

水下长大明挖隧道接头优化及工程应用

江帆, 钱文斐

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要:为解决水下长大明挖隧道变形缝渗漏频发的技术难题,以苏州独墅湖第二通道工程为依托,通过文献调研、数值模拟与工程实测相结合的方法,开展隧道接头设计关键要素优化研究。重点分析节段长度、变形缝宽度、差异沉降控制指标及基础形式对防水性能的影响,提出“枕梁+桩基”的新型接头方案。研究表明:水下明挖隧道变形缝差异沉降宜控制在10 mm以内;60 m节段长度搭配20 mm变形缝宽度可平衡结构应力与防水需求;“枕梁+桩基”方案能将变形缝两端差异沉降控制在3 mm以内,显著优于传统桩基方案。工程实测验证该方案可有效避免止水带撕裂,防水效果显著,为类似水下明挖隧道接头设计提供理论依据与工程参考。

关键词: 水下明挖隧道;变形缝;差异沉降;枕梁+桩基;防水性能

中图分类号: U455.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0281-04

Optimization and Engineering Application of Joints in Long Underwater Excavated Tunnels

JIANG Fan, QIAN Wenfei

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To solve the technical problem of frequent water leakage at deformation joints in long underwater excavated tunnels, relying on the Suzhou Dushu Lake Second Channel Project, and through the combined method of literature research, numerical simulation and engineering measurement, the research on the optimization of key elements in tunnel joint design is conducted. The focus is on analyzing the impacts of segment length, deformation joint width, differential settlement control indicators and foundation types on the waterproof performance, and a new “sleeper beam + pile foundation” joint scheme is proposed. The results show that the differential settlement of deformation joints in underwater excavated tunnels should be controlled within 10mm, and a segment length of 60m combined with a deformation joint width of 20mm can balance the structural stress and waterproof requirements. The “sleeper beam + pile foundation” scheme can control the differential settlement at both ends of the deformation joint within 3 mm, which is significantly better than the traditional pile foundation schemes. Engineering measurements verify that this scheme can effectively avoid the tearing of waterstops and achieve the remarkable waterproof effects, providing a theoretical basis and engineering reference for the joint design of similar underwater excavated tunnels.

Keywords: underwater excavated tunnel; deformation joint; differential settlement; sleeper beam + pile foundation; waterproof performance

0 引言

湖泊在调节气候、维持生态平衡中发挥关键作用,但也成为城市交通联络的天然屏障^[1-3]。水下明挖法在水位较浅水域广泛应用,如苏州独墅湖隧道、武汉东湖隧道等工程^[4-10]。然而,水下明挖隧道面临严峻的渗漏水问题,尤其在苏州等地下水丰富、砂性土质分布区,地下水渗流速率大,渗漏风险更高。因

此,优化隧道接头设计、控制差异沉降、提升防水性能,成为水下长大明挖隧道建设的关键技术难题^[11-12]。

国标防水规范^[13]提出,用于伸缩的变形缝宜少设,王铁梦^[14]指出节段长度超过40~60 m后,中部区域开裂风险大增。一旦隧道接缝的变形超出了止水带最大变形量,便会出现破损并形成渗流路径。李佳明^[15]考虑了不同桩基分布方案,分析对差异沉降的影响。

现有研究多聚焦单一设计参数优化,缺乏对节段长度、变形缝宽度、基础形式的系统性研究。本研

收稿日期: 2025-12-04

作者简介: 江帆(1987—),男,硕士,高级工程师,从事隧道与地下工程设计研究工作。

究依托独墅湖第二通道,开展水下长大明挖隧道接头性能系统性研究,提出优化设计方案并通过工程实测验证,为同类工程提供技术支撑。

1 工程概况

1.1 工程地理位置

独墅湖第二通道位于苏州市,东西走向,东接工业园区月亮湾商务区,西连吴中区郭巷街道片区,全长约3.93 km。工程采用城市主干路标准,主线设计时速50 km/h,匝道30 km/h,湖中段采用水下明挖法施工^[16]。

1.2 工程方案

横断面采用双向6车道2孔1管廊形式,结构总宽度30.2 m,总高度7.85 m,见图1。下穿水域段采用围堰明挖法施工,变形缝设置多重防水构造。

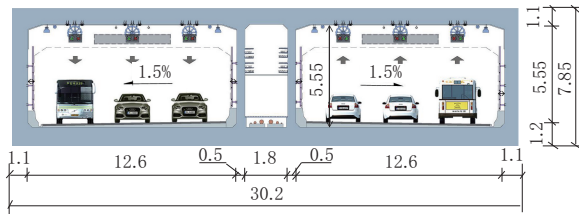


图1 独墅湖第二通道横断面(单位:m)

2 接头设计关键要素研究

2.1 节段长度及变形缝宽度优化

2.1.1 模型建立

采用MIDAS GTS NX建立三维有限元模型,模拟两种温度工况:整体升温30℃、整体降温30℃,对比节段长度30、60、90 m的力学变形响应。

2.1.2 结构应力分析

不同节段长度在整体升降温工况下结构应力值情况见表1。各模拟工况下,混凝土压应力均满足规范要求,90 m节段拉应力超限,60 m节段安全系数1.15。

表1 不同节段长度结构应力值一览表

温度工况	应力方向		30 m节段	60 m节段	90 m节段
工况1: 整体升温 30℃	X向/ MPa	拉	0.29	0.27	0.36
		压	1.07	1.12	2.57
	Y向/ MPa	拉	0.1	0.1	0.11
		压	0.48	1.2	1.98
工况2: 整体降温 30℃	X向/ MPa	拉	0.5	0.67	0.74
		压	0.12	0.25	0.59
	Y向/ MPa	拉	0.42	1.32	2.21 (超限)
		压	0.06	0.12	0.17

2.1.3 结构变形分析

不同节段长度在整体升降温工况下结构变形情

况见表2。90 m节段最大差异沉降达24.9 mm,超过常规的20 mm变形缝宽度,增加防水压力;60 m节段最大差异沉降17.5 mm,20 mm缝宽可满足防水需求。

表2 不同节段长度结构变形值情况一览表

温度工况	变形/mm	30 m节段	60 m节段	90 m节段
工况1: 整体升温30℃	顶板纵向	4.5	8.7	12.3
	底板纵向	4.4	8.4	11.7
工况2: 整体降温30℃	顶板纵向	4.5	8.8	12.6
	底板纵向	4.4	8.2	11.3
升温-降温	顶板纵向	9.0	17.5	24.9 (超20)
	底板纵向	8.8	16.6	23.0 (超20)

2.1.4 小结

综合分析后确定本项目节段长度60 m,变形缝宽度20 mm。

2.2 差异沉降控制指标

采用MIDAS GTS NX建立中埋式橡胶止水带局部模型,对左侧混凝土结构施加强制位移来模拟差异沉降导致的剪切受力情况,橡胶止水带应力见图2。根据止水带剪切应力8 MPa限值,确定差异沉降控制指标为10 mm。

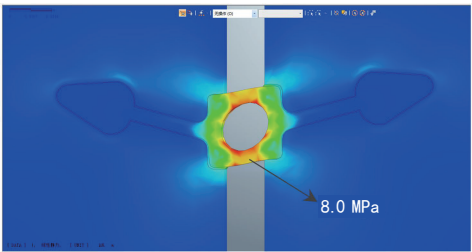


图2 中埋式橡胶止水带剪切应力云图

2.3 基础形式优化研究

本项目基于上述研究提出三种基础方案:方案一(无桩方案)、方案二(传统桩基方案)、方案三(枕梁+桩基方案),通过数值模拟对比分析。

2.3.1 模型参数

土层采用3D摩尔-库伦模型。主体结构、枕梁及桩采用3D弹性模型,桩直径0.8 m,桩长25 m。以中间节段为研究对象,建立以节段长度60 m共3个节段180 m模型。在中间节段施加100 kPa均布荷载,以评价不同基础形式的节段差异沉降情况。结构和枕梁接触面采用界面单元模拟脱开和滑移。整体计算模型见图3。

2.3.2 差异沉降对比

方案一26.4 mm,方案二20.2 mm,方案三3.2 mm。上部均匀堆载100 kPa情况下的节段间差异沉降

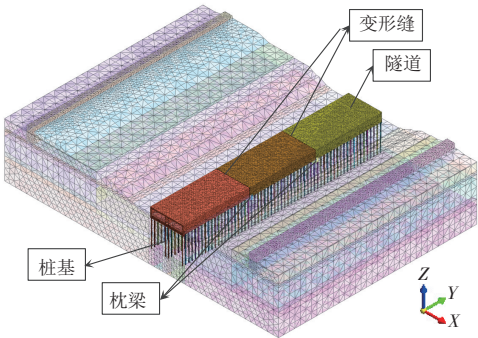
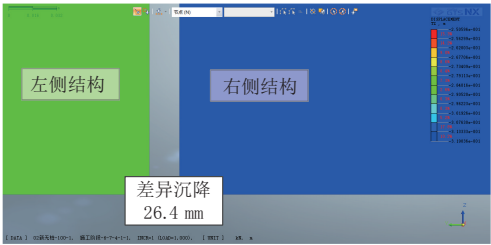
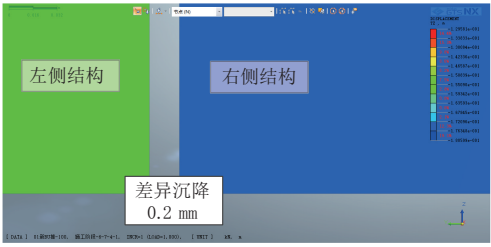


图3 整体计算模型

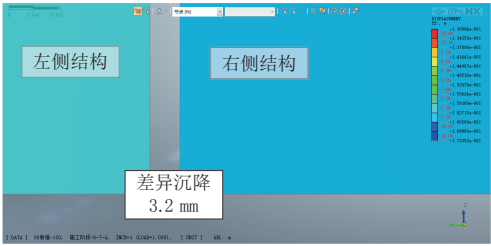
云图见图4。方案一和方案二差异沉降值均超过10 mm限值,将导致止水带撕裂和防水失效;方案三可大幅减小差异沉降至10 mm以内,确保止水带的有效性。



(a) 方案一(无桩方案)



(b) 方案二(传统桩基方案)



(c) 方案三(枕梁+桩基方案)

图4 沉降计算云图(以堆载100 kPa为例)

2.3.3 小结

枕梁+桩基方案能有效控制节段间差异沉降,被确定为本项目基础形式,即变形缝处设置枕梁,枕梁下布置桩基础,主体结构段设置变形协调桩。

2.4 隧道接头型式确定

变形协调桩兼顾抗浮与沉降控制,桩长根据抗浮计算确定,确保结构稳定。经计算,桩直径采用0.8 m,桩长25 m,其中横向布置4根,纵向布置间距6 m,见图5。

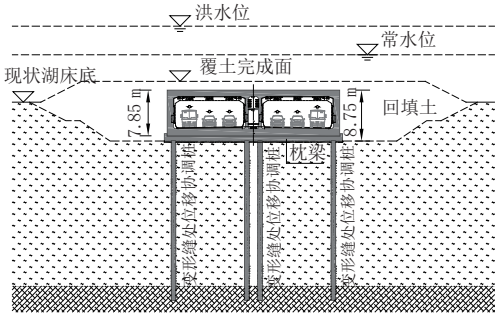


图5 隧道基础和接头布置横剖面图(单位:m)

3 工程实测验证

3.1 监测方案

N1K0+253-N1K0+364 节段于2020年12月完成施工,枕梁现场施工照片见图6。



图6 枕梁现场施工照片

选取N1K0+253-N1K0+364节段,布置7个监测断面,每个断面在顶板、侧墙、底板设置20个测点,监测变形缝两端沉降差及结构沿轴向竖向变形,监测周期2021年1—11月。测点布置横断面见图7。

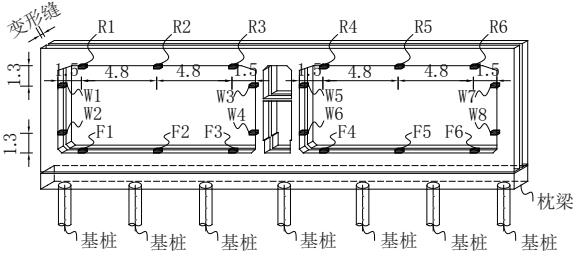


图7 横断面测点布置(单位:m)

3.2 变形缝两端沉降差

3.2.1 N1K0+253 变形缝

差异沉降值曲线见图8。底板差异沉降最大值1.3 mm,平均值0.57 mm;侧墙最大值0.7 mm,平均值0.33 mm;顶板最大值1.8 mm,平均值1.3 mm,满足设计要求。

3.2.2 N1K0+364 变形缝

差异沉降值曲线见图9。底板差异沉降最大值1.5 mm,平均值0.7 mm;侧墙最大值1.4 mm,平均值1.1 mm;顶板最大值2.4 mm,平均值1.1 mm,满足设计要求。

结构施工后1个月内竖向位移增长较快,随后趋

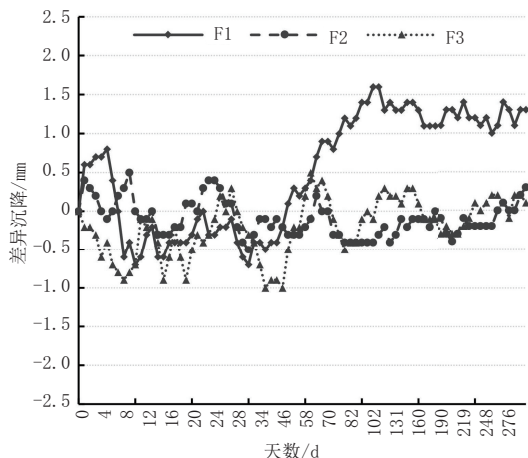


图8 N1K0+253变形缝处差异沉降(以底板为例)

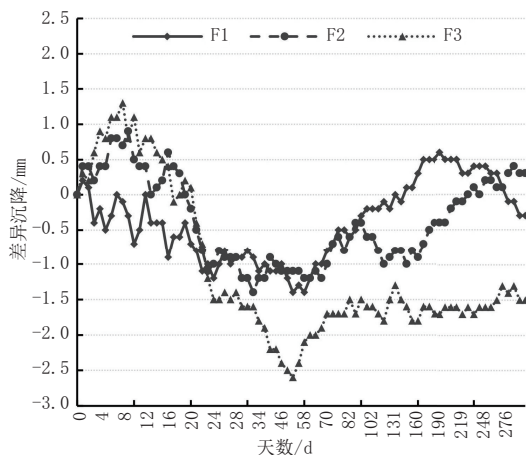


图9 N1K0+364变形缝处差异沉降(以底板为例)

于稳定,最终收敛值5 mm左右,表明枕梁+桩基方案沉降控制效果显著。

3.3 小结

监测数据验证了设计方案的合理性。监测期间,该节段变形缝未出现渗漏水现象,止水带完好无撕裂,验证了接头设计的合理性与可靠性。

4 结论与建议

(1)本项目变形缝差异沉降控制在10 mm以内,是保证止水带有效工作的关键指标;

(2)本项目60 m节段长度搭配20 mm变形缝宽

度,是接头设计的合理参数;

(3)本项目选用的枕梁+桩基方案可将差异沉降控制在3 mm以内,低于10 mm限值,实测验证效果良好。

未来可进一步研究不同地质条件下接头参数的优化调整,开展长期性能监测,探索智能化渗漏预警技术,为水下明挖隧道接头设计提供更全面的技术支撑。

参考文献:

- [1] 李林森,王涵,刘凯,等.我国城市湖泊空间分布格局特征分析及影响因素探讨[J].湖泊科学,2024,36(2):587-601.
- [2] 孙小丽,宋辉华,韩冬成.湖城融合视角下环湖交通优化研究——以武汉东湖为例[C]//中国公路学会,2024.
- [3] 张怡,杨羽佳,杨朝辉.2017年苏州市典型湖泊的生态敏感性评价[J].湿地科学,2021,19(2):239-246.
- [4] 武汉东湖隧道通风方案研究[J].地铁工程暖通空调技术,2016(5):22-26.
- [5] 张勇.苏州独墅湖隧道防水设计[J].中国建筑防水,2008(5):24-27.
- [6] 杨旭.阳澄西湖三通道工法选择及围堰明挖法、盾构法经济性分析[J].安徽建筑,2022(2):150-152.
- [7] 褚汉.浅湖区域超长明挖隧道围堰设计探讨[J].江西建材,2023(3):141-145.
- [8] 杨扣红,周正东.东湖隧道钢板桩围堰结构设计[J].山西建筑,2008,34(14):328-329.
- [9] 陈凤熔,闫朝涛.南京玄武湖隧道防水体系论述[J].隧道建设,2005,25(5):4-5.
- [10] 邵臻.九华山隧道明挖区段防水设计介绍[J].中国建筑防水,2006(3):27-29.
- [11] 朱祝何.“十隧九漏”让人头痛[C]//全国第十四届防水材料技术交流会,2012.
- [12] 江帆.水下长大明挖隧道接头防水设计研究[J].中国建筑防水,2018(12):9-13.
- [13] GB 50108—2008 地下工程防水技术规范[S].
- [14] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [15] 李佳明,陈式轩.软土地区桥隧合建桩基布置数值模拟研究[J].城市道桥与防洪,2025(7):298-302.
- [16] 钱文斐,江帆,宋尚.独墅湖第二通道工程关键技术研究[J].城市道桥与防洪,2022(10):150-153.