

钢筋混凝土管涵非开挖修复技术决策指引

胡仙斌, 金 赫*, 郑恩日, 邹紫彤

九江学院建筑工程与规划学院 江西九江

【摘要】为解决钢筋混凝土管涵故障率高、传统开挖修复方法社会与经济成本大的问题,本研究构建了一套基于故障特征的非开挖修复技术决策指引。研究系统识别了管节裂缝、内壁磨损、接缝断裂、接缝错位、底部侵蚀及支撑层空洞六类常见故障,并依据量化标准将其严重程度划分为轻微、中等和严重三级。在此基础上,综合评估了注浆、喷射混凝土、原位固化内衬、穿插内衬、离心浇筑混凝土管内衬及管道破裂六种主流非开挖修复技术的适用性。研究表明:轻微故障普遍适用注浆技术;中等故障可灵活采用原位固化内衬技术等半结构性或结构性修复技术;严重故障则必须采用穿插内衬技术、管道破裂技术等结构性修复技术。其中,接缝错位与支撑层空洞的技术选择范围相对受限。本指引为工程实践中基于具体故障场景的技术选型提供了系统化依据,实际应用需结合施工成本、设计寿命、过流能力及环境交通影响进行多目标决策。

【关键词】钢筋混凝土管涵;非开挖修复技术;决策指引;故障种类

【基金项目】江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2201916)

【收稿日期】2025 年 11 月 15 日

【出刊日期】2025 年 12 月 30 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250420

Decision-making guidance for trenchless rehabilitation techniques for RCP culvert

Xianbin Hu, He Jin*, Enri Zheng, Zitong Zou

College of Architecture Engineering and Planning, Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi

【Abstract】To address the high failure rate of reinforced concrete pipe culverts and the significant social and economic costs associated with traditional excavation repair methods, this study has developed a decision-making guidance for trenchless rehabilitation techniques based on defect characteristics. The research systematically identified six common types of defects—cracks, corrosion, joint fracture, joint misalignment, invert deterioration, and bedding voids—and classified their severity into three levels (minor, moderate, and severe) according to quantitative criteria. On this basis, the applicability of six mainstream trenchless rehabilitation techniques—grouting, shotcrete, cured-in-place pipe lining, slip lining, centrifugally cast concrete pipe lining, and pipe bursting—was comprehensively evaluated. The results indicate that minor defects are generally suitable for grouting technique; moderate defects can be flexibly addressed using semi-structural or full-structural rehabilitation techniques such as cured-in-place pipe lining; while severe defects require full-structural repair techniques such as slip lining or pipe bursting. Among these, the technical options for joint misalignment and bedding voids are relatively limited. This guidance provides a systematic basis for selecting appropriate techniques in engineering practice according to specific defect scenarios, though practical application requires multi-objective decision-making that also considers construction cost, design life, flow capacity, and environmental and traffic impacts.

【Keywords】Reinforced concrete culvert; Trenchless rehabilitation techniques; Decision-making guidance; Defect type

1 引言

管涵作为交通、水利等基础设施中承担输水、导流及穿越功能的关键构筑物,其安全服役至关重要。我国管涵存量巨大,仅公路系统估计已超千万道。然而,受材料老化、超载运行及管理维护不足等因素影响,管涵

系统故障率居高不下,平均超过 15%^[1]。传统开挖式修复方法存在施工周期长、交通干扰大、环境影响突出及综合成本高昂等显著弊端。

非开挖修复技术以其“微创”优势,成为替代传统开挖、实现城市生命线工程可持续运维的关键技术。尽

*通讯作者: 金赫

管国内已引入多种非开挖技术,但目前缺乏一套将具体故障类型、严重程度与修复技术特性进行系统性匹配的决策支持工具。现有国内外研究多侧重于单一技术介绍^[5-6]、经验性对比^[2-3]或多因素权重分析^[4],未能建立故障特征驱动下的精准选型框架^[7-8]。

因此,本研究聚焦于应用广泛的钢筋混凝土管涵,旨在构建一套集成故障诊断与修复对策的决策指引。通过量化故障分级与综合评价技术属性,为工程人员在不同损伤场景下选择最优非开挖修复方案提供科学、系统的依据。

2 管涵非开挖修复技术

本研究选取六种技术成熟、应用广泛的非开挖修复技术进行评估,其核心优缺点汇总如下:

2.1 注浆技术

适用于结构性尚未丧失的轻微缺陷。优点在于对管内清洁度要求低、可带水作业、适应复杂断面且成本低廉;缺点是施工质量控制难度大,且适用范围有限。

2.2 喷射混凝土技术

适用于中等程度损伤的半结构性修复。优势是施工速度快、能适应管径变化、对支管影响小;劣势是要求原管有一定结构完整性,且需进行内壁清理。

2.3 原位固化内衬技术

一种适用范围极广的柔性内衬技术。具有施工简便、工期短、几乎适用于任何断面、成本相对较低的优点;

缺点是需内壁预处理,且不适用于存在大变形或严重错位的管道。

2.4 穿插内衬技术

一种典型的结构性修复技术。优点是工艺简单、施工快速、成本较低;主要缺点是会显著减小管道过流断面,影响通水能力。

2.5 离心浇筑混凝土管内衬技术

适用于严重损伤的高强度结构性修复。最大优点是修复后不改变原管过流能力,且可进行长距离修复;缺点是对内壁清洁要求高、不适用于严重变形管段,且工艺质量控制要求严格。

2.6 管道破裂技术

一种以新换旧的替换型技术。优点是施工效率高,且能一定程度提升管线承载力;缺点是对短距离施工不经济、对地层条件敏感、曲线施工能力差且纠偏成本高。

3 故障分类与严重程度分级体系

为实现精准匹配,首先需对钢筋混凝土管涵的常见故障进行标准化定义与分级。本研究确定了六类典型故障,并根据其对结构性能的影响程度,制定了如表1所示的量化分级标准。分级主要依据关键物理尺寸或相对损伤比例,并将严重程度统一划分为“轻微”、“中等”、“严重”三级,分别对应“无结构性影响”、“半结构性损伤”和“结构性失效”的工程状态。

表1 钢筋混凝土管涵故障严重程度分级标准表

| 故障类型 | 严重程度 | 判定标准 (mm) | 表现 |
|--------|------|-----------------|---------------|
| 管节裂缝 | 轻微 | 宽度<0.2mm | 未贯穿,无渗漏 |
| | 一般 | 0.2mm≤宽度≤1.0mm | 局部渗水 |
| | 严重 | 宽度>1.0mm | 严重渗漏或结构失稳。 |
| 管节内壁磨损 | 轻微 | 保护层厚度减少<20% | 混凝土剥落,钢筋未露 |
| | 一般 | 20%≤保护层厚度减少≤50% | 钢筋局部暴露 |
| | 严重 | 保护层厚度减少>50% | 钢筋大面积锈蚀、穿孔 |
| 接缝断裂 | 轻微 | 宽度<0.3mm | 止水带轻微翘曲 |
| | 一般 | 0.3mm≤宽度≤1.0mm | 止水带撕裂、渗漏 |
| | 严重 | 宽度>1.0mm | 止水带严重撕裂,钢筋暴露 |
| 接缝错位 | 轻微 | 错位<5mm | 轻微变形、漏水 |
| | 一般 | 5mm≤错位≤10mm | 错位明显,止水带撕裂 |
| | 严重 | 错位>10mm | 严重渗水,过流能力下降 |
| 底部侵蚀 | 轻微 | 深度<20mm | 混凝土局部剥落 |
| | 一般 | 20mm≤深度≤50mm | 混凝土严重剥落,钢筋暴露 |
| | 严重 | 深度>50mm | 混凝土大面积缺失,钢筋断裂 |
| 支撑层空洞 | 轻微 | 沉降差<50mm | 局部沉降,无结构变形 |
| | 一般 | 50mm≤沉降差≤150mm | 沉降明显,接口开裂 |
| | 严重 | 沉降差>150mm | 承载力大幅下降,伴生裂缝 |

4 基于故障特征的修复技术决策指引

综合故障分级体系与各修复技术特性, 本研究构建了如表 2 所示的决策指引矩阵。该矩阵明确了不同

故障类型及严重程度下, 推荐采用的修复技术类型(无结构性、半结构性或结构性)及具体适宜技术选项。

表 2 基于故障严重程度的非开挖修复技术选择指引

| 故障种类 | 严重程度 | 非开挖修复技术类型 | 适用非开挖修复技术 |
|--------|------|-----------|-----------------------------|
| 管节裂缝 | 轻微 | 无结构 | 注浆 |
| 管节内壁磨损 | 一般 | 半结构 | 原位固化内衬、喷射混凝土 |
| 接缝断裂 | | 结构 | 穿插内衬、原位固化内衬、离心浇筑混凝土管内衬 |
| 底部侵蚀 | 严重 | 结构 | 穿插内衬、原位固化内衬、离心浇筑混凝土管内衬、管道破裂 |
| 接缝错位 | 轻微 | 无结构 | 注浆 |
| | 一般 | 半结构 | 原位固化内衬 |
| | | 结构 | 穿插内衬、原位固化内衬 |
| | 严重 | 结构 | 穿插内衬、原位固化内衬、管道破裂 |
| | 轻微 | 无结构 | 无 |
| 支撑层空洞 | 一般 | 半结构 | 原位固化内衬 |
| | | 结构 | 穿插内衬、原位固化内衬 |
| | 严重 | 结构 | 穿插内衬、原位固化内衬、管道破裂 |

指引核心逻辑与要点:

轻微故障的普适性方案: 所有类型的轻微故障(支撑层空洞除外), 均推荐采用注浆技术进行无结构性修复。这是一种经济、快捷的点状修复手段。

中等故障的灵活性选择: 对于中等程度损伤, 决策具有灵活性。多数故障可选用原位固化内衬或喷射混凝土进行半结构性修复; 若评估认为需提升安全裕度, 亦可直接选择穿插内衬等技术进行结构性修复。接缝错位的中等故障因几何限制, 技术选择较少。

严重故障的结构性强制要求: 所有类型的严重故障都必须采用结构性修复。穿插内衬和原位固化内衬是广泛应用的核心选项; 离心浇筑混凝土内衬适用于对过流能力有严格要求的场景(但受几何限制, 不用于严重接缝错位); 管道破裂技术作为终极替换手段, 主要用于解决管体严重损坏或需扩容的情况。

特殊故障的限制性: 接缝错位与支撑层空洞两类与管道外部支撑和几何对位相关的故障, 技术选择范围普遍窄于管体自身材料损伤类故障。尤其是支撑层空洞, 必须首先处理基础问题, 修复技术主要起到后续的管道结构恢复作用。

5 结论

本研究系统性地提出了适用于钢筋混凝土管涵的非开挖修复技术决策指引。该指引以量化故障分级为基础, 以修复技术结构贡献度为依据, 构建了从“故障识别”到“技术匹配”的清晰路径。主要结论如下:

(1) 建立了涵盖六类典型故障、三个严重等级的

标准化故障诊断体系。

(2) 明确了六种主流非开挖修复技术与不同故障场景的对应关系, 形成了可直接查用的决策矩阵。

(3) 揭示了技术选择的层次规律: 从轻微故障的“点状修复”, 到中等故障的“功能恢复”, 再到严重故障的“结构重置”。

(4) 指出了接缝错位与支撑层空洞是技术选型的难点, 需在工程中予以特别关注。

本指引为工程决策提供了核心框架, 但实际应用是一项多目标优化工程。建议在具体项目中将本指引作为初步筛选工具, 进而综合权衡施工成本、全寿命周期、过流能力保持度、施工周期及对环境 and 交通的影响等关键因素, 通过多准则决策方法确定最终最优方案。未来研究可进一步引入成本数据库、环境影响量化模型及基于人工智能的快速评估工具, 使决策过程更加智能化、精准化。

参考文献

[1] 唐中亚, 吴军, 杨丹. 城镇供水管网漏损现状分析及漏损控制技术研究进展[J]. 环境保护前沿, 2022,12(2): 224-232.

[2] YANG C., ALLOUCHE E. Evaluation of Non-Destructive Methods for Condition Assessment of Culverts and Their Embedment[C]// In Proceedings of the ICPTT 2009: Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications,

- Shanghai, China, 2009:28–38.
- [3] SELVAKUMAR A., TUCCILLO M. E., MARTEL K. D., et al. Demonstration and Evaluation of State-of-the-Art Wastewater Collection Systems Condition Assessment Technologies[J] Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice,2014,5(2):1949-1190.
- [4] THORNTON C. I., ROBESON M. D., GIRARD L. G., et al. Culvert Pipe Liner Guide and Specifications[M]. Lakewood: FHWA, 2005.
- [5] 武艺锋. 城市排水管道非开挖修复技术分析[J]. 重庆建筑, 2024,23(08):82-84.
- [6] 顾卫东. 常用城镇供水管道非开挖整体修复工艺的分析比较及展望[J]. 城镇供水, 2022,(04):78-82.
- [7] 孙桃. 既有排水管道常见损伤及非开挖修复技术应用[J]. 给水排水,2022,48(7):131-35,142.
- [8] HE J, PIRATLA K, John M., et, al. Decision-Making Guidance for the Optimal Selection of Culvert Renewal Methods[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice,2023,14(1):0402263.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

