

# 桥梁桩基抗冲刷加固钢套筒与玻纤套筒方案的技术和经济性对比研究

刘海宽<sup>1,2\*</sup>, 宋粉丽<sup>2</sup>, 于品德<sup>2</sup>

<sup>1</sup>郑州大学土木工程学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2025年7月7日; 录用日期: 2025年7月27日; 发布日期: 2025年8月11日

## 摘要

桥梁桩基作为承载的关键部件, 其冲刷病害直接威胁桥梁安全与耐久性。本文以某公路桥梁桩基冲刷加固工程为研究对象, 针对桩身外露、钢筋锈蚀等病害, 制定水下玻纤套筒与钢套筒两种加固方案, 从技术性能、施工工艺、耐久性、经济性等方面开展对比分析。研究表明: 水下玻纤套筒加固法通过3 mm厚玻纤套筒与水下环氧灌浆料形成的复合加固体系具有明显优势, 较钢套筒方案节约29.23%的直接工程费; 因其耐腐蚀性优异且无需防腐维护, 全生命周期成本较钢套筒方案低47.13%。但玻纤套筒的抗冲击性能相对较弱, 在有漂浮物撞击或砂石水流冲刷的场景中应用存在局限。研究成果为同类桩基冲刷加固工程提供了技术参考。

## 关键词

桥梁桩基, 冲刷病害, 玻纤套筒, 钢套筒, 加固方案, 技术和经济性

# Comparative Study on Technical and Economic Performance of Glass Fiber Sleeve and Steel Sleeve Schemes for Anti-Scour Reinforcement of Bridge Pile Foundations

Haikuan Liu<sup>1,2\*</sup>, Fenli Song<sup>2</sup>, Pinde Yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>Henan Transportation Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou Henan

Received: Jul. 7<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 27<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 11<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 刘海宽, 宋粉丽, 于品德. 桥梁桩基抗冲刷加固钢套筒与玻纤套筒方案的技术和经济性对比研究[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 1840-1849. DOI: 10.12677/hjce.2025.148200

## Abstract

As a key component of bridge bearing system, the scour damage of bridge pile foundations directly threatens the safety and durability of bridges. Taking the scour reinforcement project of a highway bridge pile foundation as the research object, this paper formulates two reinforcement schemes of underwater glass fiber sleeve and steel sleeve for diseases such as pile exposure and steel corrosion, and carries out a comparative analysis from the aspects of technical performance, construction technology, durability and economy. The study shows that the composite reinforcement system formed by the 3 mm-thick glass fiber sleeve and underwater epoxy grouting material has obvious advantages: it saves 29.23% of the direct engineering cost compared with the steel sleeve scheme; due to its excellent corrosion resistance and no need for anti-corrosion maintenance, the life cycle cost is 47.13% lower than that of the steel sleeve scheme. However, the glass fiber sleeve has relatively weak impact resistance, which limits its application in scenarios with floating objects impact or sand-water flow scouring. The research results provide technical reference for similar pile foundation scour reinforcement projects.

## Keywords

Bridge Pile Foundation, Scour Damage, Glass Fiber Sleeve, Steel Sleeve, Reinforcement Scheme, Technical and Economic Performance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

桥梁基础作为承载上部结构荷载并传递至地基的关键结构，其安全性与耐久性直接关系桥梁整体运营安全。与一般建筑基础相比，桥梁桩基不仅承受更大的上部荷载，还长期受河床冲刷、河道变迁等环境作用影响，因此通常需采用深基础形式。桩基础因具有结构轻、施工机械化程度高、进度快等优势，成为桥梁深基础的常用形式。然而，我国江河区域部分桥梁桩基存在不同程度的冲刷损伤，一些桩基因加固不及时导致承载力下降，后续加固维修成本大幅增加。桩基若因冲刷出现桩身外露、保护层不足、钢筋锈蚀等病害，将直接削弱其承载能力，甚至引发基础沉降、盖梁开裂乃至上部结构破坏等连锁反应。因此，对于运营阶段的桩基冲刷病害，需开展系统的加固技术研究，以保障桥梁结构的长期安全。

对于桥梁桩基加固技术，外加钢套筒是一种传统且应用广泛的方法，近年来也有新的研究进展。在对上部结构和桥墩的加固研究较为成熟的基础上，针对桩体的钢套筒加固也有较多应用。藺威威等[1]在宁波码头大修工程中，开发出配套的钢套筒、灌浆系统及超早强灌浆料，6个月内完成232根桩基加固，材料性能经检测均符合规范；单成林等[2]针对传统钢套筒封底难题，发明自动封底装置并通过ANSYS模拟明确了关键参数设计原则；陈夏阳等[3]对比了钢套筒与混凝土套箍的加固效果，指出钢套筒存在防腐维护成本高的问题。国外自20世纪80年代起逐步推广纤维增强复合材料(FRP)在桩基加固中的应用，美国联邦公路管理局(FHWA)在2010年明确将玻纤套筒列为水下桩基加固的优选方案，并在多项工程中得到应用。玻纤套筒采用高强纤维复合材料制成，对化学反应呈惰性，具有优良的耐酸、耐碱及抗化学侵蚀性能[4]-[7]。国内相关研究起步较晚，董党等[8]在引江济淮工程(河南段)桥梁加固项目中，通过采

用玻纤套筒技术，有效克服了水下复杂环境影响，大幅加快施工进度，保证了工程顺利推进；周武军等[9]在以某沿海高速公路桥梁水下桩基加固为背景，详细阐述了玻纤套筒加固方法的施工工艺与检查验收要求，加固后桩基性能良好，满足工程使用需求；肖勇辉[10]系统梳理了玻纤套筒加固技术的国内外发展历程，通过试验揭示了水下环氧灌浆料的性能优势；魏明晖等[11]将玻纤套筒加固技术成功应用于闸坡油库码头，验证了施工安全性与耐久性提升效果；刘伟杰[12]在港湾引桥项目中证实玻纤套筒加固不受水域条件限制，施工效率显著优于传统立模支护。

本文以某公路桥梁桩基冲刷加固工程为实例，针对桩基外露、钢筋锈蚀等典型病害，制定水下玻纤套筒、钢套筒两种加固方案，从力学性能、施工工艺、耐久性、经济性等方面开展对比分析，并通过现场试验验证加固效果，以期同类工程提供可参考的技术方案与决策依据。

## 2. 桥梁工程概况

某公路桥梁全长 320 m，其上部结构为装配式预应力混凝土 T 梁，全桥共 2 联，跨径组合为(5×30+5×30)米，桥梁基础为钻孔灌注桩基础。因长期受河道水流冲刷侵蚀，河道内多根桩基外露，出现剥蚀、缩颈、露筋及钢筋锈蚀等病害，其中位于河道中央的 5~7 号桥墩桩基病害最为显著。5 号墩桩身因冲刷裸露 1.3 米，箍筋外露并已严重锈蚀；6 号墩桩身外露 1.6 米，6-1 号桩不仅存在泥土夹层，且钢筋锈蚀严重，部分箍筋锈断失效，病害照片见图 1；7 号墩桩身外露 2.1 米，7-2 号桩局部混凝土破损严重，内部钢筋锈蚀；其余桥墩桩身亦出现不同程度的冲刷外露和钢筋锈蚀现象。

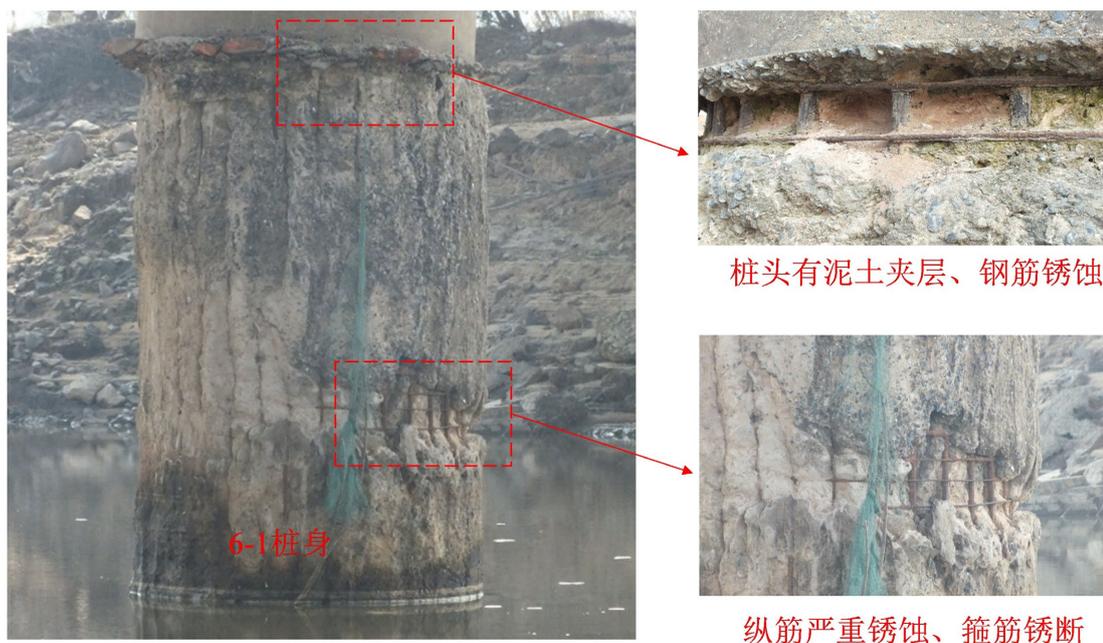


Figure 1. Photos of pile diseases of 6-1# pile  
图 1. 6-1#桩身病害照片

## 3. 桩基抗冲刷加固方案设计

针对桩基冲刷病害，工程中常用的加固方法包括外包钢筋混凝土套筒加固法、外包钢套筒加固法和外包纤维套筒加固法。结合该桥梁桩基的实际病害特征与现场施工条件，经技术可行性论证后，拟定钢套筒和玻纤套筒两种加固方案，并开展系统性对比研究。

### 3.1. 钢套筒加固方案

#### 3.1.1. 设计方案和施工步骤

如图 2 所示, 钢套筒加固桩基方案采用 10 mm 厚钢套筒包裹桩基病害段, 上下设  $\Phi 16$  植筋锚入原桩, 在套筒与桩间 15 mm 间隙灌注水泥基灌浆料, 形成增大截面的协同受力体系, 以达到修复桩基病害并增强承载力的目的。

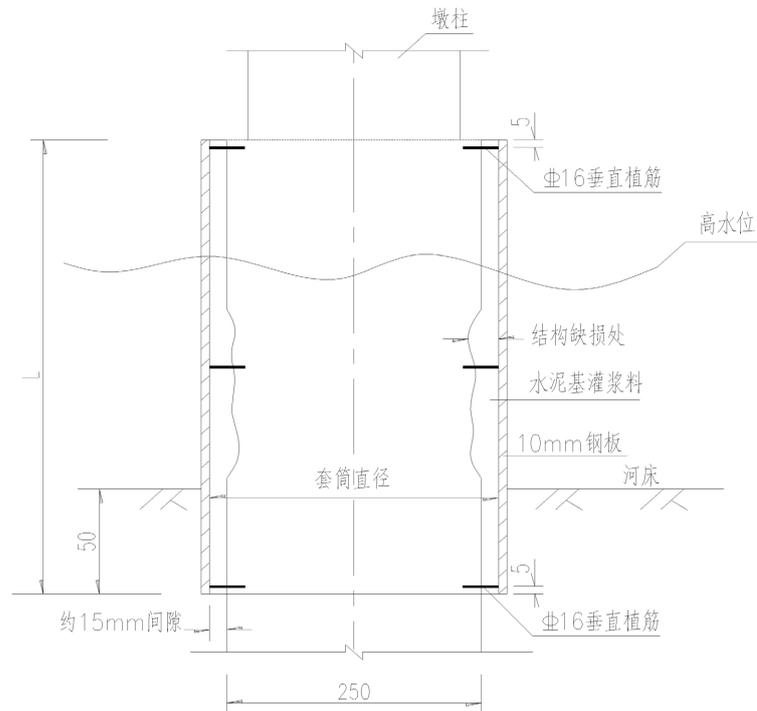


Figure 2. Diagram of pile foundation reinforcement scheme with steel sleeve  
图 2. 钢套筒加固桩基方案图示

钢套筒加固桩基施工步骤如下:

(1) 施工准备: 当河道水深较大时, 先采用钢板桩构筑钢围堰, 通过水泵抽排围堰内水体, 形成干作业施工环境。

(2) 桩身处理: 采用压力不小于 20 MPa 的高压水射流清除桩身表面泥浆及松散混凝土, 对外露锈蚀钢筋进行机械除锈, 并对水上桩身表面涂刷渗透型阻锈剂, 阻断钢筋锈蚀路径。

(3) 钢筋植入: 按设计要求在桩周植入  $\Phi 16$  mm 的 HRB400 限位连接钢筋, 植入深度为 15 d (d 为钢筋直径); 锚固采用 A 级改性环氧胶粘剂, 要求胶体不挥发物含量不小于 99%, 力学性能需满足要求。

(4) 钢套筒安装: 将 10 mm 厚 Q235C 钢套筒(预制为两个半圆分节段)从下至上拼装包裹桩基受损部位, 套筒长度需覆盖桩顶至河床面以下不小于 50 cm。半圆对接及节段连接采用坡口焊工艺, 焊缝等级需达到一级标准, 确保连接强度与密封性。

(5) 灌浆填充: 用可压缩密封条密封套筒底部, 采用压力灌注方式将水泥基灌浆料注入套筒内, 直至完全填满。

(6) 防腐处理: 钢套筒安装完成后, 按《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》[13]要求, 对套筒表面进行防腐涂装施工, 构建多层防护体系, 提升结构耐久性。

### 3.1.2. 主要材料技术要求

Q235C 钢材作为钢套筒加固桩基的核心材料,其技术性能需满足要求以保障加固体系的安全与耐久:屈服强度  $\geq 235$  MPa 确保钢材在正常荷载下不发生塑性变形,抗拉强度  $\geq 375$  MPa 且强屈比  $\geq 1.5$  赋予其足够安全储备与延性,  $-20^{\circ}\text{C}$  时冲击吸收能量  $\geq 34$  J 使其在低温环境下仍能抵御漂浮物撞击;冷弯性能要求在  $180^{\circ}$  弯曲后表面无损伤,以适应钢套筒卷圆与焊接坡口加工,碳含量  $\leq 0.20\%$ 、锰含量  $\leq 1.40\%$  的化学成分设计保障了良好焊接性,焊接热影响区硬度  $\leq 250$  HV 可避免裂纹产生;硫、磷含量均  $\leq 0.035\%$  的控制降低了电化学腐蚀倾向,表面经 Sa2.5 级喷砂处理后粗糙度达  $Ry60\sim 100\ \mu\text{m}$ ,确保防腐涂层附着力  $\geq 5$  MPa。

植筋锚固采用 A 级改性环氧胶粘剂,其胶体不挥发物含量  $\geq 99\%$ ,以确保固化后胶体成分稳定,避免因挥发物残留导致粘结性能劣化。在力学性能方面,胶体劈裂抗拉强度  $\geq 8.5$  MPa,抗弯强度  $\geq 50.0$  MPa,抗压强度  $\geq 60.0$  MPa,以保证胶粘剂良好的抗裂、抗弯曲及承压能力;粘结能力上,钢-钢(钢套筒法)拉伸抗剪强度标准值  $\geq 16.0$  MPa,保证钢套筒与植入钢筋间的可靠连接;约束抗拔条件下带肋钢筋与混凝土的粘结强度  $\geq 11.0$  MPa,确保钢筋与原桩体混凝土形成牢固的受力整体,从而使钢套筒加固体系在荷载作用下实现协同受力,保障桩基加固的可靠性与耐久性。

灌浆料性能需符合表 1 的技术要求,确保填充密实度。

Table 1. Technical requirements for cement-based grouting materials

表 1. 水泥基灌浆材料技术要求

序号	项目	具体指标	指标技术要求
1	流动度	初始值	$\geq 260$ mm
		30 min 保留值	$\geq 260$ mm
2	竖向膨胀率	3 h	0.1~3.5
		24 h 与 3 h 的膨胀值之差	0.02~0.5
3	抗压强度	1 d	$\geq 28.0$
		3 d	$\geq 40.0$
		28 d	$\geq 60.0$
4	其他项目	氯离子含量(%)	$\leq 0.06$
		泌水率(%)	0
		最大集料粒径、筛孔通过率	4.75 筛孔通过率为 100% 2.36 筛孔通过率为 $\geq 90\%$

## 3.2. 玻纤套筒加固方案

### 3.2.1. 设计方案和施工步骤

玻璃纤维具有强度高、伸长率高等优点,能与各种树脂有效配合编织成型为建筑材料[14]。针对因冲刷外露导致病害的桩基,可采用以玻纤套筒结合水下环氧灌浆料为核心的加固方案,其加固方案图示如图 3 所示。

玻纤套筒加固桩基的施工步骤如下:

(1) 桩身预处理:采用压力不小于 20 MPa 的高压水射流彻底清除桩基表面附着的泥浆及松散混凝土,对外露锈蚀钢筋进行机械除锈,并对水上部分桩身表面整体涂刷渗透型阻锈剂,抑制钢筋进一步锈蚀。

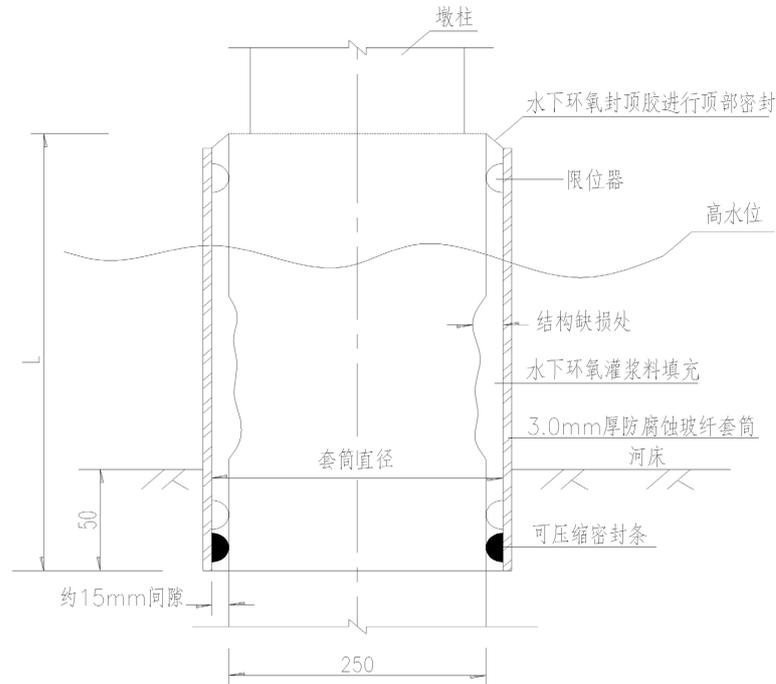
(2) 套筒安装固定:将预制好的厚度 3 mm 玻纤套筒包裹于桩基受损部位,套筒长度需覆盖桩顶至河床面以下不小于 50 cm。在套筒锁扣槽内注入水下环氧封口胶,完成锁扣封闭,然后采用抗拉强度大于 50

MPa 的高强度紧固带进行环向临时固定，确保套筒与桩身紧密贴合。

(3) 底部灌浆固化：利用可压缩密封条密封套筒底部，从注浆孔注入水下环氧灌浆料至套筒底部 15 cm 高度，待灌浆料固化不少于 8 h (固化温度需不小于 5℃)，形成底部密封支撑层。

(4) 全截面灌浆填充：将拌合均匀的水下环氧灌浆料持续注入套筒内，采用压力灌浆工艺(初始压力 0.3 MPa，逐步升压至 0.5 MPa)，直至套筒内水体完全排出且灌浆料饱满密实。

(5) 顶部封闭处理：在套筒顶部采用水下环氧封顶胶构筑斜坡式封闭结构，待灌浆料完全固化后，完成水下玻纤套筒加固系统的整体安装。



**Figure 3.** Diagram of pile foundation reinforcement scheme with glass fiber sleeve  
**图 3.** 玻纤套筒加固桩基方案图示

### 3.2.2. 主要材料技术要求

**Table 2.** Requirements for basic performance indicators of glass fiber sleeve  
**表 2.** 玻纤套筒基本性能指标要求

序号	项目	单位	技术要求
1	拉伸强度	横向	MPa $\geq 200$
		纵向	MPa $\geq 200$
2	弯曲强度	横向	MPa $\geq 200$
		纵向	MPa $\geq 200$
3	弯曲弹性模量	横向	MPa $\geq 15,000$
		纵向	MPa $\geq 10,000$
4	巴氏硬度	/	$\geq 45$
5	吸水率	%	$\leq 1$

玻纤套筒作为桩基加固的核心材料，其性能指标直接决定加固效果。玻纤套筒的基本性能指标要求见表 2。在长期服役过程中，玻纤套筒会受到紫外线、温度变化、化学物质侵蚀等多种环境因素影响。良好的抗老化性能可以确保其拉伸强度、弯曲强度等力学性能在长时间内不显著降低，从而持续为被加固结构提供可靠的侧向约束，保障桥梁桩基在长期使用中不出现因套筒失效而导致的承载能力下降。玻纤套筒的抗老化性能技术要求见表 3。

**Table 3.** Anti-aging performance indicators of glass fiber sleeve  
**表 3.** 玻纤套筒抗老化性能指标

序号	项目	单位	技术要求	
1	拉伸强度	老化前	MPa	≥200
		1000 h (UV)老化后强度保有率	%	≥90
2	弯曲强度	老化前	MPa	≥200
		1000 h (UV)老化后强度保有率	%	≥90
3	弯曲弹性模量	老化前	MPa	≥15,000
		1000 h (UV)老化后强度保有率	%	≥90

水下环氧灌浆料使玻纤套筒与桩基形成牢固的协同受力整体，确保在外部荷载作用下，共同工作，有效传递荷载，提升结构的承载能力和稳定性，避免因连接薄弱导致的结构失效。水下环氧灌浆料的主要技术性能要求见表 4。

**Table 4.** Key technical properties of underwater epoxy grouting material  
**表 4.** 水下环氧灌浆料主要技术性能

序号	项目	单位	技术要求	
1	流动度	初始	mm	≥200
		30 min	mm	≥150
2	拉伸强度	7 d	MPa	≥10
3	弯曲强度	7 d	MPa	≥30
4	压缩强度	7 d	MPa	≥80
5	静力受压弹性模量	7 d	MPa	≥10,000
6	与混凝土基材正拉粘接强度	干粘接, 7 d	MPa	≥5.0, 且为混凝土内聚破坏
		湿粘接, 7 d	MPa	≥3.5, 且为混凝土内聚破坏
7	收缩率	7 d	%	≤0.1

## 4. 加固方案的比选分析

### 4.1. 方案技术性能对比分析

#### 4.1.1. 钢套筒加固方案

作为传统加固工艺，钢套筒(Q235C 钢材，厚度 10 mm)通过水泥基灌浆料与原桩体形成组合截面，其抗压刚度提升显著。钢套筒方案依赖 Q235C 钢材，在水下环境易发生电化学腐蚀，需要环氧富锌底漆+聚硅氧烷面漆等防腐涂层维持耐久性，且涂层附着力需不小于 5 MPa。此外，现场一级焊缝标准的焊接

工艺要求高，焊接残余应力还可能引发局部应力集中，后期防腐维护较为困难。

### 4.1.2. 水下玻纤套筒加固法

该方案采用高强度玻璃纤维复合材料与水下环氧灌浆料形成复合防护体系，通过环向约束效应恢复桩基承载力。灌浆料与桩身混凝土的正拉粘结强度不小于 3.5 MPa，能形成整体受力体系，特别适用于深水及腐蚀性水质环境。水下玻纤套筒方案可直接开展水下施工，无需像钢套筒方案那样构筑钢围堰排水，能够适应大多数水下环境，面对狭窄河床也能灵活作业。该方案 15~20 天就能完成从套筒安装到灌浆固化的流程，通过精确控制 0.3~0.5 MPa 的灌浆压力、采用可靠水下密封工艺，可以保障施工质量。耐久性方面，玻纤套筒具有良好的耐盐碱、抗氯离子腐蚀能力，且在-20℃~60℃环境下性能稳定，设计使用年限超 50 年，无需额外防腐处理。

## 4.2. 方案经济性成本对比分析

针对本项目桥墩桩基加固工程，水下玻纤套筒加固方案在经济性方面也展现出显著优势。如表 5 和表 6 所示，水下玻纤套筒加固方案总造价约 250.8 万元，而传统钢套筒法因涉及钢围堰构筑、钢材预制加工、复杂焊接及防腐涂装等环节，总造价高达 354.4 元，前者相较后者直接节约 29.23% 的工程费用，在项目维修初期投入上就实现了成本压缩。

**Table 5.** Bill of quantities and cost for underwater glass fiber sleeve scheme

**表 5.** 水下玻纤套筒方案工程量清单与造价

序号	项目	单位	工程量	单价(元)	合价(万元)
1	玻纤套筒(3 mm 厚)	m <sup>2</sup>	1200	800	96
2	水下环氧灌浆料	m <sup>3</sup>	600	2200	132
3	水下环氧封口胶	kg	800	150	12
4	水下环氧封顶胶	kg	600	180	10.8
造价合计					250.8

**Table 6.** Bill of quantities and cost for steel sleeve reinforcement scheme

**表 6.** 钢套筒方案工程量清单与造价

序号	项目	单位	工程量	单价(元)	合价(万元)
1	钢套筒(10 mm 厚 Q235C)	m <sup>2</sup>	1200	1200	144
2	水泥基灌浆料	m <sup>3</sup>	600	1800	108
3	植筋(Φ16 mm HRB400)	根	800	80	6.4
4	A 级改性环氧胶粘剂	kg	2000	120	24
5	钢围堰构筑	项	8	60,000	48
6	防腐涂装	m <sup>2</sup>	1200	200	24
造价合计					354.4

从全生命周期成本来看，水下玻纤套筒采用的高性能复合材料，具有良好的抗老化、耐腐蚀特性，设计使用年限可达 50 年以上，且无需额外防腐维护措施；对于钢套筒方案，钢材易受水环境电化学腐蚀影响，虽依赖防腐涂层防护，但涂层寿命有限，按每 5 年进行一次重涂考虑，经测算 20 年累计维护成本净现值约 120 万元，全生命周期成本净现值约 474.4 万元。综合现期投入与长期运维成本，水下玻纤套筒

加固方案在经济性上优势显著,较钢套筒方案低 47.13%,长期效益突出,为桥梁桩基加固提供了兼具性价比与耐久性的优选方案。

### 4.3. 方案比选结论和局限性分析

从上述多方面对比可见,水下玻纤套筒加固法在技术先进性、耐久性 & 经济性方面综合优势明显,可作为本桥桩基冲刷病害的优选方案。需要注意的是,玻纤套筒虽在耐腐蚀性和施工便捷性上优势显著,但其抗冲击性能相对较弱,在有漂浮物撞击或砂石水流冲刷的场景中应用受限。当桥梁桩基处于水流速度大于的河道,或所在水域常有漂流木材、砾石等漂浮物时,玻纤套筒受持续冲击易出现纤维层剥离、局部开裂等问题,容易导致内部灌浆料防护体系失效。因此,对于存在明显漂浮物撞击风险或高流速挟砂水域的桩基,需谨慎选用玻纤套筒方案,并配套设置混凝土防冲护筒、柔性防护网等辅助措施,或采用钢套筒加固方案,以避免抗冲击性能的不足。

## 5. 结论

本研究通过某公路桥梁桩基冲刷加固工程实例,对比分析了水下玻纤套筒与钢套筒两种加固方案的技术性能与工程适用性,得出以下结论:

(1) 水下玻纤套筒极限抗拉强度不小于 200 MPa,与高粘结性灌浆料形成协同防护体系,相较钢套筒方案,其承载力较高,且耐盐碱、抗氯离子腐蚀能力突出,适用于深水及腐蚀性水质环境。

(2) 玻纤套筒加固法可直接水下作业,无需构筑钢围堰,施工周期缩短至 15~20 天,较钢套筒方案节约 29.23%直接工程费;全生命周期成本分析显示,玻纤套筒设计使用年限超 50 年且免维护,20 年周期内较钢套筒综合节约 47.13%的成本。

(3) 玻纤套筒抗冲击韧性较弱,在水流速度较大或存在漂浮物撞击风险的河道,需谨慎选用玻纤套筒方案,并配套设置混凝土防冲护筒、柔性防护网等辅助措施,或采用钢套筒加固方案,以避免抗冲击性能的不足。

(4) 本研究通过实际工程验证了玻纤套筒加固技术的可靠性,其在深水作业适应性、耐久性 & 经济性方面的综合优势,可为江河湖泊区域桥梁桩基冲刷病害治理提供标准化解决方案。

## 参考文献

- [1] 藺威威,谷坤鹏,刘思楠,等. 码头桩基钢套筒灌浆加固修复技术[J]. 水运工程, 2024(5): 231-236.
- [2] 单成林,吴鹏均. 水下桩基加固中钢套筒自行封底装置受力分析[J]. 公路工程, 2020, 45(6): 161-164+180.
- [3] 陈夏阳,李秀芳. 桥梁水下基础的加固技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016(4): 201-202.
- [4] 梁富春,高剑平,段红伟,等. 碳纤维复材网格增强玻璃纤维复材套筒加固箍筋锈蚀钢筋混凝土短柱轴压性能[J]. 工业建筑, 2024(6): 100-107.
- [5] 潘明亮. 基于纤维增强材料的隧道修复与加固研究[J]. 合成纤维, 2025(6): 81-86.
- [6] Nhut, P.V., Yoresta, F.S., Duc, T.Q. and Matsumoto, Y. (2025) Theoretical and Experimental Investigations of the Strengthening Effects of Glass Fiber Sheets on Channel-Shaped PGFRP Beam-to-Beam Bolted Connections. *Structures*, 73, Article ID: 108364. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108364>
- [7] Mazurkiewicz, L., Tomaszewski, M., Malachowski, J., Sybilski, K., Chebakov, M., Witek, M., et al. (2017) Experimental and Numerical Study of Steel Pipe with Part-Wall Defect Reinforced with Fibre Glass Sleeve. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 149, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.12.008>
- [8] 董党,卫振,王华震,等. 水下玻纤套筒在引江济淮工程桥梁加固中的应用[J]. 河南科技, 2021, 40(9): 85-87.
- [9] 周武军,杨小艺. 水下桩基病害检测及玻纤套筒加固方法[J]. 西部交通科技, 2023(5): 152-154.
- [10] 肖勇辉. 水下玻纤套筒加固技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017(7): 146-149+16-17.

- 
- [11] 魏明晖, 严锋. 玻纤套筒加固技术在高桩码头维修工程中的应用[J]. 水运工程, 2017(9): 202-205+213.
- [12] 刘伟杰. 玻纤套筒加固技术在水下桩基加固工程中的应用[C]//2020 年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册). 2020: 95-97.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件[S]. 北京: 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会, 2023.
- [14] Gao, H., Sun, Y., Lei, X., Gao, Y. and Liu, H. (2024) Mechanical Properties and Application of Glass Fiber Reinforced Polyurethane Composites Communication Lattice Tower. *Construction and Building Materials*, **411**, Article ID: 134180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134180>