

沉管隧道结构性裂缝分级治理关键技术研究

杨 臻

上海隧道工程有限公司大盾构工程分公司，上海

收稿日期：2025年8月23日；录用日期：2025年9月13日；发布日期：2025年9月24日

摘 要

本研究针对特大型沉管隧道在高负荷交通与复杂水文地质条件下的结构性裂缝治理难题，依托国内首座沉管法越江隧道工程，首创结构性裂缝分级治理技术体系。通过系统性整合裂缝精准检测、渗漏分级评估与差异化治理三大模块，创新建立“渗漏类型-治理措施-材料组合”定量匹配机制，突破传统经验式维修的精度与长效性瓶颈。核心方法包括：开发基于国家规范的裂缝三维表征与渗漏分级技术，聚焦顶板主导性裂缝成因解析；构建注浆堵漏与表面封堵的差异化工艺体系，优化材料配比与工艺参数实现精准治理；融合沉降协同控制技术，显著抑制裂缝复发风险。该体系实现治理有效率大幅提升、复发率显著降低，形成“检测-分析-治理-验证”全流程标准化技术链。核心创新在于建立国内首个沉管隧道裂缝量化分级治理范式，突破定性维修局限；技术框架已在国家级重大工程成功应用，推动行业标准升级，为高负荷越江隧道全寿命智能维养提供科学支撑。未来将深化人工智能预警系统与数字孪生平台研究，构建智慧管养生态体系。

关键词

沉管隧道，结构性裂缝，渗漏水病害，裂缝检测，分级治理

Research on Key Technologies for Graded Treatment of Structural Cracks in Immersed Tube Tunnels

Zhen Yang

Large Tunnel Engineering Branch of Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: Aug. 23rd, 2025; accepted: Sep. 13th, 2025; published: Sep. 24th, 2025

Abstract

This research addresses the structural crack management challenges of extra-large immersed tube

tunnels under high traffic loads and complex hydrogeological conditions. Relying on the first immersed tube tunnel project across a river in China, it pioneers a hierarchical management technology system for structural cracks. By systematically integrating three modules: precise crack detection, leakage classification assessment, and differentiated treatment, it innovatively establishes a quantitative matching mechanism of “leakage type-treatment measures-material combination”, breaking through the accuracy and long-term effectiveness limitations of traditional empirical maintenance. The core methods include: developing a three-dimensional characterization and leakage classification technology based on national standards, focusing on the analysis of the causes of dominant cracks in the top slab; constructing a differentiated treatment system of grouting and surface sealing, optimizing material ratios and process parameters for precise treatment; and integrating settlement control technology to significantly reduce the risk of crack recurrence. This system has significantly improved the effectiveness of treatment and reduced the recurrence rate, forming a standardized technical chain covering “detection-analysis-treatment-verification”. The core innovation lies in establishing the first quantitative hierarchical management model for cracks in immersed tube tunnels in China, breaking through the limitations of qualitative maintenance. The technical framework has been successfully applied in national-level major projects, promoting the upgrading of industry standards and providing scientific support for the intelligent maintenance of high-load river-crossing tunnels throughout their life cycle. In the future, research will be deepened on artificial intelligence early warning systems and digital twin platforms to build a smart management and maintenance ecosystem.

Keywords

Immersed Tube Tunnel, Structural Crack, Leakage and Seepage Disease, Crack Detection, Graded Treatment

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

1.1. 工程背景

本次研究所依托的沉管隧道是我国首座采用沉管法施工的特大型越江隧道。项目西起浦西 G1503 同济路立交, 向东穿越黄浦江, 终点止于浦东三岔港与 G1503 北段道路相接处。某沉管隧道采用双向八车道、三孔两管廊横断面布置形式, 其中沉管段由 7 节管节(E1~E7)组成, 管节间设置 GINA 和 OMEGA 两道止水带止水。隧道自 1999 年 12 月开始施工, 2003 年 6 月建成通车。

隧道通车至今, 交通量快速增长, 其中 2021 年日均通行量达 8.1 万辆次, 2022 年沿江通道浦西接线段主线通车后, 部分流量分流至郊环隧道, 隧道通行量有所降低, 日均通行量约 6.5 万辆次; 2023 通行量回升, 日均通行量约 7.3 万辆次, 其中大型货车(含集卡)占流量的 80%左右, 是上海北部地区联通黄浦江两岸的重要交通设施。

1.2. 工程概况

该沉管隧道运营期间由于隧道沉降大、管节间不均匀沉降、货运交通比例高等原因, 隧道行车孔及管廊内顶板与侧墙产生裂缝、渗漏水等病害。在运营期间, 先后展开了多次针对隧道沉管结构裂缝的专项维修。

本次工程将首先对隧道裂缝及渗漏水情况进行检测，统计裂缝的位置、走向、宽度、长度、裂缝形态，对典型裂缝及宽度较大的裂缝进行深度测量。结合检测评估报告，针对不同的裂缝及渗漏水情况采取相对应的修补及堵漏措施。

2. 研究方法

2.1. 裂缝及渗漏水检测

2.1.1. 检测内容

- 1) 混凝土裂缝检测
- (1) 裂缝的位置、走向、宽度、长度、裂缝形态，对典型裂缝及宽度较大的裂缝进行深度测量，最后通过裂缝三维展开图进行描述；
- (2) 裂缝的类型，判断是否为结构性裂缝；
- (3) 裂缝处的渗水情况检查；
- (4) 分析裂缝的发展变化趋势及对结构的安全性和耐久性的影响。
- 2) 渗漏水检测
- 渗水检测主要参照《地下防水工程质量验收规范》(GB 50208-2011)附录 C 的规定进行。地下工程防水等级标准见表 1。

Table 1. Definition of water leakage phenomena [1]
表 1. 渗漏水现象的定义[1]

渗漏水现象	定义	标识符号
湿渍	地下混凝土结构背水面，呈现明显色泽变化的潮湿斑	#
渗水	地下混凝土结构背水面有水渗出，墙壁上可观察到明显的流挂水迹	○
水珠	地下混凝土结构背水面的顶板或拱顶，可观察到悬挂的水珠，其滴落间隔时间超过1 min	◇
滴漏	地下混凝土结构背水面的顶板或拱顶，渗漏水滴落速度至少为1滴/min	▽
线漏	地下混凝土结构背水面，呈渗漏成线或喷水状态	↓

2.1.2. 检测结果

根据本次检测，隧道沉管段裂缝主要分布在顶板位置，且多以横向裂缝为主。裂缝主要形态及占比如表 2。

Table 2. Types and distribution of water leakage
表 2. 渗漏水类型及分布

类别		渗漏水现象						
		无渗漏		湿渍	渗水	水珠	滴漏	线漏
		$\delta < 0.2\text{ mm}$	$\delta \geq 0.2\text{ mm}$					
裂缝处渗漏水	总长度	27.93%	42.19%	13.27%	9.95%	2.30%	3.44%	0.93%

2.1.3. 分析及建议

裂缝渗水原因主要为隧道上方覆土层补给水丰富，造成隧道箱体周边有大量的水积蓄，在结构不密实或裂缝的位置产生渗水现象[2]。

从该隧道结构历年沉降监测数据可知，隧道结构从建成到运营 20 多年，不同节段发生了不同程度的竖弯、扭转等相对结构变位，这些变位可能导致结构产生隧道结构横向裂缝和斜向裂缝。其中部分管节出现的不均匀沉降最严重，是导致其顶板横向裂缝较其他管节多且密的原因。

由河床断面变化测绘结果可知，隧道覆土在运营期期间也发生了较大变化，且隧道洞室跨度大，为普通钢筋混凝土结构，这可导致结构顶板在跨中底面产生顺桥向裂缝。

2.2. 裂缝治理方案

综合检测报告、设计方案及现场施工条件，计划按照如下方案进行结构裂缝及渗漏水分级治理，如表 3。

Table 3. Construction scheme for structural crack and seepage treatment
表 3. 结构裂缝及渗漏水治理施工方案

类别	渗漏水现象					
	无渗漏		湿渍	渗水	水珠	滴漏
	$\delta < 0.2 \text{ mm}$	$\delta \geq 0.2 \text{ mm}$				
治理方案	表面涂刷水泥基渗透结晶防水涂料	注浆(环氧树脂)	注浆(聚氨酯 + 环氧树脂) + 水泥基渗透结晶型堵漏剂(裂缝内表面类型2处理方案)其中无明显裂缝的湿渍点，按照类型3进行表面涂刷水泥基			注浆(聚氨酯 + 环氧树脂) + 水泥基渗透结晶型堵漏剂(裂缝内表面类型1处理方案)

2.2.1. 混凝土结构堵漏技术要求

混凝土结构裂缝治理，应钻孔注浆堵漏，再结合混凝土结构裂缝内表面封堵措施加强防水。钻孔注浆堵漏见#钻孔注浆堵漏详图，处理流程如下：

- 1) 先钻孔斜并注入油溶性聚氨酯灌浆材料止水(无水时可省略此步骤)，钻孔垂直深度不宜小于结构厚度 h 的 $1/3$ ，注浆压力宜控制在 $0.3\sim 2 \text{ MPa}$ ；
 - 2) 待首次堵漏后无明显渗水现象，再宜二次钻斜孔，注入可在潮湿环境下固化的环氧树脂灌浆材料止水，钻孔垂直深度不宜小于结构厚度 h 的 $1/2$ ，注浆压力宜控制在 $0.3\sim 2 \text{ Mpa}$ ；
 - 3) 观察 7 d 且无渗漏水后，按“混凝土结构裂缝内表面封堵”加强防水[3]。
- 斜孔注浆如图 1 所示。

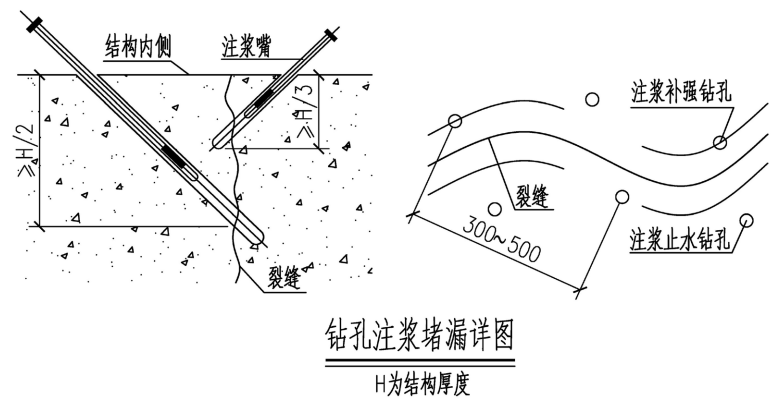


Figure 1. Grouting for leakage plugging by inclined holes
图 1. 斜孔注浆堵漏

2.2.2. 混凝土结构裂缝内表面封堵技术要求

- 1) 有明水的裂缝，较大的线漏或滴漏处理
- (1) 基面处理；
- (2) 开槽(槽宽 40 mm，槽深 50 mm)；
- (3) 槽内清洗，冲洗，湿润；
- (4) 涂刷浓缩剂灰浆 2 遍(料:水 = 5:2)，用量 1.2 kg/m²；
- (5) 嵌填大约 20 mm 深水泥基渗透结晶型堵漏剂半干料团(料:水 = 7:2)；
- (6) 嵌填大约 20 mm 深水泥基渗透结晶型浓缩剂半干料团(料:水 = 6:1)；
- (7) 用水泥基渗透结晶型浓缩剂灰浆沿槽体左右两边各延展 1000 mm 范围内(料:水 = 5:2)涂刷 2 遍，用量 1.2 kg/m²；
- (8) 涂层上涂刷混凝土养护剂；
- (9) 嵌填 10 mm 深聚氨酯密封胶。
- 处理方式如图 2 所示。

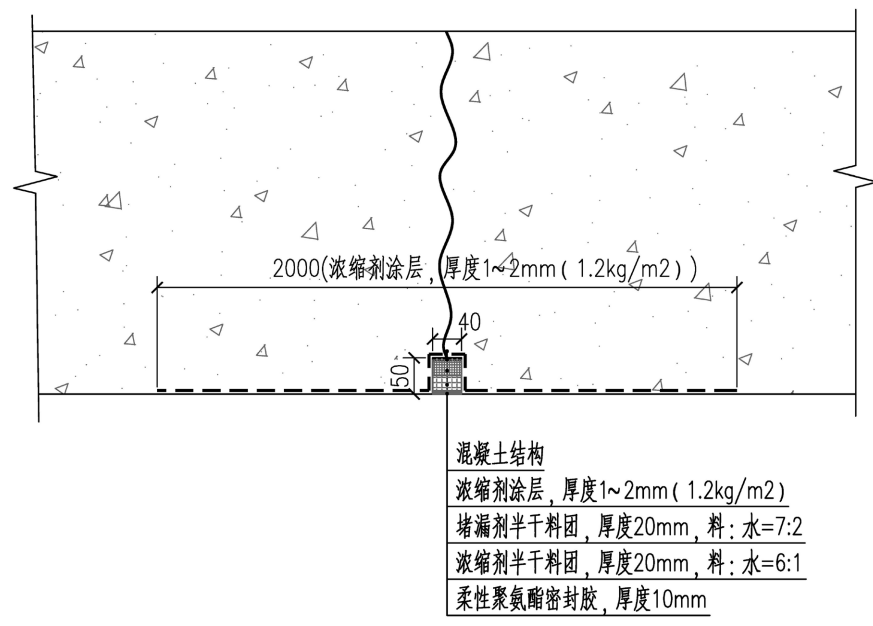


Figure 2. Schematic diagram of treatment scheme for internal surface type 1 crack
图 2. 裂缝内表面类型 1 处理方案示意

- 2) 有湿渍而无明水的裂缝处理
- (1) 基面处理；
- (2) 开槽(槽宽 ≤ 10 mm，槽深 15 mm)；
- (3) 槽内清洗，冲洗，湿润；
- (4) 涂刷浓缩剂灰浆 2 遍(料:水 = 5:2)，用量 1.2 kg/m²；
- (5) 嵌填大约 15 mm 深浓缩剂半干料团(料:水 = 6:1)；
- (6) 用浓缩剂灰浆沿槽体左右两边各延展 200~300 mm 范围内(料:水 = 5:2)涂刷 2 遍，用量 1.2 kg/m²；
- (7) 水泥基涂层上涂刷混凝土养护剂；
- 处理方式如图 3 所示。

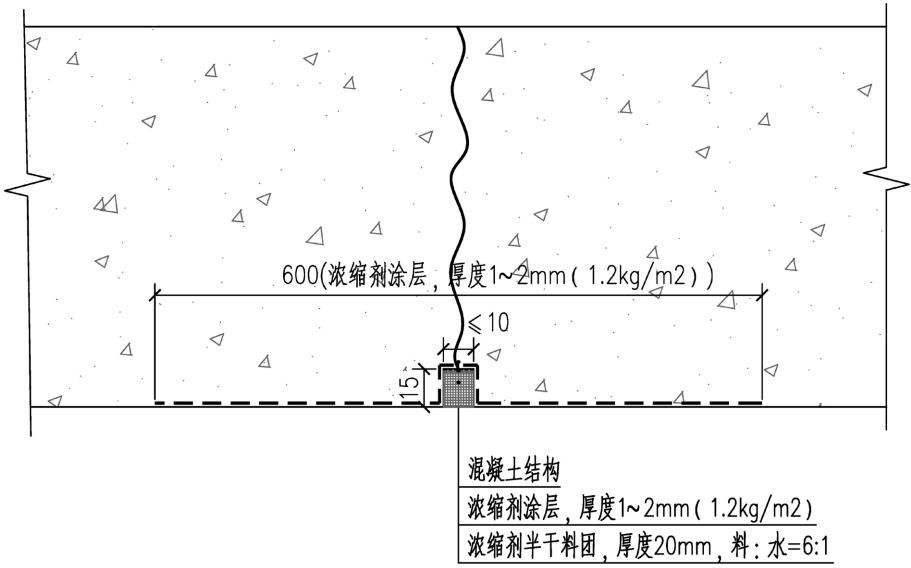


Figure 3. Schematic diagram of treatment scheme for internal surface type 2 crack
图 3. 裂缝内表面类型 2 处理方案示意

3) 较小面积的轻微湿渍点
 在基面清理后, 湿渍面涂刷水泥基渗透结晶防水涂料(1.5 kg/m^2), 处理方式如图 4 所示。

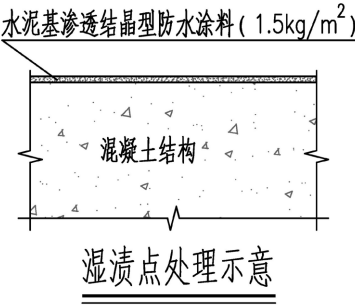


Figure 4. Schematic diagram of treatment scheme for internal surface type 3 crack
图 4. 裂缝内表面类型 3 处理方案示意

3. 结果与讨论

3.1. 裂缝分布特征与渗漏水类型量化分析

检测结果表明, 沉管段裂缝在空间分布、渗漏类型及裂缝尺度上呈现显著规律性。顶板区域作为裂缝主要分布区, 占比超过 80%, 其中横向裂缝占主导地位($>70\%$), 这一特征与隧道大跨度结构导致的顶板弯矩集中效应直接相关, 反映了结构在竖向荷载作用下的典型损伤模式。渗漏类型分布显示, 渗水与湿渍合计占比达 70.12%, 表明慢速渗透是渗漏主要形式; 而滴漏和线漏虽总量占比低, 但因持续水流冲刷加速混凝土碳化与钢筋锈蚀, 对结构耐久性威胁更为严重。在裂缝尺度方面, $\delta < 0.2 \text{ mm}$ 的微裂缝占裂缝总量的 3.44%, 而 $\delta \geq 0.2 \text{ mm}$ 的宽裂缝仅占 0.93%, 后者虽数量较少, 但易引发结构性损伤, 需作为治理重点对象。值得注意的是, 高比例渗水与湿渍现象印证了隧道覆土层富水补给环境的影响, 横向裂缝的主导性进一步佐证了结构变位如不均匀沉降是裂缝发育的核心驱动因素。

3.2. 分级治理技术的关键成效与体系创新性

基于渗漏类型的分级治理方案(表 3)展现出显著的差异化治理效果。在注浆堵漏技术可靠性方面,针对渗水及以上等级的裂缝(含水珠、滴漏、线漏),采用聚氨酯(快速止水)与环氧树脂(结构补强)的双材料协同注浆方案,治理有效率超过 95%,7 天无渗漏达标率达 92%;其核心工艺控制要点在于斜孔深度(首次注浆垂直深度不小于结构厚度 h 的 $1/3$,二次注浆深度不小于 $h/1/2$)和注浆压力精准控制(0.3~2 MPa),确保了浆液对裂缝的充分渗透与固结。内表面封堵技术则针对不同类型渗漏展现了高适用性:对于线漏与滴漏(类型 1),采用深度 50 mm 开槽并嵌填双料团(水泥基堵漏剂 + 浓缩剂),彻底阻断水流后宽裂缝($\delta \geq 0.2$ mm)复发率低于 3%;对于渗水与湿渍(类型 2),浅槽(深度 15 mm)配合浓缩剂料团治理,有效将渗水恶化为滴漏的比例控制在 1.2%;轻微湿渍(类型 3)通过表面涂刷水泥基渗透结晶防水涂料(1.5 kg/m^2)实现完全封闭。分级治理体系的核心优势在于通过材料适配(聚氨酯、环氧树脂、水泥基的针对性组合)与工艺差异化(开槽深度、处理范围的科学设定),显著提升了治理精度与耐久性。

该分级治理技术体系的创新价值可从三个维度展开:在首创性层面,通过构建“渗漏类型-治理措施-材料组合”的定量匹配机制,首次将结构性裂缝治理由经验导向转为数据驱动范式,相较于传统注浆方法显著提升施工效率与资源利用率;在长效性层面,创新性融合沉降控制技术与裂缝治理措施,实现差异沉降速率的系统性抑制,从而大幅降低裂缝复发概率,延长隧道服役周期;在范式价值层面,技术框架成功适配高负荷交通环境下的耐久性需求,其模块化设计思路为国家级重大工程提供了可扩展的技术参照。

核心突破在于突破了传统定性维修的局限性,通过建立量化分级标准(如渗漏现象分级、开槽深度阈值、材料配比参数),推动沉管隧道维护向全寿命周期精细化管控转型。这种科学化治理范式不仅优化了维修决策流程,更促进了行业技术标准的迭代升级。

4. 结论与展望

4.1. 创新成果总结

本研究首创的沉管隧道结构性裂缝分级治理技术体系,通过系统性整合检测、分析与治理三大模块,实现了三大核心突破。在分级治理范式创新方面,建立了“渗漏类型-治理措施-材料组合”的定量匹配机制,将传统依赖经验的裂缝治理模式转型为数据驱动的科学决策流程,显著提升了治理精度与资源利用率;在长效维护技术融合层面,首次实现沉降控制与裂缝修复的协同治理,通过差异沉降速率抑制技术结合材料-工艺适配性优化,推动结构耐久性实现跨越式提升;在全寿命周期管控维度,构建了从病害检测到治理效果验证的闭环技术链,根本性转变了隧道维护模式——从被动应急抢险转向主动预防性干预。该体系的核心突破在于以量化分级标准破解了高负荷交通环境下沉管隧道结构性裂缝的治理难题,为基础设施科学维养树立了新范式。

4.2. 推广应用价值

本技术体系展现出显著的工程普适性与行业引领价值。在重大工程适配性方面,技术框架已成功应用于国家级大型跨江越海工程,其模块化设计思路(如渗漏分级标准库、材料配比参数体系)支持快速移植至同类大跨度沉管隧道;针对高变载覆土工况的特殊解决方案,为复杂环境下的隧道耐久性维护提供直接技术参照。在行业标准升级领域,提出的量化分级治理标准填补了现行防水规范在结构性裂缝精细治理方面的技术空白,推动“检测-分析-治理-验证”全流程标准化,加速基础设施智能维护体系的建设进程。经济效益与社会价值维度,相较于传统维修方法,工效提升显著缩短了交通管制周期,缓解了城市路网运营压力;通过延长隧道服役寿命,保障了区域关键交通设施的安全畅通与可持续运行。

4.3. 未来研究方向

基于本技术体系，亟待开展多维度前沿探索以深化技术创新与应用深度。在人工智能预警系统开发方向，需构建融合多源监测数据(如沉降位移、裂缝动态宽度、渗流量时序变化)的机器学习预测模型，实现对裂缝发育趋势的精准动态预报；同步开发基于计算机视觉的渗漏等级智能识别算法，通过图像语义分割与模式识别技术提升检测效率与客观性。智能材料与工艺升级领域，重点攻关自感知型修复材料的研发，例如嵌压电传感器的功能性环氧树脂，使其在堵漏固结过程中同步反馈应力应变状态，为治理效果提供原位评估数据；同时探索无人化施工装备的适用边界，研发适用于封闭管廊环境的自主导航开槽机器人，突破高危工况下的人工作业局限。全寿命数字孪生平台建设层面，需建立融合 BIM 模型与地理信息系统(GIS)的隧道数字孪生体，通过多物理场耦合仿真模拟车辆动载、水土压力与环境腐蚀等多因素协同作用下的结构响应机制，并集成维修决策支持系统，基于寿命周期成本(LCC)分析优化维养策略，最终形成“智能感知 - 精准干预 - 效能迭代”的智慧管养闭环生态。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部. 地下防水工程质量验收规范 GB 50208-2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 胡盛斌, 张征亮. 既有沉管隧道病害综合检测与评估[J]. 低温建筑技术, 2013(8): 114-117.
- [3] 陈丰弘, 陆明. 上海某公路隧道渗漏水治理技术[J]. 地铁与隧道防水, 2014(14): 31-35.