

管道修复技术与
材料性能研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 12. 001

基于内衬壁厚计算理论的排水管道喷涂修复设计

董 顺¹, 廖佳杰², 黄 胜^{2,3}, 马保松^{2,3}, 赵雅宏^{2,3}, 甄 亮⁴,
伍浩良^{2,3}

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 3. 中山大学 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 广东 广州 510275; 4. 上海公路桥梁<集团>有限公司, 上海 200433)

摘 要: 针对排水管道在长期服役过程中普遍出现的腐蚀老化、裂缝扩展及结构抗力下降等问题,传统砂浆喷涂修复方法中内衬壁厚的确定缺乏科学设计与验证。本研究通过对比分析砂浆喷涂修复前后排水管道的力学性能,探究基于内衬壁厚计算理论的足尺排水管道结构性能影响规律。结果表明,内衬壁厚的优化对提升管道承载能力与耐久性至关重要。当内衬壁厚由33 mm增至45 mm时,排水管道的极限承载力从60.54 kN提高至93.83 kN,增幅达55%。此外,引入的内衬壁厚计算理论能够更为系统地反映修复后排水管道的实际承载能力,为非开挖修复技术提供科学的设计依据。

关键词: 排水管道; 喷涂技术; 内衬壁厚; 修复; 力学性能; 结构延性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)12-0001-08

Design of Drainage Pipeline Rehabilitation Using Spray Lining Technology Based on Liner Thickness Calculation Theory

DONG Shun¹, LIAO Jiajie², HUANG Sheng^{2,3}, MA Baosong^{2,3}, ZHAO Yahong^{2,3},
ZHEN Liang⁴, WU Haoliang^{2,3}

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 3. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Shanghai Road and Bridge <Group> Co. Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: Addressing the common issues of corrosion aging, crack propagation, and the gradual reduction of structural resistance in drainage pipelines during long-term service, the traditional mortar-spraying rehabilitation method lacks a scientific design and validation for determining the liner thickness. This study examines the impact of liner thickness on the structural performance of full-scale drainage pipelines by comparing the mechanical properties before and after mortar-spraying rehabilitation. The findings highlight the critical importance of optimizing liner thickness to enhance the load-bearing capacity and durability of the pipelines. Specifically, increasing the liner thickness from 33 mm to 45 mm

基金项目: 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09G087); 中国长江三峡集团有限公司内部科研项目(WWKY-2021-0275); 中国长江三峡集团有限公司技术服务资助项目(202203171)

通信作者: 伍浩良 E-mail: wuhliang5@mail.sysu.edu.cn

raised the ultimate load capacity of the drainage pipelines from 60.54 kN to 93.83 kN, representing an increase of 55%. Furthermore, the introduced calculation theory of liner thickness could provide a more systematic reflection of the actual load capacity of the drainage pipelines after rehabilitation, offering a scientific basis for trenchless repair techniques.

Keywords: drainage pipelines; spray lining technology; liner thickness; rehabilitation; mechanical properties; structural ductility

随着城市化进程的加速,供水排水管网的建设与维护已成为现代城市管理的重要内容之一^[1]。随着排水管道使用年限的增加及环境负荷的变化,管道结构往往出现损伤,易引发严重的城市安全问题^[1-5]。在管道长期服役过程中,表面不断腐蚀老化、裂纹逐步扩展等因素将导致结构材料抗力逐步下降。混凝土管道和钢筋混凝土管道的破坏形式主要包括纵向裂缝、管顶坍塌和管道腐蚀减薄^[5-6]。针对混凝土管道出现纵向裂缝这种典型的破坏形式,Ballinger等^[7]通过试验研究了混凝土管道从初始铺设到最终破坏的全过程。混凝土管道内部的腐蚀破坏主要源于管道中 H_2S 气体遇到冷凝湿气时逐渐形成 H_2SO_4 ,腐蚀作用导致其内壁逐渐减薄、露筋等,从而降低排水管道的使用寿命^[8-9]。因此,亟须对管道结构进行修复,而修复效果取决于组合结构的最薄弱部位。Zhao等^[10]的研究表明,外荷载作用下水泥砂浆内衬与原管道的界面剥离是组合结构失效的主要原因。张海丰^[11]则提出,界面径向应力和抗剪强度是内衬层与既有管道共同工作的条件,界面间隙的出现会导致组合结构丧失共同承担外荷载的能力。McAlpine^[12]的研究也表明,单独的水泥砂浆内衬无法提高结构的承载性能,需将内衬管道与既有管道黏合为一个整体。此外,水泥砂浆的自身收缩和干缩也会导致界面剥离,在其中加入矿物掺合料可有效降低水泥基砂浆材料的早期收缩。修复后结构的承载能力和耐久性衡量修复效果的主要评价指标。

对于修复后排水管道的结构性能,主要通过组合梁加载试验、三边承载性能试验以及埋地管道试验等方法进行验证。国内外学者对既有结构-内衬组合梁结构以及修复后管道的承载性能、界面黏结性能等开展了大量研究^[10,13-16]。尽管砂浆喷涂技术在排水管道修复中展现出显著的应用潜力,但在确定最佳内衬壁厚以及准确评估修复效果方面,仍存

在诸多挑战。内衬壁厚直接关系到修复后管道的承载能力、耐久性以及流量特性,因此,开展基于内衬壁厚计算理论的排水管砂浆喷涂修复设计,对于优化修复方案、指导实际工程具有重要的理论和实践价值。本研究通过足尺力学试验,分析内衬壁厚对砂浆喷涂修复排水管结构性能的影响,探讨内衬壁厚的计算理论,并提出优化的设计方案,不仅为排水管道的非开挖修复提供理论依据和技术指导,还可为城市基础设施的维护与管理提供新的视角和方法。

1 内衬壁厚计算方法及局限性

内衬材料的拉伸与弯曲性能、延性及界面黏结性能等对修复效果具有显著影响。Bazant等^[16]基于断裂力学尺寸效应,提出了适用于混凝土梁及圆环厚度的计算方法。依据《通过树脂浸渍软管翻转和固化对现有管道和涵洞进行修复的标准实践》(ASTM F1216)对管道破坏类型的划分,Matthews等^[17]提出了针对部分破坏与完全破坏管道的地聚物水泥砂浆内衬壁厚计算方法。Royer等^[18]在考虑安全系数及原管道椭圆度影响的基础上,结合Young等^[19]、Watkins^[20]的研究成果,提出了不同受力状态下的内衬壁厚计算模型。以上内衬壁厚计算理论在不同情况下均得到了应用。然而,上述设计方法均未考虑管道结构二次受力的影响。排水管道在修复前,原管道承担了压力、地面荷载等作用,管壁结构已处于较高的应力水平。假设原管道承载能力不变,修复后内衬管道可认为仅承担修复后新增的荷载。因此,既有管道-内衬结构属于二次受力体系,其受力特征与基于新建管道的设计模型存在较大差异。虽然Shi等^[21]基于螺旋缠绕法的试验结果表明,二次受力和一次受力之间的差异较小,二次受力条件下的裂缝荷载和破坏荷载分别约为一次受力模型的97.3%和87.0%,认为可忽略二次受力,但对于缺陷情况不同的管道,二次受力的

影响程度尚不明确,仍需开展进一步研究。

2 内衬壁厚计算理论推导

当原结构和修复材料的弹性模量相同时,可按单一材料结构进行分析。然而,排水管道非开挖修复内衬材料的性能通常更优。根据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013),加固材料的性能应高于原结构材料,且须采取有效措施保证二者连接可靠,形成整体协同工作。目前采用的水泥砂浆材料,其性能一般可达C60以上,并与原管道内壁紧密连接。在界面剪应力及界面黏结拉应力未达到其相应强度限值之前,二者仍可协同受力,共同承担外荷载。

2.1 管道喷涂修复后的应力形式

常规管道喷涂修复后的应力可分为3种形式,即梁弯曲正应力、梁界面径向应力及叠合曲梁界面剪应力。梁弯曲正应力主要出现在管道的内外表面及其附近区域。当管道受到外部载荷作用或内部压力变化时,其横截面产生弯曲变形,导致材料承受正应力或拉应力。该类应力沿管道长度方向分布,对管道的整体结构稳定性有显著影响。梁界面径向应力则是指在喷涂材料与原管道材料的接触面上产生的应力。喷涂材料在固化过程中可能发生体积收缩,且两种材料的热膨胀系数存在差异,这些因素会导致径向应力在界面上的分布不均,可能引发材料间的剥离或开裂。因此,合理控制喷涂材料的性质和喷涂工艺,是确保修复质量的关键。叠合曲梁界面剪应力是在外部荷载或温度变化作用下,于喷涂层与原管道材料之间因剪切变形而产生的应力。该剪应力直接作用于喷涂层与管道的接合面,对接合强度和耐久性有重要影响。高剪应力可能会导致喷涂层与管道材料之间的界面破坏,从而影响修复的长期稳定性。通过对上述3种应力的详细分析,可以更好地理解喷涂修复过程中的力学行为,进而优化修复材料的选择和施工工艺,确保管道的修复效果和耐久性。

2.2 基于极限状态的管道修复层设计

采用砂浆喷筑修复后的管道增强结构,在荷载作用下的失效形式主要包括3种:①结构达到耐久性要求的裂缝宽度限值或变形限值状态;②管道-内衬叠合界面达到协调变形要求的黏结张拉和界面剪切限值状态;③结构达到最大承载能力,本体

因强度超过限值而破坏。因此,在进行管道砂浆喷涂内衬结构设计时,应结合上述3种极限状态进行校验。

图1为基于极限状态的管道修复层设计流程。其中, S 为相应极限状态下的作用效应组合设计值; C 为正常使用极限状态允许限值; γ_0 为结构重要性系数; R 为承载能力极限状态下的结构抗力设计值。作用效应组合设计值与结构抗力设计值通过内力计算模型建立联系。在具体工程应用中,首先应判断管道-内衬修复结构的协调变形条件是否满足,即进行界面强度设计。其作用效应组合设计值的计算式为:

$$S_d = C_{G1}G_{1k} + C_{Gw}G_{wk} + C_{Gsv}F_{sv,k} + C_{Gep}F_{ep,k} + \varphi_{qv}C_{Qv}Q_{vk} + \varphi_{qgw}C_{Qgw}q_{gw,k} \quad (1)$$

式中: S_d 为界面剥离裂缝、张拉裂缝等作用效应的设计值,MPa; C_{G1} 为管道自重作用效应系数; G_{1k} 为管道自重标准值,MPa; C_{Gw} 为管内水重作用效应系数; G_{wk} 为管内水重标准值,MPa; C_{Gsv} 为管顶主动土压力作用效应系数; $F_{sv,k}$ 为管顶主动土压力标准值,MPa; C_{Gep} 为管侧主动土压力作用效应系数; $F_{ep,k}$ 为管侧主动土压力标准值,MPa; φ_{qv} 、 φ_{qgw} 分别为地面动荷载、地下水作用的准永久值系数; Q_{vk} 为地面动荷载标准值,MPa; C_{Qv} 为地面动荷载作用效应系数; $q_{gw,k}$ 为管道外侧地下水压力标准值,MPa; C_{Qgw} 为管道外侧地下水压力作用效应系数。

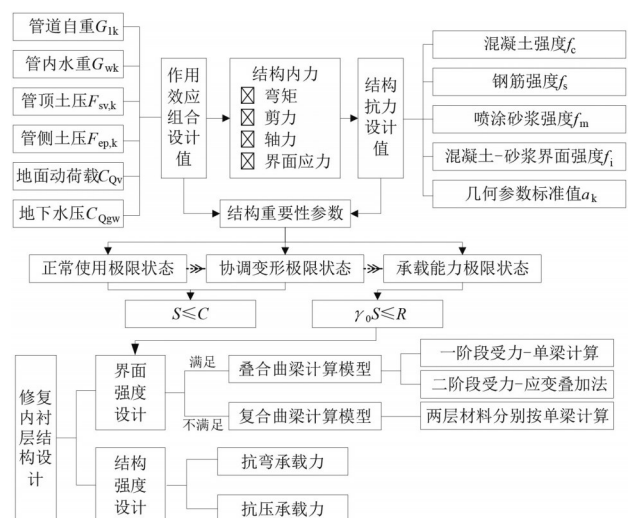


图1 基于极限状态的管道修复层设计流程

Fig.1 Pipeline rehabilitation layer design process based on limit state

3 钢筋混凝土管道承载力试验结果

在对管道进行水泥砂浆喷涂修复前,首先应按规范方法对完好的钢筋混凝土管道进行三点加载试验,通过观测管道变形、关键荷载值及裂缝发展情况等,确定管道的受力性质和关键参数,为后续分析管道与内衬截面内力、整管承载力等提供数据支撑。管道三点加载试验系统主要由4台30 t的液压油缸、压力传感器、上加载梁、高强丝杠立柱、底板及伺服控制系统等组成。管道三点加载试验系统如图2所示。

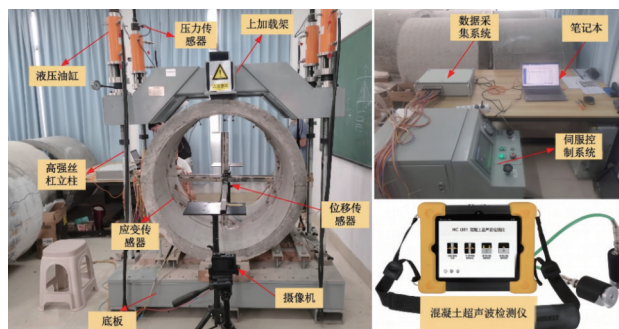


图2 管道三点加载试验系统

Fig.2 System for three-point loading test on pipelines

该试验系统可进行压力调节、流量调节及油路转换,对管道施加的最大荷载可达300 kN以上。该系统具有直接加载、预压加载和监测一体化等功能,通过调节中空垫块中的紧固螺帽和上加载梁下部的丝杠螺帽,可进行管道二次受力的试验研究。

3.1 加载宏观破坏结果

1#~3#管道的破坏形式具体如图3所示。其中,主裂缝位置以实线椭圆标注,次裂缝以虚线椭圆标注。

由图3可知,管道的开裂和破坏情况具有明显对称性。在3根管道内侧,管顶与管底(90° 和 270° 位置附近)各有1条主裂缝沿纵向贯穿,混凝土被明显拉开。1#和2#管左右内壁受压裂破坏,各形成1条裂缝,并伴有混凝土碎块脱落;3#管内壁左右侧的压裂缝不明显,主要原因是该管道在达到极限承载力后卸载较快,加载架未继续向下移动,裂缝尚未充分发展。在3根管道外侧,左右裂缝分布较为分散。主裂缝均分布于 0° 和 180° 起拱线附近,在主裂缝的上下相邻区域内,发展出多条张拉次裂缝。其中,1#管左侧4条,右侧5条;2#管左侧3条,右侧4条;3#管左侧6条,右侧4条。次裂缝的宽度小于主

裂缝,产生和发展较为迟缓,大部分裂缝分布对应的管道正截面圆心角约为 60° 范围内(3#管左侧裂缝分布对应的圆心角约为 90°)。裂缝间隔分布较为均匀,基本沿管道纵向分布,少数裂缝连通交叉,均表现出张拉破坏特征。

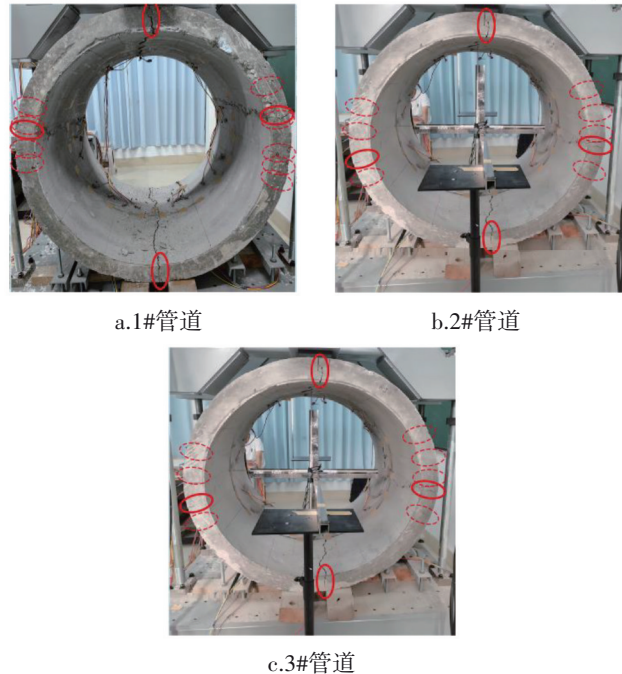


图3 1#~3#管道破坏形式

Fig.3 Forms of failure for pipelines 1# to 3#

3.2 荷载-位移曲线

管道加载全程的荷载与竖向位移的关系如图4所示。

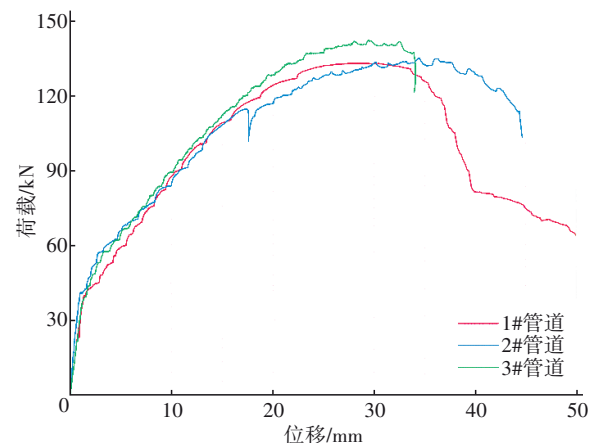


图4 1#~3#管道的荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves for pipelines 1# to 3#

由图4可知,3根管道的受力特征相似,在位移增加过程中,承受的荷载呈先增加后减少的趋势,最大值出现在位移约30 mm处。加载初期,管道处

于弹性阶段,荷载与位移近似成正比;当达到裂缝荷载时,曲线图出现拐点。随着裂缝发展,位移增长加快。达到峰值荷载后,管道完全破坏,峰值荷载即为其极限承载力值。1#和2#样本在位移增加过程中表现出较为相近的极限承载力,而3#样本的极限承载力略高,表明其在某些条件下可能具有较强的力学稳定性或不同的材料特性。总体而言,该图提供了材料在不同位移下的力学性能定量信息,可用于评估材料的强度和韧性。

管内4个监测点的荷载-位移曲线如图5所示。

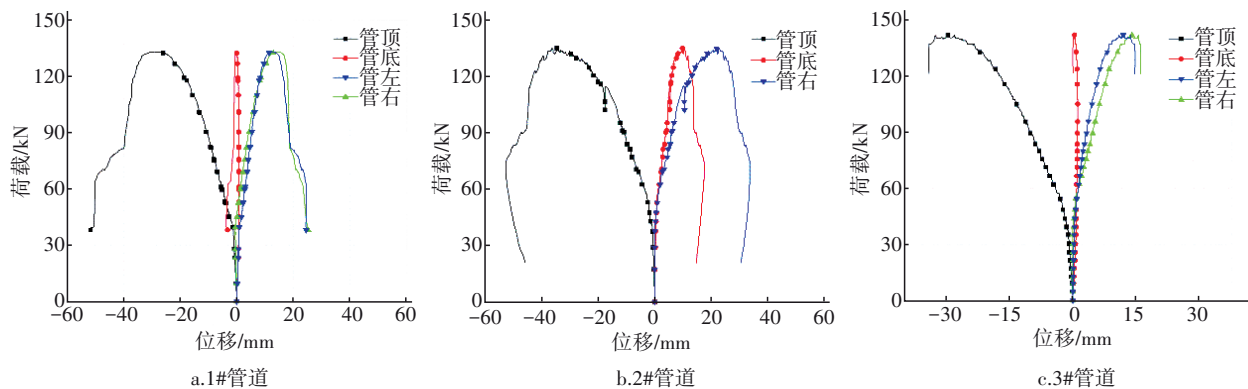


图5 管道内侧监测点的荷载-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves at monitoring points inside pipelines

4 修复后管道加载试验

4.1 内衬喷涂法

喷涂系统如图6所示。该系统可分别控制水与

其中,2#管左侧位移传感器监测异常,该点数据已剔除。

由图5可知,管道左、右两侧的位移变化情况基本一致;管底位置的变形量明显小于其他3个监测点,而管顶位置的变形量最大。2#管底部传感器的探针恰好经过裂缝,导致该组监测的管底位移值略高于另外两组。开始加载后,管道产生较为明显的竖向变形,截面形状由近似圆形逐渐变为椭圆形,竖直方向的变形量明显大于水平方向,管顶与管底均呈现变平的趋势。

干料的添加量,在搅拌机拌和均匀后,通过压送管道输送至喷头进行管道修复。喷头包括高压旋喷头和人工气动喷头等,可根据施工需求选择。



图6 管道喷涂系统

Fig.6 Pipeline spray lining system

喷涂施工前,先将管道内表面清理干净,用高压水枪将混凝土表面润湿,并将高压旋喷喷头置于喷涂起点处的管道内轴线上。喷涂过程中,与喷头后端连接的钢丝绳将匀速回收,牵引旋喷头沿管道纵向移动,形成均匀的内衬层。试验分别对1#和2#管道进行不同厚度的喷涂加固,修复后管道直接加

载试验的组别设置如下:1-1#管,平均喷涂壁厚33 mm;2-1#管,平均喷涂壁厚45 mm。为防止喷涂过厚导致顶部水泥砂浆塌落,2-1#管的内衬施工分2层进行:第1层喷涂厚度为25 mm,待水泥砂浆硬化后喷涂第2层,最终形成总厚度为45 mm的内衬层,两层喷涂的时间间隔为5 h。管道在温度(20±

5) $^{\circ}\text{C}$ 、湿度95%的室内环境中进行养护。采用防水篷布覆盖管道,并在其内部放置1盆清水,每日洒水2次,确保管道处于恒温恒湿状态。养护到期后,将管道置于试验加载架上,随后粘贴应变片并布设线性可变差动变压器(LVDT)。试验采用逐级加载方式,由0开始增加荷载,直至管道达到极限承载力后破坏。测试过程中,实时观测并记录裂缝发展情况。

4.2 内衬喷涂结构破坏和修复形式

组合结构的荷载与竖向位移关系如图7所示。可知,修复后的管道-内衬结构仍呈现出弹性阶段-裂缝发展-达到极限承载力后破坏的典型力学行为。与钢筋混凝土管道不同,修复后管道在加载初期达到弹性极限点后,荷载出现明显的下降段,此时位移快速增大,随后荷载逐步攀升,最终达到极限承载力。1-1#管在裂缝发展阶段出现数次荷载下降点,最终在60 kN左右峰值荷载下持续位移约3.4 mm后,荷载缓慢降低,达到破坏状态。2-1#管在裂缝发展阶段的荷载和位移持续上升,在荷载达到93 kN左右、持续位移约1.4 mm后便快速破坏。这一现象与两根管道界面剥离历程、范围及裂缝发展等综合因素有关。

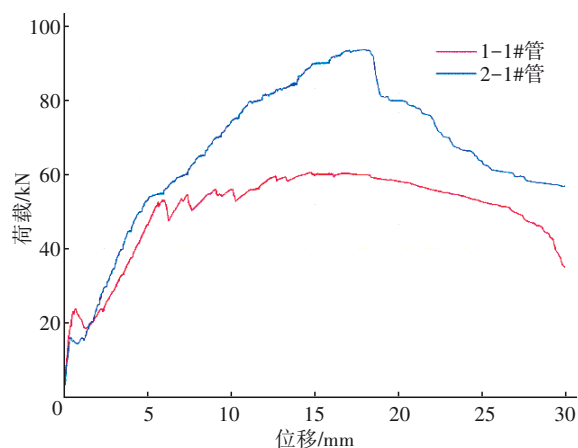


图7 组合结构的荷载-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves of composite structures

1-1#管和2-1#管的弹性刚度分别比原管高17.7%和2.1%。修复后内衬的裂缝荷载及对应位移相较原管均有所降低,表明原管道与内衬的界面作用对结构受力影响显著,且不同管道之间存在明显差异。1#管和2#管修复后的极限承载力分别达到原管极限承载力的45.4%和69.4%,说明增大水泥砂浆内衬层厚度能够显著提升修复后管道的承

载力。若需进一步提高极限承载力,可考虑继续增加内衬层厚度,但这将导致管道过流断面减小。修复后1#和2#管道破坏荷载对应的位移分别为原管的51.1%和52.1%,这是因为原管道在修复前整体变形较大,剩余承载力微弱,仅依靠水泥砂浆内衬难以完全恢复原管的力学性能。然而,修复后管道在达到极限承载力时具有明显的持续位移段,表明整体结构延性有所提高。

1-1#管开裂情况如图8所示。

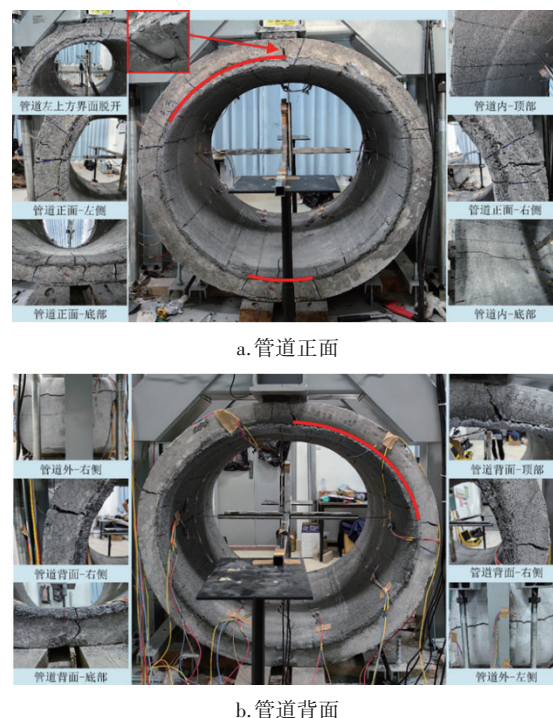
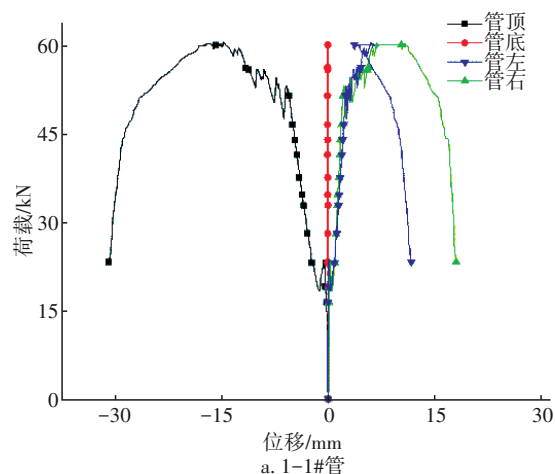


图8 1-1#管开裂情况

Fig.8 Cracking condition of pipeline 1-1#

管道修复后,其内部4个监测点的荷载与位移关系如图9所示。



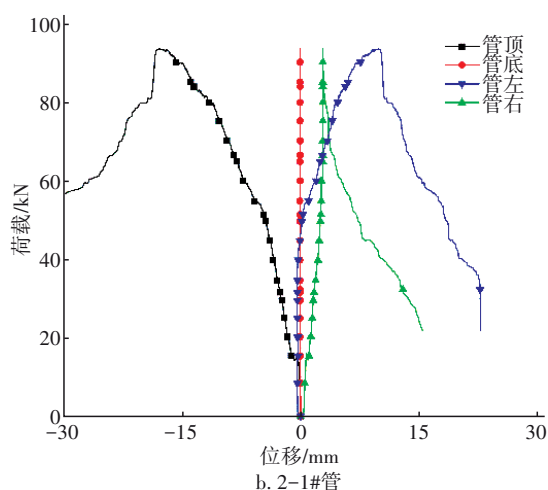


图9 1-1#管和2-1#管监测点的荷载-位移曲线

Fig.9 Load-displacement curves at monitoring points of pipelines 1-1# and 2-1#

由图9可知,管道竖直方向的变形量大于水平方向。在达到裂缝荷载时,1-1#管的竖向变形量为1.66%,2-1#管的竖向变形量为2.06%;在管道破坏至完全卸载后,1-1#管的竖向变形量为5.53%,2-1#管的竖向变形量为6.25%。管顶位置的位移绝对值最大,管道左侧和右侧的位移呈现不对称变化,其主要原因是主裂缝具有不对称性,塑性铰的位置导致其运动路径有所差异。

5 结论

① 研究证实,合理优化内衬壁厚对于提升修复后排水管道的承载力与耐久性至关重要。试验数据表明,当内衬壁厚由33 mm增至45 mm时,排水管道的极限承载力可从60.54 kN提升至93.83 kN。

② 排水管道修复前后的受力特性对比分析表明,修复后1#和2#管道的极限承载力分别达到原管道极限承载力的45.4%和69.4%,且增大水泥砂浆内衬层厚度能够显著提升修复后管道的承载力。建议未来进一步探索不同内衬材料的性能优化及施工技术,以提高修复效果的稳定性和可靠性;同时,还应关注不同环境下内衬材料的应用效果,为排水管道修复提供更全面的理论依据和实践支持。

参考文献:

- [1] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京:人民交通出版社, 2008: 1-28.
- MA B S. The Science of Trenchless Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 1-28 (in

Chinese).

- [2] 谷俊鹏,刘静,黄俊,等. 数据+模型“双驱动”的排水管网风险评估与预测体系[J]. 中国给水排水, 2025, 41(20):17-24.
- GU J P, LIU J, HUANG J, et al. Risk assessment and prediction system for drainage networks driven by data and models [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(20):17-24 (in Chinese).
- [3] 谷俊鹏,潘铁津,王哲. 深圳市G区排水管网精细化管理对策与措施[J]. 中国给水排水, 2025, 41(22): 6-11.
- GU J P, PAN T J, WANG Z. Countermeasures and measures of refined management for drainage network in District G, Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(22):6-11 (in Chinese).
- [4] 张子程,胡俊杰,温慧君,等. 横琴排水系统精细化运维管养的思路及实践[J]. 中国给水排水, 2025, 41(6):109-116.
- ZHANG Z C, HU J J, WEN H J, et al. Ideas and practice of constructing fine drainage operation and maintenance management in Hengqin [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(6):109-116 (in Chinese).
- [5] 宋连仲,张伟林,陈昭. 国内外管道修复技术现状及发展趋势[J]. 中国给水排水, 2005, 21(3):35-37.
- SONG L Z, ZHANG W L, CHEN Z. Current status and development trends of pipe rehabilitation technology at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(3): 35-37 (in Chinese).
- [6] TROTT J J. Buried Rigid Pipes: Structural Design of Pipelines[M]. London: Taylor & Francis, 1984:1-32.
- [7] BALLINGER C A, DRAKE P G. Culvert Repair Practices Manual: Volume I [R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1995.
- [8] PARKER C D. Mechanics of corrosion of concrete sewers by hydrogen sulfide [J]. Sewage and Industrial Wastes, 1951, 23(12): 1477-1485.
- [9] 姚军,程宁. 基于复掺矿物掺合料的高性能混凝土耐久性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(8): 44-47.
- YAO J, CHENG N. Research on durability of high performance concrete with mineral admixture [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(8): 44-47 (in Chinese).
- [10] ZHAO Y H, MA B S, SAMUEL T A, et al. Structural performance of damaged rigid pipe rehabilitated by centrifugal spray on mortar liner [J]. Tunnelling and

- Underground Space Technology, 2021, 116: 104117.
- [11] 张海丰. 水泥砂浆内衬法修复混凝土重力管道理论与实验研究[D]. 武汉:中国地质大学,2019:20-25.
- ZHANG H F. Theoretical and Experimental Study on Structural Performance of the Sprayed-on Cement Mortar Liners Rehabilitaing Precast Concrete Drainage Pipe [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019: 20-25(in Chinese).
- [12] MCALPINE G. Structural rehabilitation of semi-elliptical concrete sewers [C]//ASCE. Pipelines 2006: Service to the Owner. Reston: ASCE,2006: 1-7.
- [13] 史国棚,马保松,杨超,等. 水泥砂浆喷涂法修复钢筋混凝土管道结构性能[J]. 中国给水排水,2020,36(20):32-38.
- SHI G P, MA B S, YANG C, et al. Structural performance of reinforced concrete pipe repaired by cement mortar spraying method [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 32-38(in Chinese).
- [14] GARCÍA D B, MOORE I D. Performance of deteriorated corrugated steel culverts rehabilitated with sprayed-on cementitious liners subjected to surface loads [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47: 222-232.
- [15] RIAHI E, YU X, NAJAFI M, et al. D-load strength of concrete pipes with epoxy linings [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2019, 10(4): 04019030.
- [16] BAZANT Z P, CAO Z. Size effect in brittle failure of unreinforced pipes [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1986, 83(3): 369-373.
- [17] MATTHEWS J C, CONDIT W, VAIDYA S, et al. Performance Evaluation of an Innovative Fiber Reinforced Geopolymer Spray-applied Mortar for Large Diameter Wastewater Main Rehabilitation in Houston, TX[R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency (EPA), 2014:45-63.
- [18] ROYER J R, ALLOUCHE E N. Laboratory testing and analysis of geopolymer pipe-lining technology for rehabilitation of sewer & storm water conduits [C]//North American Society for Trenchless Technology (NASTT). Proceedings of the NASTT No-Dig Show 2016. Texas: NASTT, 2016: 2-10.
- [19] YOUNG W C, BUDYNAS R G, SADEGH A M. Roark's Formulas for Stress and Strain[M]. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2012: 26-68.
- [20] WATKINS R K. Structural Mechanics of Buried Pipes [M]. Florida: CRC Press, 2000: 43-69.
- [21] SHI Z H, WANG J, MASAANKI N, et al. Structural Analysis and Renovation Design of Ageing Sewers: Design Theories and Case Studies [M]. Warsaw: De Gruyter Open Poland, 2016: 121-124.
-
- 作者简介:董顺(1992—),男,四川达州人,博士,高级工程师,主要从事非开挖工程等领域的科研与实践工作。
- E-mail: dong_shun@ctg.com.cn
- 收稿日期:2024-04-23
- 修回日期:2025-11-26

(编辑:沈靖怡)

用生命之水,筑美丽中国