

# 顶进节段法最终接头工艺研究及应用

潘伟<sup>1,3</sup>, 王殿文<sup>2,3</sup>

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071;  
3. 天津市水下隧道建设与运维技术企业重点实验室, 天津 300461)

**摘要:** 最终接头作为海底沉管隧道工程贯通管节, 是整个工程的重中之重。结合大连湾海底隧道工程的特点及难点, 调研现有的国内外沉管隧道最终接头的施工案例, 开展顶进节段法最终接头工艺顶推回拉系统、纠偏系统、锁定系统、双层止水系统、施工工艺 5 项关键技术的研究及水下抗浮、回拉 2 项受力计算。经大连湾海底隧道最终接头施工验证, 该工艺施工操作方便, 施工周期短, 船机设备投入少, 造价低, 施工工艺具有可逆性。顶进节段法最终接头在技术先进性、安全可靠性和经济效益等方面具有极大优势, 可推广应用于类似沉管隧道工程中, 具有显著的经济和社会效益。

**关键词:** 沉管隧道; 最终接头; 顶进节段

中图分类号: U655.4; U455.46

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)04-0001-04

doi: 10.7640/zggwjs202404001

## Research and application of the final joint process using the segment-jacking method

PAN Wei<sup>1,3</sup>, WANG Dian-wen<sup>2,3</sup>

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Shandong, Qingdao 266071, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Construction, Operation and Maintenance Technologies for Underwater Tunnels, Tianjin 300461, China)

**Abstract:** The final joint, as the connecting pipe joint of the submarine immersed tunnel project, is the top priority of the entire project. Combined with the characteristics and difficulties of the Dalian Bay Subsea Tunnel Project, the existing construction cases of the final joint of immersed tube tunnels at home and abroad were investigated, and five key technologies of the final joint process of the segment-jacking method were studied, including the jacking and pulling back system, the deviation correction system, the locking system, the double-layer water stop system, and the construction process, and the calculation of forces on underwater anti floating and pull-back were carried out. The construction verification of the final joint of Dalian Bay subsea tunnel shows that this process is convenient to operate, short in construction period, low in investment of ship machinery and equipment, low in cost, and reversible in construction technology. The final joint of segment-jacking method has great advantages in terms of technical advancement, safety reliability and economic benefits, which can be applied in similar immersed tunnel projects, with significant economic and social benefits.

**Key words:** immersed tunnel; final joint; segment-jacking

### 0 引言

大连湾海底隧道工程为北方首个沉管隧道工程, 施工技术难度大、工期紧、质量安全要求高, 要求在保证施工质量与安全的前提下, 最大化缩

短工期。

最终接头作为海底沉管隧道工程贯通管节, 其施工质量直接决定整个工程的成功与否。大连湾海底隧道工程施工区域狭窄, 施工干扰大, 断

收稿日期: 2023-12-21 修回日期: 2024-01-04

作者简介: 潘伟 (1967—), 男, 辽宁大连人, 硕士, 正高级工程师, 副总经理, 总工程师, 港航工程专业。E-mail: panw@cccchy.com

面大,曲线半径小,施工控制、止水难度高。需在调研国内外沉管隧道常用最终接头工艺的基础上,研究适合该工程的经济、合理、可行的沉管隧道最终接头工艺并应用。

## 1 研究概况

### 1.1 主要内容

结合大连湾海底隧道工程的复杂环境条件,通过研究沉管隧道最终接头的施工技术,对结构形式、施工工艺及方法进行分析研究,制定适用于大连湾沉管隧道最终接头的工艺。

### 1.2 技术路线

调研现有的国内外沉管隧道最终接头的施工案例,对比分析各工艺的优缺点,选择适合大连湾沉管隧道的最终接头形式。结合大连湾海底隧道工程的特点及难点,开展顶进节段法最终接头工艺研究。总体技术思路见图1。

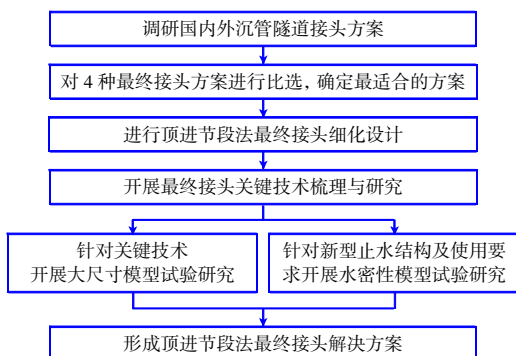


图1 技术研究路线

Fig. 1 Technical research route

## 2 国内外常见的最终接头形式

国内外沉管最终接头常用的形式有传统止水板法、岸上干地施工法、V形块体法、端部块体法等<sup>[1]</sup>,应用工程见表1。

表1 沉管隧道最终接头常用方案

Table 1 Common solutions for final joints of immersed tunnel

序号	最终接头方案	沉管隧道工程名称
1	传统止水板法	上海外环隧道、广州洲头咀隧道、香港西区海底隧道、南昌红谷隧道、日本新泻港隧道
2	岸上干地施工法	宁波常洪隧道、天津海河隧道、襄阳市东西轴线过江隧道
3	V形块体法	港珠澳大桥隧道、日本大阪南港隧道
4	端部块体法	日本川崎航道隧道、日本多摩川隧道

1) 传统止水板法是在水中安装外侧止水模板,抽水后内部现浇的最终接头施工方法,也是目前应用最多的最终接头施工方法。传统止水板

法造价相对较低,但是其水下作业较复杂,施工难度较大,施工周期长。

2) 岸上干地施工法是在最终管节安装完成后,采用围堰等结构形式构建一个临时的封闭空间,在无水条件下完成最终接头的施工。岸上干地施工法施工难度较低,但适用于水深较浅且需形成干地围堰条件的工程。

3) V形块体法采用预制钢壳混凝土V形块体结构形式,布置在管节之间,节段通过临时预应力拼接而成<sup>[2]</sup>。该工艺体系转换快速,但结构复杂,需要大型起重设备。

4) 端部块体法结构由接合短管段、竖井突出部等部分组成,其结构简单,几乎可在无水情况下作业、质量管理容易。但端部块体法施工不可逆,体系转换时间长。

结合大连湾海底隧道施工区域狭窄、施工干扰大、深水大断面的实际工程情况及施工质量好、施工周期较短、建设成本低、可实现工序可逆的施工需求,上述既有最终接头方案均有不适应性,因此需要研究出一种新型最终接头工艺。

## 3 关键技术研究

顶进节段法最终接头施工工艺是在干作业条件下,提前完成支撑梁、外部套筒、顶进节段预制、注浆止水带安装,然后将顶进节段推入外部套筒内、安装可伸缩止水带后进行场地灌水<sup>[3]</sup>。待最终管节安装完成后,通过顶推装置将顶进节段推出,进行最终接头安装;最后进行锁定构造安装,浇筑后浇带,完成隧道贯通。

### 3.1 结构构造

顶进节段法最终接头结构,由顶进节段、外部套筒、止水构造、顶推装置及锁定构造、后浇带等结构组成。最终接头结构形式见图2。

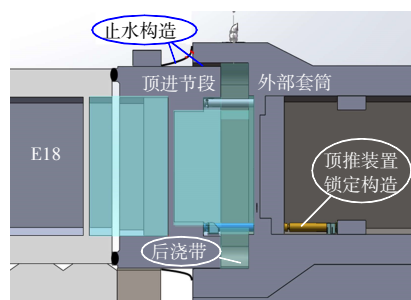


图2 顶进阶段法最终接头结构形式

Fig. 2 Final joint structure type of segment-jacking method

“顶进节段法”最终接头属首次提出并开展应

用研究,无成功实施的相关工程案例。根据顶进节段法最终接头形式,开展顶推回拉系统、纠偏系统、锁定系统、双层止水系统、施工工艺5项关键技术研究及水下抗浮、回拉2项受力分析。

### 3.2 顶推回拉系统

为实现工序可逆,研究采用具有顶推回拉功能的双向油缸作为动力,在结构上设置临时止推钢支撑、反力牛腿、钢牛腿。为降低顶推难度,研究采用了聚四氟乙烯板+镜面不锈钢组合。滑动摩擦系数理论为0.1<sup>[4]</sup>。顶推回拉装置示意图见图3。

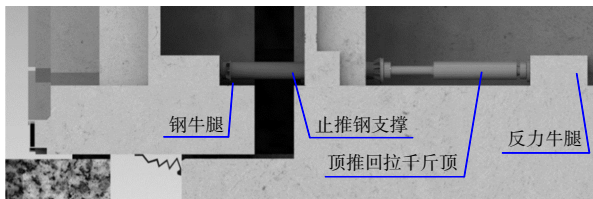


图3 顶推回拉装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of jacking and pulling back device

### 3.3 纠偏系统

纠偏系统由主动纠偏装置(4台顶推油缸,左右各布置2台)及被动纠偏结构(限位)组成。每台油缸可独立进行顶推和回拉作业,系统具有自动监测及自动响应功能,当顶进节段偏离轴线,超过偏差预警值(1 cm)时,纠偏系统启动,推拉油缸联动,实现纠偏。在顶进节段两侧设置水平限位块,单侧间隙2 cm。

### 3.4 锁定系统

锁定系统主要由止推钢支撑、连接钢支撑及扁平千斤顶组成。锁定系统主要作用为:顶进节段安装完成后,止水带弹力由水压力转到锁定装置平衡,完成受力体系转换。锁定结构示意图见图4。

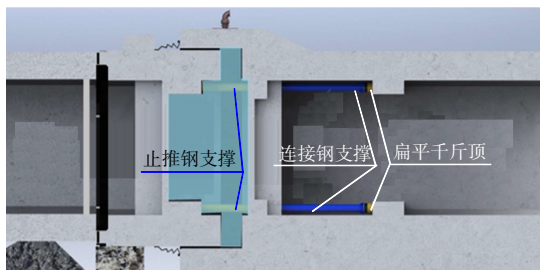


图4 锁定系统

Fig. 4 Locking system

本锁定系统能适应更大的止推力要求,启动作用时间更快,可靠度也更高。

### 3.5 双层止水系统

为达到最终接头顶推后高水深条件下滴水不漏的临时止水效果,同时考虑突发情况下,实现止水带的可检可修,采用2种止水原理的双层止水结构:可伸缩止水带与可注浆止水带。在外部套筒与顶进节段间安装可伸缩止水带,在外部套筒内安装可注浆止水带。止水带沿顶进节段外侧各布置1圈,形成双道密封环<sup>[9]</sup>。本密封构造施工更方便,止水效果也更好。双层止水系统见图5。

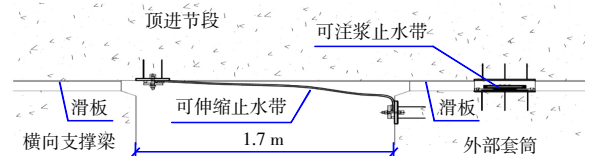


图5 双层止水系统

Fig. 5 Double-layer water stop system

### 3.6 施工工艺

根据上述系列关键技术研究最终确定施工工艺,关键工艺流程为:支撑梁制作→外部套筒及顶进节段制作→可注浆止水带安装→顶进节段顶入套筒→可伸缩止水带安装→围堰灌水拆除→管节安装→顶进节段顶推安装→体系转换→后浇带浇筑→底部注浆→最终接头回填。

### 3.7 水下抗浮分析

1) 顶进节段与外部套筒接合腔排水后,顶进节段两侧均处于无水状态,此时顶进节段所受重力最小,处于最不利工况。此时顶进节段重心距顶进节段尾端2.751 m,浮心距顶进节段尾端2.893 m,重力产生扭矩6 655 t·m,浮力产生扭矩6 030 t·m,重力产生扭矩>浮力产生扭矩,顶进节段不会发生旋转(图6)。

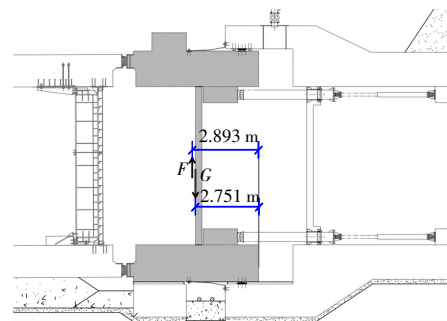


图6 抗旋转受力分析

Fig. 6 Analysis of anti rotation force

2) 顶进节段重2 500 t,浮力2 120 t。在排出接合腔水后,抗浮系数1.18>1.05,满足要求。混凝土封门(重246 t)拆除且顶部未回填,顶进节段

重为 2 254 t, 抗浮系数  $1.06 > 1.05$ , 满足要求。

### 3.8 回拉受力分析

顶进节段回拉纠偏过程中, 纠偏侧外侧千斤顶提供回拉力, 非纠偏侧外侧千斤顶起限位作用, 顶进节段绕限位点进行旋转。顶进节段重心位置距离旋转点 10.67 m, 水下最大静摩擦力 195 t, 所需扭矩  $2\,081\text{ t}\cdot\text{m}$ 。纠偏侧外侧千斤顶提供回拉力 150 t, 回拉位置距离旋转点 21 m, 提供扭矩  $3\,150\text{ t}\cdot\text{m} > 2\,081\text{ t}\cdot\text{m}$ (图 7), 能够满足回拉需求。

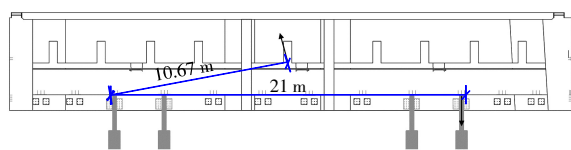


图 7 回拉受力分析

Fig. 7 Analysis of pulling back-force

## 4 工程应用成果

顶进节段法最终接头工艺已在大连湾海底隧道最终接头施工中得到成功应用。

1) 最终接头预制, 各结构预制尺寸偏差及各高精度预埋件平整度满足设计要求。

2) 顶进节段顶入套筒过程通过顶推系统实现顶推过程的时时监测及纠偏。顶进节段启动动力为 400 t, 静摩擦系数为 0.16; 顶推过程中千斤顶顶力为 98~252 t, 动摩擦系数为 0.039~0.101。

3) 顶进节段顶推安装施工过程中, 顶推系统、纠偏系统工作状态稳定, 油缸顶力稳定, 顶推总顶力平均在 131~154 t, 同步性能良好, 顶进节段轴线控制良好。

4) 经贯通测量最终接头安装绝对偏差及相对偏差均符合要求。最终接头绝对轴线首端偏西 2 mm, 尾端偏西 3 mm; 底高程首端偏高 1 mm, 尾端偏高 2 mm; 设计纵倾 0%, 实测纵倾 0%。

5) 用时 9 d 完成支撑体系安装, 体系转换中, 止水带及钢支撑状态整体稳定受控, 扁平千斤顶总顶力约 5 907 t(单个顶部平均 242 t, 底部平均 250 t), 接合腔无渗漏水现象, 止水带止水效果良好。锁定结构性能良好, 体系实现快速转换。

6) 后浇带效果: 后浇带浇筑完成后, 监测 GINA 止水带整体压缩约 0.3 mm, 钢支撑拆除后, 止水带整体反弹约 0.1 mm; 通过监测数据分析表明后浇带收缩补偿效果较好, 安全质量整体受控。

7) 施工后变形监测: 最终接头底部注浆施工完成 1 a 后, 最终接头沉降、位移累计变化均小

于 1 mm, 最终接头处于稳定状态。

经大连湾海底隧道最终接头施工验证, 该工艺水下工作量小, 施工操作方便, 施工周期短, 速度快, 节约人员设备工班耗时。海上作业量小, 不需要大型起重吊装船舶, 船机设备投入少, 造价低。施工工艺具有可逆性, 如对接不成功, 可逆向操作恢复初始状态。

## 5 结语

根据大连湾海底隧道工程的特点及难点, 研究了沉管隧道最终接头深水大断面、长距离顶推可逆式新型结构形式, 并开发了顶进节段法施工关键技术。研制了可回拉、纠偏、低摩阻的液压顶推系统和具有初始预紧功能、可快速体系转换的锁定系统。提出了超长超宽可伸缩止水带和可注浆止水带双层止水方法。顶进节段法最终接头在大连湾海底隧道建设中成功应用, 实现了最终接头毫米级的对接, 做到了滴水不漏。

随着我国跨海通道、沉管隧道的快速发展, 顶进节段法在技术先进性、安全可靠性和经济效益等方面具有极大优势, 可推广应用于类似沉管隧道工程中。

## 参考文献:

- [1] 耿伟光, 徐伟. 沉管隧道最终接头形式和施工工艺的改进[J]. 建筑施工, 2017(1): 128-130.  
GENG Wei-guang, XU Wei. Final connector form of immersed tunnel and improvement of construction technology[J]. Building Construction, 2017(1): 128-130.
- [2] 林鸣, 林巍, 刘晓东, 等. 整体式主动止水最终接头技术及其与沉管管节的一体化[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(11): 1-11.  
LIN Ming, LIN Wei, LIU Xiao-dong, et al. Technique of integrated-type and positive-waterstop closure joint and its integration with immersed tunnel element[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(11): 1-11.
- [3] 付洪超, 姚延焕. 沉管隧道最终接头止水带安装工艺[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(12): 121-125.  
FU Hong-chao, YAO Yan-huan. Installation technology for final joint water-stop of immersed tube tunnel[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(12): 121-125.
- [4] 肖继涛, 杨霁, 王殿文, 等. 顶进节段法最终接头底部滑行系统综合研究[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(12): 13-17.  
XIAO Ji-tao, YANG Ji, WANG Dian-wen, et al. Comprehensive study on bottom sliding system of segment-jacking method for tunnel closure joint[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(12): 13-17.
- [5] 任冬生, 杨霁. 大连湾沉管法隧道最终接头防水系统创新模型试验研究[J]. 隧道与轨道交通, 2021(S2): 71-75.  
REN Dong-sheng, YANG Ji. Innovative model test research on waterproof system of final joint of Dalian Bay immersed tunnel[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S2): 71-75.