

# 钢壳沉管隧道最终接头龙口宽度研究

王建<sup>1</sup>, 董辉<sup>2</sup>, 管泽旭<sup>2</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)

**摘要:** 为了确保整体预制水下推出式最终接头在外海工况下施工过程安全风险可控, 满足设计要求的厘米级安装对接精度, 针对钢壳沉管隧道最终接头施工中的龙口宽度问题进行探讨。在分析已安管节实际施工参数和特定要求气象窗口条件下, 从沉管进入龙口的方式、管节纵向定位能力及隧道预制、安装的累计长度误差等方面进行研究。研究表明, 控制最终接头龙口宽度在 2.2 m 有利于提供后焊段作业空间, 增强通风效果, 满足大体量焊接作业条件, 便于大型设备的投入, 提高工作效率; 同时, 为沉管施工提供有效沉放对接作业空间, 降低作业风险。本研究为钢壳沉管最终接头施工提供有益参考, 具有重要意义。

**关键词:** 沉管隧道; 预制推出式最终接头; 龙口富裕宽度; 沉放控制; 定位能力

中图分类号: U655.4; U455.46

文献标志码: B

文章编号: 2095-7874(2024)05-0068-05

doi: 10.7640/zggwjs202405011

## Study on the closure width in the final joint construction of steel shell immersed tunnel

WANG Jian<sup>1</sup>, DONG Hui<sup>2</sup>, GUAN Ze-xu<sup>2</sup>

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract:** In order to ensure that the overall prefabricated underwater push-out final joint can control the safety risk during construction process under offshore conditions, and to meet the design requirements of centimeter-level installation and docking accuracy, this paper explores the issue of the closure width in the final joint construction of steel shell immersed tunnels. By analyzing the actual construction parameters of the installed pipes and the specific weather window conditions, this paper focuses on the entry method of the pipe into the closure, the longitudinal positioning ability of the pipe, and the cumulative length errors of the tunnel prefabrication and installation. The results show that controlling the closure width of the final joint at 2.2 m is beneficial for providing space for post-welding operations, enhancing ventilation effects, satisfying large-scale welding operation conditions, facilitating the deployment of large-scale equipment, and improving work efficiency. Meanwhile, it provides an effective space for sinking and docking operations in the construction of immersed pipes, reducing operational risks. This study is of great significance to provide useful references for the final joint construction of steel shell immersed pipes.

**Key words:** immersed tunnel; prefabricated push-out final joint; surplus width of closure; sinking control; positioning ability

### 0 引言

深中通道沉管隧道作为我国首例采用整体预制水下推出式最终接头的项目, 其结构形式和施工工艺在国际范围内均属于首次应用<sup>[1]</sup>, 具有创新性和挑战性。此前, 日本川崎航道和多摩川隧道也曾成功实施岸边陆域推出最终接头方案<sup>[2-3]</sup>。

整体预制水下推出式最终接头的特点是预制与标准管节有相同断面的小型管节(推出段), 一端设置 GINA 止水带, 背面设置临时封门。在最后一个待沉放管节艏端设置扩大段, 将最终接头放置在扩大段内。完成最后一个管节的沉放后, 将推出段从扩大段内推出, 使其与相邻管节的端

收稿日期: 2023-08-30 修回日期: 2024-01-02

作者简介: 王建(1970—), 男, 山东临沂人, 高级工程师, 安全总监, 港航工程专业, 主要从事工程施工及技术管理工作。E-mail: 363378918@qq.com

面接触,完成GINA止水带的初始压接。然后抽排对接腔内水体,利用水力压接使GINA止水带充分压缩,最后在沉管隧道内部进行止水及纵向锁定的施工。

目前国内外尚未有类似整体预制水下推出式最终接头的应用案例。尽管如此,GINA止水带在水下隧道施工中已广泛应用,其可靠性和稳定性得到了充分验证。此外,我国在隧道施工技术方面已取得了显著的成果,为整体预制水下推出式最终接头的成功实施奠定了基础。

本文对深中通道沉管隧道最终接头施工中的关键问题进行深入研究,探讨其施工技术、安全控制和环境影响等方面,为我国隧道施工技术的发展提供有益的参考,推动钢壳沉管隧道施工技术的进步。

## 1 工程概况

深中通道沉管隧道采用国内首次应用的钢壳混凝土组合结构形式,是世界首例特长双向八车道海底隧道<sup>[4]</sup>。两端分别位于海中东、西人工岛上,隧道全长5 035 m,由32个管节+最终接头构成,标准管节高10.6 m、宽46 m、长165 m,曲线变宽管节高10.6 m、宽46~55.46 m、长123.8 m,重约76 000 t。最终接头位于E23—E24管节之间,长度约2.5 m。

沉管浮运安装采用运输安装一体船“一航津安1”施工,该船是世界上第一艘集沉管浮运、定位、沉放和安装等功能于一体的、具有DP动力定位和循迹功能的专用沉管安装船。该船主船体采用双体船船型,船长190.4 m、船宽75 m、型深14.7 m<sup>[5]</sup>。由于最终接头设置在E23管节扩大段内,因此E23管节+最终接头浮运和沉放亦由一体船施工。

在E23管节施工前,E24管节已经安装完成,E23管节+最终接头的安装主要有2种方案,示意图见图1。

### 1) 东西纵移方案

一体船携带最终接头沉管浮运至龙口东侧已安管节上方进行系泊,系泊完成后,通过缆绳进行纵向绞移至安装位置后,船管脱离进行最终接头管节沉放对接施工,与常规管节的绞移安装工艺顺序相同。

### 2) 南北横移方案

本方案根据管节下放的时间不同,又分为2

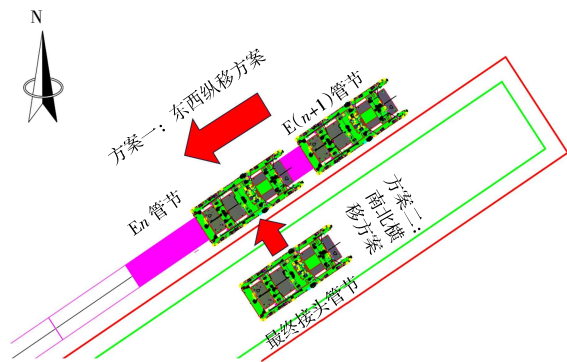


图1 E23管节+最终接头进入龙口方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of E23+ final joint entering the closure

种方式:

方式一为船管一体绞移。一体船携带最终接头沉管浮运至龙口南侧航道区域进行系泊,系泊完成后直接进行南北向的横移,横移到安装位置后船管脱离进行最终接头管节沉放对接施工。

方式二为船管脱离绞移。一体船携带最终接头沉管浮运至龙口南侧航道区域进行系泊后,首先进行船管脱离,下放管节至距离航道底面一定距离后,再进行南北向的横移,横移到安装位置后继续下放最终接头管节至基床,进行后续对接施工。

为确定方案的可行性,在E5管节安装后进行了现场横向绞移试验,试验结果表明:横向绞移时一体船无法在小范围内精确控制其平面位置,初步评估目前采用的最终接头方式两侧预留的安全距离不能满足该作业方式要求。

经综合比选,南北横移方案在某种程度上具有施工过程简单、节省时间和人力的优势。但同时,该方案受风、浪等环境因素影响较大,可能导致精度不稳定。在实际施工过程中,需根据具体情况灵活调整方案,结合船管一体绞移和船管脱离绞移的优点,确保最终接头安装的顺利进行。

最终接头管节安装须采用从东侧管顶纵移进入龙口的方案(东西纵移方案),进入龙口正上方后采用垂直沉放方式进行安装。该方案与标准管节安装工艺基本一致,可操作性强、熟练度高。

## 2 龙口富裕宽度影响因素分析

经过前期的研究分析,最终接头龙口富裕宽度与管节的安装方式、船舶性能、沉管纵向定位能力、两侧预留安全距离、管节预制累计长度误差、GINA压缩量累计误差等主要因素相关,龙口

三维形态还与两侧相邻管节定位精度密切相关。经收集整理现场相关实施数据,结合本工程运安

一体船的实际性能及目前已安装管节的施工经验,对最终接头管节龙口富裕宽度进行论证分析(图2)。

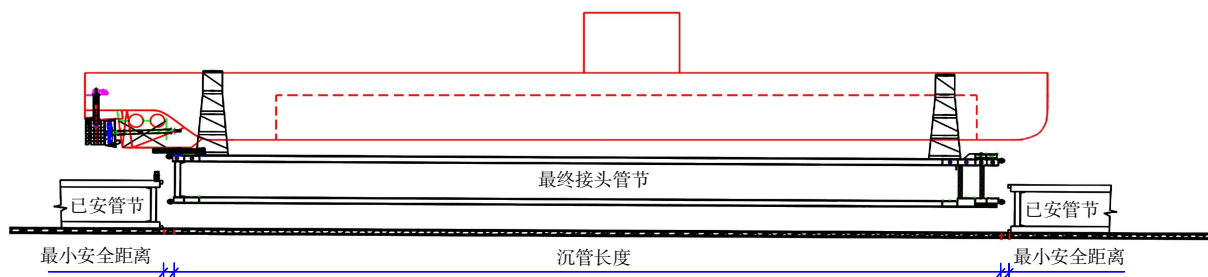


图2 最终接头管节安装合龙口纵剖面图

Fig. 2 Longitudinal profile of the closure of final joint pipe installation

## 2.1 管节纵向定位能力

最终接头合龙口姿态测控方法主要有:双测量塔测控法<sup>[6]</sup>、高精度贯通测控法<sup>[7]</sup>、双人孔投点测控法<sup>[8]</sup>。

主要采用这3种测控技术,根据已安装沉管对测控方式精度比对结果显示:可提供在设计要求范围以内龙口参数。依据测控数据分析测控精度,并通过误差传播理论进行端面特征点测量精度的评估。通过精度评估,分析不同测控方法所能达到的合龙口姿态测量精度,选择最优的测控方式为最终接头合龙口姿态参数的选择提供理论依据。

在管节沉放过程中,受海流、波浪和缆系等多种因素影响,沉管存在一定的纵、横向晃动(纵荡、横荡)和平面扭动(艏摇),根据目前已安管节实测数据统计分析,管节横荡最大纵向晃动幅度为0.36 m,纵荡最大纵向晃动幅度为0.34 m,平面扭转幅度最大偏差为0.44 m。

由于最终接头管节龙口流场与标准管节的安装流场存在较大的不同,管节的纵向晃动(纵荡)、平面扭动(艏摇)存在一定的不确定性,所以现阶段暂取实测最大平均值0.4 m。

## 2.2 两侧预留安全距离

综合考虑沉管安装的施工需求,目前已安管节距离对接端1 m时进行着床,且着床高度控制在2 m以内,此时GINA鼻尖距离已安管节端钢壳仅为0.5 m左右,若考虑最大纵向晃动幅度则安全裕量并不大。

由于最终接头沉放高度约11 m,若按照目前的安全距离预留,则最终接头管节沉放安装时的风险实际要大幅高于标准管节,现阶段暂按E4—

E9管节着床平均值0.84 m考虑,取值为0.8 m。

按照目前的沉管安装工艺,E23管节+最终接头两侧的最小富裕宽度取 $0.8-0.4=0.4$  m。

## 2.3 管节预制长度及GINA压缩量偏差

实测E5管节尾端里程比设计值偏东31.9 mm,实测E8管节尾端里程比设计值偏西39.7 mm。由于后续预制和安装仍存在一定的不确定性,暂按平均值进行估算,见图3。

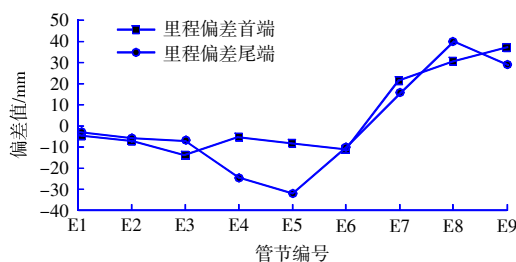


图3 管节预制长度及GINA压缩量偏差统计

Fig. 3 Statistics of pipe prefabrication length and GINA compression deviation

综合考虑32个管节的管节预制及GINA压缩偏差,若按照E5管节贯通结果计算,E5管节安装结束偏东31.9 mm,计算32个管节: $31.9/5 \times 32=204.16$  mm,龙口长度整体会比设计值偏小204.16 mm;若按照E8管节贯通结果计算,E8管节安装结束偏西39.7 mm,计算32个管节: $39.7/8 \times 32=158.8$  mm,龙口长度整体会比设计值偏大158.8 mm;现阶段建议取值为-0.16~0.2 m。

## 3 龙口富裕宽度计算

### 3.1 计算过程

目前仅从以上3个因素考虑,根据已有数据进行统计分析,在满足安全水深的前提下,按照纵向绞移和垂直沉放的方案,计算龙口单侧最大

富裕宽度为  $S=0.4+0.4+0.2/2+0.1/2=0.95$  m(即:管节纵向定位能力偏差+最小富裕宽度+管节预制长度及GINA压缩量偏差/2+定位偏差/2),考虑到施工过程中可能出现的各种不确定性因素,如气象、水文等环境条件的变化、设备故障等突发情况,增加富裕宽度可以确保施工的安全性和稳定性,加之该工艺属于国内首次实施,在此基础上增加0.15 m富裕量,现阶段建议龙口富裕宽度(预留安全距离) $S$ 取值为1.1 m。

### 3.2 后续处置措施

由于目前管节仅安装了总数的一半,后续还需要大量的数据进一步确定龙口富余宽度,为了保证龙口宽度较准确,计划后续开展如下工作:

1) 在E21、E25管节采用人孔投点的方式将高精度控制点投测至管节内部,检校进洞导线测量成果,提高外符合精度,为准确掌握合龙口姿态提供保障。

双人孔井投点主要利用GNSS技术实现首、尾人孔井投点特征点绝对位置坐标采集,采集到的坐标使用直接投点的方式投到管节内部如图4所示,其一,可以直接检核贯通成果,确保贯通成果的可靠性。其二,结合人孔井投点特征点与管节各特征点之间的相对位置关系以及安装到位后管节实际倾斜数据进行空间三维坐标解算,精确得到管节特征点实际隧道坐标和管节端面空间姿态。

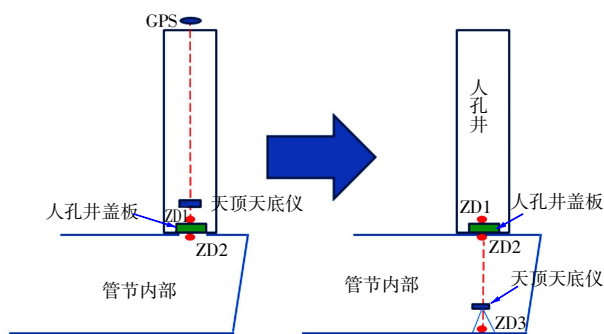


图4 双人孔井投点原理图

Fig. 4 Principle diagram of double manhole drop point

2) 按照龙口尺寸动态评估的原则最终接头两侧剩余3~4个管节时,分阶段进行龙口宽度评估,评估数据确认无误后上报并通过配切E24管节端钢壳长度的方式将龙口宽度控制在2.2 m以内。

### 4 实施效果

深中通道沉管隧道采用世界首例整体预制水

下推出式最终接头,其结构形式和施工工艺在国际范围内均属于首次应用。在最后一个待沉放管节艏端设置扩大段,将最终接头放置在扩大段内。完成最后一个管节的沉放后,将推出段从扩大段内推出,使其与相邻管节的端面接接触,完成GINA止水带的初始压接。

在正式施工之前,分别在陆上和坞内水下做了推出试验,掌握推出过程最终接头行走状态和相关参数,并从中发现问题,解决了可能发生的情况,制定了应急预案。

在试验过程中发现,由于止水带的原因,最终接头无法完全退回到原位,导致龙口富裕度减小,现场实测E23管节及最终接头两侧龙口宽度0.87 m,比计划预留的1.1 m小0.23 m,比计算富裕量小0.08 m,为保证管节顺利沉放,优化沉放工艺,将E23管节沉放对接位置由端面间距5 m位置变更至1.1 m位置连续沉放,避免管节水下绞移出现晃动发生碰撞。2023年6月9日E23管节及最终接头顺利完成沉放及对接,2023年6月11日最终接头顺利推出完成海底隧道水下合龙。

### 5 结语

针对钢壳沉管隧道最终接头龙口宽度问题进行了深入研究,提出了一种综合考虑多种因素的计算方法,并制定了相应的后续处置措施。

研究成果主要包括以下4点:1)提出了钢壳沉管隧道最终接头施工的龙口宽度分析方法,为施工安全提供了重要依据;2)创新性地应用了整体预制水下推出式接头,提高了施工效率和安装精度;3)实施严格的安全控制措施,确保了施工过程中的安全;4)采取环保施工措施,减少了施工对环境的影响。

钢壳沉管隧道最终接头施工技术的创新在提高施工效率、降低成本、保障安全以及保护环境等方面具有重要意义,有助于推动我国隧道施工技术持续创新和发展。

### 参考文献:

- [1] 邓斌,黄清飞,金文良,等.深中通道沉管隧道水下推出式最终接头构造研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(10):1769-1778. DENG Bin, HUANG Qing-fei, JIN Wen-liang, et al. Study on construction of underwater push-type final joint of immersed tunnel in Shenzhen-Zhongshan Link[J]. Tunnel Construction(Chinese and English), 2023, 43(10): 1769-1778.
- [2] 胡政才,先明其,马积薪.日本多摩川沉管隧道的设计与施工[J].世界隧道,1995(5):52-75.



- HU Zheng-cai, XIAN Ming-qi, MA Ji-xin. Design and construction of the Tamagawa immersed tunnel in Japan[J]. World Tunnel, 1995(5): 52-75.
- [3] 林鸣, 史福生, 表莲. 日本沉管隧道最终接头施工新工法[J]. 中国港湾建设, 2012, 32(4): 1-4.
- LIN Ming, SHI Fu-sheng, BIAO Lian. New technology for construction of final joint of immersed tube tunnels in Japan[J]. China Harbour Engineering, 2012, 32(4): 1-4.
- [4] 刘健, 邓斌, 黄清飞. 深中通道沉管隧道钢壳设计及制造关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1367-1374.
- LIU Jian, DENG Bin, HUANG Qing-fei. Design and manufacturing techniques for steel-shell structure of Shenzhen-Zhongshan Link's immersed tunnel[J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2021, 41(8): 1367-1374.
- [5] 世界首艘自航式沉管运输安装一体船开工建造[J]. 水运工程, 2018(8): 97.
- Construction of the world's first self-propelled immersed tunnel transportation and installation ship[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(8): 97.
- [6] 成益品, 刘兆权, 锁旭宏, 等. 北斗在深中通道沉管隧道安装定位中的应用[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(10): 17-20, 699.
- CHENG Yi-pin, LIU Zhao-quan, SUO Xu-hong, et al. Application of Beidou in installation and positioning of immersed tube tunnel in Shenzhen-Zhongshan Link[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(10): 17-20, 69.
- [7] 成益品, 孙阳阳, 高应东. 外海超长沉管隧道精密贯通测量设计与实践[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(5): 12-15.
- CHENG Yi-pin, SUN Yang-yang, GAO Ying-dong. Design and practice of precise through survey of offshore super long immersed tunnel[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(5): 12-15.
- [8] 锁旭宏, 刘国辉, 张德津, 等. 港珠澳大桥沉管隧道最终接头合龙口状态测量[J]. 深圳大学学报(理工版), 2022, 39(4): 402-408.
- SUO Xu-hong, LIU Guo-hui, ZHANG De-jin, et al. Closure state measurement of final joint of the immersed tunnel of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2022, 39(4): 402-408.
- ~~~~~
- (上接第 47 页)
- [9] HORPIBULSUK S, RACHAN R, RAKSACHON Y, et al. Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay[J]. Soils and Foundations, 2009, 49(1): 85-98.
- [10] FURLAN A P, RAZAKAMANANTSOA A, RANAIVOMANANA H, et al. Effect of fly ash on microstructural and resistance characteristics of dredged sediment stabilized with lime and cement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 272: 121637.
- [11] 程强强. 粉煤灰水泥加固海相粘土的力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- CHENG Qiang-qiang. Study on mechanical properties of fly ash cement treated marine clay[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [12] 王子帅, 王东星. 工业废渣-水泥协同固化土抗硫酸盐侵蚀性能[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(11): 2035-2042.
- WANG Zhi-shuai, WANG Dong-xing. Performances of industrial residue-cement solidified soils in resisting sulfate erosion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(11): 2035-2042.
- [13] 李丽华, 韩琦培, 杨星, 等. 稻壳灰-水泥固化淤泥土力学特性及微观机理研究[J]. 土木工程学报, 2023(12): 166-176.
- LI Li-hua, HAN Qi-pei, YANG Xing, et al. Mechanical properties and micro-mechanisms of RHA-cement solidified sludge[J]. China Civil Engineering Journal, 2023(12): 166-176.
- [14] CONSOLI N C, VAZ FERREIRA P M, TANG C S, et al. A unique relationship determining strength of silty/clayey soils-Portland cement mixes[J]. Soils and Foundations, 2016, 56(6): 1082-1088.
- [15] 庞文台. 掺合粉煤灰的复合水泥土力学性能及耐久性试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- PANG Wen-tai. Experimental study on mechanical properties and durability of composite cement soil mixed with fly ash[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [16] 黄英豪, 董婵, 关云飞, 等. 击实对固化淤泥物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1728-1733.
- HUANG Ying-hao, DONG Chan, GUAN Yun-fei, et al. Effect of compaction on physical and mechanical properties of solidified dredged materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1728-1733.
- [17] LANG L, SONG C Y, XUE L, et al. Effectiveness of waste steel slag powder on the strength development and associated micro-mechanisms of cement-stabilized dredged sludge[J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117975.
- [18] 张春雷, 汪顺才, 朱伟, 等. 初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 567-570.
- ZHANG Chun-lei, WANG Shun-cai, ZHU Wei, et al. Influence of initial water content on cement solidification effect of dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 567-570.
- [19] CHOMPOORAT T, THEPUMONG T, KHAMPLUD A, et al. Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing[J]. Construction and Building Materials, 2022, 316: 125858.
- [20] 李飞, 童昊. 粉煤灰对水泥中重金属存在形式的影响[J]. 水泥工程, 2023(1): 21-23.
- LI Fei, TONG Hao. Effects of fly ash on the form of heavy metals in cement[J]. Cement Engineering, 2023(1): 21-23.
- [21] 聂鼎. 基于净浆流变理论的自密实混凝土配合比优化方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- NIE Ding. Research on optimizing mix proportion of self-compacting concrete based on paste rheological theory[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.