

沉管隧道密闭空箱处理技术

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7月20日；录用日期：2025年8月10日；发布日期：2025年8月22日

摘 要

文章对上海外环隧道PX18空箱病害难题展开深入研究，全面剖析其产生的背景与现状。通过综合考量隧道结构特性、交通荷载、地质条件等多方面影响因素，详细阐述了针对PX18空箱问题所制定的处理方案。方案涵盖裂缝治理、防水处理、引流措施等多个关键环节，并对各环节的技术要点、施工工艺及实施效果进行了全面论证。研究表明，此处理方案具备科学性和可行性，有效解决了外环隧道PX18空箱问题，提升了隧道的稳定性与安全性，为类似隧道工程病害处理提供了有益的参考和借鉴。

关键词

外环隧道，沉管法施工，PX18空箱，裂缝治理，防水，引流

Sealed Box Treatment Technology for Immersed Tube Tunnel

Zhen Yang

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

Received: Jul. 20th, 2025; accepted: Aug. 10th, 2025; published: Aug. 22nd, 2025

Abstract

This article delves into the challenges of the PX18 empty box disease in the Shanghai Outer Ring Tunnel, thoroughly analyzing its background and current status. By considering the tunnel's structural characteristics, geological conditions, and traffic loads, the article details the treatment plan for the PX18 empty box issue. The plan includes key aspects such as crack management, waterproofing, and drainage measures, with a comprehensive evaluation of the technical points, construction methods, and implementation outcomes of each step. The study concludes that this treatment plan is both scientifically sound and practical, effectively addressing the PX18 empty box problem in the Outer Ring Tunnel, enhancing the tunnel's safety and stability, and providing valuable insights for similar tunnel engineering issues.

Keywords

Outer Ring Tunnel, Immersed Tube Construction, PX18 Empty Box, Crack Treatment, Waterproofing, Drainage

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

上海外环隧道作为城市交通网络的重要枢纽，承担着巨大的交通流量，对城市的经济发展和居民出行起着至关重要的作用。然而，随着使用年限的增加以及交通荷载的不断作用，隧道出现了诸如结构裂缝、渗漏水等病害，其中 PX18 空箱区域的问题尤为突出，严重影响了隧道的结构安全和正常使用。因此，对上海外环隧道 PX18 空箱问题进行深入研究并制定科学有效的处理方案具有紧迫的现实意义。

2. 外环隧道大修概述

2.1. 工程背景

外环隧道是上海市黄浦江上首次采用沉管法施工的大型越江隧道。隧道段全长 1860 m，其中浦西引道段 282.7 m，浦西暗埋段 457 m，沉管段 736 m，浦东暗埋段 177 m，浦东引道段 207.3 m (见图 1)。工程沉管段全长 736 m，共分为 7 节管节。各管节名称(名义长度)自浦西往浦东依次为：E1 (108 m)、E2 (104 m)、E3 (100 m)、E4 (100 m)、E5 (108 m)、E6 (108 m)和 E7 (108 m)。外环隧道平面见图 1，纵剖面见图 2。

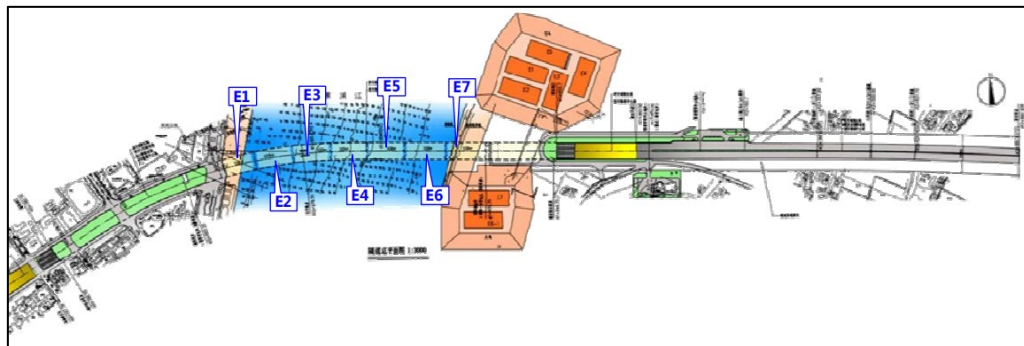


Figure 1. Plan of the outer ring tunnel

图 1. 外环隧道平面图

2.2. 运营现状

隧道在投入运营后，交通量逐年快速上升。经 20 年运营，受建设时施工设备和工艺等因素限制、外部建设环境条件改变、超负荷运营、材料老化和退化等多因素影响，导致运营期间隧道行车孔及管廊内顶板与侧墙产生裂缝、渗漏水等病害，部分管节接头止水带出现局部破损、压板锈蚀，路面沥青面层出现较大面积的剥落、龟裂、横向贯穿裂缝及坑槽等病害。2020 年 1 月，根据上海市建筑科学研究院有限公司《外环隧道大修前服役性能检测评估报告》，经对全线土建结构服役性能状态的评定，整体服役状态为“恶化”(IV)级状态，需对外环隧道进行大修。

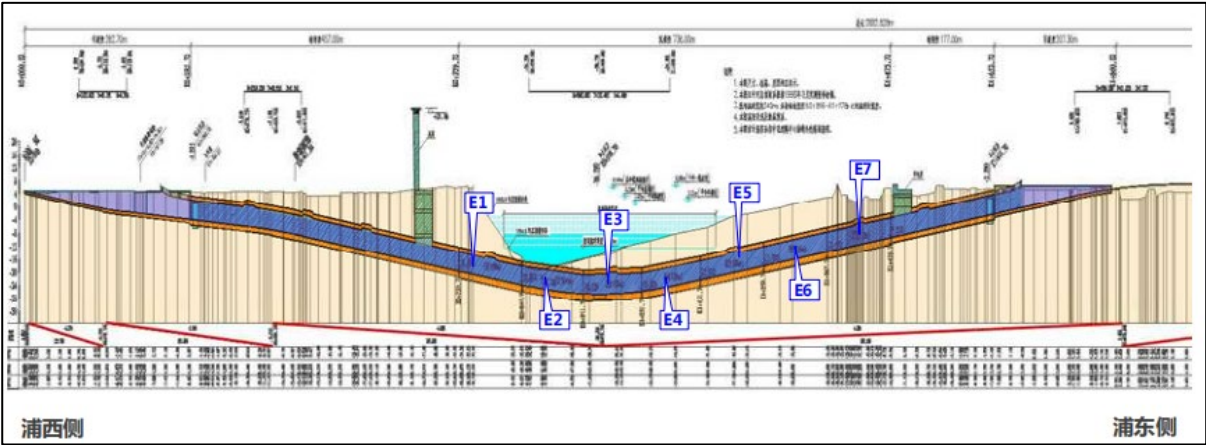


Figure 2. Longitudinal section of the outer ring tunnel
图 2. 外环隧道纵剖面图

2.3. 大修情况

本次大修主要实施接头改造、结构加固、裂缝治理及机电系统更新、道路铣刨加罩及隧道管理中心翻修施工。在外环隧道大修施工过程中,发现 PX18 段中板上层空箱内有积水情况。根据原设计及竣工图纸, PX18 段空箱容积约 4170 m³; 现场对三个孔的中板先后进行开孔排水, 第一次开了一个孔, 排水为 270 m³/d, 累计排放 8 天; 第二次又新增 2 个孔, 排水为 600 m³/d, 累计排放 3 天; 先后两次排水累计近 4000 m³, 但空箱内水位没有明显变化。

在排水过程中空箱内出现负压情况, 说明空箱为相对封闭空间; 空箱内排出水均为清水且水量补给较快, 与一般结构渗漏情况存在明显不同; 原设计 PX18 段中板活载 5 kN/m², 根据现空箱内水深条件估算中板平均活载已近 35 kN/m², 远超原设计荷载, 中板结构损伤情况不明。鉴于上述复杂情况, 经参建各方共同研讨, 决定对 PX18 段空箱顶板进行开设检查孔, 通过排水、进入空箱内部查明原因并诊断结构病害, 为后续的整治修复工作奠定基础。PX18 空箱纵断面结构如图 3。

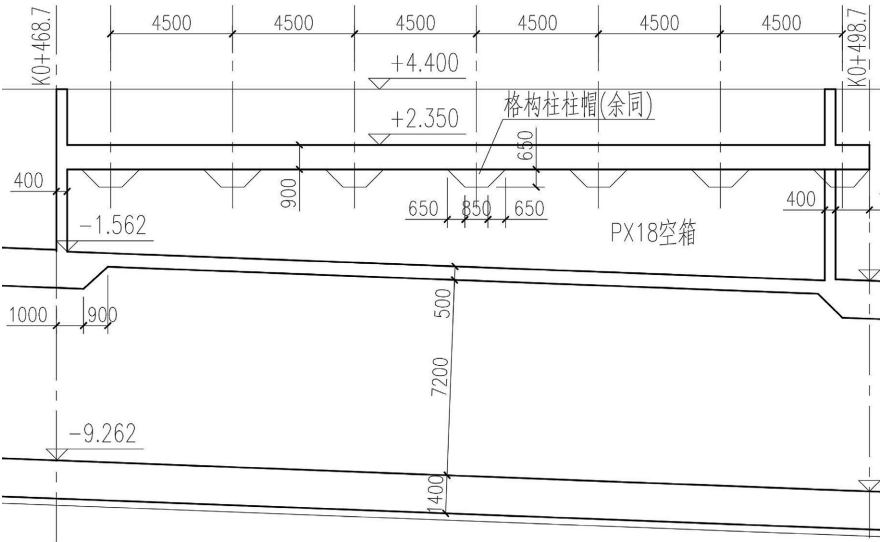


Figure 3. Longitudinal section of PX18 empty box
图 3. PX18 空箱纵断面图

3. PX18 处理方案设计

3.1. 病害分析

外环隧道交通流量大，重载车辆频繁通行，长期的交变荷载作用使得隧道结构承受了较大的应力，导致结构疲劳损伤，引发裂缝和变形；结构裂缝宽度较大，部分裂缝贯穿结构层。原有的防水系统随着时间推移出现老化、破损等问题，防水性能下降，地下水得以渗入隧道结构内部，加速了结构的腐蚀和损坏，渗漏水情况严重；又因原设计 PX18 空箱为密封空间无排水功能，水量堆积加重了荷载，加速结构老化[1]。

3.2. 总体思路

针对 PX18 空箱区域的病害特点和成因，处理方案遵循“先控制、后治理、再防护”的总体思路[2]。首先，通过排水等措施有效控制病害进一步发展；其次，对裂缝进行精准封堵止水，恢复结构的整体性；最后，完善防水和防护系统，以延长隧道的使用寿命，保障其长期安全稳定运行。

3.3. 具体处理措施

3.3.1. 开设检修口

在对空腔内的积水排出、积水隐患处治后，排查结构裂缝、渗漏水情况；清理干净下一层建筑垃圾；对 PX18 段检修口位置结构复核、补强；空箱内增设排水通道、照明等措施，检修口设止水槛和防火盖板，以便后期检修维护。

3.3.2. 裂缝治理

对于宽度小于 0.2 mm 的裂缝，采用压力灌浆法，注入环氧树脂浆液；对于宽度大于 0.2 mm 的裂缝，同样采用压力灌浆法，注入聚氨酯+环氧树脂浆液，填充裂缝并恢复结构的整体性[3]。

3.3.3. 防水、引流处理

顶板顶设置 2.0 mm 单组分聚氨酯防水涂料(GB/T 19250)+70 mm 厚 C20 细石砼保护层，新旧防水层之间搭接宽度 ≥ 200 mm。同时，在空腔内侧设置落水管，及时排除渗入的地下水，降低结构所受的水压力，提升防水效果。

4. 处理方案实施

4.1. 施工组织

编制详细的处理方案，制定详细的施工计划，合理安排施工顺序和施工进度，确保施工过程的安全、高效。施工过程中，严格遵守相关的施工规范和质量标准，加强现场管理和质量控制。

4.2. 施工技术

4.2.1. 开口检查施工

首先依据隧道内部结构的精确坐标数据，使用全站仪这一高精度测量仪器，在施工现场进行实地测量放样。通过全站仪对空间点位的精准定位，明确划分出 PX18 段在地面的具体范围。在确定地面范围后，技术人员结合现场实际地质条件以及隧道顶板的结构布置情况，进行细致的分析与评估。为保障隧道结构的安全性，避免对关键受力节点造成破坏，经过多方案比选，确定最优的开孔位置。充分考虑了地质条件可能对施工的影响，以及顶板结构的受力特性，确保开孔操作不会削弱隧道结构的承载能力与稳定性。在选定开孔位置后，对顶板覆土采用钢护筒作为支护进行开挖施工。钢护筒在安装过程中，严

格控制垂直度偏差不超过 1%，以保证其支护效果，防止开挖过程中出现土体坍塌，保障施工安全。顶板覆土开挖完成后，按照设计要求，采用排孔方式对顶板进行开孔作业，开孔尺寸为 800×800 mm。排孔方式有助于均匀分散开孔过程中的受力，减少对顶板结构的扰动。精确控制开孔尺寸，既满足施工人员进出及检测设备操作的空间需求，又最大限度降低对顶板结构完整性的影响[4]。

顶板开孔后，为保障施工人员安全，立即使用气体检测仪对隧道空腔内的气体成分及浓度进行检测，主要检测氧气、可燃气体、一氧化碳、硫化氢等可能存在的有害气体。检测完成后，在开孔处安装风扇进行强制通风，持续通风 30 分钟后，再次使用气体检测仪对气体浓度进行复测，确保各项气体指标均符合安全标准。当气体检测达标后，施工人员通过开设的检查口进入隧道空腔内部，对隧道结构进行全面细致的排查。重点检查结构是否存在裂缝、渗漏等病害情况，对发现的病害进行详细记录、拍照，并标注具体位置与严重程度，为后续制定针对性的治理方案提供准确依据。整个排查过程严格遵循安全操作规程，确保施工人员安全与检测结果的可靠性[5]。

4.2.2. 裂缝治理施工

在裂缝处理前，先对裂缝进行清理，去除表面的灰尘、油污等杂质。然后根据裂缝宽度的不同，需采用差异化的治理策略与材料。对于宽度小于 0.2 mm 的细微裂缝，通常采用压力灌浆法，注入环氧树脂浆液进行修复[6]。细微裂缝虽肉眼较难察觉，但在长期环境作用下可能进一步扩展，威胁结构安全。环氧树脂浆液具有良好的流动性和渗透性，在压力作用下，能够渗入细微裂缝的各个角落，其固化后可形成高强度、高粘结性的胶体，有效封闭裂缝，阻止水分、有害介质侵入，从而提升结构的耐久性与防水性能。

而当裂缝宽度大于 0.2 mm 时，由于其可能对结构承载能力造成更大影响，同样采用压力灌浆法，但选用聚氨酯+环氧树脂浆液进行处理[7]。聚氨酯材料具有良好的弹性与抗变形能力，能够适应裂缝因环境变化产生的微小位移，有效防止裂缝再次开裂；环氧树脂则提供高强度与高粘结力，确保裂缝填充密实，恢复结构的整体性。两种材料的协同作用，不仅能有效填充较宽裂缝，还能使修复后的结构在具备良好力学性能的同时，拥有更强的适应变形能力，使结构在修复后能更好地承受后续荷载及环境变化，保障结构长期稳定与安全[8]。

4.2.3. 引流施工

根据现场结构情况，部分区域无法进行裂缝治理；考虑后续仍有渗漏水情况，利用原先开设的排水孔进行引流措施。以现场每个排水孔作为排水系统的最低点，在排水孔四周的结构表面进行 1.5% 的素砼找坡施工[9]。1.5% 的坡度既能保证水流顺畅向排水孔汇集，又避免因坡度过大影响结构表面平整度与稳定性。在完成素砼找坡后，于每个排水孔下部安装 DN50 规格的落水管。落水管通常采用耐腐蚀性强的塑料材质，通过热熔焊接方式与排水孔牢固衔接，确保连接处密封不漏水。随后，将落水管与侧石预埋的 DN50-UPVC 管进行对接[10]。通过精确的管道安装与连接，使渗漏水能够沿着“排水孔→落水管→DN50-UPVC 管”的路径，最终排入边沟，完成整个引流过程。处置方案如图 4、图 5 所示。

4.2.4. 防水施工

施工前期，首要任务是对地下一层空腔内的建筑垃圾进行全面清理。这些建筑垃圾包括施工过程中遗留的混凝土碎块、废弃管材、包装材料等杂物，若不清理干净，不仅会影响后续防水施工质量，还可能刺穿防水层，导致渗漏隐患。清理完成后，需等待 PX18 地下一层空腔完成渗漏治理及地面找坡工作。渗漏治理能解决已存在的渗水问题，地面找坡则确保排水顺畅，为防水层施工创造良好条件，三者相辅相成，共同为防水工程奠定基础。



Figure 4. Plan view of empty box disposal
图 4. 空箱处置平面图

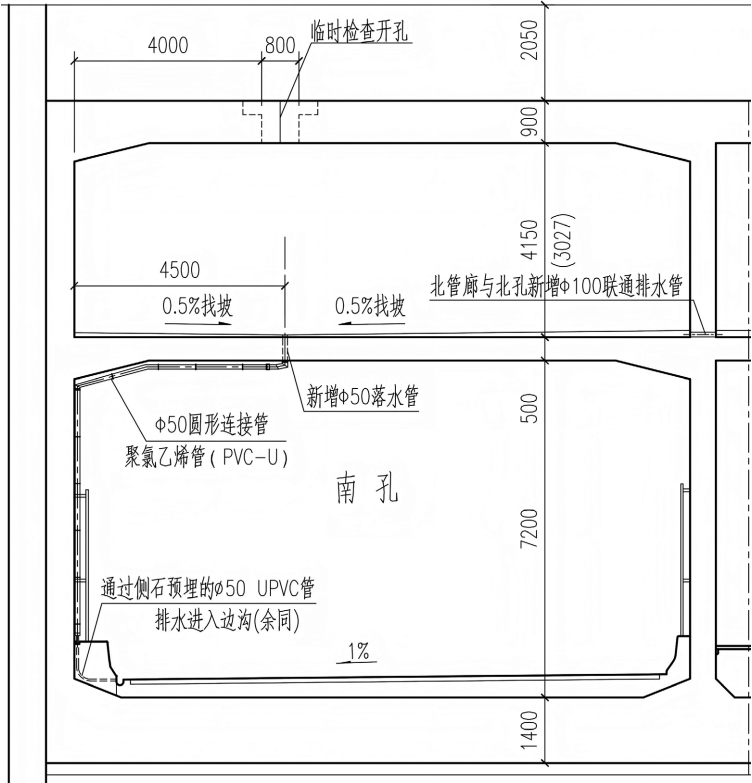


Figure 5. Cross section of empty box disposal
图 5. 空箱处置横断面图

中板地面防水施工采用 10 mm 厚聚合物水泥防水砂浆[11]，该材料性能需严格满足《聚合物水泥防水砂浆》(JC/T 984-2011)中 II 型的相关要求。II 型聚合物水泥防水砂浆具有良好的抗渗性、粘结性和柔

韧性，能够适应基层一定程度的变形，有效抵御地下水的渗透。施工过程中，严格遵循以下技术要求：

- (1) 在基层清理过程中，为减少扬尘对施工环境及人员健康的影响，采取一系列有效降尘措施；
- (2) 若基层表面过于干燥，需提前进行充分润湿处理。采用洒水或喷雾的方式使基层达到饱和面干状态，即表面无明水但内部湿润。这样可避免干燥基层快速吸收防水砂浆中的水分，影响水泥的水化反应，保证防水砂浆与基层之间具有良好的粘结力，防止空鼓、脱落现象发生[12]；
- (3) 进行人工刮涂作业时，施工人员需使用专用的刮板工具，按照一定的方向和顺序进行涂抹，确保涂布均匀，厚度符合 10 mm 的设计标准。要保证防水层的完整性，避免出现漏涂、堆积等问题。若在施工过程中防水层出现损坏，需立即进行修补，防止后期渗漏；
- (4) 管根、地漏与基层交接部位是防水施工的薄弱环节，易因应力集中、变形频繁等原因导致渗漏。因此，需对这些部位进行专门的防水密封处理。先对交接部位进行打磨、清理，去除油污、浮尘等杂质；然后采用密封胶或防水涂料进行多遍涂刷或嵌填，形成加厚、加强的防水密封层，增强这些关键部位的防水性能，确保整个防水系统的可靠性。

4.2.5. 永久封口施工

顶板检查口的永久封口采用补偿收缩 C35 混凝土[13]，抗渗等级达 P8。在混凝土配比中掺入膨胀剂制成补偿收缩混凝土，有效避免因收缩开裂导致的渗漏隐患，增强封口处混凝土的密实性与整体性。为进一步强化施工缝处的防水效果，在顶板检查口永久封口的施工缝位置设置预埋式注浆管。该注浆管在混凝土浇筑前预先埋设，后期若发现施工缝出现渗漏情况，可通过注浆管压注水性环氧树脂浆液。水性环氧树脂浆液具有良好的亲水性，能在潮湿环境下与水混合，渗入细微裂缝并固化，起到堵漏补强的作用。同时，施工缝处采用遇水膨胀止水胶进行处理[14]，止水胶在干燥状态下保持良好的弹性与粘结性，当遇水后体积膨胀，填满施工缝细微空隙，形成紧密的防水屏障，双重措施保障施工缝处的防水可靠性。

在顶板顶部进行防水层与保护层施工，首先喷涂 2.0 mm 厚的单组分聚氨酯防水涂料[15]。在防水涂料施工完成后，浇筑 70 mm 厚的 C20 细石砼保护层，延长防水层使用寿命。为确保整个顶板防水系统的完整性，新旧防水层之间的搭接宽度严格要求 ≥ 200 mm。在搭接施工时，先对旧防水层的搭接部位进行清理，去除灰尘、油污等杂质，确保表面干净、干燥。然后将新喷涂的聚氨酯防水涂料与旧防水层充分搭接，使新旧防水层紧密结合，形成连续的防水屏障，避免因搭接不足导致的渗漏风险，从而保障顶板结构长期处于良好的防水状态。顶板检查口封孔措施如图 6 所示。

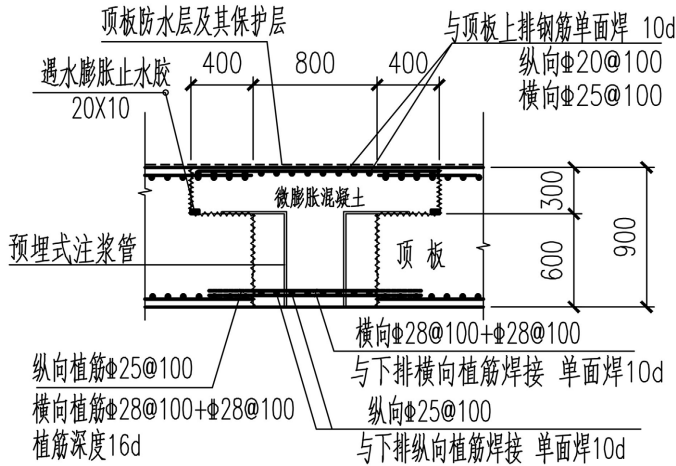


Figure 6. Section of permanent sealing of roof inspection port
图 6. 顶板检查口永久封孔剖面图

4.3. 施工质量控制

建立严格的质量检验制度,对每一道施工工序进行质量检验。在材料采购方面,严格把控材料质量,所有材料必须具有质量合格证明文件,并按规定进行抽样检验[16]。在施工过程中,加强对关键工序和关键部位的质量检查,如裂缝灌浆的饱满度、检查口钢筋的焊接质量、防水等[17]。

5. 处理效果评估

5.1. 检测方法

在处理方案实施完成后,采用多种检测方法对处理效果进行评估。利用无损检测技术,如地质雷达、超声回弹仪[18]等,对结构内部的缺陷和强度进行检测;通过测量仪器对结构的变形进行监测;对渗漏水情况进行现场观察和记录。

5.2. 检测结果分析

检测结果表明,PX18 空箱的裂缝得到了有效封堵,结构内部无明显缺陷,混凝土强度满足设计要求;渗漏水现象通过落水管有效排除,空箱内无积水现象。各项检测指标均达到设计标准,处理方案取得了良好的实施效果,有效解决了 PX18 空箱区域的病害问题,提升了隧道的结构安全性能和使用功能。

6. 结论与展望

6.1. 研究结论

通过对上海外环隧道 PX18 问题的深入研究和处理方案的实施,得出以下结论:针对 PX18 区域病害特点和成因制定的处理方案科学合理、切实可行,采用的裂缝处理、结构加固和防水处理等技术措施有效解决了隧道病害问题,提高了隧道的安全性和稳定性;在施工过程中,严格的施工组织和质量控制确保了处理方案的顺利实施和施工质量;处理效果评估结果表明,处理后的隧道结构性能良好,满足设计和使用要求,为隧道的长期安全运营提供了保障[19]。

6.2. 展望

尽管本研究成功解决了上海外环隧道 PX18 空箱问题,但随着城市交通的快速发展,隧道工程面临的挑战日益严峻。未来,应进一步加强对隧道病害的研究力度,不断探索创新检测技术和处理方法,持续提升隧道病害防治水平;同时,加快建立完善的隧道运营管理和维护体系,加强对隧道的日常监测和维护工作,及时发现并处理潜在的病害问题,确保隧道安全、稳定运行,为城市交通的持续发展提供可靠支撑[20]。

参考文献

- [1] 陆明,张冬梅.沉管隧道防水设计与施工关键技术研究[J].中国建筑防水,2014(12):1-6.
- [2] 林鸣,刘晓东,李英.港珠澳大桥沉管隧道结构与施工技术创新[J].中国工程科学,2018(20):1-10.
- [3] 李术才,刘人太.环氧树脂-聚氨酯复合注浆材料在隧道裂缝修复中的应用[J].建筑材料学报,2017(20):456-462.
- [4] 交通运输部.JTG F60-2023 公路隧道施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2023.
- [5] 李兵,张顶立,房倩,等.海底隧道建设全过程核心安全风险分析[J].北京工业大学学报,2010,36(4):463-468.
- [6] 张雄,等.环氧树脂在混凝土裂缝修补中的应用研究[J].建筑材料学报,2019,22(3):456-462.
- [7] 李国雄,等.聚氨酯改性环氧树脂灌浆材料的性能研究[J].水利水电科技进展,2020,40(2):78-84.
- [8] 中国工程建设标准化协会.T/CECS370-2018 混凝土裂缝修复技术规范[S].北京:中国计划出版社,2018.

-
- [9] 中华人民共和国交通运输部. JTG/TD33-2012 公路排水设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
 - [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T10002.1-2020 给水用硬聚氯乙烯(PVC-U)管材[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
 - [11] 中华人民共和国工业和信息化部. JC/T984-2011 聚合物水泥防水砂浆[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2011.
 - [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50108-2008 地下工程防水技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
 - [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T178-2009 补偿收缩混凝土应用技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
 - [14] 叶琳昌. 建筑工程施工缝防水技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
 - [15] 黄学军, 吴炜. 南昌红谷隧道沉管外包防水施工技术研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(9): 1125-1131.
 - [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50204-2015 混凝土结构工程施工质量验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
 - [17] 交通运输部. JTG/T3660-2020 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
 - [18] 中国工程建设标准化协会. T/CECS562-2018 混凝土结构耐久性检测技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
 - [19] 王梦恕, 等. 隧道与地下工程病害防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
 - [20] 上海市市政工程设计研究总院. DG/TJ08-2294-2019 城市隧道运营维护技术规程[S]. 上海: 同济大学出版社, 2019.