

桥梁简支板玄武岩纤维加固技术研究

李红鸽¹, 吴志文¹, 滕仁栋², 李南南³, 贾铂杰⁴

- (1. 石家庄市道桥设施管护中心, 石家庄 050019; 2. 河北省建筑科学研究院有限公司, 石家庄 050021;
3. 石家庄市道桥建设总公司综合维护管理所, 石家庄 050091;
4. 北京中铁装饰工程有限公司, 北京 100040)

摘要: 为了研发适用于服役年限超过 20 年的病害桥梁及涉水恶劣环境桥梁的高效快速加固技术, 解决城市在役中小跨径桥梁耐久性与力学性能不足的问题, 依托石家庄市一座跨河 3 跨简支板病害梁桥开展实桥加固研究, 提出对各跨径简支板粘贴不同层数的玄武岩纤维布和碳纤维布的三种加固方案, 通过动静载试验采集桥梁加固前后各项技术参数, 分析对比玄武岩纤维布和碳纤维布在梁板加固中对桥梁综合性能的提升效果。结果表明: 玄武岩纤维布作为绿色建材完全可以替代高成本的碳纤维布实施梁板加固, 加固后, 桥梁各孔挠跨比、钢筋最大应力增量均低于加固前; 动挠度与动应变冲击系数均有降低, 各项指标均满足规范要求, 加固效果良好。研究结果可为后续既有病害桥梁快速加固相关研究提供新思路与试验参考, 为我国大量既有老旧桥梁的加固改造提供可靠技术支撑, 也为推动既有桥梁运维加固技术升级、保障基础设施安全提供工程实践参考。

关键词: 玄武岩纤维布; 在役简支板梁桥; 加固技术; 桥梁耐久性; 桥梁力学性能

中图分类号: U445.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0151-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.025

Research on Basalt Fiber Reinforcement Technology of Bridge Simply Supported Plate

LI Hongge¹, WU Zhiwen¹, TENG Rendong², LI Nannan³, JIA Bojie⁴

- (1. Shijiazhuang Road & Bridge Facilities Management and Maintenance Center, Shijiazhuang 050019, China;
2. Hebei Academy of Building Research Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China;
3. Comprehensive Maintenance Management Office of Shijiazhuang Road & Bridge Construction Corporation, Shijiazhuang 050091, China;
4. Beijing China Railway Decoration Engineering Co., Ltd., Beijing 100040, China)

Abstract: In order to develop an efficient and rapid reinforcement technology suitable for diseased bridges with a service life of more than 20 years and bridges in harsh water-related environments, and solve the problem of insufficient durability and mechanical properties of small and medium-sized bridges in service in the city, this paper relies on a river-crossing 3-span simply supported plate disease bridge in Shijiazhuang City to carry out real bridge reinforcement research, and proposes three

项目来源: 2020 年河北省建设科技研究指导性计划项目 (项目编号 2020-285)。

作者简介: 李红鸽 (1971—), 女, 硕士研究生, 正高级工程师, 研究方向: 市政桥梁养护管理。

通信作者: 滕仁栋 (1983—), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, 研究方向: 结构加固改造。

收稿日期: 2026-03-17

道桥技术

reinforcement schemes for each span simply supported plate to paste different layers of basalt fiber cloth and carbon fiber cloth. The technical parameters of the bridge before and after reinforcement were collected through dynamic and static load tests, and the improvement effect of basalt fiber cloth and carbon fiber cloth on the comprehensive performance of the bridge in beam plate reinforcement was analyzed and compared. The results show that basalt fiber cloth as a green building material can completely replace the high-cost carbon fiber cloth to implement beam and plate reinforcement. After reinforcement, the deflection-span ratio of each hole of the bridge and the maximum stress increment of the steel bar are lower than those before reinforcement. The dynamic deflection and dynamic strain impact coefficient are reduced, and all the indexes meet the requirements of the specification, and the reinforcement effect is good. The research results can provide new ideas and experimental references for the follow-up research on the rapid reinforcement of existing diseased bridges, provide reliable technical support for the reinforcement and reconstruction of a large number of existing old bridges in China, and also provide engineering practice reference for promoting the upgrading of existing bridge operation and maintenance reinforcement technology and ensuring the safety of infrastructure.

Key words: basalt fiber cloth ; simply supported plate girder bridge in service ; reinforcement technology ; bridge durability ; mechanical properties of bridge

0 引言

由 2024 年交通运输行业发展统计公报可知, 2024 年末全国公路桥梁 110.81 万座, 其中服役期 10-30 年的桥梁占比超 85%^[1]。受交通量激增、车辆超载、自然老化等多重因素影响, 既有桥梁安全风险日益突出, 桥梁事故发生率偏高, 凸显出既有桥梁运维与加固的迫切需求。玄武岩纤维 (BFRP) 作为新型绿色加固材料, 兼具优异力学性能与高性价比, 将其应用于病害桥梁加固, 对提升桥梁耐久性与力学性能、延长服役寿命具有重要理论意义与工程实践价值。

国内诸多学者围绕桥梁加固材料及技术开展了大量相关研究, 其中玄武岩纤维 (BFRP) 因优异的力学性能、耐高温性、耐化学腐蚀性 & 环境友好特性, 成为新型加固材料的研究热点。李涛等^[2] 研究表明 BFRP 加固方柱的抗压强度和延性随包裹层数的增加而提高, 但提高幅度呈衰减趋势; 王新玲等^[3] 指出混凝土梁的疲劳损伤会降低 CFRP 加固钢筋混凝土梁的极限抗弯承载力; 秦丽辉^[4] 研究发现 BFRP 加固钢筋混凝土梁正截面抗弯破坏机理与普通钢筋混凝土梁存在差异; 张振雷等^[5] 证实采用玄武岩纤维复合材料混合加固破损混凝土短梁的抗剪性能具有可行性; 边苗^[6] 试验表明, 玄武岩纤维布加固后试验梁的刚度显著提升, 应变明显降低; 张志文等^[7] 试验发现, 增加 BFRP 布层数能有效提高梁体抗弯刚度、降低刚度损伤、改善整体性能, 同时抑

制裂缝扩展、减小最大挠度值; 龚娅楠等^[8] 研究表明, 适当增加纤维布层数可提升冻融损伤钢筋混凝土柱的抗震性能; 王海良等^[9] 试验发现酸、碱、氯盐环境腐蚀作用会降低玄武岩纤维布加固既有损伤梁极限承载力; 史乐贤等^[10] 指出新型玄武岩纤维在抗折强度与抗压强度方面均表现出良好的增强效果; 王伟、吴闻秀等^[11-12] 学者均强调, 玄武岩纤维作为新型高性能绿色建筑材料, 兼具性价比优势与环境友好特性, 极具应用潜力; 戴博玄、刘欣鑫等^[13-14] 研究证实玄武岩纤维可有效抑制硫酸盐对混凝土的侵蚀; 谢福君等^[15] 则提出, 针对 4 类桥梁的加固与重建采用实用性改造分析, 可在资金有限的前提下, 为桥梁加固改造提供高效合理的指导。这些研究成果为玄武岩纤维加固技术的发展奠定了一定的理论基础。

目前将玄武岩纤维 (BFRP) 应用于桥梁承载力加固的系统性研究报道较为匮乏, 且现有研究对象多集中于钢筋混凝土实心矩形梁, 缺乏对服役年限超 20 年的病害桥梁及涉水等恶劣环境下桥梁的针对性研究, 现有快速加固技术相关研究仍有待进一步深入。同时, 现有研究尚未形成结合实际工程场景的针对性加固设计方法, 导致玄武岩纤维 (BFRP) 材料的优良特性未能充分发挥, 严重制约了其在桥梁加固工程领域的规模化、工程化应用。鉴于此, 依托实际工程案例, 对服役年限超 20 年的病害桥梁及涉水桥梁, 采用理论分析与试验研究相结合的技术路径, 系统探究玄武岩纤维 (BFRP) 在桥梁加固

中的适用性与有效性，构建科学合理的加固设计方法，进而提升桥梁结构刚度与耐久性，保障桥梁结构长期安全稳定运营。

1 工程概况

1.1 桥梁概况

以汇新路跨引水入市改善环境工程（西线）的桥梁工程为例，该桥建于 1999 年，位于西线桩号 12+652.29 处，桥长为 22 m，跨径组合为 7 m+8 m+7 m，桥宽为 12 m，横向布置 12 片普通钢筋混凝土预制实心板梁，横向相邻板间用现浇铰缝连接。桥面铺装分为两层，上层为 3 cm 厚的沥青混凝土，下层为 10 cm 厚的水泥混凝土，全桥整体现浇。下部结构为单排三柱式墩台，柱顶为双悬臂矩形截面盖梁，墩柱直径 80 cm，桩为直径 100 cm 的钻孔灌注桩，一柱一桩。

该桥在强降雨时易出现板底浸泡的现象，且目前桥梁板底已出现混凝土开裂、钢筋外露锈蚀的现象，故为隔绝水气并改善桥梁耐久性，兼顾提高桥梁承载能力，拟采用纤维材料（FRP）对桥梁进行加固。

1.2 加固材料参数

拟采用的纤维材料分别为碳纤维布和玄武岩纤维布，碳纤维主要依赖进口，成本高，玄武岩纤维在我国储量丰富，绿色环保。加固桥梁采用的混凝土及钢筋、碳纤维布及玄武岩纤维布主要性能指标，分别见表 1、表 2。

表 1 混凝土、钢筋的主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of concrete, steel bar and reinforcement material

名称	等级	抗拉强度 标准值 /MPa	抗拉强度 设计值 /MPa	抗压强度 设计值 /MPa	弹性模量 /MPa	极限 压应变
混凝土	C25	1.78	1.23	11.5	2.8×10^4	0.003 3
钢筋	HRB335	335	280	280	2.0×10^5	0.01

表 2 纤维复合材料的主要性能指标

Table 2 Main performance indexes of fiber composites

名称	抗拉强度 标准值 /MPa	弹性模量 /MPa	极限拉 应变	纤维密度 /(g/cm ³)	单位面积 质量 /(g/m ²)
碳纤维布	3400	2.4×10^5	0.014 2	1.8	200
玄武岩纤维布	2000	8.0×10^4	0.025 0	2.6	275

2 加固设计及荷载试验

2.1 极限承载力计算

在对钢筋混凝土受弯构件进行加固时，构件的作用荷载效应按两个阶段受力进行计算。依据 GB50367—2013《混凝土结构加固设计规范》的规定，第一阶段为加固前，作用应包括构件自重在内的实际恒载及施工荷载，第二阶段为加固后，作用应包括构件自重在内的恒载、二期作用的恒载及使用阶段的可变作用。简支板桥达到承载能力极限状态之前，FRP 布与原桥之间不发生剥离破坏，符合 GB50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》的要求。

根据理论推导，得到加固前的矩形钢筋混凝土板梁的基于现状的抗弯承载能力为 308.5 kN·m，原设计规范规定的 1.2 倍恒载与 1.4 倍汽-20 作用下的跨中弯矩设计值为 300.06 kN·m，而现行 JTGD60—2015《公路桥涵设计通用规范》规定的 1.2 倍恒载与 1.4 倍公路-II 级作用下的跨中弯矩设计值为 334.64 kN·m。原桥的设计承载能力低于现行规范规定的跨中弯矩设计值。基于此，需要对在役简支板桥采取加固措施，提升简支板桥的设计承载能力。

选用三种方案对简支板控制截面抗弯承载能力进行计算。第一种，在边跨和中跨简支板底部粘贴一层碳纤维布；第二种，在边跨和中跨简支板底部粘贴一层玄武岩纤维布；第三种，在边跨和中跨简支板底部粘贴两层玄武岩纤维布。

桥梁边跨和中跨加固前后极限抗弯承载能力计算结果见表 3。

表 3 桥梁加固前后极限抗弯承载力对比表

Table 3 Comparison table of ultimate flexural bearing capacity before and after bridge reinforcement /MPa

加固前		加固后					
边跨	中跨	单层 CFRP		单层 BFRP		双层 BFRP	
		边跨	中跨	边跨	中跨	边跨	中跨
308.5	308.5	350.9	350.4	328.4	328.4	346.4	346.0

2.2 桥梁加固方案设计

由表 3 可知，采用单层碳纤维布加固，简支板抗弯承载力可提升 14%，采用单层玄武岩纤维布加固，简支板抗弯承载力可提升 6.5%，采用双层玄

道桥技术

玄武岩纤维布加固, 简支板抗弯承载力可提升 12.3%。在采用相同纤维复合材料的截面面积的情况下, 玄武岩纤维布的加固效果为碳纤维布加固效果的 46%; 在玄武岩纤维布的截面面积为碳纤维布的两倍时, 玄武岩纤维布的加固效果为碳纤维布加固效果的 88%。

汇新路桥由三孔组成, 依据理论计算结果考虑按照以下加固方案进行:

- (1) 第一孔采用 4 层玄武岩纤维加固;
- (2) 第二孔采用 2 层碳纤维加固;
- (3) 第三孔采用 1 层碳纤维加固, 2 层玄武岩纤维加固。

2.3 试验荷载和测点布置

为对比三种加固方案的可行性, 在桥梁加固前后分别安排静动载试验, 通过试验数据, 分析桥梁技术状况提升效果。

静载试验: 采用汽车荷载加载的方法, 按最大试验荷载进行分级加载, 测试该桥梁各控制截面在各级荷载作用下的应变和变形情况。

动载试验: 单辆车以 10、20、30、40 km/h 速度通过桥梁进行行车试验, 测试桥梁的动挠度、动应变、跨中截面竖向速度及竖向加速度等动力响应参数, 以及环境微振动激励下桥梁结构的自振频率。

试验荷载按控制内力、应力或变位等效原则确定, 根据 CJJ/T 233—2015《城市桥梁检测与评定技术规范》要求静力荷载试验效率宜介于 0.95~1.05 之间。

2.3.1 试验荷载布置

试验荷载依据等效设计原则, 偏载采用两辆车, 在靠近人行道的两个车道加载。第 1~3 孔试验加载车辆信息见表 4。

表 4 第 1~3 孔加载车辆统计表
Table 4 1~3 hole loading vehicle statistics table

车辆编号	汽车总重 /t	前轴重 /t	后轴重 /t	前一中轴 间距/mm	中—后轴 间距/mm
1	40.60	7.80	32.80	1 400	3 800
2	40.45	7.70	32.75	1 400	3 800

2.3.2 试验工况

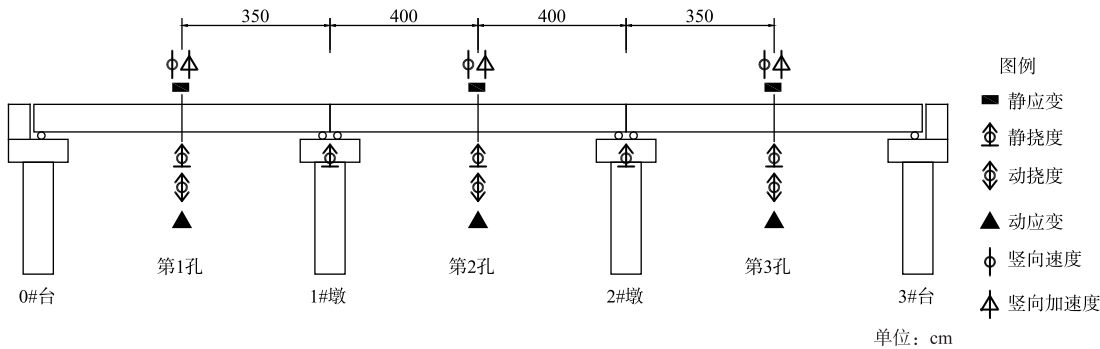
共测试 3 孔, 桥梁加固前后测试工况一致。试验共分为 10 个工况, 其中静载 6 个工况, 动载 4 个工况, 每种工况循环 2 次, 具体见表 5。

表 5 试验工况统计表
Table 5 Statistical table of test conditions

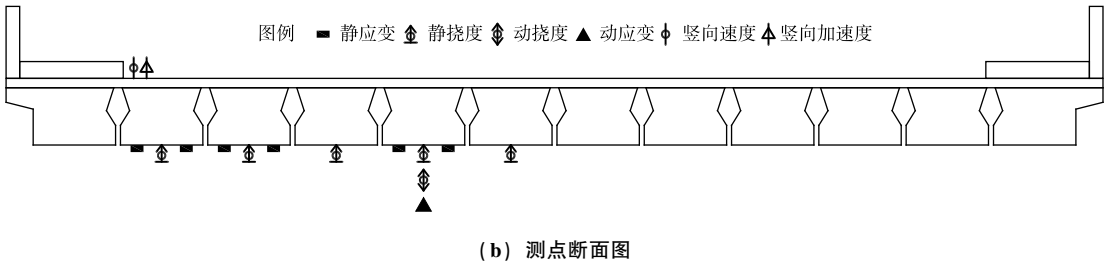
试验类型	加载类型	工况描述	工况编号	加载车辆/辆	车辆速度/(km/h)	循环次数
静载试验	偏载	第 1 孔跨中控制截面	工况 1	1		2
		第 1 孔跨中控制截面	工况 2	2		2
		第 2 孔跨中控制截面	工况 3	1		2
		第 2 孔跨中控制截面	工况 4	2		2
		第 3 孔跨中控制截面	工况 5	1		2
		第 3 孔跨中控制截面	工况 6	2		2
动载试验		第 1~3 孔跨中控制截面	工况 7	1	10	2
		第 1~3 孔跨中控制截面	工况 8	1	20	2
		第 1~3 孔跨中控制截面	工况 9	1	30	2
		第 1~3 孔跨中控制截面	工况 10	1	40	2

2.3.3 试验测点布置

为对比加固前后桥梁结构受力性能, 加固前后测点布置位置一致。该桥为普通混凝土梁, 因此静载应变测点布置在跨中截面底板钢筋上, 为尽量减少对梁体结构的破坏, 所以每孔选择受力最大的 3 片梁, 每片梁布置 2 个测点; 静载挠度测点布置在每孔跨中截面, 每截面布置 5 个测点。动载竖向速度和竖向加速度测点布置在每孔次边梁的跨中截面, 动应变和动挠度测点布置在每孔第 5 片梁的跨中截面, 模态测试采用环境激励法。各测点布置如图 1 所示。



(a) 测点立面图

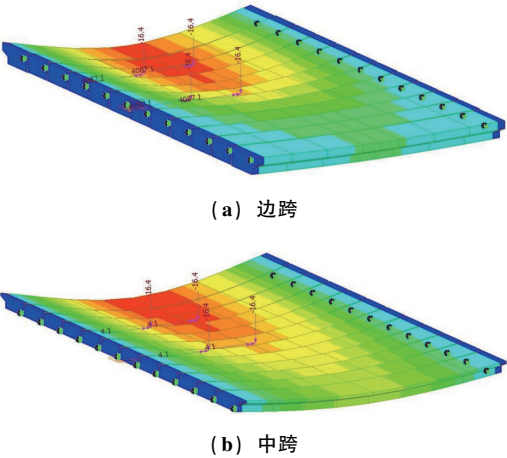


(b) 测点断面图

图 1 试验测点布置图

Fig. 1 Measuring point layout diagram

使用 MIDAS 软件进行理论建模计算，图 2 为控制截面偏载加载计算模型，表 6 为控制截面设计荷载及试验荷载理论计算结果。



(a) 边跨

(b) 中跨

图 2 加载计算模型

Fig. 2 Loading calculation model

表 6 理论计算结果				
Table 6 Loading efficiency coefficient of each control section				
类型	底板位移/mm		荷载弯矩/(kN·m)	
	边跨	中跨	边跨	中跨
设计	-1.96	-2.92	138.80	257.40
试验	-1.95	-2.94	133.94	248.90

试验荷载作用下边跨的控制截面挠度效率系数为 1.00，跨中弯矩效率系数为 0.97，中跨控制截面挠度效率系数为 1.01，跨中弯矩效率系数为 0.97，均满足 CJJ/T 233—2015《城市桥梁检测与评定技术规范》要求。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

荷载试验结果汇总见表 7。

表 7 试验结果										
Table 7 Test results										
名称	状态	挠跨比	钢筋应力最大增量/MPa	校验系数		最大残余%		冲击系数		自振频率/Hz
				挠度	应变	挠度	应变	挠度	应变	
第一孔	加固前	1/4 490	16.95	0.85	0.73	2.5	2.30	0.12	0.13	18.16
	加固后	1/4 867	15.85	0.79	0.69	2.1	3.30	0.11	0.10	20.70
第二孔	加固前	1/4 212	17.36	0.74	0.92	1.9	3.20	0.13	0.14	15.04
	加固后	1/4 549	15.97	0.68	0.60	1.5	3.25	0.06	0.11	17.55
第三孔	加固前	1/4 519	15.90	0.85	0.84	3.0	1.80	0.11	0.16	19.34
	加固后	1/4 927	14.83	0.71	0.80	2.7	1.70	0.11	0.11	21.29

3.2 结果分析

3.2.1 静载试验

加固前，跨中控制截面最大挠跨比在第二孔为 1/4 212，加固后，各级试验荷载作用下，实测各孔控制截面最大挠跨比均小于加固前，其中第三孔挠度减小明显，降低了 8.3%。

加固前，各控制截面底板钢筋应力最大增量在

第二孔为 17.36 MPa，加固后，各控制截面底板钢筋应力最大增量均小于加固前，其中第二孔减小明显，降低了 1.39 MPa。

加固前后，各级试验荷载作用下，实测各孔应变最大相对残余为 3.3%，挠度最大相对残余为 3.0%，相对残余均满足 CJJ/T 233—2015 的要求 ($\leq 20\%$)。

道桥技术

加固前后, 各级试验荷载作用下, 实测各孔挠度校验系数最大值为 0.85, 应变校验系数最大值为 0.92, 均满足 CJJ/T 233—2015 的要求 (≤ 1.00)。

使用碳纤维布和玄武岩纤维布加固, 对挠跨比均有减小, 第一孔为 7.7%, 第二孔为 7.4%, 第三孔为 8.3%, 加固效果基本一致。

使用碳纤维布和玄武岩纤维布加固, 各个控制截面底板钢筋应力最大增量均有所降低, 第一孔为 6.5%, 第二孔为 8.0%, 第三孔为 6.7%, 都超过了 5%, 提升效果明显。

3.2.2 动载试验

加固前, 动荷载作用下, 第二孔实测动挠度冲击系数最大为 0.13, 加固后各孔动挠度冲击系数均变小, 第二孔最大动挠度冲击系数减小明显, 降低了 0.07。

加固前, 第三孔动应变冲击系数最大为 0.16, 加固后各孔动应变和冲击系数均变小, 第三孔最大动应变冲击系数减小明显, 降低了 0.05。

加固前, 实测桥跨一阶竖向自振频率第三孔最大为 19.34 Hz, 加固后各孔实测自振频率均有所提高, 其中第一孔提高最明显, 增加了 2.54 Hz。

使用碳纤维布和玄武岩纤维布加固, 各孔基频均有所提升, 第一孔提升了 14.0%, 第二孔提升了 16.7%, 第三孔提升了 10.1%, 均超过了 10%, 加固效果显著。

经过以上数据分析, 采用三种不同加固方案, 对桥梁应变、挠度和自振频率都有所改善, 提升了桥梁承载能力, 加大了安全储备, 碳纤维布和玄武岩纤维布加固效果相当, 三种加固方案均可行。但是, 我国碳纤维大部分依赖进口, 其过高的成本是制约碳纤维加固桥梁技术发展应用的重要因素, 而我国玄武岩石分布广泛, 为玄武岩纤维的生产提供了丰富的原材料, 尤为重要, 由于它取自天然矿石而无任何添加剂, 是目前为止唯一的无环境污染的不致癌的绿色健康纤维产品, 值得在桥梁加固中广泛推广使用。

4 结论

围绕服役近 20 年的病害桥梁及涉水等恶劣环境

桥梁运维加固的迫切需求, 依托石家庄市汇新路跨引水入市桥梁, 在三孔桥跨上选用碳纤维布和玄武岩纤维布设计了三种不同加固方案, 通过桥梁加固前后静动载试验, 分析各加固方案的可行性和加固效果。主要得出以下结论:

(1) 静载试验表明, 加固后各孔跨中控制截面最大挠度、底板钢筋应力最大增量均低于加固前, 说明加固后桥梁抗弯刚度提升, 结构受力状态改善且弹性恢复性能良好。

(2) 动载试验显示, 加固后桥梁各孔动挠度冲击系数、动应变冲击系数明显小于加固前, 各孔桥跨一阶竖向自振频率较加固前显著提高, 表明加固后桥梁抗冲击性能、整体刚度及动力稳定性得到有效提升。

(3) 对比双层碳纤维和四层玄武岩纤维加固方案, 对桥梁性能提升效果相当, 由于玄武岩纤维绿色健康属性, 且在我国有丰富的原材料, 值得在桥梁加固中优先推广。

参 考 文 献

- [1] 交通运输部. 2024 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. (2025-06-12) [2026-05-25]. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202506/t20250610_4170228.html.
- [2] 李涛, 黄镜淳, 周安, 等. 玄武岩纤维复材布加固素混凝土方柱轴压性能研究 [J]. 工业建筑, 2018, 48 (2): 182-187.
- [3] 王新玲, 苏会晓, 钱辉. 碳纤维加固材料加固受损混凝土梁受弯性能试验及设计方法研究 [J]. 工业建筑, 2015, 45 (9): 68-71.
- [4] 秦丽辉. 玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] 张振雷, 李劲松, 刘华新. 玄武岩纤维复合材料混合加固破损混凝土短梁的抗剪性能 [J]. 四川建筑科学研究, 2018, 44 (1): 1-5.
- [6] 边苗. 玄武岩纤维布加固混凝土梁的力学性能研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2024.
- [7] 张志文, 姜井高, 唐站站, 等. 玄武岩纤维布加固混凝土梁抗弯性能试验与分析 [C] // 全国结构工程学术会议 2021 论文集. 成都: 2022: (第 III 册) 354-358.
- [8] 龚娅楠, 张绍武, 吕安安. 玄武岩纤维布加固冻融钢筋混凝土柱性能分析 [J]. 混凝土世界, 2021 (9): 76-80.
- [9] 王海良, 王博, 杨新磊, 等. 酸、碱、氯盐对玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能的影响 [J]. 建筑结构, 2015, 45 (9): 81-85.

(下转第 168 页)

研究与应用

- [14] REDMON J, FARHADIA. YOLOv3: An Incremental Improvement [Z]. arXiv e-prints, 2018.
- [15] HOWARD A G, ZHU M, CHEN B, et al. MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications [Z]. arXiv, 2017.
- [16] 陈俊玮, 刘汉赋, 袁焕鑫, 等. 地铁车辆段检修库装配式混凝土空心柱抗震性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 113-119.
- [17] DORAFSHAN S, THOMAS R J, MAGUIRE M. SDNET2018: An annotated image dataset for non-contact concrete crack detection using deep convolutional neural networks [J]. Data in Brief, 2018, 21: 1664.

(上接第 156 页)

- [10] 史乐贤, 张永辉, 周大兴, 等. 新型玄武岩纤维增强混凝土的性能研究 [J]. 混凝土世界, 2026 (199): 33-36.
- [11] 王伟, 洪雅璐, 姜屏, 等. 玄武岩纤维增强混凝土的研究进展: 力学性能, 耐久性能, 微观机制 [J/OL]. 复合材料学报, 1-27 [2026-05-25]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20260114.002>.
- [12] 吴闻秀, 田浩辰, 张洪光, 等. 玄武岩纤维混凝土力学强度与多尺度增韧机理研究 [J]. 高科技纤维与应用, 2025 (6): 71-82.
- [13] 戴博玄. 玄武岩纤维混凝土在路桥工程伸缩缝施工中的应用 [J]. 汽车画刊, 2025 (11): 226-228.
- [14] 刘欣鑫, 陈庆, 韩非, 等. 玄武岩纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能及侵蚀深度预测模型 [J]. 混凝土, 2025 (12): 11-15.
- [15] 谢福君, 张家生. 基于实用效应的桥梁加固或拆除重建方案比选 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16 (7): 1714-1718.

E-mail: fmhzhly@163.com