道桥技术

复合纤维混凝土对桥梁结构加固效果的影响

李学军

（湖南高速养护工程有限公司，长沙 410206）

摘 要：为了增强桥梁结构的加固效果，延长桥梁结构的使用寿命。以镀铜钢纤维、聚乙烯醇纤维和玄武岩纤维作为复合纤维，研究了复合纤维掺量对混凝土基本力学以及阻裂性能的影响，优选出合适的复合纤维掺量，并考察了复合纤维混凝土作为加固材料对桥梁结构的加固效果。结果表明：合适掺量的复合纤维能够显著改善混凝土的基本力学性能和阻裂性能，推荐复合纤维的最佳掺量为 0.6%。复合纤维混凝土加固后的 T 梁在施加载荷过程中，载荷-挠度曲线的峰值显著增大，并且在相同的载荷和测试位置条件下，使用复合纤维混凝土加固后的 T 梁底部钢筋应变明显小于使用普通混凝土加固。复合纤维混凝土作为加固材料能够有效提高目标桥梁结构的抗弯拉性能和极限载荷，起到了良好的加固效果。

关键词：复合纤维；混凝土桥梁架构；力学性能；阻裂性能；加固性能

中图分类号：U445.72 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-8249（2026）05-0134-05

DOI：10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.020

The Influence of Composite Fiber Reinforced Concrete on the Reinforcement Effect of Bridge Structures

LI Xuejun

（Hunan Expressway Maintenance Engineering Co., Ltd., Changsha 410206, China）

Abstract: In order to enhance the reinforcement effect of bridge structures and extend their service life. The influence of composite fiber content on the basic mechanics and crack resistance of concrete was studied using copper plated steel fibers, polyvinyl alcohol fibers, and basalt fibers as composite fibers. The appropriate composite fiber content was selected, and the reinforcement effect of composite fiber concrete as a reinforcement material on bridge structures was investigated. The results show that the appropriate dosage of composite fibers can significantly improve the basic mechanical properties and crack resistance of concrete. The recommended optimal dosage of composite fibers is 0.6%. The peak value of the load deflection curve of the T-beam reinforced with composite fiber reinforced concrete significantly increases during the application of load, and under the same load and test position conditions, the strain of the steel bars at the bottom of the T-beam reinforced with composite fiber reinforced concrete is significantly lower than that reinforced with ordinary concrete. Composite fiber reinforced concrete as a reinforcement material can effectively improve the bending and tensile resistance and ultimate load capacity of the target bridge structure, playing a good reinforcement effect.

Key words: composite fibers; concrete bridge structure; mechanical properties; crack resistance performance; reinforcement performance

作者简介：李学军（1973—），男，本科，高级工程师，研究方向：高速公路工程养护施工。

收稿日期：2025-08-25

0　引言

我国从 90 年代后期开始对桥梁工程的建设投入不断增加，截止目前，我国新建成的公路和铁路桥梁合计达到了 50 万座以上，总里程达到了 6.5 万公里以上，并且我国的桥梁建设水平也已达到世界先进行列[1]。然而随着桥梁服役时间的不断延长，桥梁结构老化以及病害问题逐渐开始显现[2]。因此，需要针对桥梁结构老化问题开展高效的加固维护技术研究，以有效延长桥梁的使用寿命。

目前，国内外常用的混凝土桥梁结构加固方法主要包括外部预应力后张法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维板加固法、改变结构受力体系法、喷射混凝土加固法、置换混凝土加固法、增设纵梁加固法以及增大截面加固法等。但综合来看，不同类型的加固方法的具体效果均会受到加固材料以及加固层结构设计的影响[3-4]，新型加固材料的发展对桥梁结构加固技术的发展影响较大[5-6]。其中彭雪等[7] 以自制的纤维水泥基复合材料为基础，并结合碳纤维布对新旧混凝土结构开展了加固处理，结果表明纤维水泥基复合材料的综合性能较好，混凝土梁经过复合材料的加固处理后力学性能明显提升；王苓力等[8] 采用环氧树脂、聚硫橡胶和填料等作为原料制备出一种耐冻融型桥梁加固用新型胶黏剂，并评价了不同原料用量对胶黏剂性能的影响，结果表明新型胶黏剂的抗冻性能较强，冻融循环试验后强度降低率不大于 5%；谢群[9] 对碳纤维材料在混凝土桥梁加固中的应用开展了研究，分析介绍了碳纤维加固材料的特点，并开展了加固修补技术研究，结果表明碳纤维材料的力学性能较好，适合在桥梁加固工程中进行推广应用。可以看出纤维类材料在混凝土桥梁加固中的应用前景较好[10]，其中纤维增强混凝土与传统混凝土相比，通常具有抗弯拉强度高、韧性好、不易开裂以及耐久性能强的优点[11-12]。梁腾飞等[13] 开展了聚乙烯醇纤维（PVA）对混凝土加固性能的研究，结果表明 PVA 纤维的长度和掺量对混凝土力学性能的影响较大，合适掺量和长度的 PVA 纤维可在混凝土中充分分散包裹，可大幅提高混凝土的韧性；瞿溢文[14] 开展了 GRC 网格与聚丙烯纤维混凝土对混凝土结构的复合加固试验，评价了加固材料对混凝土圆柱轴压性能的影响，结果表明聚丙烯纤维的掺入可有效增大混凝土圆柱的抗压性能，GRC 网格和聚丙烯纤维均能有效提升混凝土的延性。

综合上述结果可知，近年来，纤维增强混凝土材料在桥梁结构建设方面的研究及应用相对较多，并且也取得了良好的应用效果，而将纤维增强混凝土作为加固材料应用于桥梁结构加固方面的研究则相对较少。将镀铜钢纤维、聚乙烯醇纤维和玄武岩纤维进行混合作为复合纤维，考察了复合纤维对混凝土基本力学性能、阻裂性能的影响，优选出合适的复合纤维掺量，并进一步研究了复合纤维混凝土对桥梁结构的加固效果，为桥梁结构加固技术的发展以及加固材料的研发提供一种新思路。

1　试验部分

1.1　主要试验材料及仪器

材料：P · O 42.5 普通硅酸盐水泥；超细粉煤灰；高性能聚羧酸减水剂；细度模数为 3.0 的细砂、连续级配为 5~25 mm 的碎石；复合纤维（使用镀铜钢纤维、聚乙烯醇纤维以及玄武岩纤维按照体积比为 1∶1∶1 的比例进行混合制备而成）；镀铜钢纤维；聚乙烯醇纤维；玄武岩纤维；HRB400E 系列热轧钢筋。

仪器：SUS 型万能试验机；EL-KKL 型混凝土抗裂性能测定试验装置；HP-PST 型应变测试系统；JLD-270 型混凝土抗弯拉性能测试试验装置。

1.2　混凝土配合比

选择砂率为 40%，水胶比为 0.3，复合纤维混凝土的配合比设计结果见表 1，其中复合纤维的掺量为体积百分数，减水剂的掺量为质量百分数。

表 1　复合纤维混凝土配合比设计结果

Table 1　Design results of composite fiber reinforced concrete mix proportion

编号	水	水泥	砂	碎石	粉煤灰	纤维掺量/%	减水剂掺量/%
	/ (kg/m^3)						
F0	120	340	710	1 065	60		1.2
F1	120	340	710	1 065	60	0.2	1.2
F2	120	340	710	1 065	60	0.4	1.2
F3	120	340	710	1 065	60	0.6	1.2
F4	120	340	710	1 065	60	0.8	1.2
F5	120	340	710	1 065	60	1.0	1.2

道桥技术

1.3 试验方法

1.3.1 基本力学性能试验

参照国标 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》中的相关要求，使用万能试验机对复合纤维混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度进行了测定，考察复合纤维掺量对混凝土基本力学性能的影响。

1.3.2 阻裂试验

参照国标 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的相关要求，以最大裂缝宽度和单位面积上的裂缝面积为评价指标，使用混凝土抗裂性能测定试验装置对复合纤维混凝土试件的阻裂性能进行了测定，考察复合纤维掺量对混凝土阻裂性能的影响。

1.3.3 加固 T 梁抗弯性能试验

结合桥梁工程施工的实际情况，采用反力架装置对 T 梁进行预压处理，采用逐级加载的静力加载方式对 T 梁进行抗弯性能评价试验。其中 1#为未加固前的 T 梁，2#和 3#分别为使用不同加固混凝土加固后的 T 梁具体情况见表 2。具体试验步骤为：设计试验用 T 梁未加固前的高度均为 400 mm，截面翼缘宽度均为 500 mm，高度均为 150 mm，腹板宽度均为 150 mm，高度均为 260 mm；另外，T 梁底部加固部分均采用“U”形套设计。按照上述试件设计在试验场地进行试件制作，浇注 T 梁，并养护 28 d，预裂处理后对受损梁进行加固处理。采用四点对称加载的方式对试验用 T 梁进行施加载荷，预加载阶段加载速度均设置为 10 kN/min，载荷达到 30 kN 时持荷 15 min。正式抗弯性能测试阶段加载方式分两个阶段，第一阶段（当 T 梁未出现裂缝时）加载速度设置为 10 kN/min，并且每级载荷均持荷 5 min，第二阶段（T 梁出现裂缝后）加载速度同样设置为 10 kN/min，每增加 20 kN 时持荷 10 min。持续施加载荷直至达到 T 梁被破坏，记录并计算上述试验期间不同载荷条件下的挠度及钢筋应变数据。

表 2 试验用 T 梁基本情况

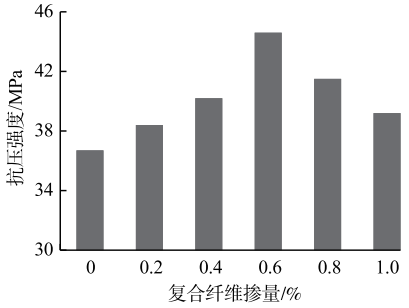
Table 2 Basic information of T-beams used in experiments

T 梁编号	加固用混凝土编号	加固层厚度/mm	钢筋类型	预加荷载
2#	F0	80	5×HRB400E	0.2Pu
3#	F3	80	5×HRB400E	0.2Pu

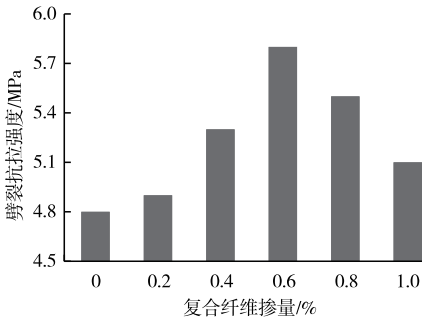
2 结果与讨论

2.1 基本力学性能试验结果

由图 1 可知，随着混凝土中复合纤维掺量的逐渐增大，混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度均呈现出“先升高后降低”的趋势。当未掺入复合纤维时，混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度分别为 36.7、4.8 MPa，而加入 0.6%的复合纤维时，混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度值均可以增大至最大，分别为 44.6、5.8 MPa，与未加入复合纤维的空白混凝土相比，抗压强度和劈裂抗拉强度值均显著提升。而当复合纤维的掺量增大至 0.8%和 1.0%时，混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度则呈现出逐渐降低的趋势。这是由于过多的复合纤维可能导致混凝土内部结构出现缺陷的概率增大，纤维团聚、分散不均匀以及气泡等现象均可能使混凝土的力学性能有所恶化。因此，从复合纤维掺入时对混凝土基本力学性能的影响考虑，推荐复合纤维在混凝土中的最佳掺量为 0.6%。



（a）抗压强度



（b）劈裂抗拉强度

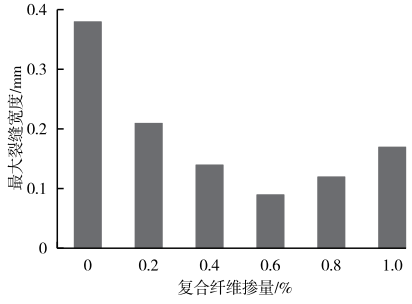
图 1 不同复合纤维掺量混凝土强度

Fig. 1 Strength of concrete with different composite fiber contents

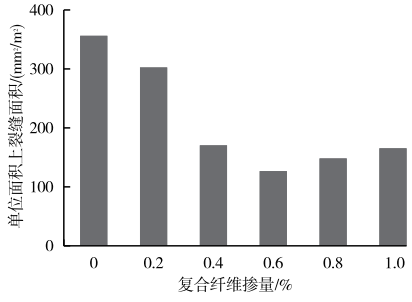
2.2 阻裂性能试验结果

由图 2 可知，随着混凝土中复合纤维掺量的逐渐

增大，混凝土试件的最大裂缝宽度和单位面积上裂缝面积均呈现出“先减小后增大”的趋势。当未掺入复合纤维时，混凝土的最大裂缝宽度和单位面积上裂缝面积分别为0.38 mm 和356.2 mm^2/m^2，阻裂性能相对较差。而当复合纤维的掺量增大至0.6%时，混凝土的最大裂缝宽度和单位面积上裂缝面积则分别可以减小至0.09 mm 和126.7 mm^2/m^2，与未掺入复合纤维的空白混凝土相比，混凝土的最大裂缝宽度和单位面积上裂缝面积均显著下降。而当复合纤维的掺量增大至0.8%和1.0%时，混凝土的最大裂缝宽度和单位面积上裂缝面积则又呈现出逐渐增大的趋势。这说明复合纤维的掺入能够明显改善混凝土的阻裂性能，但当其掺入量较大时，阻裂性能的改善效果则会有所下降。这是由于合适掺量的复合纤维能够有效填充混凝土的内部孔隙，降低混凝土表面的开裂概率，而当复合纤维的掺入量过大时，混凝土内部结构变得不稳定，反而会对其阻裂性能产生不利影响。因此，从复合纤维掺入时对混凝土阻裂性能的影响考虑，同样推荐复合纤维在混凝土中的最佳掺量为0.6%。



（a）最大裂缝宽度



（b）单位面积上裂缝面积

图2　不同复合纤维掺量混凝土裂缝情况

Fig. 2　Cracking behavior of concrete with different composite fiber contents

2.3　加固T梁抗弯性能试验结果

2.3.1　载荷–挠度试验结果

由图3可知，随着加载载荷的不断变化，不同试验用T梁的载荷–挠度曲线均呈现出“先迅速上升，然后逐渐趋于平稳，最后逐渐降低”的趋势。在试验初期阶段，试验用T梁的载荷与挠度呈现出正相关的关系；而随着试验载荷的不断变大，T梁底部的钢筋逐渐屈服，挠度逐渐增大，曲线的斜率逐渐变小；当试验进行到末期阶段时，T梁底部的钢筋已经基本完全屈服，而顶部的混凝土加固结构也基本被压碎，导致顶部的载荷不断变小。

未经过加固的T梁（1#梁）的载荷–挠度曲线峰值最小，使用未添加复合纤维的混凝土加固后的T梁（2#梁）的载荷–挠度曲线峰值明显增大，而使用添加0.6%复合纤维的混凝土加固后的T梁（3#梁）的载荷–挠度曲线峰值则可以达到最大。这说明采用复合纤维混凝土对目标桥梁结构进行加固能够取得良好的加固效果，明显增大其抗弯性能和抗拉性能。这是由于复合纤维混凝土中的不同类型纤维能够发挥良好的协同增效作用，有效填充在混凝土加固层内部，降低了混凝土中微裂缝出现的数量，从而有助于提高加固层的强度，增强其对桥梁结构的加固效果。

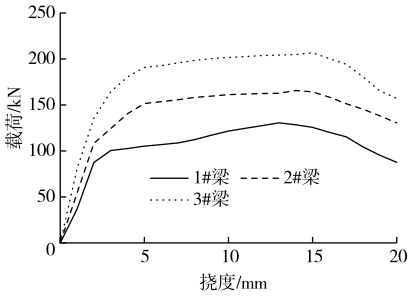


图3　不同试验T梁的载荷–挠度曲线

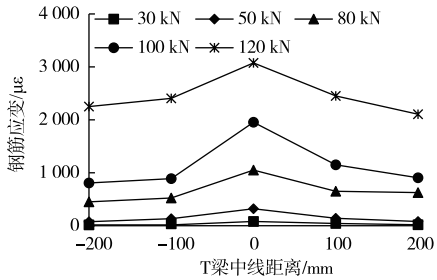
Fig. 3　Load deflection curves of different experimental T–beams

2.3.2　载荷–应变试验结果

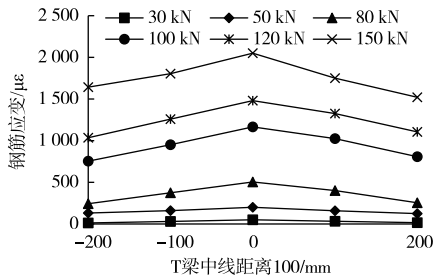
由图4可知，使用不同类型混凝土对目标桥梁结构进行加固时，随着加载载荷的不断增大，试验梁底部钢筋的应变均呈现出不断增大的趋势，并且距离T梁中线的距离越大，钢筋的应变相对就越小。另外，在相同的载荷和相同的T梁中线距离条件下，使用加入0.6%复合纤维的混凝土作为加固层的T梁（3#梁）底部钢筋应变均明显小于未添加复合纤维的混凝土加固层T梁（2#梁），并且当载荷达到120 kN时，

道桥技术

2#梁的底部钢筋不同位置的应变均已超过 2 000 με，而 3#梁的底部钢筋不同位置的应变均在 1 500 με 以下。这说明使用加入 0.6%复合纤维的混凝土作为加固层的桥梁结构具有更强的抗弯拉性能和更高的极限载荷，加固效果更好。这是由于加入复合纤维的混凝土加固层在施加载荷的过程中能够承受更多的拉应力，从而可以分担一部分底部钢筋的应力，使桥梁结构的整体抗弯拉性能有所提升，起到较好的加固效果。



（a）2#梁



（b）3#梁

图 4 梁底部钢筋在不同载荷条件下的应变曲线

Fig. 4 Strain curves of reinforcement at beam bottom under different load conditions

3 结论

通过评价复合纤维掺量对混凝土基本力学性能和阻裂性能的影响，优选出合适的复合纤维掺量，并进一步评价了未掺复合纤维混凝土以及掺入复合纤维混凝土对桥梁结构加固效果的影响，得出主要结论如下：

（1）复合纤维的掺入能够显著提升桥梁结构加固用混凝土的基本力学性能，当复合纤维的掺量为 0.6%时，混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度均可以达到最大。

（2）复合纤维的掺入能够显著提升桥梁结构加固用混凝土的阻裂性能，当复合纤维的掺量为 0.6%时，混凝土的最大裂缝宽度和单位面积上的裂缝面积均可以达到最小。

（3）使用添加复合纤维的混凝土作为加固层对 T 梁进行加固后，其载荷-挠度曲线峰值明显增大；并且在相同的加载载荷条件下，复合纤维混凝土加固后的 T 梁底部钢筋应变明显减小，抗弯拉性能和极限载荷明显提升，加固效果较好。

（4）复合纤维混凝土作为加固层能够显著提升目标桥梁结构的抗弯拉性能，推荐混凝土中复合纤维的最佳掺量为 0.6%，能够满足目标桥梁结构加固施工的需求。

参 考 文 献

[1] 郑其华，薛齐. 大跨度公路桥梁桩基极限承载力预测方法[J]. 粉煤灰综合利用，2025，39（2）：160-163.

[2] 胡志刚. 探析公路桥梁路段的养护和管理措施[J]. 黑龙江交通科技，2020，43（3）：105-106.

[3] 陶滔. 超高性能纤维混凝土在公路桥梁加固中的应用[J]. 广东建材，2024，40（5）：23-26.

[4] 项沛，崔力宁，杨彤. 基于桥梁改造的新旧混凝土结构植筋加固粘接技术研究[J]. 粘接，2023，50（11）：98-101.

[5] 刘驰，俞晓东. 一种新型混凝土加固桥梁施工技术研究[J]. 黑龙江交通科技，2020，43（11）：74-75.

[6] 杜永刚. 硅基聚氨酯复合材料在桥梁加固工程中的应用[J]. 合成材料老化与应用，2022，51（4）：165-166，129.

[7] 彭雪，郑栋栋. 基于桥梁改造的新旧混凝土结构粘接加固复材改性研究[J]. 粘接，2024，51（7）：17-20.

[8] 王苓力，宋承哲，孔靖勋，等. 聚硫橡胶和填料对耐冻融型桥梁加固用胶粘剂性能的影响[J]. 中国胶粘剂，2024，33（7）：53-58.

[9] 谢群. 桥梁加固中碳纤维材料的应用[J]. 合成材料老化与应用，2021，50（6）：159-161.

[10] 李建霞. 公路危旧桥梁碳纤维加固技术[J]. 黑龙江交通科技，2023，46（7）：95-97.

[11] 辛芳. 纤维增强水泥基复合材料加固梁柱节点抗压性能分析[J]. 粉煤灰综合利用，2025，39（1）：45-48，104.

[12] 高汉操. 低收缩高韧性混杂纤维增强桥面铺装混凝土性能研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2023.

[13] 梁腾飞，杨瑞娟，赵伟. 聚乙烯醇纤维混凝土抗压力学性能及加固机理研究[J]. 高科技纤维与应用，2021，46（5）：47-51.

[14] 瞿溢文. 纤维增强自密实轻质混凝土与 BFRP 筋加固 T 梁抗弯性能研究[D]. 长沙：中南大学，2023.