

· 综合 ·



# 沉管工厂化预制技术 在港珠澳大桥工程中的应用

翟世鸿<sup>1,2</sup>, 吴海波<sup>2</sup>, 杨秀礼<sup>1,2</sup>

(1. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430014;  
2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 港珠澳大桥隧道工程是目前世界上外海条件下埋深最深的沉管隧道工程, 该沉管隧道断面大、管节质量大、混凝土抗裂要求高, 在国内首次采用了工厂化预制工艺进行沉管管节的预制。由于预制工艺复杂, 项目前期进行了深入的研究, 并进行了众多工艺的改进和创新。介绍了工厂法预制的工艺及关键技术和应用情况。

**关键词:** 沉管隧道; 沉管预制; 工厂法预制

中图分类号: U 455.46

文献标志码: B

文章编号: 1002-4972(2015)08-0001-05

## Application of industrial prefabrication technology of immersed tunnel in Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge project

ZHAI Shi-hong<sup>1,2</sup>, WU Hai-bo<sup>2</sup>, YANG Xiu-li<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab of Large-Span Bridge Technology, Ministry of Transport, PRC, Wuhan 430014, China;  
2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

**Abstract:** Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge project is the deepest buried depth of immersed tunnel in the open sea. The tubes in this project have large cross sections, heavy weight, and high standard of crack resistance of concrete. It is the first one using industrial prefabricated immersed tubes for tunnel construction in China. Due to complexities of the prefabrication technology, deep studies were made to develop various improvements and innovations. This paper mainly outlines the industrial prefabrication technology and its application.

**Keywords:** immersed tunnel; prefabrication of immersed tunnel elements; industrial prefabrication

### 1 工程概况

港珠澳大桥连接香港、珠海和澳门(图1), 其中穿越伶仃西航道和铜鼓航道的海底隧道工程采用沉管方案, 沉管隧道总长5.664 km, 分为33个管节, 其中每个标准管节长180 m, 由8个22.5 m长的节段通过预应力张拉联成整体。这是迄今为止世界规模最大、埋深最深(最大回淤埋深达23 m)的海中沉管隧道, 设计寿命120 a。其管节质量巨大, 每节管节质量达7.5万t。断面宽37.95 m、高11.4 m(图2)。

传统的沉管预制方法主要采用干坞整体预制

分批出运, 该工艺在多个沉管隧道中曾被采用, 如我国上海外环隧道、韩国釜山沉管隧道<sup>[1]</sup>等, 而工厂化预制工艺仅在连接丹麦与瑞典的厄勒海峡沉管隧道<sup>[2]</sup>中曾采用。

所谓工厂化预制是指: 在工厂厂房内, 进行沉管节段的匹配流水预制, 最后形成整个沉管并浮运下水<sup>[3]</sup>, 其工艺流程概念见图3。其主要优点为: 可全天候预制、流水线标准化生产、预制质量有保障、可全断面浇筑控制混凝土热裂缝、能实现连续不中断地预制。

收稿日期: 2015-05-28

作者简介: 翟世鸿(1969—), 男, 教授级高工, 从事桥梁与隧道技术研究工作。

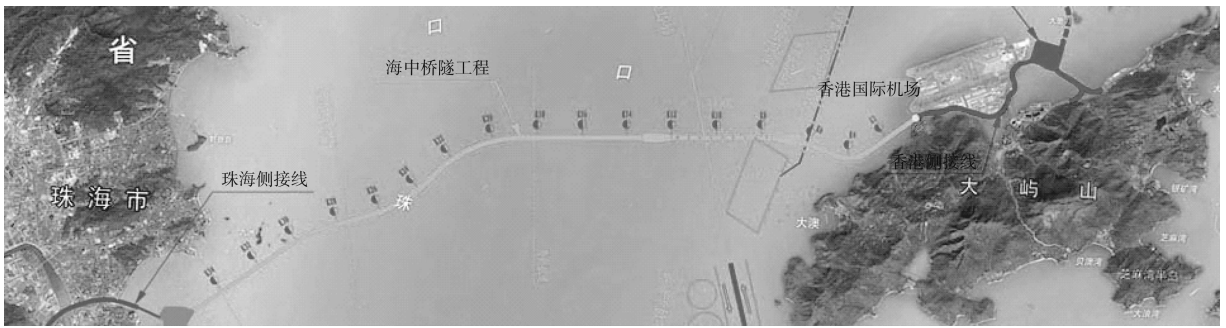


图1 港珠澳大桥地理位置

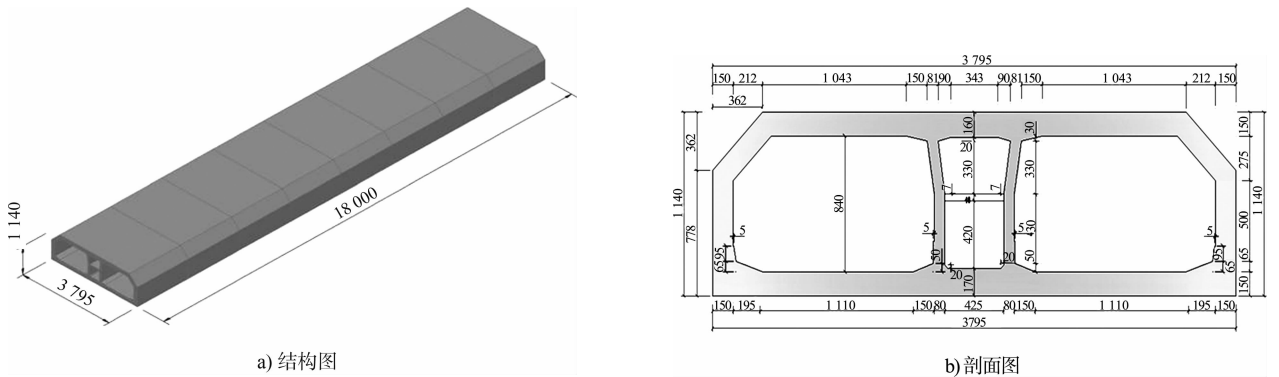


图2 港珠澳大桥沉管隧道结构 (单位: mm)

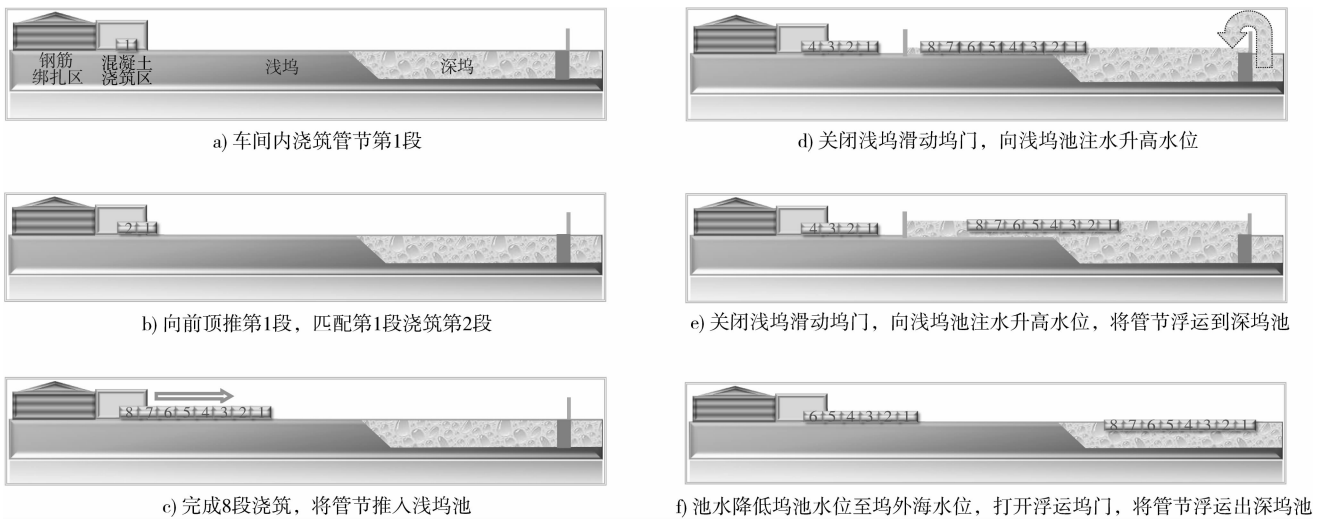


图3 管节工厂化预制流程

由于传统模式干坞涉及到大量土石方开挖,干坞投入生产时间过晚,管节施工周期过长,每批预制完成后管节出坞阶段预制必须中断,预制进度受到影响,且南方多雨、炎热的气候条件使预制质量难以保证。工厂化预制的优点能满足工期要求、预制质量更可控,因此工程开工前就开始了工厂化预制的研究。

## 2 预制工艺

### 2.1 预制工厂厂址的选择

工程前期对潜在可能的预制工厂厂址进行比选,包括位于广州南沙港和位于伶仃洋内的牛头岛厂址,图4为预制厂址。

两个厂址的优缺点均非常明显,南沙港厂址位于大陆,交通、水电、物资材料供应方便,但地

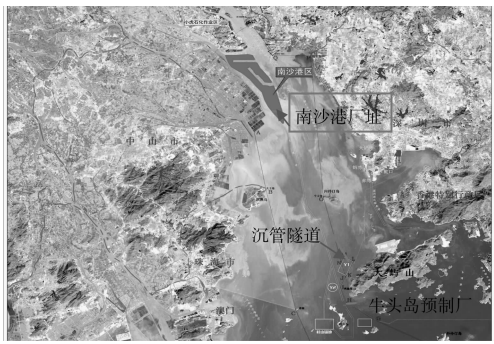


图 4 预制厂址

基条件不好(为软基),对超过 7 万 t 的沉管预制台座及顶推滑移轨道的承载设计是巨大的挑战。且沉管浮运距离施工现场约 35 km,长距离浮运风险较大;而牛头岛是一座孤岛,为花岗岩地基,无

水电供应,距沉放现场仅 7 nmile。最终从有利于沉管浮运风险控制、便于沉管顶推滑移轨道沉降控制等因素考虑,选择了牛头岛作为预制厂址。

### 2.2 预制工艺设计及预制厂平面布置

预制工艺设计是工厂化预制的核心,而工厂化流水线生产工艺决定了预制厂的平面布置。由于港珠澳隧道沉管的钢筋含量高(290 kg/m<sup>3</sup>),且断面形式特殊,密集的配筋决定了无法采取钢筋网片组装的方式,而只能采取单根现场绑扎。为了提高钢筋的绑扎工效,将钢筋安排在 3 个不同的台座同时进行底板、隔墙和顶板钢筋流水绑扎,流水绑扎的工艺解决了钢筋的标准化生产、工效与质量控制等问题。其工艺流程布置见图 5。

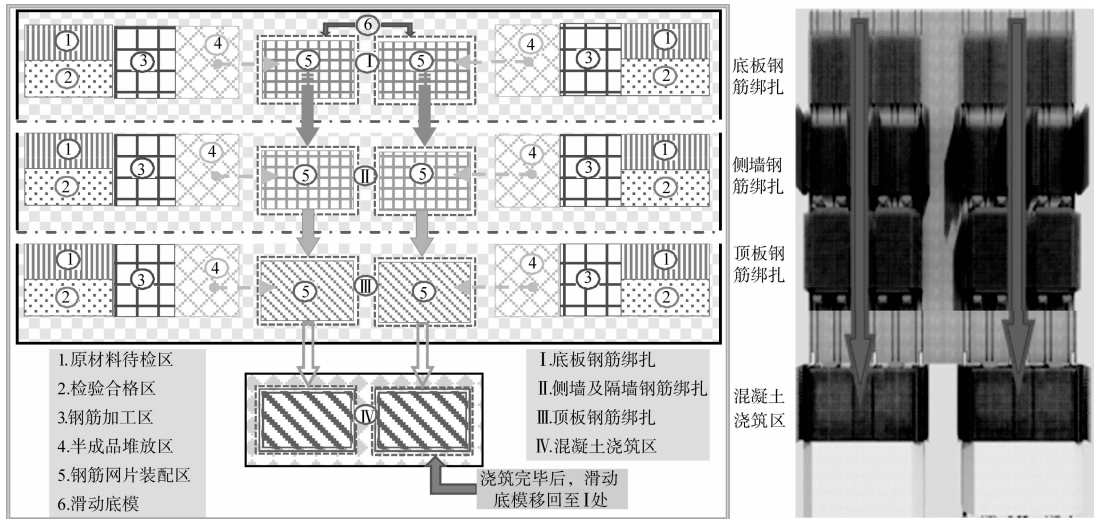


图 5 港珠澳隧道管节生产流水线工艺布置

总平面布置结合了预制工艺与现场场地条件,进行厂房和深、浅坞设计,并将浅坞区与深坞区并排布置。浅坞区用作沉管一次舾装,与工厂高程一致,用一道滑移钢坞门与工厂隔离;深坞区用于转移并寄放管节,高程与坞外一致。图 6 为港珠澳隧道沉管预制工厂。



图 6 港珠澳隧道沉管预制工厂布置

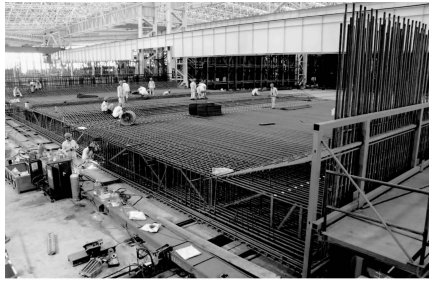
## 3 工厂化预制关键技术

### 3.1 钢筋笼生产与顶推

钢筋笼的生产包括:采用数控钢筋加工设备,使钢筋加工精度在 1 mm 内;流水线的钢筋下料、加工生产线,使得钢筋的下料、弯曲工效极大地提高;采取固定的绑扎作业平台兼做定位支架,工装的大量使用确保了钢筋定位的精度和保护层的厚度;各个绑扎区域配置专门的天车起重机,每个台座固定熟练的工人,确保工效。实际每个钢筋绑扎台座均能在 5 d 左右完成,保证了均衡的流水生产节拍。

钢筋笼在不同的台座上绑扎,最终需要顶推至浇筑台座上立模浇筑(图 7)。钢筋笼整体在精确安装好有侧向限位的 12 条平行轨道上滑移,并

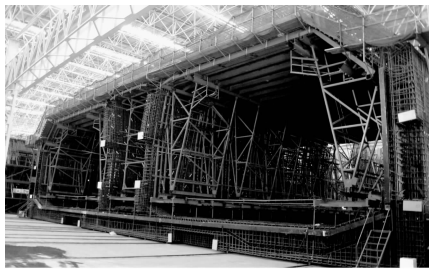
设计了能随钢筋笼整体移动的顶板绑扎胎架，依托胎架控制钢筋笼的变形，确保顶推过程不左右偏移，若钢筋笼左右偏位 1 mm，保护层的厚度误差就会增加 1 mm，且调整整体钢筋笼左右位置来确保保护层的厚度异常困难。



a) 底板钢筋绑扎



b) 侧墙钢筋绑扎



c) 顶板钢筋绑扎



d) 浇筑台座钢筋笼转换气囊

图7 钢筋笼绑扎流水现场

利用 12 条充气气囊起顶钢筋笼，抽出移动滑轨，钢筋笼顺利就位位于底模上。

### 3.2 混凝土模板

本工程模板特点是：外模安装在浇筑台座固定的位置，能实现全液压开、合，内模为全断面液压模板，悬挂于针形梁上，能沿针形梁纵向移动（图 8）。单个节段混凝土浇筑完成后，拆除外模和内膜，底模下降，质量达 7 000 t 的管段从底模转换至顶推的支撑千斤顶上面。本工程外侧墙模板取消了穿墙的对拉杆，设置反力墙抵抗外侧墙模板的混凝土侧压力，而内模混凝土侧压力则利用混凝土的左右对称浇筑实现力的自平衡。对于自防水的沉管混凝土耐久性来说，意义重大且节省了大量封堵费用。



图8 带针形梁支撑的全断面液压模板

### 3.3 混凝土浇筑与养护

管节采取泵送工艺全断面一次浇筑成型（图 9）。对于大断面的沉管混凝土浇筑而言，如何避免温度裂缝是实现 120 a 耐久性的关键。理论研究<sup>[4]</sup>和实际观测表明，全断面浇筑工艺对混凝土的热裂缝控制非常有利，因为水化散热更加均匀且规避了分次浇筑带来的约束裂缝问题。

设置带喷雾系统的封闭养护棚，实现了沉管养护的环境湿度和内外温差控制，这是确保管节不出现温度裂缝的重要举措。



图9 泵送混凝土全断面浇筑

### 3.4 节段顶推

质量达 7.5 万 t 的沉管要实现从工厂区向浅坞区纵向移动约 300 m, 是一个巨大的挑战。顶推面临的主要问题包括如何提供巨大的顶推力、如何控制轨道的沉降和不平整度。

为了降低单点顶推力, 采用了分散顶推力的方案, 即在每个节段下面布置 8 个顶推点 (图 10), 每个顶推点提供 800 kN 顶力, 一个标准管节 8 个节段就能提供 51 200 kN 的总顶力。通过同步控制系统, 确保 8 个节段之间同步顶推而不至于节段之间张开。



图 10 沉管分散顶推及支撑千斤顶

由于沉管的刚度足够大, 即便在轨道  $\pm 10$  mm 的不平整度情况下, 在顶推过程中也不会出现局部脱空。有限元分析计算表明<sup>[4]</sup>, 支点的脱空将导致沉管开裂。最终采用了液压千斤顶支撑 (图 10) 沉管向前滑动的方案, 采用 32 个 900 t 液压千斤顶支撑每个管段, 一个标准管节 8 个管段采用 256 个 ( $8 \times 32$ ) 液压千斤顶, 按照三点形成面的支撑原理, 千斤顶被分成 3 组, 形成 3 个独立的支撑区域, 以便在滑动轨道产生高低变化时, 能提供类似弹簧的支撑反力, 而不至于支点脱空。

为了防止顶推产生偏向, 专门设置了侧向导向千斤顶。并采用千斤顶下的四氟滑板与不锈钢滑动轨道之间的滑动来减小滑动摩擦力。图 11 为沉管脱离底模后沿滑动轨道顶推。



图 11 沉管脱离底模后沿滑动轨道顶推

## 4 结语

1) 沉管工厂化预制工艺在港珠澳大桥成功应用, 是“预制化、工厂化、大型化、装配化”建设目标的最佳实践, 代表了未来的发展方向, 并将产生重大的示范效应。

2) 作为一项全新的预制工艺, 可借鉴的工程经验少, 预制工艺的研究与应用、预制工厂的设计结合了工程的具体特点, 取得多项创新性的成果。

3) 关键技术的研究与应用, 实践证明是成功的, 但一些方面仍然值得改进: 总体工艺设计和相关设备的匹配性、钢筋笼绑扎与体系转换工效的优化、管节顶推滑动方案的优选、混凝土输送方案的进一步完善等。

## 参考文献:

- [1] Busby J, Marshall C. Design and construction of the Oresund tunnel[C]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Civil Engineering, 2000: 157-166.
- [2] W Jassen, P de Haas, Y H Yoon. Busan-Geoje Link: Immersed tunnel opening horizons [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006(3): 332.
- [3] 肖晓春. 大型沉管隧道管节工厂化预制关键技术[J]. 隧道建设, 2011, 31(6): 701-705.
- [4] 翟世鸿. 港珠澳大桥沉管工厂化预制研究报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程局有限公司, 2010.

(本文编辑 武亚庆)