

玄武岩纤维格栅增韧超高性能混凝土 加固系统性能

宫亚峰¹, 杨泓雨¹, 王 帅¹, 宋加祥¹, 王 东², 贾明琨³

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 2. 吉林省交通科学研究所, 长春 130012; 3. 长春理工大学 学生工作处, 长春 130021)

摘 要:通过开展轴向拉伸试验和单剪试验,探究了玄武岩纤维格栅增韧超高性能混凝土(BFGRU)加固系统抗断裂性能及其与既有混凝土界面的黏结性能。试验结果表明:玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)格栅作为增强材料嵌入到超高性能混凝土(UHPC)中可以提升其抗断裂性能,极限拉伸荷载最大可提升102%。BFGRU加固系统与既有混凝土界面的黏结性能表现良好。采用正交试验设计与灰色关联度分析法,提出了BFGRU加固系统最佳黏结加固方案,即在UHPC材料中嵌入网孔尺寸25 mm的BFRP格栅,并将其布满加固区域。研究结果可为BFGRU加固系统在桥梁加固工程中的应用奠定基础。

关键词:桥梁工程;玄武岩纤维格栅;超高性能混凝土;抗断裂性能;黏结性能;灰色关联度分析法

中图分类号:TU528 文献标志码:A 文章编号:1671-5497(2026)06-1618-11

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241335

Basalt fiber reinforced polymer grids reinforcing ultra-high performance concrete reinforcement system

GONG Ya-feng¹, YANG Hong-yu¹, WANG Shuai¹, SONG Jia-xiang¹, WANG Dong², JIA Ming-kun³

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Jilin Provincial Transport Scientific Research Institute, Changchun 130012, China; 3. Student Affairs Office, Changchun Institute of Technology, Changchun 130021, China)

Abstract: Axial tensile tests and simple-shear tests were conducted to investigate the anti-fracture property of the Basalt Fiber Reinforced Polymer Grids Reinforcing Ultra-High Performance Concrete (BFGRU) reinforcement system and its interface bonding performance with existing concrete. The experimental results demonstrate that the BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer) grids embedded in UHPC as a reinforcing material can enhance the anti-fracture property of UHPC, with an ultimate tensile load increase

收稿日期:2024-12-21.

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600604, 2021YFB2600600);吉林省科技发展计划项目(20230402048GH);吉林省交通运输创新发展支撑项目(2024-1-10);龙建路桥股份有限公司科技项目(230000100004258240009).

作者简介:宫亚峰(1977-),男,教授,博士.研究方向:超高性能混凝土性能解析与应用推广.

E-mail:gongyf@jlu.edu.cn

通信作者:宋加祥(1994-),男,讲师,博士.研究方向:超高性能混凝土应用关键技术.E-mail:jxsong@jlu.edu.cn

of up to 102%. The bonding performance between the BFGRU reinforcement system and the existing concrete interface is satisfactory. The optimal bonding reinforcement scheme of the BFGRU reinforcement system was proposed through an orthogonal experimental design and the Grey Relational Analysis. This scheme involves embedding BFRP grids with a grid size of 25 mm in UHPC material and covering the whole area to be reinforced. The results can serve as a foundation for the application of the BFGRU reinforcement system in bridge-reinforcing engineering.

Key words: bridge engineering; basalt fiber reinforced polymer (BFRP) grids; ultra-high performance concrete (UHPC); anti-fracture property; bonding performance; gray relational analysis (GRA)

0 引言

随着桥梁结构服役年限的增加及车辆载重的增大,桥梁结构会不可避免地出现开裂、钢筋锈蚀、稳定性下降等病害,严重威胁着桥梁结构的稳定性和安全性^[1]。传统的桥梁加固技术(如增大截面、粘贴钢板等方法)因施工工艺复杂、施工难度大、加固效果不理想等原因而逐渐被取代^[2,3]。利用新型材料进行桥梁加固已成为桥梁工程领域的重要研究方向。

超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC)作为一种新型的超高性能水泥基复合材料,在制备过程中掺入多种多级分布的细骨料,可取代普通混凝土中的大粒径粗骨料。现有研究表明^[4,5],UHPC具有优异的力学性能和耐久性能,已广泛应用于桥梁结构加固中。蔡雄庭等^[6]进行了UHPC加固RC梁的受弯试验,结果表明加固梁钢筋屈服进度延缓,裂缝宽度扩展缓慢,提升了桥梁的抗弯承载力。Zhou等^[7]研究了UHPC加固RC梁的抗扭转性能,结果表明使用UHPC加固后,梁的开裂和扭转承载力相较于RC梁均取得了巨大提升,说明UHPC可以作为桥梁加固材料,以提升桥梁结构的承载能力。

为了提升UHPC在桥梁结构中的加固效果,有必要掺杂或嵌入抗断裂性能更强的材料,与UHPC协同加固桥梁结构。纤维增强聚合物(Fiber reinforced polymer, FRP)材料以优异的抗拉性能,广泛应用于桥梁加固中。目前,一般采用环氧树脂(Epoxy resin, ER)等有机材料黏结FRP的方法进行加固。然而,采用ER粘贴FRP的方法,存在易老化、渗透性和耐久性较低的不足^[8-10]。在FRP加固应用中,利用具有耐老化、高抗渗性和优异耐久性的无机胶凝材料(Inorganic cementitious material, ICM)作为黏结材料,可以有效解决

这些问题。为了验证ICM的有效性,Guo等^[11]分析了聚合物水泥砂浆(Polymer cement mortar, PCM)粘贴碳纤维复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)加固混凝土结构的拉伸性能,结果表明同时在垂直和水平方向加固格栅,可有效提升混凝土结构的抗拉性能。Mizan等^[10]通过四点弯曲试验研究了PCM粘贴CFRP材料加固RC梁的抗弯性能,结果表明CFRP网格对提升RC梁的抗弯性能具有较大作用。Ke等^[12]提出了一种使用FRP和预制UHPC砌块的RC柱加固方法,通过压缩试验证明该FRP-UHPC加固方法在改善RC柱的抗压行为方面具有显著效果。上述研究表明,使用ICM可实现桥梁结构的有效加固。

玄武岩纤维(Basalt fiber, BF)作为一种新型无机环保绿色高性能纤维材料,掺入混凝土中能有效增强其力学性能^[13,14]。玄武岩纤维增强聚合物(Basalt fiber reinforced polymer, BFRP)是一种环保、高性能、高性价比材料^[15],在混凝土结构加固领域具有广阔的应用前景。姜浩等^[16]研究了BFRP格栅-水泥基复合材料加固钢筋混凝土梁抗剪性能,结果表明采用该方法加固后,梁的抗剪承载力提升了24%~33%,可有效抑制斜裂缝的发展。He等^[17]研究了侧面黏结BFRP格栅加固的钢筋混凝土梁的抗剪性能,结果表明,BFRP格栅与混凝土基体之间具有良好的黏结性能,已成为加固钢筋混凝土构件的优异材料。因此,采用BFRP格栅加固混凝土桥梁,有望提升桥梁的承载力水平服役寿命。

鉴于此,本文旨在探究玄武岩纤维格栅增韧超高性能混凝土(Basalt fiber reinforced polymer grids reinforcing ultra-high performance concrete, BFGRU)加固系统的拉伸性能、抗断裂性能及其与既有混凝土的界面黏结性能。通过正交试验、

轴向拉伸试验及单剪试验解析了加固系统的开裂失效模式和力学响应;利用灰色关联度分析法,提出BFGRU加固系统最佳黏结加固方案。本文为BFGRU加固系统在桥梁加固工程中的应用提供了试验基础。

1 材料及方法

1.1 试验材料

水泥使用吉林亚泰水泥有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥。UHPC细集料使用郑州瀚海环保科技有限公司生产的石英砂和石英粉,其中石英砂选用80~120目、40~80目、20~40目3种粒径,并按照1:2:2的比例将其混合之后进行筛分,将得到的0.3~0.6 mm、0.15~0.3 mm的石英砂按照质量比1.6:1进行混合。硅灰使用河南铂润铸造材料有限公司生产的SF96型硅灰。C40混凝土细集料使用0.1~4.75 mm、细度模数为2.8的天然河砂。C40混凝土粗骨料使用5~20 mm连续级配玄武岩碎石,经过筛分,将得到的4.75~9.5 mm、9.5~13.2 mm、13.5~16 mm、 ≥ 16 mm的集料按照质量比1.6:1:1:0.4进行混合。减水剂选用湖南中研建材科技有限公司生产的ZYTPC(HPWR)型聚羧酸减水剂,减水率为25%。玄武岩纤维选用吉林通鑫玄武岩科技有限公司生产的短切玄武岩纤维,试验用水为自来水。

根据前期研究^[18-20],进行UHPC配合比设计,水泥、石英砂、石英粉、硅灰、水、减水剂、玄武岩纤维用量分别为841.8、947.0、311.4、210.4、151.4、69.1、8 kg/m³。C40混凝土配合比根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[21]设计,如下所示:水泥、细集料、粗骨料、水、减水剂用量分别为474.4、570.6、1 158.5、185、4.8 kg/m³。UHPC和C40混凝土28 d立方体平均抗压强度分别为112.1、45.6 MPa。

BFPR格栅选自山东修和公司生产的PF40型玄武岩土工格栅,具体性能测试结果如表1所示,符合《公路工程玄武岩纤维及其制品第3部分:玄武岩纤维土工格栅》(JT/T 776.3—2010)^[22]的要求。

PCM选自青岛卓能达建筑科技有限公司生产的聚合物水泥砂浆,由聚乙烯等聚合物、水泥、砂、外加剂等预制,水与PCM按照10:17的质量

表1 玄武岩纤维格栅性能测试结果

Table 1 Test results of BFRP grids

检测项目	检测结果	技术要求
经向断裂强力/(kN·m ⁻¹)	42	≥ 40
纬向断裂强力/(kN·m ⁻¹)	43	≥ 40
经向断裂伸长率/%	3.5	≤ 4.0
纬向断裂伸长率/%	3.7	≤ 4.0

比进行混合。28 d立方体平均抗压强度为58.8 MPa。ER选用湖南把兄弟新材料股份有限公司生产的德益新一代环氧树脂胶及环氧固化剂,环氧树脂胶和环氧固化剂按照1:1的质量比进行混合。

1.2 试验设计及试件制备

为探究BFGRU加固系统内部的拉伸性能、抗断裂性能以及BFGRU加固系统与既有混凝土的界面黏结性能,本文设计了BFGRU复合层轴向拉伸及BFGRU加固系统与既有混凝土界面单剪试验。

1.2.1 BFGRU复合层轴向拉伸试验

BFGRU复合层轴向拉伸(轴向拉伸)试验旨在研究BFGRU加固系统在轴向拉伸荷载作用下的力学响应及破坏模式等。该试验通过施加荷载,分析BFGRU加固系统在受力过程中的变形行为、破坏机理及其断裂特性,从而为加固方案的优化和实际应用提供可靠的力学性能参考指标。

轴向拉伸试验试件尺寸为100 mm×400 mm×30 mm。试验共计3组,每组3个试件,具体如下表2所示。

表2 轴向拉伸试件分组

Table 2 Groups of axial tensile specimens

组号	试件组	试件名称	BFRP格栅类型
1	普通UHPC	UHPC	不嵌入BFRP格栅
2	BFGRU	UHPC-25	BFRP格栅网孔尺寸为25 mm
3	BFGRU	UHPC-50	BFRP格栅网孔尺寸为50 mm

轴向拉伸试件制备流程如图1所示。试件模具采用钢模板。在钢模板的两侧沿着应变片导线伸出方向打孔,以便应变片导线顺利伸出,同时确保BFRP格栅在试件浇筑时处于试件的中部。BFGRU试件浇筑时,先在模板内浇筑一层厚度为15 mm的UHPC,之后将格栅轻轻压入UHPC中,使UHPC从格栅的孔中轻微冒出。在格栅位置固定后,继续浇筑UHPC至浇筑完成。用刮刀将多余UHPC除去。待试件脱模后,将试件放置标准养生室养护28 d。

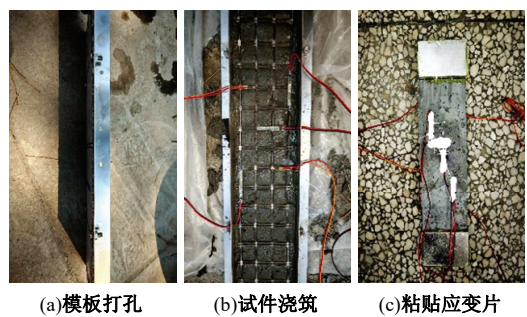


图 1 轴向拉伸试件制作流程

Fig. 1 Preparation of axial tensile specimens

为了对比在外加荷载作用下,试件表面和格栅表面应变变化情况,在制作轴向拉伸试件前,在BFRP 格栅表面粘贴 3 片应变片。在试件养护完成后,在试件表面相应位置粘贴 3 片相同的应变片。为了与试件表面中心处的应变变化情况进行对比,在试件表面中心处粘贴 1 片规格相同的应变片,如图 2 所示。在拉伸试件两端各粘贴两块 100 mm×60 mm×2 mm 的铝板,防止试件在加载时被夹头破坏。

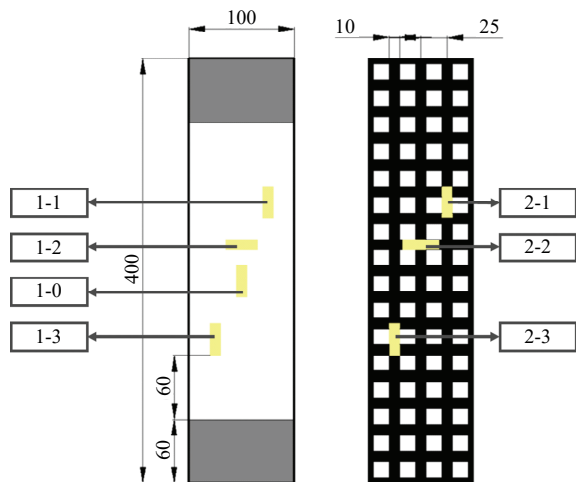


图 2 轴向拉伸试件应变片粘贴方案

Fig. 2 Strain gauge paste scheme of axial tensile specimens

1.2.2 BFGRU 加固系统与既有混凝土界面单剪试验

BFGRU 加固系统与既有混凝土界面单剪(单剪)旨在考察BFGRU加固系统与既有混凝土界面之间的黏结性能,界面黏结性能直接决定加固系统与原结构之间的协同工作能力。通过单剪加载,分析界面失效模式、力学响应及应变传递,结合数学分析方法探究不同BFGRU加固系统的黏结效应。

单剪试验的既有混凝土为 18 个尺寸为

150 mm×150 mm×300 mm 的 C40 混凝土试件,C40 混凝土试件使用塑料模板进行浇筑,待试件脱模后,将试件放置在标准养生室养护 28 d,养护完毕后取出晾干。采用 PCM、UHPC、ER 作为粘贴材料进行单剪试验。粘贴宽度根据文献[23]确定,分别为既有混凝土试件宽度的 1/3、2/3 及试件全宽度。通过正交试验法设计试验,共计 6 组,每组 3 个试件,具体如表 3 所示。

表 3 单剪试件分组

Table 3 Groups of single-shear specimens mm			
组号	黏结材料种类	黏结区域宽度	BFRP 格栅网孔尺寸
1	PCM	50	25
2	PCM	100	50
3	UHPC	50	50
4	UHPC	150	25
5	ER	100	25
6	ER	150	50

为了探究在外加荷载作用下不同加固系统中BFRP 格栅的受力情况,在制作单剪试件前,BFRP 格栅表面拉伸区域每隔 25 mm 粘贴一片应变片,如图 3 所示。

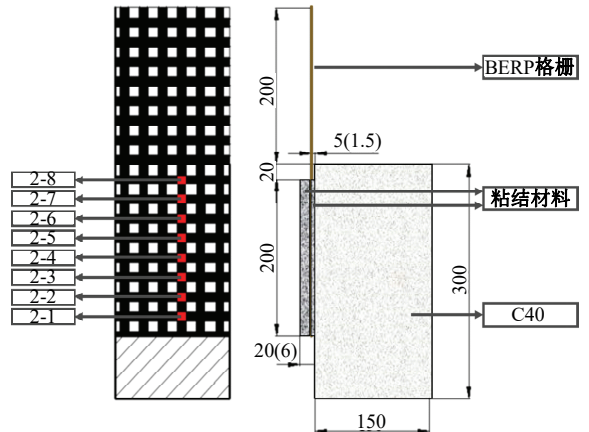


图 3 单剪试件应变片粘贴方案

Fig. 3 Strain gauge paste scheme of single-shear specimens

随后,分别以 PCM、UHPC、ER 三种黏结材料,将网孔尺寸分别为 25、50 mm 的两种 BFRP 格栅黏结到 C40 混凝土试件表面。使用 PCM、UHPC 作为黏结材料的试件,黏结区域厚度为 20 mm。在粘贴过程中,先涂抹 5 mm 粘贴材料,将 BFRP 格栅轻轻压入,再涂抹余下的黏结材料。使用 ER 作为黏结材料的试件,黏结区域厚度为 6 mm。在粘贴时,先涂抹 1.5 mm 黏结材料,将 BFRP 格栅轻轻压入,再涂抹余下的粘贴材料。单剪试件黏结区域长度设置为 200 mm,为减小端

部效应,试件制作时在混凝土边缘保留 20 mm 的非黏结区。

单剪试件制作完成后,将试件放置在标准养生室养护。使用 PCM、UHPC 作为黏结材料的试件养护 28 d,使用 ER 作为黏结材料的试件养护 7 d。

1.3 试验方法

轴向拉伸试验用于探究 BFGRU 加固系统的抗断裂性能。采用长春新试验机有限公司生产的 WAW-300B 型微机控制电液伺服万能试验机作为加载装置,试验过程采用负荷控制加载,加载速率为 0.2 kN/s。通过万能试验机内置传感器记录试验过程中的实时荷载,同时使用东华软件股份有限公司生产的 DH3818Y 应变采集箱记录试验过程的应变数据,并布置一组位移计,测量试件加载过程中的长度变化,加载布置方案如图 4 所示。

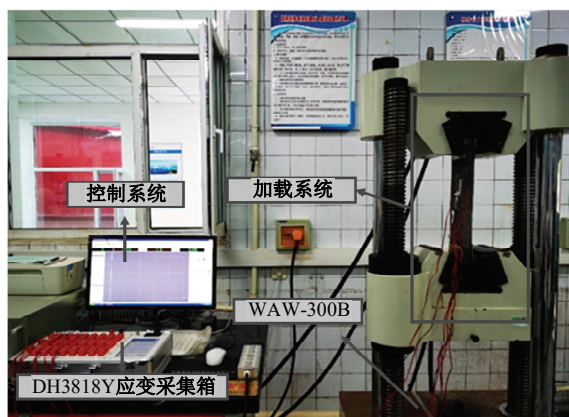
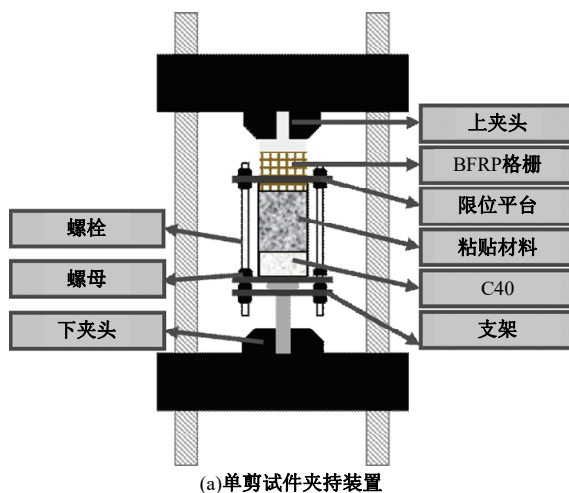


图 4 轴向拉伸试验加载方案

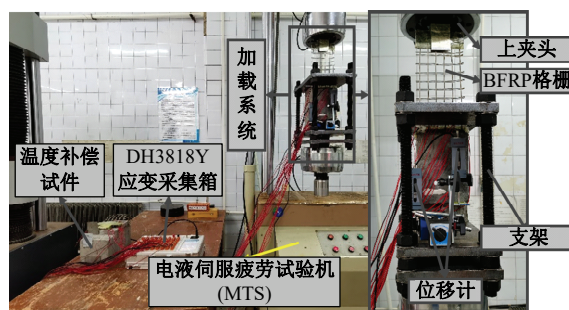
Fig. 4 Loading scheme of axial tensile test

单剪试验用于探究各加固系统与既有混凝土的黏结性能。采用电液伺服疲劳试验机(MTS)作为加载装置,试验过程采用位移控制加载,加载速率为 0.5 mm/min。通过万能试验机内置传感器记录试验过程中的实时荷载,同时使用 DH3818Y 应变采集箱记录试验过程中应变的变化情况。

为了将单剪试件固定在 MTS 底座上,本文设计了一个试件夹持装置,如图 5(a)所示。加载前将试件放置上述装置中,并使用一组位移计来测量加载过程中加固系统与试件的相对滑移,布置方案如图 5(b)所示。在试验加载前,MTS 的下夹头夹紧并固定 50 mm 直径的高抗拉强度螺栓,已粘贴锚固钢板 BFRP 格栅通过上夹头预先夹板夹紧。



(a)单剪试件夹持装置



(b)单剪试验布置方案

图 5 单剪试验加载方案

Fig. 5 Loading scheme of single-shear test

2 结果和讨论

2.1 加固系统抗断裂性能分析

2.1.1 开裂过程和失效模式

在加载过程中,观察到两种试件(普通 UHPC 试件和 BFGRU 试件)的开裂过程和失效模式存在显著差异,但均可分为 3 个阶段:第 1 阶段(初始阶段):试件初始裂缝出现前阶段;第 2 阶段(裂缝扩展阶段):试件出现初始裂缝至试件断裂前阶段;第 3 阶段(失效阶段):试件断裂及之后阶段。

对于 UHPC 试件,在初始阶段,随着外部荷载的增加,试件表面逐渐开始出现裂缝。裂缝出现后,试件进入第 2 阶段。在裂缝扩展阶段,随着荷载的持续增大,初始裂缝继续扩展并且裂缝数量增多,在试件初始开裂位置周围形成一个密集的微裂缝网络。在裂缝充分发育扩展后,试件进入第 3 阶段。在失效阶段,UHPC 表面的裂缝随着荷载的不断扩展并向试件内部延伸,最终达到 UHPC 极限抗拉强度,试件断裂。普通 UHPC 试件失效模式为脆性破坏。

对于 BFGRU 试件,其开裂过程前两个阶段

与普通UHPC试件一致,但其第3阶段表现出不同的特征。在失效阶段,UHPC开裂之后,内部的BFRP格栅裸露,位于最大裂缝宽度处的BFRP格栅逐渐被拔出。在随后的拉伸过程中,只有BFRP格栅发挥作用。随着荷载的继续增大,BFRP格栅最终发生断裂。BFGRU轴向拉伸试件的失效模式表现出一定的塑性破坏。

通过开裂过程和失效模式对比分析,发现未嵌入BFRP格栅的普通UHPC试件失效阶段较为单一,全过程仅由UHPC承受荷载。嵌入BFRP格栅的BFGRU试件在拉伸破坏时失效阶段更为复杂。在UHPC开裂后,试件中嵌入的BFRP格栅仍能承受荷载,表明在UHPC中嵌入BFRP格栅能够在一定程度上约束裂缝向内部扩展延伸,增强其抗断裂强度。

2.1.2 断裂过程力学响应

根据试验过程中万能试验机的实时荷载及应变采集箱应变数据,绘制出轴向拉伸试验过程中各试件组极限荷载中位试件的应力-应变关系曲线,如图6所示。

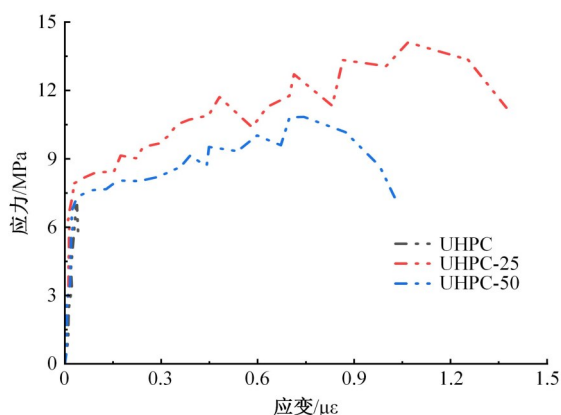


图6 轴向拉伸试件应力-应变关系

Fig. 6 Stress-strain relationship of axial tensile specimens

在初始阶段,应力-应变呈线性增长趋势,符合胡克定律,即此阶段应力与应变基本成正比,与开裂过程中观察到的现象对应。同时,3条曲线斜率基本一致,说明在该阶段主要由UHPC承受荷载。

3组试件的开裂应力、开裂应变不同,UHPC-25组试件开裂应力、开裂应变最高,UHPC-50组次之,普通UHPC试件(即UHPC组)最低。这说明在初始阶段,BFRP格栅已经开始发挥加筋作用,提升了试件整体的抗断裂性能,并且嵌入25 mm的BFRP格栅对于试件的抗断裂

性能提升作用更大。在裂缝扩展阶段,3条曲线斜率仍基本一致,说明在该阶段仍主要由UHPC承受荷载。3组试件的断裂应力、断裂应变也与第1阶段保持相同规律。这说明在裂缝扩展阶段,BFRP格栅的加筋作用约束了裂缝向内部的扩展延伸,增强了试件的韧性。

在失效阶段,普通UHPC试件的应力-应变曲线由于UHPC发生断裂而出现了明显下降。BFGRU试件的应力-应变曲线保持上升状态。这说明在失效阶段,BFGRU试件的UHPC断裂后,其内部的BFRP格栅承受外荷载,并最终断裂破坏。同时,也说明BFGRU试件中的BFRP格栅在试验加载的全过程中一直都在发挥加筋作用,改善了试件的脆性,抑制裂缝向内部扩展延伸,提升了试件的抗断裂性能。此外,UHPC-25组试件断裂应力、断裂应变更高,说明网孔尺寸为25 mm的BFRP格栅对于UHPC的增韧效果更强,能够抵抗更大的变形。这是由于,网孔尺寸为25 mm的BFRP格栅其轴向抗拉筋更多,韧性更强,能够更好地抵抗变形作用。

根据试验过程中万能试验机的实时荷载及应变采集箱应变数据,绘制轴向拉伸试验过程中BFGRU试件组中极限荷载中位试件的荷载-应变关系曲线,如图7所示(彩图参见电子版,下同)。

根据1.2.1节可知,1-1与2-1、1-2与2-2、1-3与2-3分别为粘贴在UHPC表面和BFRP格栅表面的同一位置处的应变片。根据图7可知,1-1与2-1、1-2与2-2、1-3与2-3的应变变化趋势一致,由此可以说明UHPC与内部的BFRP格栅在加载过程中协同受拉,即UHPC与BFRP格栅二者具有良好黏结性能。试件表面应变与BFRP格栅表面应变数据基本一致,说明在BFGRU轴向拉伸试件破坏的第1阶段与第2阶段,UHPC和BFRP格栅均发挥了抗拉作用,且二者发挥作用相当,变形基本一致。当UHPC破坏后,试件表面应变明显下降,而BFRP格栅表面应变呈上升趋势,说明在试件拉伸破坏的第3阶段,UHPC断裂后,BFRP格栅仍可承受一定荷载。这一现象与由应力-应变曲线获得的结论相互印证。同时,可以发现1-2、2-2应变片的数值始终为负值,这是由于,随着试件受拉,其轴向产生了塑性变形,使试件的截面尺寸产生一定的收缩,截面宽度减小。1-2、2-2应变片位于试件的受压区,在加载

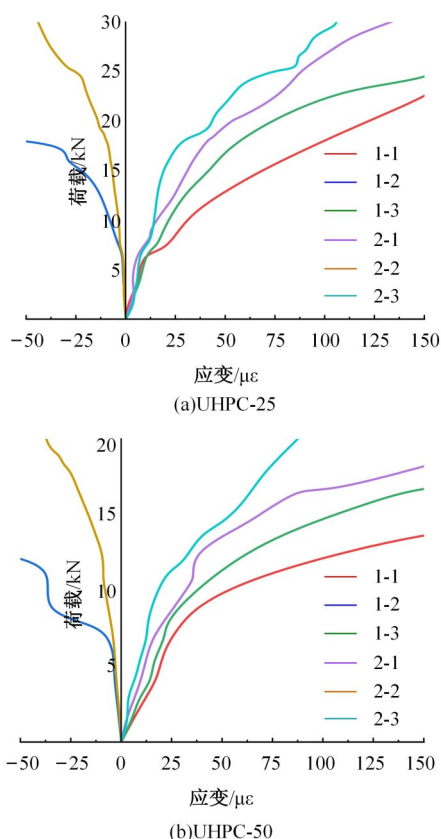


图 7 轴向拉伸试件极限荷载中位试件荷载-应变关系
Fig. 7 Strain-load relationship of axial tensile ultimate load median specimen

过程中产生负应变。

根据试验过程中万能试验机的实时荷载,可以获得轴向拉伸试件的极限荷载,如图 8 所示。由图 8 可知,与未嵌入 BFRP 格栅的 UHPC 试件相比,试验组 UHPC-25 和 UHPC-50 的极限荷载提高幅度分别为 102% 和 62%。在 UHPC 中嵌入 BFRP 格栅可以显著提高试件的轴向极限拉伸荷载。BFRP 格栅可在 UHPC 基体中起到一定的加筋作用。同时,在 UHPC 中加入网孔尺寸

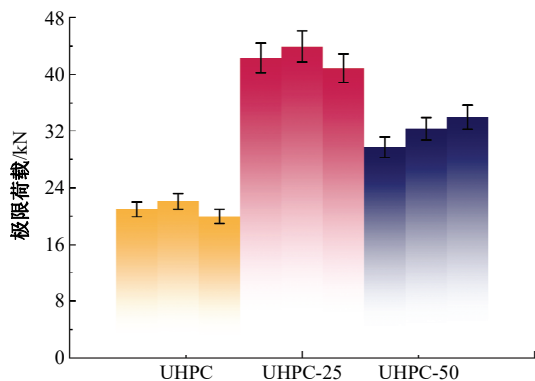


图 8 轴向拉伸试件极限荷载

Fig. 8 Ultimate load of axial tensile specimens

为 25 mm 的 BFRP 格栅极限拉伸荷载提升幅度更大,抗拉性能更加优秀。这是由于格栅网孔尺寸为 25 mm 的 BFRP 格栅轴向抗拉纤维筋的数量较格栅网孔尺寸为 50 mm 的 BFRP 格栅轴向抗拉筋的数量多一倍,能够更加有效地阻碍表面裂缝的扩展延伸,提升试件的抗断裂性能和韧性,试件抵抗变形能力更强,能够承受更大的轴向拉伸荷载。

2.2 加固系统与既有混凝土界面黏结性能分析

2.2.1 失效模式

根据调研发现^[24],BFGRU 复合加固系统与既有混凝土界面单剪试件失效模式具有多样性,如图 9 所示。失效模式主要分为 6 种:①混凝土剪切破坏,即最终试件 BFGRU 加固系统完好,既有 C40 混凝土发生剪切破坏;②黏结材料剥离,即最终 BFGRU 加固系统与既有混凝土交界面处发生较大滑移,二者剥离导致试件失效;③黏结层剪切破坏,即最终 BFGRU 加固系统内部的黏结材料发生剪切破坏导致试件失效;④BFRP 格栅与黏结材料剥离,即最终 BFGRU 加固系统内部的 BFRP 格栅与黏结材料交界面处发生较大滑移,二者剥离导致试件失效;⑤BFRP 格栅分层,即最终 BFGRU 加固系统与既有混凝土交界面处完好,二者之间无明显滑移,BFRP 格栅分层导致试件失效;⑥BFRP 格栅破坏,即最终 BFGRU 加固系统与既有混凝土交界面处完好,二者之间无明显滑移,BFRP 格栅被拉断导致试件失效。

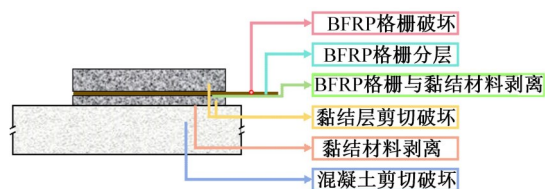


图 9 单剪试件失效模式种类

Fig. 9 Various failure modes of single-shear specimens

6 组正交设计单剪试件均因发生 BFRP 格栅筋断裂而破坏,如图 10 所示,即第⑥类破坏:BFRP 格栅的轴向受拉纤维断裂。这表明,在整个加载过

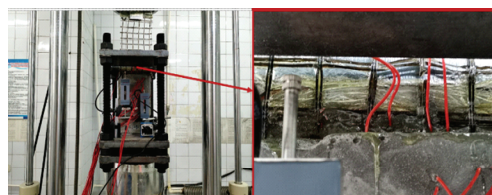


图 10 单剪试件破坏形式

Fig. 10 Failure mode of single-shear specimen

程中,加固系统与既有混凝土交界面处无明显滑移,二者共同承担荷载,产生的变形一致,加固系统与既有混凝土界面之间的黏结性能良好。

2.2.2 断裂过程力学响应

通过试验过程中MTS的实时荷载及应变采集箱应变数据,与位移计采集数据相印证,计算绘出单剪试件的应力-应变关系曲线,如图11所示。

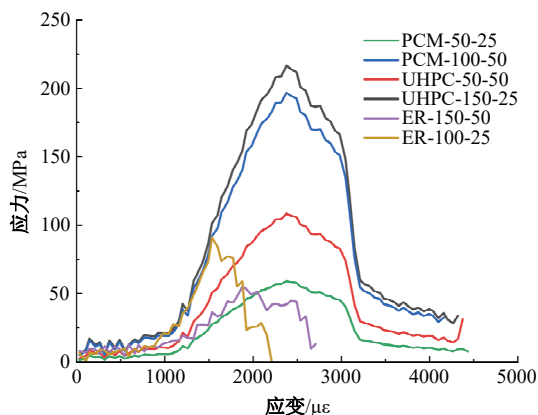


图11 单剪试件应力-应变关系

Fig. 11 Stress-strain relationship of single-shear specimens

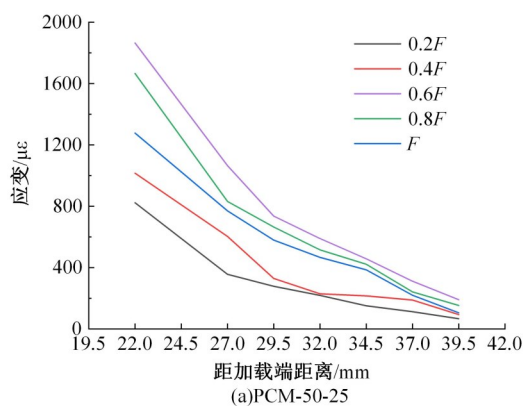
单剪试件的应力-应变曲线可以分为两个阶段,即裂缝初始阶段(第1阶段)、裂缝扩展阶段(第2阶段)。在裂缝初始阶段,随着荷载增加,应变逐渐增大。试件中的BFRP格栅与黏结

材料承受荷载,直至BFRP格栅出现细小的微裂缝,此时进入第2阶段。随着荷载的增大,BFRP格栅裂缝数量增加且裂缝宽度增大,直至BFRP格栅发生断裂,试件失效。此阶段应变表现为基本不变或下降,主要是由于该阶段内BFRP格栅裂缝数量增加,部分玄武岩纤维丝拔出或断裂退出工作,导致仅有部分荷载传递到下方的黏结区,黏结区承受的荷载及应变下降,最终达到加固系统的极限荷载,BFRP格栅彻底拉断,试件破坏。

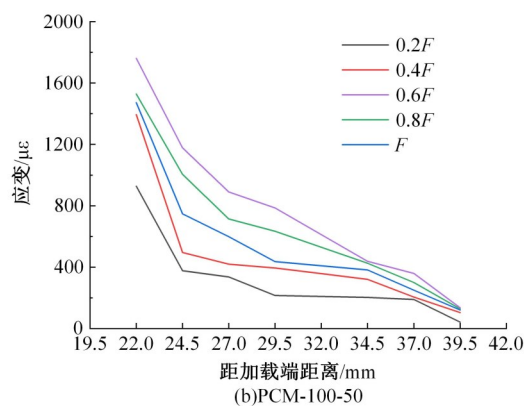
当单剪试件处于裂缝初始阶段时,随着荷载的增大,加固系统与既有混凝土界面之间的滑移量逐渐增大。这是由于随着荷载增加,BFRP格栅与既有混凝土加固区滑移逐渐增大,直到BFRP格栅表面出现微裂缝,进入第2阶段。在裂缝扩展阶段,荷载只有部分沿着BFRP格栅未断裂的受力筋传递至下方黏结区,黏结区所受荷载下降。随着荷载持续增加,BFRP格栅裂缝扩展发育,裂缝的数量持续增多,滑移量持续下降。最终,BFRP格栅被拉断,加固系统失效。

2.2.3 应变传递过程分析

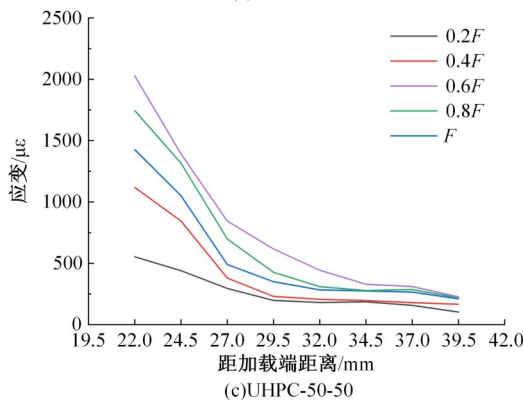
将单剪试件极限荷载记为 F ,分别绘制了各组荷载为 $0.2F$ 、 $0.4F$ 、 $0.6F$ 、 $0.8F$ 、 $1.0F$ 时的应变与距加载端距离的曲线,如图12所示。



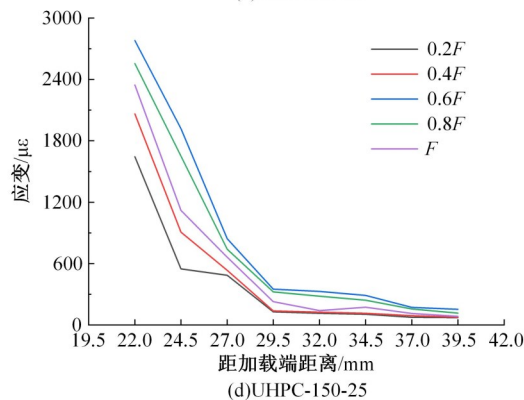
(a)PCM-50-25



(b)PCM-100-50



(c)UHPC-50-50



(d)UHPC-150-25

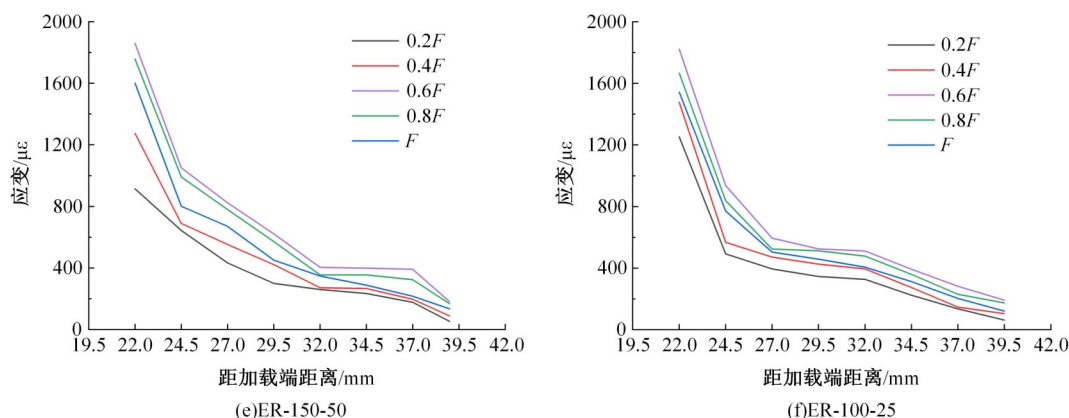


图 12 单剪试件应变与距加载端距离关系

Fig. 12 Strain-distance to load end relationship of single-shear specimens

当单剪试件处于裂缝初始阶段时,BFRP 格栅表面没有产生裂缝,荷载可以正常传递至下部黏结区。应变表现为荷载越大,应变越大。当荷载超过约 0.6F 后,BFRP 格栅表面出现细小裂缝,此时单剪试件处于裂缝扩展阶段。由于 BFRP 格栅表面裂缝的存在,荷载只能通过未断裂的受力筋部分传递至黏结区,黏结区所受荷载下降,应变减小。之后,随着荷载继续增大,BFRP 格栅表面裂缝数量增多,传递到黏结区的荷载下降,应变减小,直至试件破坏。由图 12 可知:距离加载端越近,应变越大,这是由于荷载向下传递的过程中产生了损失,部分荷载被 BFRP 格栅承受,越远离加载端,损失的荷载越多,应变越小。

3 基于灰色关联度分析法的加固系统与既有混凝土界面黏结效应分析

3.1 灰色关联度分析法

灰色关联度分析法(Grey relational analysis, GRA)是灰色系统分析方法的一种,是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度(即“灰色关联

度”)衡量因素间关联程度的方法^[25]。

3.2 加固系统与既有混凝土黏结强度分析

基于 GRA 对单剪试件极限荷载进行分析,以确定黏结材料种类、黏结区域宽度、格栅网孔尺寸与单剪试件破坏荷载的关联程度,即加固系统与既有混凝土界面黏结效应影响因素。

首先,确定灰色关联度分析中的因素数列,即黏结材料黏结强度、黏结区域宽度、格栅网孔尺寸,如表 4 所示。由于表 4 中各因素物理意义不同,数据的量纲也不尽相同。因此,将破坏荷载作为参考数据,基于式(1)对各因素数列指标数据进行无量纲化处理,结果如表 5 所示。

$$x_i(k) = \frac{x'_i(k)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x'_i(k)} \quad (1)$$

式中: $x_i(k)$ 为各因素无量纲数列; $x'_i(k)$ 为各因素数列; $k=1,2,\cdots,m$,其中 m 为指标的个数; $i=0,1,2,\cdots,n$,其中 n 为被评价对象的个数。

基于式(2)可以分别计算每个比较序列和参考序列对应元素的灰色关联系数:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \times \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \times \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (2)$$

式中: $\zeta_i(k)$ 为各因素数列的灰色关联系数; ρ 为分辨系数, $0 < \rho < 1$, ρ 越小,则关联系数间差异越

表 4 单剪试件极限荷载信息

Table 4 Ultimate load information of single-shear specimens

参数	PCM-50-25	PCM-100-50	UHPC-50-50	UHPC-150-25	ER-150-50	ER-100-25
黏结材料黏结强度/MPa	1.21 ^[23]	1.21 ^[23]	2.78	2.78	1.36 ^[23]	1.36 ^[23]
黏结区域宽度/mm	50	100	50	150	100	150
格栅网孔尺寸/mm	25	50	50	25	25	50
破坏荷载/N	186.28	613.25	114.62	1179.91	295.04	185.93

表 5 单剪试件参数无量纲化处理
Table 5 Parameters dimensionless process of single-shear specimens

参数	PCM-50-25	PCM-100-50	UHPC-50-50	UHPC-150-25	ER-150-50	ER-100-25
黏结材料黏结强度	0.678 505	0.678 505	1.558 879	1.558 879	0.762 617	0.762 617
黏结区域宽度	0.500 000	1.000 000	0.500 000	1.500 000	1.000 000	1.500 000
格栅网孔尺寸	0.666 667	1.333 333	1.333 333	0.666 667	0.666 667	1.333 333
破坏荷载	0.434 045	1.428 915	0.267 073	2.749 273	0.687 464	0.433 230

大,区分能力越强,通常 ρ 取 0.5。

最后,按照式(3)求得各因素数列的灰色关联度,并记录于表 6 中。

$$r_{0i}=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^m\zeta_i(k)\tag{3}$$

式中: r_{0i} 为因素数列的灰色关联度。

由此,可确定最佳加固方案为:格栅网孔尺寸为 25 mm,加固区域宽度为 150 mm,黏结材料为 UHPC,即使用 UHPC 将网孔尺寸为 25 mm 的 BFRP 格栅黏结到 C40 混凝土表面且黏结全宽度。应用到工程中时,在 UHPC 材料中嵌入网孔尺寸 25 mm 的 BFRP 格栅并布满加固区域。

表 6 单剪试件灰色关联系数
Table 6 Grey correlation coefficients of single-shear specimens

参数	PCM-50-25	PCM-100-50	UHPC-50-50	UHPC-150-25	ER-150-50	ER-100-25	r_{0i}
$\zeta_1(k)$	2.441 102	0.795 231	0.461 950	0.501 304	7.940 469	1.811 699	2.325 293
$\zeta_2(k)$	9.047 894	1.391 300	2.561 957	0.477 678	1.909 379	0.559 399	2.657 935
$\zeta_3(k)$	2.565 329	6.243 327	0.559 666	0.286 540	28.693 810	0.662 979	6.501 942

4 结 论

(1)BFRP 格栅对轴向拉伸试件开裂过程和破坏模式有明显影响。无 BFRP 格栅试件失效过程表现出明显的脆性破坏;BFRP 格栅增韧 UHPC(BFGRU)试件在失效过程中呈现出塑性损伤特征。

(2)BFRP 格栅的加入显著提升了 UHPC 试件的抗裂性、承载能力和抗断裂韧性。嵌入 25 mm 网孔尺寸 BFRP 格栅的 BFGRU 试件极限拉伸荷载提升效果最为明显,拉伸强度最大可提高 102%。

(3)BFGRU 复合加固系统与旧混凝土界面黏结性能良好。在受载失效过程中交界面处无明显滑移,二者可共同承担荷载作用并协同变形。

(4)不同因素对界面黏结性能的影响效应结果表明,关联程度从高到低依次为:格栅网孔尺寸、黏结区域宽度、黏结材料种类。基于此,优化 BFGRU 复合加固技术方案为在 UHPC 材料中嵌入网孔尺寸 25 mm 的 BFRP 格栅并布满加固区域。

参考文献:

[1] 郑宇宙,王文炜,李剑锋,等. 复材格栅-高延性纤维水泥基受拉本构关系模型[J]. 工业建筑, 2016, 46(5): 12-17.
Zheng Yu-zhou, Wang Wen-wei, Li Jian-feng, et

al. The constitutive relationship model of ECC composite strengthened with FRP grid under axial loading [J]. Industrial Construction, 2016, 46(5): 12-17.

[2] Lee D, Shin S. Nonlinear pushover analysis of concrete column reinforced by multi-layered, high strength steel UL700 plates[J]. Engineering Structures, 2015, 90: 1-14.

[3] Benzecry V, Rossini M, Morales C, et al. Design of marine dock using concrete mixed with seawater and FRP bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2021, 25(1): No. 05020006.

[4] Yoo D, Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: a review [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 73: 267-280.

[5] Zhou Z, Qiao P. Durability of ultra-high performance concrete in tension under cold weather conditions[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 94: 94-106.

[6] 蔡雄庭,刘力,伍贤智,等. UHPC 加固 RC 梁受弯性能试验研究[J]. 世界桥梁, 2024, 52(1): 117-124.
Cai Xiong-ting, Liu Li, Wu Xian-zhi, et al. Experimental study of mechanical behavior of RC beam retrofitted by using UHPC[J]. World Bridges, 2024, 52(1): 117-124.

[7] Zhou C, Wang J, Shao X, et al. The feasibility of using ultra-high performance concrete (UHPC) to strengthen RC beams in torsion[J]. Journal OF Mate-

- rials Research and Technology, 2023, 24: 9961-9983.
- [8] 徐文远, 李微, 王大洋, 等. 碱冻耦合作用FRP加固混凝土性能损伤机理研究[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2025, 55(6): 2050-2062.
- Xu Wen-yuan, Li Wei, Wang Da-yang, et al. Study on the damage mechanism of FRP reinforced concrete under alkali freezing coupling effect[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(6): 2050-2062.
- [9] Stewart A, Douglas E. Accelerated testing of epoxy-FRP composites for civil infrastructure applications: property changes and mechanisms of degradation[J]. Polymer Reviews, 2012, 52(2): 115-141.
- [10] Mizan M, Matsumoto K. Polymer cement mortar strengthened RC beams with/without silica fume as repair material[J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: No. 134046.
- [11] Guo R, Pan Y, Cai L, et al. Study on design formula of shear capacity of RC beams reinforced by CFRP grid with PCM shotcrete method[J]. Engineering Structures, 2018, 166: 427-440.
- [12] Ke Y, Tian J, Zhang T, et al. Compressive behavior and strength model of novel FRP-UHPC strengthened RC columns[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98: No. 111383.
- [13] 陈歆, 郑秀华, 韩凯. 玄武岩纤维掺杂混凝土材料特性的研究[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2019, 36(1): 61-66.
- Chen Xin, Zheng Xiu-hua, Han Kai. Characterization of basalt fiber doped concrete materials[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2019, 36(1): 61-66.
- [14] 郭耀东, 刘元珍, 王文婧, 等. 玄武岩纤维特征参数对混凝土单轴受拉性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(5): 2897-2912.
- Guo Yao-dong, Liu Yuan-zhen, Wang Wen-jing, et al. Influence of basalt fiber characteristic parameters on uniaxial tensile properties of concrete[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2897-2912.
- [15] Xu X, Rawat P, Shi Y, et al. Tensile mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer tendons at low to intermediate strain rates[J]. Composites Part B-Engineering, 2019, 177: No. 107442.
- [16] 姜浩, 赵正文. 玄武岩纤维网格水泥基复合材料加固RC梁抗剪性能试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2025, 55(1): 211-220.
- Jiang Hao, Zhao Zheng-wen. Experiment on shear performance of RC beams strengthened with basalt fiber grid cement-based composites[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(1): 211-220.
- [17] He W, Wang X, Monier A, et al. Shear behavior of RC beams strengthened with side-bonded BFRP grids[J]. Journal of Composites for Construction, 2020, 24(5): No. 04020051.
- [18] 吴树正. BFRPC与钢绞线锚固体系粘结滑移性能与损伤行为研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2023.
- Wu Shu-zheng. Study on bond-slip performance and damage behavior of BFRPC and steel strand anchorage system[D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2023.
- [19] 宫亚峰, 宋加祥, 吴树正, 等. BFRPC与预应力钢绞线黏结-滑移本构模型[J]. 中国公路学报, 2023, 36(9): 96-105.
- Gong Ya-feng, Song Jia-xiang, Wu Shu-zheng, et al. Bond-slip constitutive model of BFRPC and prestressed steel strand[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(9): 96-105.
- [20] 吕翔. 季冻区玄武岩纤维活性粉末混凝土耐久性能和力学性能研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2021.
- Lv Xiang. Research on durability and mechanical properties of basalt fiber reactive powder concrete in seasonal frozen area[D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2021.
- [21] JGJ 55—2011. 普通混凝土配合比设计规程[S].
- [22] JT/T 776.3—2010. 玄武岩纤维及其制品第3部分: 玄武岩纤维土工格栅[S].
- [23] 贺卫东. BFRP网格加固混凝土受弯构件静力与疲劳性能研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2021.
- He Wei-dong. Static and fatigue behavior of RC flexural members strengthened with BFRP grid[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2021.
- [24] 姜绍飞, 臧荣彬, 宋华霖, 等. 表面开槽碳纤维布-混凝土界面抗剪性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(6): 52-60.
- Jiang Shao-wei, Zang Rong-bin, Song Hua-lin, et al. Experimental study on interfacial shear behavior of CFRP-concrete with surface groove[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(6): 52-60.
- [25] Gong Y, Wu S, Zhang Y, et al. Investigation of the high-temperature and rheological properties for asphalt sealant modified by SBS and rubber crumb[J]. Polymers, 2022, 14(13): No. 2558.