

# 大型钢壳沉管隧道内异形路缘石安装工艺

杨光

(中交一航局第一工程有限公司)

**摘 要:** 深中通道沉管隧道缘石长 1.5 m、重 1.5 t, 属大型异形构件, 为解决沉管隧道受管节差异沉降影响导致的缘石安装精度控制难题, 研发了“三维调节螺栓+模块化精调工装”协同施工工艺, 首先通过建立动态模拟体系, 量化分析管节接缝处最大位移差达 12 mm 的工况特征, 针对性设计了具有 $\pm 15$  mm 轴向调节裕度的承插式锚固系统, 结合可拆卸精调工装实现安装轴线 $\pm 1$  mm 的微距调控。工程应用表明, 该工艺有效消除累计沉降位移对缘石体系的负面影响, 结构服役性能满足 120 a 设计寿命要求。研究成果构建了沉管隧道异形预制件高精度安装技术体系, 为跨海通道工程预制化施工提供了重要技术范式。

**关键词:** 深中通道; 检修道缘石; 大型异形构件; 高精度安装

## 0 引言

随着我国交通基础设施建设的快速发展,更加重视工程建筑与自然环境的和谐,跨海通道由地上桥梁转为水下隧道。跨海通道工程面临着诸多技术挑战,其中沉管隧道的施工技术尤为关键。在沉管隧道施工中,检修道缘石系统需承担多重功能耦合的复杂作用,是保障隧道内行车安全和结构稳定性的重要环节。检修道缘石不仅起到分隔车道、保护隧道侧墙的作用,还能在车辆撞击时起到缓冲和导向的作用。然而,由于沉管隧道管节间的柔性连接特性,管节在着床后可能会出现差异沉降和温度变形等,给检修道缘石的安装精度带来了极大的挑战。目前国内外缘石安装工艺创新研究主要针对普通道路的小型缘石,包括坐浆工艺、滑模工艺等<sup>[1-2]</sup>,现有技术均无法适应深中通道沉管隧道的大型、重载缘石的高精度安装需求。

本研究以深中通道沉管隧道检修道缘石安装工程为背景,针对大型缘石构件的安装难题,提出了一种“三维调节螺栓+模块化精调工装”的协同施工工艺,为跨海通道工程中大型预制构件的安装提供了新的技术思路。

## 1 工程概况

深中通道项目岛隧工程位于珠江口伶仃洋海域,通过设置东、西人工岛以实现桥隧转换。其中西人工岛岛头设置岛上段隧道暗埋段,沉管隧道 E1 管节通过与暗埋段 CW01 段对接以完成岛隧

转换过渡。沉管隧道全长 5 035 m, 由 32 个管节和 1 个最终接头组成, 纵断面为非对称 W 形, 管节间为柔性连接, 存在差异沉降<sup>[3]</sup>。

为降低车辆侧面撞击损伤,隧道两侧行车道中墙处各设置 1 道检修道缘石。单块检修道缘石预制件重量约为 1.5 t,长度 1.5 m,安装时预留 3 mm 安装拼缝。检修道缘石顶距离中墙 85 cm 安设,安装后底部采用 C30 细石混凝土填充。检修道缘石结构尺寸断面<sup>[4]</sup>如图 1 所示。

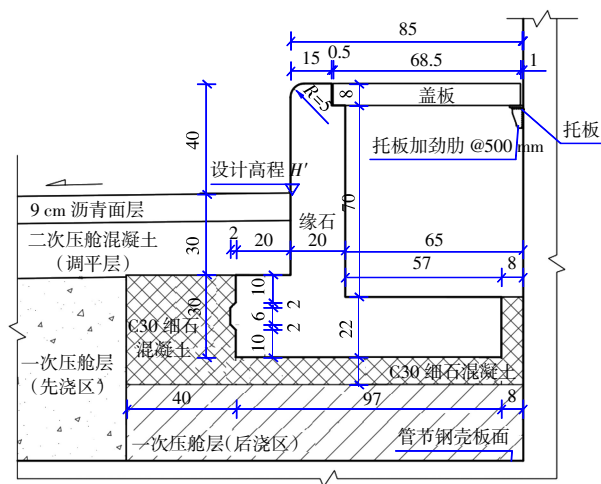


图 1 检修道缘石结构尺寸断面图(cm)

相较于常规道路,沉管隧道管节接头处缘石增设 2 项特殊构造。1) 可滑动连接件:采用不锈钢滑轨+高强橡胶垫复合系统,允许纵向 $\pm 20\text{ mm}$ 位移;2) 弹性密封体系:拼缝内填筑聚氨酯膨胀

密封胶, 适应 0.5~1.2 mm/℃ 温度变形。

## 2 缘石安装施工工艺

沉管隧道路缘石安装工序包括基面处理、定位放样、构件吊装、动态调平、接缝控制、底部浇筑以及工装拆除 7 个步骤。

常规缘石体积小, 重量轻, 通常采用坐浆法安装施工, 即在缘石下方铺设砂浆垫层, 通过砂浆垫层厚度控制缘石标高。其施工工艺为: 施工准备→测量放样→标高样石安装→挂线铺设砂浆垫层→缘石安装调整→缘石两侧砂浆填缝。此工艺方便快捷, 适用于小型缘石快速安装, 但对于大重量缘石构件, 砂浆垫层无法承受较大荷载, 且标高、线形调整依靠人员手动调整, 无法做到高精度施工。因此, 该工艺无法适用深中通道检修道缘石安装工程, 需研发一种可快速、高精度安装大重量缘石构件的工艺<sup>[5-6]</sup>。

本工程在现有工艺的基础上, 经过比选, 采用调节螺栓+精调工装组合工艺快速精确安装检修道缘石, 安装施工工艺流程如图 2 所示。其安装方法为: 待沉管隧道管节沉降稳定后, 在压舱混凝土上植入 M12 双排调节螺栓, 作为检修道缘石标高精调措施。检修道缘石满足龄期要求并验收合格后, 采用叉车吊装放置于平板车并转运至待安装管节, 由叉车起吊, 人工辅助将检修道缘石安装至精调工装上, 并按照设计边线精准调节。标高及安装边线满足要求后进行下一块体的安装, 单个管节整体安装完成后对安装标高及边线整体复核。

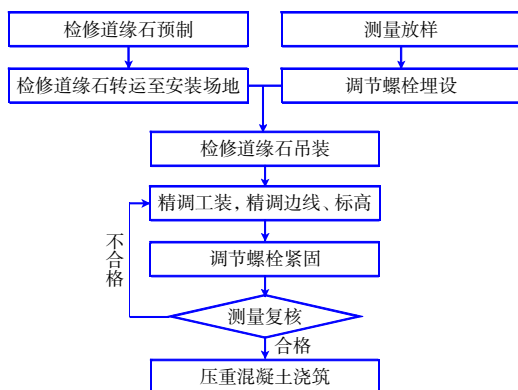


图 2 检修道缘石安装施工工艺流程图

### 2.1 施工放样

检修道缘石安装线形需平顺、美观, 对安装过程中测量放样及复核提出了较高的要求。安装

前, 根据隧道线形调整原则进行边线放样, 通过量取到侧墙距离作为边线放样点, 量取距离为 105 cm, 每 10 m 量取 1 次, 点位上架设自动安平水平仪, 以发射激光作为检修道缘石安装边线。施工过程中, 即以激光边线为准调整构件空间姿态, 保证安装边线精确。

根据隧道路面设计曲线高程, 在中墙上每 10 m 放样 1 处高程, 相邻两处高程之间弹线标记, 作为构件安装标高控制<sup>[7]</sup>。

### 2.2 调节螺栓设计及埋设

为精确调整检修道缘石标高, 采用调节螺栓精确控制检修道缘石最终标高。调节螺栓分为螺栓和套筒 2 部分, 套筒采用 DN15 钢管与 M12 螺母焊接而成, 长度为 9 cm, 螺栓采用 M12 螺栓, 长度为 6 cm。螺栓套筒埋入压舱混凝土中, 埋深为 5 cm。作业时, 旋拧螺栓, 实现调节螺栓上下调节, 可调节高度 10 cm, 保证满足构件标高调整需求。每块检修道缘石下方埋设 2 组, 共 4 根, 间距为 80 cm×130 cm, 位于检修道缘石底面四角内侧。调节螺栓埋设前, 测量放样好每块检修道缘石安装位置, 确保埋设位置与构件一一对应。

### 2.3 检修道缘石安装及精调

检修道缘石安装分为粗放和精调。安装时, 采用叉车配合吊装工装将检修道缘石构件放入待安装位置, 使用精调工装对检修道缘石安装边线及标高进行精确调整定位。精调工装示意图如图 3 所示, 由万向球和液压千斤顶组成, 单个万向球可承载 0.8 t, 千斤顶可调节高度为 12 mm, 可实现检修道缘石构件三维度快速移动调整及空间姿态调整。

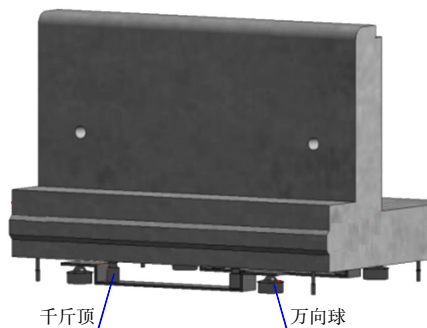


图 3 精调工装示意图

检修道缘石预制完成后由运输车转运至安装位置。安装时, 使用叉车配合吊装工装将构件缓慢起吊, 运至安装位置时, 缓慢下放至螺栓顶 10 cm

处，并通过叉车调节构件位置，使构件的安装边线满足设计要求，调节完成后，再将构件下放到调节螺栓上。

检修道缘石粗放完成后，根据放样边线精调。采用水平向千斤顶对检修道缘石水平向调节，调节完成后使用竖向千斤顶对检修道缘石标高及垂直度进行调节，采用激光水平仪根据设计标高对缘石顶标高进行调整，并与前一块检修道缘石顺接，相邻检修道缘石错缝不得大于 3 mm。边线及标高调整完成复核无误后，旋转底部调节螺栓，与检修道缘石接触后即可将精调工装撤出，进行

下一块检修道缘石安装。安装过程中，为控制相邻检修道缘石安装间隙，保证安装间隙一致性，采用 3 mm 硬质缝卡对检修道缘石安装进行限位，确保构件缝宽一致，均匀美观。

2.4 检修道缘石测量复核

单个管节检修道缘石安装完成后，采用水准仪和激光水平仪对缘石标高和直顺度复检验收。标高每 10 m 复核 1 处，直顺度每 200 m 复核 4 处，E6 管节南侧路缘石安装检测结果如表 1 所示，安装精度均优于设计值，从而保证了缘石整体平顺、美观<sup>[8-10]</sup>。

表 1 E6 管节南侧缘石安装精度检测统计表

里程编号	路缘石直顺度/cm		实测数据差值/cm	顶面高程/m		实测数据差值/m	相邻两块高差/mm		相邻两块缝宽/mm	
	实测值	设计值		实测值	设计值		设计值	实测值	设计值	实测值
K11+130	70.3	70	-0.3	-28.998	-28.993	-0.005	3	1	—	—
K11+140	69.7	70	0.3	-29.116	-29.112	-0.004	3	1	—	—
K11+150	69.5	70	0.5	-29.277	-29.280	0.003	3	1	—	—
K11+200	69.8	70	0.2	-27.425	-27.431	0.006	—	—	±3	1
K11+210	70.0	70	0	-27.269	-27.263	-0.006	—	—	±3	0
K11+220	70.2	70	-0.2	-27.088	-27.095	0.007	—	—	±3	1

验收合格后，检修道缘石底部压重混凝土浇筑，保证缘石稳固。压重混凝土浇筑过程中，应采取保护措施对缘石构件进行保护，避免浇筑过程中对构件表面造成磕碰、污染。

调节螺栓+精调工装组合安装施工工艺的应用，使得单个作业小组检修道缘石安装效率由 15 m/台班提升至 45 m/台班，大大提高了施工效率。检修道缘石安装精度也得到极大提高，标高偏差控制在 5 mm 以内，线形美观度得到有效保证。

3 异形预制构件安装偏差形成机理与纠偏策略

针对沉管隧道差异沉降(≤12 mm)与温度变形(±20 mm)耦合作用下的错台问题，研究显示其本质为传统刚性安装体系无法适应动态边界条件。创新提出“模具优化-动态调平-接缝补偿”三级控制理论：

1) 模具精度迭代控制：建立基于 BIM 的模具数字化验收标准(尺寸公差±0.5 mm)，采用三维激光扫描技术对预制模具进行全尺寸逆向建模，通过点云数据与设计模型比对实现模具缺陷智能识别。工程实践表明，模具验收合格率由 82% 提升至 97%，从源头减少构件尺寸偏差<sup>[11]</sup>。

2) 动态定位补偿系统：研发具有三向液压补

偿功能的智能安装平台，集成高精度倾角传感器(分辨率 0.001°)与激光测距模块，实时监测管节位移并自动计算补偿量。相比传统人工调节，轴向定位精度提升至±0.8 mm(常规工艺±3 mm)，工效提高 2.3 倍<sup>[12]</sup>。

3) 接缝协同变形技术：设计弹性模量梯度变化的复合密封垫层，通过有限元分析优化垫层截面形状(双曲抛物线型)，实现 10 mm 位移量下的应力均匀分布(峰值应力≤2 MPa)。现场测试显示接缝密封性能提升 40%，有效解决错台引发的渗漏风险。

4 结语

本研究针对沉管隧道大重量缘石预制件安装难题，创新研发了“动态调节螺栓+模块化精调工装”协同施工体系。通过三向位移补偿技术(轴向调节裕度±15 mm)与实时监测系统融合，成功克服了管节差异沉降(≤12 mm)及温度变形(±30 ℃)引发的安装偏差，实现线形精度±1 mm/10 m、接缝匹配合格率 98.6%的工程突破。相比传统工艺，安装效率提升 134%，综合成本降低 22%，且结构服役性能满足 120 a 设计寿命要求。

该工艺的核心创新在于构建了动态适应-精准

调控—长效稳定的技术框架：1) 研发可定制化调节螺栓组件，通过调整螺纹导程(2~5 mm)与材质组合(不锈钢/钛合金)，可适配不同工程差异变形阈值；2) 提出模块化工装快速重构方法，支持 30 min 内完成工装参数重置，适应 5~15 t 级预制件安装需求；3) 建立数字化验收标准体系，形成沉管隧道异形构件安装技术规范 3 项。

工程实践表明，本工艺通过调整调节螺栓刚度系数(2.5~5.8 kN/mm)与工装定位模数(1.5~2.5 m)。在后续的沉管隧道工程中，可借鉴深中通道的成功经验，根据不同工程的特点和需求，通过对调节螺栓+精调工装组合工艺进行适当调整和优化，以适应不同工程特点的需求。

#### 参考文献：

- [1] 翟保亮,王元鹏,张兰芳. 堤顶道路路缘石滑模工艺技术及应用[J]. 人民黄河,2024,46(S2):36-37.
- [2] 郑燕燕. 园林工程中路缘石坐浆法施工技术应用研究[J]. 四川水泥,2020(10):194-195.
- [3] 陈鸿,刘洪洲. 深中通道施工图联合设计——隧道防火、内装、排水及附属设施[R]. 上海:上海市隧道工程轨道交通设计研究院,2019.
- [4] 上海市隧道工程轨道交通设计研究院. 沉管段排水及附属设施联合设计的设计服务函[Z]. 2020.
- [5] 朱全江,卫振,王华震,等. 引江济淮工程环形路面路缘石安装工艺研究[J]. 河南科技,2021,40(19):81-83.
- [6] 郑燕燕. 园林工程中路缘石坐浆法施工技术应用研究[J]. 四川水泥,2020,290(10):194-195.
- [7] 上海市隧道工程轨道交通设计研究院. E4~E7 管节检修道缘石及防撞侧石安装预抬量建议函[Z]. 2021.
- [8] 胡倩. 对市政工程路缘石施工技术的研究[J]. 散装水泥,2019,198(1):64-65,72.
- [9] 董智杰. 路缘石滑模施工技术探讨[J]. 河北水利,2023(12):47,40.
- [10] 麻文进. 公路工程施工质量管理问题研究[J]. 交通世界,2022(1):215-216.
- [11] 王帮松. 清水混凝土预制件施工技术研究[J]. 价值工程,2018,37(31):139-140.
- [12] 翟保亮,王元鹏,张兰芳. 堤顶道路路缘石滑模工艺技术及应用[J]. 人民黄河,2024,46(S2):36-37.