DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260540

基于病害机理的桥梁加固技术研究及案例分析

王　淼
[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 20092]

摘　要: 公路桥梁作为交通基础设施的核心载体,受荷载累积、环境侵蚀、材料老化及交通量增长等因素影响,易出现裂缝、刚度衰减、承载能力不足等病害,直接影响路网通行安全与服役寿命。为解决既有桥梁病害问题,提升结构可靠性与耐久性,聚焦桥梁加固关键技术及工程实践。从桥梁上部结构、下部结构出发,系统介绍了桥梁加固的方法,总结其加固机理、特点和注意事项。综述了粘贴钢板、外包混凝土、纤维复合材料加固、预应力加固等主流加固技术的作用机理、技术特点,并结合典型工程实例,针对性选用加固技术。研究成果可为同类桥梁加固工程的设计优化提供技术参考,对推动加固技术工程化应用、保障既有桥梁服役安全具有重要意义。

关键词: 公路桥梁;桥梁病害;加固技术;加固机理;工程应用
中图分类号: U445.6;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0220-05

Research and Case Analysis of Bridge Reinforcement Technology Based on Disease Mechanism

WANG Miao
[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: As the core carriers of transportation infrastructure, highway bridges are prone to diseases such as cracks, stiffness attenuation and insufficient load-bearing capacity due to factors like load accumulation, environmental erosion, material aging and traffic volume growth, which directly affect the traffic safety and service life of the road network. To address existing bridge distresses and enhance structural reliability and durability, the focus is on key reinforcement techniques and engineering practices of bridges. Proceeding from both the superstructure and substructure of the bridge, the reinforcement methods for bridges are systematically introduced, and the reinforcement mechanisms, characteristics and precautions of the bridge are summarized. The working mechanisms and technical features of mainstream reinforcement techniques such as steel plate bonding, concrete cladding, fiber composite material reinforcement and prestressed reinforcement are reviewed. And combined with the typical engineering examples, the targeted reinforcement technologies should be selected. The findings can provide technical references for the design optimization of similar bridge reinforcement projects and are of great significance for promoting the engineering application of reinforcement techniques and ensuring the service safety of existing bridges.

Keywords: highway bridges; bridge distresses; reinforcement techniques; reinforcement mechanisms; engineering applications

0　引　言

公路桥梁作为国家综合交通运输体系的核心枢纽,是保障路网贯通、支撑区域经济发展的关键基础设施。在其长期服役过程中,受车辆荷载冲击、各种介质侵蚀、建筑材料老化等因素叠加影响,路桥易出现裂缝[1]、刚度衰减[2]、承载能力下降等问题,不仅严重威胁路网通行安全,还会大幅缩短桥梁服役寿命[3]。在此背景下,开展桥梁加固关键技术及工程实践研究,对治理既有桥梁病害、提升结构可靠性与耐久性具有重要现实意义。本文基于桥梁常见病害,梳理了粘贴钢板[4]、外包混凝土、纤维增强复合材料[5-6]加固等主流技术的作用机理与技术特点[7],并结合工程实例针对性地选用加固方案,旨在为同类桥梁加固工程的设计提供技术支撑,推动桥梁加固技术的工程应用,保障既有桥梁的安全长效服役。

收稿日期: 2026-05-13
作者简介: 王淼(1977—),男,博士,高级工程师,从事城市轨道交通结构设计。

1　桥梁病害机理

桥梁典型病害包括混凝土裂缝、墩台基础破

坏、钢筋锈蚀及铺装层损坏等。它们相互关联、不同程度影响桥梁的状态。这些病害共同构成一个从表及里、逐渐发展的损害体系，各种病害详见表1。

表1　桥梁典型病害

类型	特征	成因	危害
混凝土裂缝	纵向、横向、斜向及网状裂缝	荷载因素：车辆超载与重载交通反复作用非荷载因素：材料收缩、温度应力[8]、施工缺陷、环境侵蚀	破坏混凝土整体性与密实性，为有害物质提供渗透通道，诱发钢筋锈蚀与混凝土劣化，削弱承载能力与耐久性；长期发展将降低结构刚度、增大变形，严重时导致梁体断裂，危害行车安全
墩台基础破坏	表层混凝土开裂、剥落、蜂窝麻面，基础不均匀沉降、倾斜，以及基础冲刷、淘空	地基承载力不足、土层不均匀等地质条件；混凝土浇筑不密实[9]、钢筋保护层不足等施工质量缺陷；车辆超载导致的过大荷载	引发上部结构附加应力，导致梁体裂缝、桥面损坏等问题；墩台倾斜破坏受力平衡；基础冲刷淘空大幅降低承载力，严重时可致墩台失稳、倾斜甚至倒塌，造成毁灭性破坏及重大安全风险
钢筋锈蚀	钢筋锈蚀膨胀及表面生锈，致使外部混凝土保护层产生裂缝并发生脱落	内因：主要为混凝土保护层厚度不够、密实性差外因：氯离子、二氧化碳、水分及氧气在环境中的联合作用，形成电化学腐蚀。	导致钢筋有效截面面积减小，力学性能降低，进而削弱结构的承载能力；锈胀应力加剧混凝土开裂，破坏钢筋-混凝土粘结，损害结构整体性与耐久性；诱发失稳，缩短服役寿命，增加维护成本
桥梁铺装层损坏	坑槽、松散、剥落及推移等形式	设计阶段：铺装厚度不足、材料不当、未充分考虑结构变形施工阶段：层间粘结不良、压实度与平整度不足使用阶段：车辆重复荷载[10]、水分渗透、温度应力及冻融循环的耦合作用	降低行车舒适性与通行效率；一方面造成荷载集中，加速桥面板的疲劳损伤进程；另一方面，有害介质的渗入会诱发内部钢筋锈蚀及混凝土材质劣化；严重坑槽可直接导致爆胎、车辆失控等安全事故，威胁运营安全
结构长期下挠与变形	主梁跨中挠度随时间持续、不可逆地增大，常伴随梁体腹板、底板出现新增裂缝或原有裂缝扩展；结构线形显著改变	材料时变效应：混凝土长期徐变与收缩预应力损失：预应力筋松弛[11-12]、管道摩阻、锚具变形及钢筋锈蚀导致的预应力效能下降长期荷载：长期超载或重载交通的累积效应	改变设计线形，影响行车平顺性与视觉美观，可能导致桥面积水；过大的下挠会改变结构受力状态，诱发或加剧其他裂缝，严重时影响结构稳定性和安全性，且修复极为困难

2　桥梁加固技术

针对既有桥梁的结构性能退化问题，表2系统梳理了6种常用加固修复技术。这些方法依据其作用机理可分为3类：以化学灌浆为代表的修复性技术，旨在恢复结构整体性与耐久性；以粘贴钢板、纤维复合材料为代表的增强性技术，通过外贴高强材料提升构件承载能力；以体外预应力、外包混凝土和桥面补强层为代表的主动加固或截面增大技术，用于大幅改善结构体系受力性能与刚度。各类技术具有明确的优势与适用场景，基于病害性质、结构体系、性能提升目标及施工条件等可进行综合比选。

表2　加固技术

类型	机理	优势	适用场景
化学灌浆修补法[13]	将低黏度、高渗透性化学浆液在压力下注入缺陷内部，通过渗透、填充与固化，恢复结构的整体性与连续性[14]	施工灵活、对结构扰动小	处理非结构性裂缝、接缝渗漏及混凝土内部疏松等病害，旨在恢复耐久性与抗渗性
体外预应力加固法[15-16]	对结构主动施加体外预应力，产生反拱效应以抵消部分既有荷载效应，改善内力分布，提升刚度并抑制裂缝	加固效率高、应力滞后效应小、可不中断交通施工、预应力筋可检测与更换	因荷载提高、材料老化或损伤导致抗弯承载力不足的中大跨径梁桥与刚构桥的加固[17]
外包混凝土加固法	于原构件外侧浇筑新增钢筋混凝土，借助新旧混凝土之间的协同受力，使结构承载能力与刚度获得显著提高	耐火与耐久性较好、传力路径直接、可靠性高	桥墩、拱圈、梁体等承重构件因截面尺寸不足或混凝土强度劣化导致的承载力严重下降
纤维复合材料加固法	利用结构胶将高强纤维布粘贴于构件表面，通过有效界面粘结传递应力，使纤维材料分担荷载，提升构件力学性能[18]	具有强度高、自重轻、耐腐蚀性强、施工操作便利等特点，几乎不额外增加构件截面尺寸及结构自重	梁板抗弯抗剪加固、墩柱抗震延性增强、裂缝控制等需高效、耐久加固的场景[19]
桥面补强层加固法	在既有桥面板上浇筑新混凝土层，通过可靠界面结合形成复合截面，增大有效高度与抗弯惯性矩，改善荷载分布与应力状态	显著提升了桥面的平整程度以及车辆行驶的舒适性	因设计标准偏低、铺装层损坏或梁体刚度不足导致的桥面板及主梁承载力不足

注：续表2加固技术

3　典型案例分析

3.1　白银市建设北路立交桥加固

3.1.1　立交桥现状病害

白银市建设北路立交桥为现有S217线景泰至白银公路白银市进城段上跨铁路立交桥，与建设路相交。该桥1994年修建，结构形式为曲线连续梁，Y形

柱式桥墩。桥面全宽10.5 m，连续梁跨度为20 m，主跨为预应力钢筋混凝土T形梁，桥两侧设置0.8 m钢护栏。

该桥目前存在以下病害：行车道桥面网裂严重、有坑槽，伸缩缝鼓胀、不平顺；桥头沉降、路面有车辙，桥面有横向贯穿裂缝；钢筋混凝土板梁和T梁裂缝较为发育，底部主筋位置存在横向裂缝；桥墩、梁体表面粗糙，凹凸不平。桥梁病害情况如图1所示。

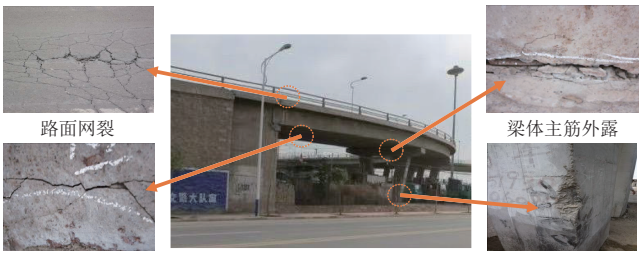


图1　白银立交桥病害

3.1.2　加固设计方案

本次加固改造的设计目标如下：该桥梁原始设计所采用的荷载标准为汽车-20级、挂车-100级，根据当前的车辆通行情况，该桥承载力明显不足，梁体已有不同程度的损伤，该桥加固后确保承载能力满足目前公路-Ⅱ级荷载等级要求，路面平顺，并且外形美观。

（1）T梁预应力加固

根据《公路工程技术标准》（JTG B01—2014），桥梁标准横断面为12 m+2×1.5 m，T梁断面如图2所示。

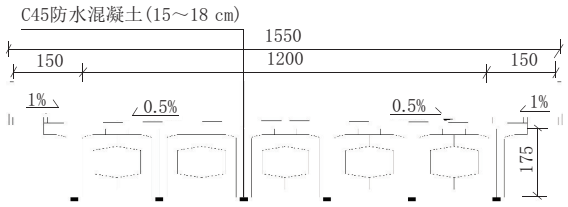


图2　T梁断面图

在T梁常用加固方法中，粘贴钢板法需增设防护层以防止钢板锈蚀，长期耐久性欠佳，维护成本可控性较低。同时，该方法依赖螺栓锚固，会对原结构造成损伤，考虑到实际加固过程必须通车，难以实现在理想恒载状态下施工，影响加固效能。粘贴碳纤维布法同样对施工荷载状态较为敏感，在实际半幅通车工况下加固效果易打折扣。相较而言，体外预应力加固能在不显著增加自重的前提下，有效提升主梁刚度与承载力，且便于在维持通车的条件下实施。综合考虑，采用体外预应力加固法。

按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362—2018）及《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T 5431—2025）的规定，完成加固设计荷载的计算。由于需要提高的承载力比较大，考虑体外预应力加固的优越性[20]，加固方案比选仅从需要增设的体外预应力钢筋的根数来进行。加固比选表见表3。

表3　体外预应力加固比选表

体外预应力束/束	张拉控制应力	加固后承载力/（kN·m）	安全系数
2	65%	5 220.0	-1.58%
4	65%	5 814.8	9.63%
6	65%	6 410.0	20.85%
梁的既有承载能力/（kN·m）		4 776.9	
公路-Ⅱ级荷载弯矩组合设计值/（kN·m）		5 304.0	

通过比较加固后梁的承载力安全系数，可以看出，每片T梁纵向采取4根体外预应力筋进行加固比较合适，并增加横向预应力筋，增强梁体的整体性。加固工艺如下：成孔→安装锚固板→安装定位箍筋与穿束→张拉与锚固→防护处理。

（2）板梁碳纤维布加固

板梁在浇筑时保护层厚度过小，导致部分地方主筋外露，且浇筑后表面并未处理，表面粗糙，需对其进行打磨处理。为抑制裂缝的持续扩展，先对既有裂缝实施注浆处理，随后在梁底沿纵、横双向粘贴碳纤维布。该加固工艺的主要流程依次为：施工准备及结构卸荷→混凝土基面处理→局部找平与整平→底胶涂刷→碳纤维布铺设→浸渍胶的涂刷与防护层施工→养护作业→表层涂装。

施工过程中应尽可能卸除构件荷载；对混凝土基面进行裂缝封闭、破损修复、打磨圆角（R≥30 mm）及清洁干燥处理；使用整平胶填补凹陷并处理转角（R≥10 mm）；均匀涂刷底胶并打磨平整；按设计裁剪碳纤维布，在涂刷粘贴胶后分层粘贴、滚压除泡；依次涂刷浸渍胶与防护胶；最后进行不少于1～2周的养护，全部工序完成后进行表面涂装。

（3）桥面加固

原桥面整体性较差，容易产生纵向裂缝，且存在漏水现象。本次加固设计拆除原桥面铺装层，浇筑C45防水钢筋混凝土桥面，每隔8 m做宽5 mm、深3 cm的夹缝。加固工艺如下：铲除桥面沥青及混凝土桥面铺装→植筋→安装钢筋网→调整钢筋→浇筑混凝土→养护→完工验收。

（4）桥墩加固

由于桥下有大型货车停留，且桥墩表面粗糙。因此，对桥墩表面进行打磨处理，并且涂刷外墙涂料，桥墩底部周围设置防撞栏。加固工艺如下：基面处理→局部找平→裂缝封闭→表面涂装。首先对混凝土表面进行打磨，去除浮浆与污染物，用湿布或喷水清洗干净；随后采用整平胶对较大坑洼进行填补找平；接着沿裂缝涂刷专用胶黏剂以封闭表面细微裂缝；待指触干燥后，最终涂刷外墙涂料以提升耐久性与外观效果。

3.2　临江河桥加固

3.2.1　临江河桥现状病害

临江河桥位于 G212 线，桥梁中心桩号 K336+216。该桥于 2010 年修建，桥长为 106.1 m，主跨为五跨钢筋混凝土空心板梁，跨径为 20 m，桥面全宽 9.5 m，基础形式为双柱式墩基础及扩大基础，设计荷载为公路-Ⅱ级。根据现场调查，该桥梁板底有裂缝，桥体的钢筋保护层厚度不足，个别部位出现主筋外露的现象，同时 3、4 号桥墩冲刷严重。桥梁病害情况如图 3 所示。



图 3　临江河桥病害

3.2.2　加固设计方案

加固改造设计目标：该桥原设计荷载为公路-Ⅱ级，根据目前的车辆通行情况和桥梁养护部门提供的调查资料以及今后通行车辆的要求，该桥部分地方产生裂缝且由于桥体钢筋保护层厚度不足，个别部位出现主筋外露现象。因此，需要维修加固，加固后需满足以下基本要求：第一，确保桥梁加固后能够提高结构的耐久性；第二，为满足梁体耐久性和美观的要求，对已出现的主要裂缝进行修补，在梁底粘贴碳纤维布，防止钢筋锈蚀，提高梁体承载力；第三，3、4 号桥墩进行钢筋混凝土外包，提高双柱式桥墩整体性。

（1）WS 裂缝封闭胶防腐处理修补

为满足梁体耐久性和美观的要求，使用封闭罩面 WS 胶对梁体未粘贴碳纤维布底面和梁体侧面进行封闭处理。加固工艺如下：对混凝土表面进行打磨、清洗→用胶-水泥膏体对坑洼进行找平→依次涂刷底层涂料（WS∶水泥=1∶1）、主层涂料（WS∶水泥=1∶1.2）及罩面纯胶涂料。

需将 WS 浓缩液按 1∶4 稀释并添加消泡剂配制成工作胶液，可与 42.5 级水泥按比例拌制成涂料；各层涂刷须保证指触干燥后再进行下一道工序，且涂刷间隔宜大于 0.5 h。该工艺主要用于封闭混凝土表面细微裂缝，提升结构耐久性与外观[21]。

（2）3、4 号桥墩外包钢筋混凝土加固

为增强 3、4 号桥墩的抗水流冲刷能力，在其外侧外包一层 20 cm 厚的钢筋混凝土；同时于迎水面设置钢筋笼抛石，以削弱水流冲击作用。具体施工流程为：基面处理及植筋→钢筋绑扎与模板安装→混凝土浇筑及养护。

对指定桥墩表面进行凿毛、清洁及植筋，以形成可靠界面与连接；按设计图纸完成钢筋的绑扎与定位，并支立模板；浇筑 20 cm 厚的外包混凝土层，并进行养护。该方法通过扩大构件截面尺寸，显著增强了桥墩的承载力及耐久性能。

（3）粘贴碳纤维布

原桥钢筋保护层厚度不足，个别部位钢筋外露，且桥体多处出现裂缝，会降低混凝土结构的耐久性，严重影响桥梁的使用寿命。因此，在梁底垂直于纵向裂缝方向局部粘贴碳纤维布，以防止裂缝的进一步扩展，并对外侧保护层厚度做了增量处理。加固工艺顺序如下：准备与卸荷→基面处理→底胶涂刷→找平表面→粘贴碳纤维布（同时浸渍胶）→二次浸渍胶涂刷→养护。

施工过程中应尽可能卸除构件荷载；对混凝土基面进行破损修补、打磨至棱角圆顺（R≥30 mm）并清洗干净；均匀涂刷底胶（厚度≤0.1 mm）；使用修补胶对凹陷及高差部位找平；在粘贴区域涂布浸渍胶，依据设计尺寸对碳纤维布进行裁剪与粘贴，保证搭接质量，滚压至密实；粘贴后再次涂刷浸渍胶以充分填充覆盖；最后进行不少于 1 周的封闭养护。

3.3　许家河桥加固

3.3.1　许家河桥现状病害

许家河桥位于 S205 线，桥梁中心桩号 K32+485。该桥于 2001 年修建完成，结构形式为简支钢筋混凝土 T 梁桥。桥梁全宽 12 m，桥长为 34 m，主跨为钢筋混凝土 T 型梁，跨径为 20 m。根据现场调查，该桥梁端上下游边板各有 4 条斜裂缝，梁底局部出现小裂缝。桥梁病害情况如图 4 所示。



图4　许家河桥病害

3.3.2　加固设计方案

加固改造设计目标：根据目前的车辆通行情况和桥梁养护部门提供的调查资料以及今后通行车辆的要求，结合现场病害调查，该桥梁需要进行维修加固，加固后需满足以下要求：第一，确保加固后桥梁结构的耐久性得到提高；第二，达到抑制裂缝发展、混凝土腐蚀及钢筋锈蚀的目的。

（1）粘贴钢板、钢条加固

T梁腹板侧面端部有斜裂缝产生，表明T梁端部区域抵抗剪切破坏的能力欠缺。因此，对T梁腹板侧面端支点至1/4跨处粘贴钢条，为满足当前及后续车辆通行需要，对横隔梁采用粘贴钢条法加固。加固工艺顺序：清理混凝土表面→处理混凝土粘合面→处理钢板粘合面→T梁腹板侧面打孔→钢板上对应打孔→将螺栓放入梁体钻孔→涂胶并安装钢板→完成钢板表面防腐。

对混凝土粘合面进行打磨、斩毛并清洁干净，直至露出坚实新层；对钢板粘合面做除锈、糙化处理，并涂刷一道防锈底漆。随后，依据探测的钢筋位置在梁体精准钻孔、清孔，并在钢板上配套钻孔，植入高强螺栓。安装时，将粘钢胶以中部厚约3 mm的梯度涂抹于钢板，对准锚栓就位后迅速拧紧锚栓，使胶体均匀渗出，并通过敲击检查密实度。最后，对钢板外露表面实施三层防腐涂层处理（环氧富锌底漆、环氧云铁中间漆、聚氨酯面漆），以确保持久防护。该工艺通过胶粘与机械锚固双重作用，实现钢板与混凝土的协同受力，有效提升构件承载能力。

（2）碳纤维布加固

为抑制裂缝扩展、防止混凝土腐蚀及钢筋锈蚀，并增加保护层厚度，对T梁腹板底面顺桥向粘贴碳纤维布。本次设计采用的碳纤维布应为连续纤维，其力学性能应满足下列要求：

a. 碳纤维应选用不大于12K（1K=1 000）的小丝束聚丙烯腈基（PAN基纤维），不得使用大丝束纤维。

b. 碳纤维材料的主要力学性能指标满足《公路桥梁加固设计规范》（JTG/T 5431—2025）的相关技术要求，详见表4规定。

表4　桥梁加固用碳纤维材料主要力学性能指标

项目	抗拉强度标准值/MPa	弹性模量/MPa	伸长率/%	弯曲强度/MPa	碳纤维与混凝土正拉黏结强度/MPa	层间剪切强度/MPa
碳纤维布	≥3 400	≥2.4×105	≥1.7	≥700	≥2.5且为混凝土内聚破坏	≥45

在实施加固作业之前，对结构进行最大程度的卸荷，以最大限度降低碳纤维粘贴施工过程中构件所承担的荷载。具体操作流程依次为：混凝土基底处理→底胶涂布→修补胶找平→首遍浸渍胶涂刷→铺贴碳纤维布→第二遍浸渍胶涂刷→养护→验收。

4　结　语

本文系统梳理了桥梁典型病害及其成因，并重点探讨了适用于不同损伤场景下的桥梁加固关键技术及其工程应用。研究表明，针对裂缝、钢筋锈蚀、铺装层损坏及墩台基础破坏等病害，需基于详细的检测评估，所选加固方案应充分体现针对性、协同性与耐久性的核心要求。粘贴钢板、体外预应力、外包混凝土及纤维复合材料加固等主流技术，分别通过补强受拉区、主动调整内力、增大截面尺寸和利用高强复合材料等方式，显著增强了构件的承载能力、抗变形刚度及长期使用性能，加固效果明显，目前所加固桥梁均已正常服役。工程实例分析进一步表明，加固方案的成功实施取决于对原结构损伤模式的精确诊断、加固机理的深入理解以及施工工艺的严格控制。本研究理论结合实践，为既有桥梁的加固设计提供了技术参考与案例支持，推动桥梁加固技术向更精细化和可持续化的方向发展。

参考文献：

[1] 黄金生，姚波，何超，等.环氧沥青钢桥面铺装早期裂缝病害形态分析[J].公路，2024，69（6）：1-11.

[2] 刘维正，郜凤龙，闫宏业，等.湿化作用下路基刚度衰减规律及其对无砟轨道结构变形的影响[J].铁道学报，2025，47（10）：134-145.

[3] 周逸宇.公路桥梁养护管理与危桥加固改造技术的研究[J].工程建设与设计，2025（12）：160-162.

[4] 吴昊天.公路桥梁裂缝检测与养护加固技术研究[J].科技与创新，2025（16）：147-150.

[5] 王佳，徐颖，杨荣周，等.碳纤维布约束下水泥砂浆动态力学及能

（下转第235页）