

Analysis on anti seepage and structural stability of inverted siphon immersed pipe section of water conveyance project in mountainous area

Rui Zhang

China Railway Shanghai Engineering Bureau Group Huahai Engineering Co., Ltd., Shanghai, 201101, China

Abstract

In water conveyance projects in mountainous areas, inverted siphon immersed tube is an important water conveyance structure across valleys, across channels and under complex terrain conditions. Its safety directly affects the continuous operation ability of the water conveyance system and the level of regional water supply guarantee. However, in practice, affected by the factors such as large topographic relief, complex geological structure, significant water pressure gradient and high intensity of external environmental disturbance, the inverted siphon immersed pipe section often faces the risks of seepage damage, pipeline floating, joint leakage, uneven settlement of the pipeline and fatigue damage. In order to systematically reveal the anti-seepage demand and structural stability control mechanism of inverted siphon immersed pipe section under mountain conditions. Based on the research of using composite impermeable layer, flexible joint sealing, foundation bearing layer reinforcement, longitudinal constraint optimization and anti floating measures configuration, this paper can significantly improve the safety margin of immersed pipe section in complex mountainous environment, and provide technical reference for similar projects.

Keywords

inverted siphon; Immersed pipe section; Seepage prevention; Structural stability; Seepage analysis

山区输水工程倒虹吸沉管段防渗与结构稳定性分析

张锐

中铁上海工程局集团华海工程有限公司，中国·上海 201101

摘 要

山区输水工程中，倒虹吸沉管作为跨谷、穿槽及复杂地形条件下的重要输水结构，其安全性直接影响输水系统的连续运行能力与区域供水保障水平。但实践中受地形起伏大、地质构造复杂、水压梯度显著和外界环境扰动强度高等因素影响，倒虹吸沉管段常面临渗流破坏、管道浮托、接头渗漏、管道不均匀沉降以及疲劳损伤等风险。为系统揭示山区条件下倒虹吸沉管段的防渗需求与结构稳定性控制机理。本文基于研究采用复合防渗层、柔性接头密封、基础持力层加固、纵向约束优化及抗浮措施配置，可在复杂山区环境下显著提升沉管段的安全裕度，为类似工程提供技术参考。

关键词

倒虹吸；沉管段；防渗；结构稳定性；渗流分析

1 引言

随着山区水资源调配规模的不断扩大，跨山谷输水工程中倒虹吸结构的应用场景愈加广泛，其在地形适应性与高压输水能力方面具有不可替代的作用。倒虹吸沉管需在地下或低洼区域承担较高水头差，运行工况中不仅承受内部水压，还需面对复杂地应力、地基变形及环境温度的动态变化。本研究旨在提供一套覆盖设计、施工与运行阶段的综合分析框架，为山区输水工程的安全运行提供理论与实践依据。

2 山区输水工程倒虹吸沉管段的工程特征与风险暴露机制

山区地貌具有高差大、坡面陡峭、谷地狭窄及地层发育不均的典型特征，使得倒虹吸沉管的选线多需穿越陡坡崩塌堆积体、风化岩层或松散坡积物。山区地层结构常呈现明显的节理裂隙，渗透系数空间差异大，当沉管段处于高渗透性土体中时，外部渗流容易沿管壁—土体界面浓集，造成局部冲刷、空洞扩展以及基础承载能力衰退。而山区岩土体季节性干湿变化强烈，体积收缩与膨胀交替出现，使管道周围约束状态随时间波动，增加不均匀沉降与结构弯曲变形的可能性。尤其在高地应力区域，若管身埋深较大，围岩侧压不均均可导致纵向附加应力升高，使接头部位成为潜在薄弱点^[1]。

【作者简介】张锐（1980—），男，中国吉林吉林人，本科，工程师，从事水利工程研究。

倒虹吸系统依赖压力流输水，由于入口与出口水位差通常较大，沉管段内部水压长期维持在高水平。运行中，阀门操作、水泵启停及突发停水可产生水锤效应，使管壁承受高幅度的瞬态压力波。压力波传播速度与管道材质、内壁粗糙度及周围介质阻尼相关，其耦合作用可能诱发疲劳裂纹的形成与扩展。在综合分析山区输水工程的地形特征、渗流行为与结构

受力机理的基础上，本文构建了“风险识别—渗流与受力分析—防渗体系设计与结构稳控—施工质量控制—运行监测与反馈优化”的研究路线框架。

该框架不仅体现了倒虹吸沉管段在设计、施工与运行全过程中的技术逻辑，也为后续章节的结构布局提供了明确指引，如图1所示。

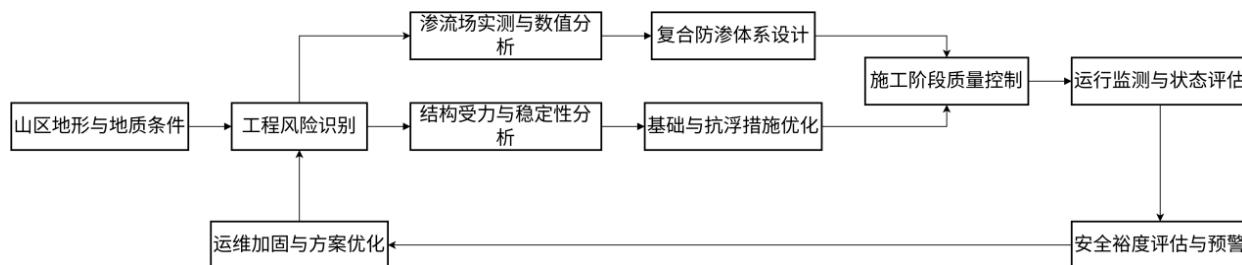


图1 山区输水工程倒虹吸沉管段防渗与结构稳定性图

3 倒虹吸沉管段的渗流场分布规律与防渗机理分析

3.1 渗流场形成机理与关键影响因素

倒虹吸沉管段的渗流场是在内部高水压、外部天然水力系统以及管道与土体界面多因素共同作用下形成的复合渗流体系，其演化过程具有明显的空间异质性和时间依赖性。首先，管壁渗透性能是影响渗流场分布的首要因素^[2]。对于未完全密实的混凝土管道或因老化、腐蚀导致微裂隙扩展的钢衬类结构，其微观孔隙会在高水头作用下形成渗水通道；而玻璃钢、HDPE等材料虽然本体渗透性较低，但在受温度循环和应力集中影响时仍可能出现界面渗漏。其次，周围土体的渗透系数决定了水流的扩散模式和渗压消散路径。山区输水工程多处于坡积层、崩积物与风化岩混合分布的场地条件中，土体渗透性差异显著，局部高渗透性碎石夹层会造成渗流场的集中通道，使局部渗压显著抬升；而低渗透性粘性土则会在渗流扩散过程中导致渗压堆积，增加对防渗层的压力作用。

除材料和土体因素外，水头差是驱动渗流的主要动力来源。倒虹吸结构在运行中内部水压通常远高于外部孔隙水压，当两者形成较大差值时，将诱发由内向外的渗流过程。特别是在高压段或低谷地形区，水头差可以达到数百千帕，使防渗系统承受持续且强烈的渗透应力。与此同时，季节性降雨、地表径流汇集以及地下水位上升也会对渗流场产生外部扰动。当外部水位显著超过管内水位时，渗流方向可能发生倒置，使外界渗水沿管壁薄弱处或接头缝隙倒灌入管体，形成外渗内漏的反向渗流过程。这种间歇性渗流方向变化不仅加速孔隙结构劣化，还可能导致土体颗粒被反复迁移，引发潜蚀与管底局部冲刷^[3]。在渗流演化过程中，接缝部位由于结构不连续、应力集中及密封材料老化，是渗压集中和渗漏发生的高风险区域。渗流水头在接缝区的突跳效应会显著提高局部渗流速度，使防渗材料在较短时间内出现疲劳破

坏。因此，充分理解渗流场形成机制及其影响因素，是制定可靠防渗策略的前提。

3.2 防渗结构体系的构成原理

为了有效阻隔倒虹吸沉管段复杂渗流场的扩展，工程设计中通常构建多层级、多材料协同的复合防渗结构体系，使其具备高抗渗能力、良好界面适应性和长期耐久性。整体防渗体系由管壁本体、外包防水层、接头密封构造及周围土体处理层四部分构成，其核心思想是通过连续封闭、柔性适应与低渗透性包围相结合，形成阻断渗流路径、延长渗流距离并降低局部渗压的综合防护格局^[4]。第一，管壁材料是防渗体系的主体屏障。对于钢筋混凝土管道而言，其防渗性能依赖于骨料级配、孔隙率、龄期及外加剂应用，通过采用低水胶比、高性能减水剂与致密化外加剂，可显著降低本体渗透性。对于HDPE或玻璃钢管等柔性管材，其本体基本不渗透，但需要重点关注安装阶段的机械损伤和运行中的温度变形，这些因素往往是防渗失效的源头。为进一步增强管壁抗渗能力，工程中常在管外表面设置喷涂聚脲、环氧涂层或防水砂浆外包层，这类材料具备优异的粘结性及延展性，可在地基变形或温度变化引起的微裂缝中保持连续性，从而形成沉管段外部的第一道连续防水屏障^[1]。

第二，接头密封是防渗体系的关键环节。接头部位不仅承受内部水压和外部土压力，还需适应管道因地基沉降、温差变化或运行压力变化产生的位移，因此需采用具有柔性恢复能力的密封型式。常用构造包括双道橡胶圈密封、柔性胶浆密封与钢套筒压紧结构。橡胶圈通过适当的压缩量产生径向密封力，可抵抗高压水条件下的渗流侵入；柔性密封胶能在微裂纹出现时自动填充缝隙；套筒式结构通过机械压紧作用保证接头在位移作用下仍保持密封性。为了提升耐久性，部分工程在接头处增设加固环，以减少应力集中并提升密封构造的稳定性。可见复合防渗体系通过材料特性、结构构造与地基处理的协同作用，在倒虹吸沉管段形成具有连续

性、冗余性与耐久性的防护体系。其核心目标在于阻断渗流通道、降低渗压集中并提升结构稳定性，为沉管段长期安全运行提供可靠保障。

4 倒虹吸沉管段的结构受力特征与稳定性影响机制

4.1 内部水压力与外部荷载共同作用下的结构受力特征

倒虹吸沉管在运行过程中呈现出典型的压力管道受力特征，其结构安全受内部水压、外部土压力、地基反力以及温度应力的耦合作用影响。内部水压力是主导环向应力与径向拉应力的根本来源，在高水头输水条件下，水压沿管壁产生均布的环向拉应力，使管壁的抗拉强度成为控制爆管风险的关键参数^[2]。当输水系统出现水锤时，瞬态压力急剧升高，环向应力与轴向应力同步放大，使结构短时间内承受远高于稳态工况的加载，若材料存在疲劳微裂纹，则可能在瞬变压力下迅速扩展。

外部荷载主要包括覆土压力、地下水压力与可能存在的附加动土压力。在山区地形中，覆土厚度分布不均，使管壁受到的外压呈现显著差异，局部压力集中会引发椭圆化变形，进而导致环向压应力失稳。地基反力的均匀性直接关系到管道纵向弯矩的大小，若地基呈现软硬不均的特征，容易形成管道的悬空段与高应力集中区，使纵向拉压应力周期性变化，增加疲劳累积效应。根据经验观察不难发现温度变化会引起管壁的热胀冷缩，在约束条件下形成附加应力，长期作用可能导致材料性能退化或接头松动，使结构稳定性受到进一步削弱。

4.2 结构失稳模式及其形成机制

在多种荷载长期耦合作用下，倒虹吸沉管段可能发生多类型结构失稳，其典型破坏模式包括环向拉裂、纵向弯折变形、接头失稳与抗浮失效。环向拉裂多由高内压或材料老化引起，当管壁强度不足或表面存在缺陷时，内部水压作用将导致裂缝沿环向出现并逐步扩展，最终发展为爆管事故。纵向弯折破坏常与不均匀沉降密切相关，当地基承载能力沿线路变化显著时，管道在纵向方向形成弧形变形，使拉压应力在管节交接处集中，接头承载状态恶化，更易产生脱节、剪切破坏或密封失效。接头区域失稳是倒虹吸结构中最常见且最危险的破坏形式之一^[3]。由于接头在结构上具有先天不连续性，其密封构造容易在水压波动、地基沉降及温度变化的共同作用下发生压缩量不足、局部开裂或密封层老化，从而形成渗漏路径。进一步发展时，渗流侵蚀土体导致管道支承条件削弱，使接头受力进一步偏离设计工况，形成恶性循环。抗浮失效则多发生在高地下水位或洪季条件下，当浮托力超过管道自重及覆土重量时，结构会产生整体上浮趋势，引发覆土破坏、管道位移甚至结构变形。此类破坏往往突

然发生，治理难度大，因此在设计阶段须严格开展抗浮稳定校核。

4.3 倒虹吸沉管段防渗设计与结构稳定性控制技术

防渗体系的设计需遵循“多道阻隔、整体封闭”的原则，在材料、构造与界面处理层面同时发力。针对管壁，应采用厚壁高密实度材料，通过外包环氧、聚脲或防水砂浆提升表面抗渗能力^[4-5]。对接头区域，需优化橡胶圈压缩量，设置双道密封构造，并通过加强环或钢套筒提高受力均匀性，使其在地基变形情况下仍保持密封效果。周围土体防渗采用注浆加固与黏性土回填联合方式，形成低渗透率环状土体屏障，使渗流路径尽量延长。对运行期可能出现的裂缝，需预设注浆管，为后续维修提供通道，实现结构全寿命周期防渗能力的可恢复性。在结构安全控制方面，可通过纵向约束体系、抗浮设计与地基加固措施提升整体稳定性。纵向约束体系包括支墩、锚固桩与限位墩，可抑制管道在高压与温度变化下产生过大轴向位移。抗浮应力校核需基于最不利水位条件，若浮托力明显大于管道自重与覆土重量之和，应增设抗浮锚杆、压重块或加厚覆土层，以保证抗浮稳定。地基加固措施包括换填、强夯、注浆固结与桩基支撑等方式，通过提高地基承载力、降低变形量、减少差异沉降，使管道受力更加均匀。

5 结论

山区输水工程中的倒虹吸沉管段面临渗流复杂、结构受力耦合明显、地基条件差异大及环境变化频繁等共同挑战，其防渗与稳定性控制是一项系统工程。研究表明，渗流场的演化与管身材料、接头密封、外部渗透条件共同作用，结构稳定性则由水压力、地基反力与温度应力的耦合决定。通过构建复合防渗体系、加强接头密封、实施地基加固、优化结构约束与配置抗浮措施，可显著提升沉管段在全寿命周期内的安全性。工程实例进一步说明，基于地形特征、地质条件与水力作用的精细化设计，能够有效预防渗漏与结构失稳风险。未来应加强对水力瞬变、渗流一应力联合作用机理的研究，并结合数字孪生和监测技术，构建沉管段运行状态的实时评估体系，为山区输水工程提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 廉俊霞. 张坞渠灌区提升改造工程倒虹吸设计[J]. 河南水利与南北水调, 2025, 54(09): 55-56.
- [2] 杨奇, 马福恒, 叶伟, 等. 超标准暴雨洪水下长距离调水工程风险评估研究[J]. 水利水电工程学报, 2025, (05): 101-112.
- [3] 刘巧银. 明渠调水工程泵站故障情景下上游群闸应急调控研究[D]. 河北工程大学, 2025. DOI: 10.27104/d.cnki.ghbjy.2025.000480.
- [4] 张帅康. 大流量倒虹吸充水过程及出口流态水力特性研究[D]. 黑龙江大学, 2025. DOI: 10.27123/d.cnki.ghlju.2025.001207.
- [5] 苑征. 浅析山区输水工程渡槽方案设计与研究[J]. 地下水, 2022, 44(05): 116+122. DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2022-05-037.