

上海外环沉管隧道大修施工实践

杨臻

(上海隧道工程有限公司大盾构工程分公司, 上海市 200137)

摘要: 上海外环隧道作为上海首条采用沉管法施工的越江隧道, 在运营二十余年后面临结构裂缝、管节接头渗漏及路面破损等多重病害影响通行安全, 需进行大修。通过系统性技术治理, 创新性提出接头修复方案, 实施内置式沉管接头结构, 确保沉管接头渗漏水得到根治。应用高模量沥青路面结构、水泥基渗透结晶型堵漏剂等新工艺、新材料, 解决了隧道路面、结构裂缝等病害。大修后外环隧道结构韧性显著提升, 为同类沉管隧道大修提供了重要实践范例。

关键词: 外环隧道; 沉管隧道; 大修; 沉管接头修复

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0304-05

Overhaul Construction Practice of Shanghai Outer Ring Road Immersed Tube Tunnel

YANG Zhen

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Large Shield Engineering Branch, Shanghai 200137, China)

Abstract: As the first cross-river tunnel in Shanghai constructed by the immersed tube method, the tunnel of the Outer Ring in Shanghai has been in operation for over two decades and is now facing multiple issues such as structural cracks, segment joint leakage and pavement damage, which affect its operational safety and is required of overhaul. Through the systematic technical management, the joint repair scheme is proposed to implement an internal immersed tube joint structure, ensuring that the leakage at the immersed tube joints is completely cured. The new technologies and new materials of high modulus asphalt pavement structure and cement-based permeable crystalline waterproofing agent are applied to solve the diseases such as tunnel pavement and structural cracks. After the overhaul, the structural resilience of the Outer Ring Tunnel has been significantly improved, providing an important practical example for the overhaul of similar immersed tube tunnels.

Keywords: Outer Ring Tunnel; immersed tube tunnel; overhaul; joint repair of immersed tube

0 引言

上海市外环隧道作为上海市首条采用沉管法施工的越江隧道, 自2003年通车以来, 已成为连接黄浦江两岸的重要交通枢纽。在长达二十余年的运营过程中, 随着交通流量持续增长, 尤其是重载车辆比例高达80%, 隧道结构陆续出现管节接头止水带破损、顶板横向裂缝、路面车辙与坑槽等多类病害, 对结构安全与运营服务品质构成显著威胁。为此, 本次大修工程以系统性治理为原则, 通过创新应用内置式接头修复加固技术、组合式裂缝治理以及高性能路面材料等施工工艺, 全面提升了隧道的耐久性

与防水性能, 以期同类大型沉管隧道的养护与修复工作提供有益参考^[1]。

1 工程概况

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, 自1999年12月开始施工, 2003年6月建成通车, 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。隧道段全长1 860 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。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), 管段间采用柔性连接, 接头防水采用GINA和Omega双

收稿日期: 2026-03-13

作者简介: 杨臻(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政、公路项目的施工管理工作。

层止水带^[2]。

隧道采用双向 8 车道、三孔两管廊横断面布置形式,边孔顶板、底板厚为 1.45、1.5 m,中孔顶板、底板厚为 1.4、1.45 m,侧墙厚度为 1.0 m,中隔墙厚度为 0.55 m。边孔按 3 车道设计,中孔按两车道设计。隧道管节外包宽 43 m、高 9.55 m,采用整体式钢筋混凝土管节;管节间采用柔性连接,设 GINA 和 Omega 两道止水带;设计荷载等级为汽-超 20,验算荷载挂-120、特-300;地震设防烈度 7 度;管节抗浮安全系数不小于 1.2;管节混凝土强度等级为 C35,抗渗等级 P10。隧道标准横断面见图 1。

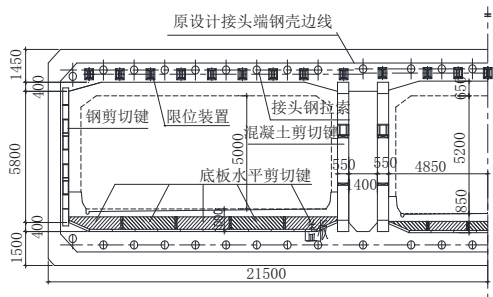


图 1 隧道沉管管节横断面图(单位:mm)

自 2003 年 6 月建成通车,外环隧道交通量快速增长,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。

2 大修前结构服役性能检测

经 20 年运营,外环隧道受重载交通、隧道沉降、

管节不均匀沉降等多因素影响,导致运营期间部分沉管接头止水带出现局部破损渗漏、压板锈蚀,隧道行车孔及管廊内顶板与侧墙产生裂缝、渗漏水,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^[3-4]。根据监测数据,外环隧道沉管接头变形过大,部分接头已发生渗漏。考虑运营安全,对外环隧道整体状态进行了检测,以查明隧道结构缺陷类型及缺陷的性质、部位、严重程度及发展趋势,确定和量化结构的退化程度,开展隧道结构服役性能评估,判定是否需要大修。

2.1 沉管接头病害

在该沉管隧道管节接头外观病害检测中,发现其 Omega 止水带病害主要表现为扭曲变形、内凹变形、内部有异物凸出导致 Omega 止水带外鼓变形以及被异物刺穿导致的破损。而止水带的固定装置病害主要变现为局部压板间隙渗水析白、压板螺栓缺失、压板螺栓松动以及螺栓和压板均大面积锈蚀。通过量测 Omega 止水带压板之间的纵向间距,计算 GINA 止水带的压缩量,8 个接头的 GINA 止水带最小压缩量均处于“安全”状态,5 个接头的 GINA 止水带最大压缩量处于“危险”状态,3 个接头的 GINA 止水带最大压缩量处于“警戒”状态^[4]。

2.2 结构裂缝及渗漏水

大修前采用非金属超声波检测仪对隧道结构本体进行了混凝土裂缝检测,按照裂缝的位置、走向、宽度、长度以及裂缝渗漏水状态进行了分类。经检测,该隧道结构裂缝主要分布在顶板位置,且多为横向裂缝^[5],裂缝主要形态及占比见表 1。

表 1 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
		$\delta<0.2\text{ mm}$	$\delta\geq0.2\text{ mm}$					
裂缝处渗漏水	总长度	27.93%	42.19%	13.27%	9.95%	2.30%	3.44%	0.93%

2.3 道路病害

外环隧道在运营期间因交通流量趋于饱和且多为重载车辆,隧道沥青路面在长期饱和的重载交通作用下出现了大范围病害:车辙变形在南、北孔客货混行车道及进出口路段尤为显著,主要由高轴载车辆的反复作用与频繁制动产生的剪切应力导致^[6];结构裂缝在敞开段尤为严重,沥青面层铣刨后可见水泥混凝土基层存在贯穿裂缝,其根本原因在于敞开段倒滤层功能失效引发基层变形;同时,全线分布

有大量坑槽与局部破损,多数伴随渗水痕迹,这是由隧道结构渗漏水侵蚀路面材料与沥青混合料自身黏结性能退化共同作用所致^[7]。

2.4 大修必要性

基于隧道结构的检测结果,依据《道路隧道大修技术标准》,对外环隧道大修前土建结构服役性能状态进行评定,整体服役性能已严重退化,影响隧道运行舒适性及安全性,需开展大修工程。

3 大修期间交通组织

为根治沉管接头病害,确保沉管接头修复质量,并且为缩短大修工期,减少施工风险及运营风险,外环沉管隧道大修采用全封闭施工。

基于外环隧道大修期间采用全封施工的方案,本次施工交通组织方案采取“一处封闭,多路绕行,全方位保障”的方案,通过交通指引诱导、优化道路设施条件等多项措施,把外环隧道大修引发的交通影响降至最低,确保在外环隧道大修期间,区域交通运行平稳。制定了施工期间以郊环隧道为主,长江路隧道为辅的绕行方案,针对宝山城区及周边不同区域的车辆明确具体绕行路径。

并且对绕行可能引发的潜在问题如驾驶员对绕行路径及区域路网不熟悉,需加强信息引导、周边收费站节点压力大可能成为交通瓶颈等问题均制定了配套优化措施。在交通瓶颈位置大修前进行了收费站扩容、简化发卡流程等措施,并且大修前加强绕行指引和宣传,通过设置地面及高快速路引导标志、联动导航优化路线规划,并通过“上海发布”、物流企业传单等提前宣传。

封交后首月运行情况显示,绕行道路流量显著增加,郊环隧道呈时段性拥堵,长江路隧道分流超预期,区域未现长时间、大面积拥堵。实现了交通流量的平稳过渡,验证了在特大流量压力下,通过系统性、前瞻性的交通组织来保障重大工程实施的可行性,为今后同类项目积累了宝贵的实证经验。

4 大修关键工序

外环隧道全面封交后首先进行原有土建及机电附属设施拆除,之后立即交叉并行开始实施接头改造、结构加固、裂缝治理及机电安装更新,系统调试满足隧道通风条件后开始道路交安施工,最终系统联调及各项改造施工全部完成后具备恢复通车条件。本文章主要针对接头修复、裂缝治理及道路提升3个关键工序进行论述。

4.1 接头修复

沉管接头改造修复主要分为原有沉管接头修复和接头修复结构两部分,以提升接头防水韧性。

4.1.1 接头原有设施修复

接头原有设施修复是确保沉管接头耐久性与安全性的关键环节,首先需对原有 OMEGA 止水带破损位置进行修补,之后再进行其他钢结构设施除锈防

腐。本次大修对检测发现的破损原 OMEGA 止水带,由厂家现场裁切接驳,具体流程为:先拆解压板后对破损位置切割;接着将原止水带与新止水带替换段的两端各剖切外侧一半,分别打磨清洁形成新黏合面;随后将处理后的两接头拼合,涂黏合层并覆盖帘子线加强层与生胶料,完成热接准备;再用含电热模具、压紧器等的压接设备进行热硫化压接(约 14 h);最后冷却后清理整修胶料边角,以压板、压条等紧固件固定,完成修补^[8]。

在对原 Omega 止水带及压件系统缺陷修复、钢拉索预紧除锈及钢剪力键除锈等工序的施工中,除锈作业的质量直接决定了防腐层的附着力与使用寿命,是影响修复效果的关键因素。

当前主流除锈技术中,人工打磨靠人力摩擦,清洁度低、易留锈迹且粗糙度不均,不利涂层附着,还可能磨薄基材,同时产生大量粉尘噪声,污染环境并危害健康,人力成本高、效率低,长期综合成本最高;喷砂除锈通过高速喷射磨料冲击除锈,虽清洁度较高、粗糙度均匀利于涂层,但磨料易损伤薄壁或精密基材,粉尘污染重、需除尘设备,磨料回收成本高,设备投资适中但耗材与环保费用高;激光除锈用高能激光使锈层气化或膨胀剥离,非接触无机械应力,基材无损伤,能精准控清除范围且不改变基材粗糙度,避免损伤敏感部件,且无粉尘、废水,废料易回收,属绿色工艺,初期投资高但无耗材、运行成本低,长期效益显著^[9]。

综合看,激光除锈在清洁度、基材保护、环保及长期经济性上均优于前两者。本项目最终采用激光除锈技术,以克服传统方法在精度、环保性及对敏感部件保护方面的局限性。通过引入激光除锈,不仅提升了对原有 Omega 止水带等敏感部件的保护效果,还显著降低了环境风险与运维成本,为类似隧道工程的修复工作提供了可靠的技术路径。

经接头原有设施修复,原有 OMEGA 止水带及沉管接头恢复原有功能,完成沉管接头修复的关键一环^[10]。

4.1.2 接头修复结构

沉管接头改造是一项技术复杂的系统工程,其核心目标是在确保隧道车道限界满足安全行车的前提下,提升沉管接头止水性能。由于国内尚无在该领域的修复范例。本项目在实施前充分研究了国外相关工程案例,并进行了系统的专项试验研究。首先通过混凝土与植筋材料的选型确定主材,之后对

止水措施以及结构承载力进行了验证,最终确认了本次接头改造的具体方案。即在管节接头两侧相邻管节内,各沿环向浇筑一圈混凝土外挑结构,外挑结构通过植筋与原结构连接,接头内侧设置有环向钢端壳用以增设一道 Omega 止水带,以在原有 Gina 与 Omega 止水带内侧再形成一道防水措施。管节接头修复结见图 2、图 3,施工完成情况见图 4。

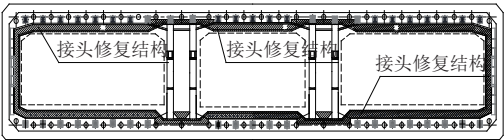


图 2 接头修复结构横断面布置图

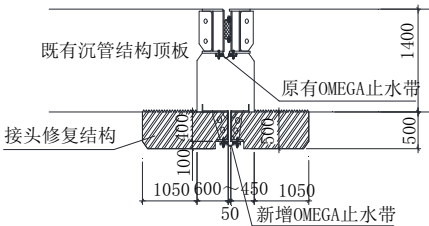


图 3 接头修复结构断面图(单位:mm)



图 4 接头修复结构施工完成情况

对于沉管接头修复结构,新老混凝土结合面密实度与长效防水的保障尤为关键。为确保结合面质量,施工中采用了分段浇筑工艺,浇筑顺序严格遵循“先管廊后车道孔”。并设置了专门的排浆口系统,可有效避免一次浇筑导致的排气不畅与密实度不足问题,确保结合面填充密实^[11]。

此外,通过凿毛、设置遇水膨胀橡胶条及预埋注浆管二次注浆等措施,进一步强化了结合面的密封性能^[12]。最终,通过接头修复结构的有效实施,保障了新老混凝土界面的密实性与防水可靠性,外环隧道沉管接头具备了3道有效的止水屏障。

4.2 裂缝分类治理

根据对该隧道结构裂缝及渗漏水原因分析,隧道上方覆土层地下水补给充沛,导致大量水体在隧道结构外围积聚,进而在其薄弱部位,形成渗漏通道。在隧道建成并投入运营的二十余年间,各个管节段落产生了差异性的竖向弯曲和扭转变形。这类结构变位是诱发隧道产生横向与斜向结构性裂缝的重要原因^[13]。特别是其中不均匀沉降较为显著的若干管节,其顶板区域出现的横向裂缝在数量和密度上均高于其他区段,这与此处相对较大的差异沉降直接相关。

针对上述裂缝及由此引发的渗漏水问题,本次整治工作将依据病害的严重程度和特征,采取分级、分类的治理策略^[14],具体实施方案见表 3,现场实施前后情况对比见图 5。

表 3 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	线漏
	$\delta<0.2\text{ mm}$	$\delta\geq 0.2\text{ mm}$					
治理方案	表面涂刷水泥基渗透结晶防水涂料	钻孔注浆(环氧树脂)	钻孔注浆(聚氨酯+环氧树脂)+水泥基渗透结晶型堵漏剂			钻孔注浆(聚氨酯+环氧树脂)+水泥基渗透结晶型堵漏剂	

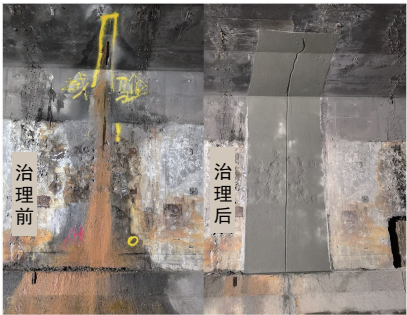


图 5 裂缝治理前后对比

4.3 道路提升

为应对外环隧道内高湿度、重载及高频率交通运行所导致的严重车辙、水损害与耐久性不足等路

面病害,本次大修工程系统性提升了路面结构性能。通过采用具有高抗车辙和抗水损害功能的沥青混凝土材料,并应用适应大湿度、高剪切应力工况的高性能层间黏结技术,以提升隧道路面的耐久性与安全性^[15]。

针对重载交通特性,对原路面结构进行优化,采用以下组合:4 cm 阻燃净味高模量重载改性沥青玛蹄脂碎石(SMA-13)上面层+6 cm 中粒式高模量重载改性沥青混凝土(AC-20C)下面层+1 cm 同步碎石防水层。该结构通过材料改性、层级强化与功能叠加,系统性地增强了路面的抗病害能力^[16]。

具体而言,SMA-13采用间断级配形成骨架嵌挤结构,AC-20C优化为连续级配并强化矿料骨架,两者协同作用以显著提升混合料的高温稳定性,从而有效抑制车辙变形。通过严格控制两者的空隙率,可减少渗水通道,降低水损害风险。此外,通过在沥青中添加高黏度改性剂(如SBS),显著提高了混合料的动态模量与抗剪切变形能力,使其动稳定度成倍高于普通沥青,能够更好地抵抗重载交通导致的塑性变形。

同步碎石防水层的设置,则通过沥青与碎石的同步洒布形成致密屏障,有效阻隔地表水向下渗透,减少因水损害引发的唧浆、松散与坑槽等次生病害。该层同时兼具应力缓冲功能,有助于降低重载冲击对路面基层的破坏风险^[17-18]。

综上,本次大修所采用的路面结构,通过高模量材料抵抗车辙、防水层阻断渗水,形成了“刚柔并济”的复合功能体系,可显著延长重载交通路段的使用寿命。同步碎石防水层弥补了传统结构在防水方面的短板,而分层协同设计兼顾了荷载的有效传递与应力的合理分散,为重载交通环境下隧道路面的治理提供了系统性的解决方案。

5 大修历程及效果

上海外环沉管隧道大修工程自2024年3月22日24时全面封闭开始,历时1年,于2025年3月22日0时圆满完成全部施工并恢复通车(见图6、图7)。



图6 外环隧道大修后门头实拍

通车后,外环隧道车流量已恢复至大修前,各项设施运行效果良好。经过系统性修缮,隧道结构韧性得到显著提升,其安全性与耐久性实现了根本性重塑与增强。此次大修在技术方案、工艺创新与长效运维方面形成了可复制的经验,为国内同类沉管

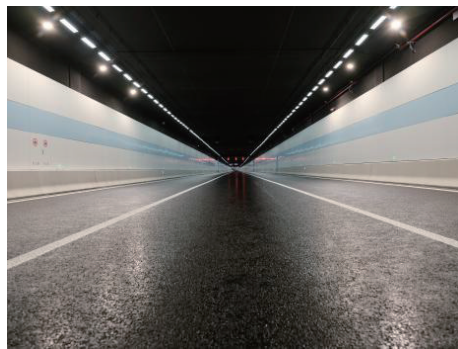


图7 外环隧道大修后隧道内部实拍

隧道的大修工程提供了重要的实践参考与示范。

参考文献:

- [1] 姜海西,杨媛媛,徐则灵,等.上海动脉的智慧新生——全国首例预测性养护隧道大修纪实[J].中国公路,2025(10):58-62.
- [2] 毛剑峰,邓涛.沉管隧道管节预制方法综述[J].交通科技,2013(6):79-82.
- [3] 张娜.沉管隧道典型病害机理分析及结构安全评价方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
- [4] 丁浩,景强,闫禹,等.沉管隧道运维技术发展现状综述[J].中国公路学报,2022,35(10):1-12.
- [5] 吴占强.波导及其布置对微波辅助破岩效果影响规律与机制研究[D].西安:西安科技大学,2023.
- [6] 王德波,芮照诚,闫翔鹏.全厚式沥青路面力学响应及协同抗疲劳特性研究[J].山东交通科技,2025(6):21-26.
- [7] 赖桂全.市政道路养护中沥青路面裂缝修复技术研究[J].低碳世界,2026,16(2):122-124.
- [8] 白云,鲁洪昊.沉管隧道接头 OMEGA 止水带损坏分析及修复技术[J].铁道工程学报,2016,33(9):87-92.
- [9] 徐会文.激光除锈技术对轨道车辆车轮产品性能的影响[J].大型铸锻件,2020(4):42-44;47.
- [10] 牙爽东,蒋常升,翟朝凯,等.铁路专用配件的激光清洗除锈机研制[J].装备制造技术,2025(7):129-133.
- [11] 岑雪雁.高速公路工程双连拱隧道隔墙施工技术[J].四川建材,2022,48(9):152-153.
- [12] 罗鑫,林济.新型矩形顶管结构形式及防水试验研究[J].隧道与轨道交通,2021(增刊2):80-81.
- [13] 曹文宏,申伟强.道路隧道工程大修决策与设计[J].地下工程与隧道,2017(1):1-5.
- [14] 杭建国.综合管廊变形缝位置渗漏处理研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(11):158-162.
- [15] 贺源.重载交通下大型交叉路口路面破坏原因分析及改进路面方案的选择[D].深圳:深圳大学,2023.
- [16] 熊建良,史梦南,刘欢,等.探究重载交通道路铺装耐久性快速修复技术[J].工程建设与设计,2025(24):165-167.
- [17] 任晨.重载交通道路铺装耐久性快速修复技术及应用[J].中国市政工程,2019(6):37-39.
- [18] 邓栋.公路路面改造工程中的路面病害调查及防治措施分析[J].交通科技与管理,2025,6(13):96-98.