3): 290-299.(in Chinese))
- [14] 吕瑶, 杨尚杰, 肖毅强. 竹材人造板在建筑应用中的绿色价值潜力研究[J]. *建筑科学*, 2021, **37**(8): 199-210. (LÜ Yao, YANG Shangjie, XIAO Yiqiang. Research on the green value potential of bamboo wood-based panels in building applications[J]. *Building Science*, 2021, **37**(8): 199-210.(in Chinese))
- [15] KUMARASAMY K, SHYAMALA G, GEBREYOWHANSE H. Strength properties of bamboo fiber reinforced concrete[J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, **981**: 032063.
- [16] CHIN S C, MOH J, DOH S I, et al. Strengthening of reinforced concrete beams using bamboo fiber[J]. *Key Engineering Materials*, 2019, **821**: 465-471.
- [17] 张昌. 竹纤维混凝土力学性能试验研究与耐久性分析[D]. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2014. (ZHANG Chang. Experimental study on mechanical properties and durability analysis of bamboo fiber concrete[D]. Master Thesis. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese))
- [18] 陈升平, 马小霞, 卢应发, 等. FRP筋钢纤维混凝土梁延性性能研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2019, **5**: 59-63. (CHEN Shengping, MA Xiaoxia, LU Yingfa, et al. Study on ductility performance of steel fiber reinforced concrete beams with FRP bars[J]. *Concrete and Cement Products*, 2019, **5**: 59-63.(in Chinese))

- [19] 周道成, 常利晨. CFRP修复缺陷钢板应力解析模型[J]. 应用数学和力学, 2021, **42**(12): 1276-1286. (ZHOU Daocheng, CHANG Lichen. Stress analytical model of steel plate repaired with CFRP[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, **42**(12): 1276-1286.(in Chinese))
- [20] 刘鑫, 吴倩倩, 于国财, 等. 碳纤维/树脂基复合材料曲壁蜂窝夹芯结构的三点弯曲性能[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(5): 490-498. (LIU Xin, WU Qianqian, YU Guocai, et al. Three-point bending performance of carbon fiber/resin matrix composite with curved wall honeycomb sandwich structure[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(5): 490-498.(in Chinese))
- [21] 孔祥清, 于洋, 邢丽丽, 等. BFRP筋与钢筋混合配筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018, **8**: 48-54. (KONG Xiangqing, YU Yang, XING Lili, et al. Experimental study on flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars and steel bars[J]. *Glass Reinforced Plastic/Composites*, 2018, **8**: 48-54.(in Chinese))
- [22] QIN R, ZHOU A, LAU D. Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, **108**: 200-209.
- [23] 赵李俊. ECC-钢筋混凝土组合结构桥墩抗震性能研究[D]. 硕士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2020. (ZHAO Lijun. Study on seismic behavior of bridge pier of ECC reinforced concrete composite structure[D]. Master Thesis. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese))