

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.08.021

# 港珠澳大桥珠海口岸人工岛管线上岛沉管设计研究

杨国洪, 徐晓明, 付朝晖, 刘羽  
(珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519002)

**摘要:** 区别于常规内河沉管,海上沉管受涨落潮及风浪影响,流急水深,尤其是需要同时沉放多根管道时,要求采用定位准确、稳定快速、运行可靠的敷管工艺。港珠澳大桥珠海口岸人工岛临时管线上岛工程采用双管道、长距离沉管技术,从管材选择、浮运吊装、沟槽开挖及回填方面进行了较为全面的论证分析和过程控制,最终选择 PE 管作为沉管管材,并按计划完成了通水试验,实现了稳定运行,可为同类工程提供借鉴。

**关键词:** 港珠澳大桥; 跨海沉管; PE 管

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)08-0120-05

## Design and Research on Sinking Pipeline Technology of Artificial Island at Zhuhai-Macao Port of HZMB

YANG Guo-hong, XU Xiao-ming, FU Zhao-hui, LIU Yu  
(Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519002, China)

**Abstract:** Different from the conventional river sinking pipeline, the offshore sinking pipes are affected by the ebb and flow as well as waves at deep water and torrent. Especially when multiple pipes need to be sunk at the same time, the application process of more accurate positioning, as well as stable, fast and reliable operation is required. Double pipes and long-distance sinking pipeline technology were adopted in the temporary artificial island pipeline project at Zhuhai-Macao port of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (HZMB). Comprehensive analysis and process control were made from pipe material selection, floating transportation and hoisting, trench excavation and backfilling. Finally, PE pipes were selected as sinking pipeline, and water test was completed on schedule, realizing the function of stable operation, which can provide reference for similar projects.

**Key words:** the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (HZMB); cross sea sinking pipeline; polyethylene pipe

对于河床稳定和水流并不过急的常规内河水道,水下沟槽开挖、管段的浮运、定位和沉放等沉管施工过程较易控制。根据所处水域情况及现场条件,一般采用浮运法、底拖法、铺管船法及管桥原位沉管<sup>[1]</sup>等设计手段实现既定管道的水下敷设。而对于海上沉管施工方案设计,因不规则半日潮的推

拉作用,海底暗流涌动,加之风浪叠加,水流湍急,尤其是靠近海底河床处水流作用最大,施工过程难以控制。当需要同时沉放多根管道时,施工难度愈加凸显,管道受海底暗流涌动可能发生缠绕、碰撞,如何快速、准确、可靠地实现跨海沉管施工成为一大难题。以港珠澳大桥珠海口岸人工岛市政配套临时管

线上岛工程为例,阐述小口径、长距离、多管道跨海沉管设计施工技术,为相关工程提供案例借鉴。

## 1 工程概述

珠海口岸人工岛是港珠澳大桥的重要组成部分,位于珠海拱北湾南侧(见图1),是港珠澳大桥主体工程与珠海、澳门两地的衔接中心<sup>[2]</sup>,东接大桥主体工程,西接珠海连接线工程,南与澳门口岸紧密相接。根据工程总体进度,为满足2017年底珠海口岸与港珠澳大桥主体工程同步建成投入使用,在上岛管线永久工程建成前,需考虑沿港珠澳大桥连接线设置一套安全、可靠、合理、经济的临时上岛管线,以满足人工岛及大桥水、电、通信等的需求。其中,临时上岛DN600给水管及DN500污水压力管须采用海底敷设工艺,单管总长约800m。



图1 人工岛区域位置

Fig. 1 Location of artificial island area

海底敷管工程可考虑采用的设计方案包括非开挖的顶管法、水平定向钻施工及开挖法沉管施工。顶管法常用于管径 $>DN800$ 的管道,对于长距离顶管,需考虑设置DN1800的套管,然后在套管内敷设小管,工序较繁琐;同时,顶管还受穿堤稳定性影响,如遇孤石则增大风险,影响工期。而水平定向钻穿越大型河流或海域时床底埋深较大(9~18m),需要较大的造斜空间(30m以上),并且人工岛周边存在较厚的填石层,水平定向钻施工标高难以控制,穿越填石层极易刮伤管材。由于建设工期较为紧迫,因此选择更为经济、合理的沉管法施工。

## 2 海上沉管施工技术

### 2.1 地貌及气象条件

工程区域属珠江三角洲海陆交互沉积平原,海滨相一级阶地,周边分布有海湾,地势较为平坦,多被第四系松散沉积层及人工填土覆盖。其中人工

填土层主要由碎石、角砾、块石组成,靠近人工岛及海岸线处块石粒径一般为5~30cm,最大可达80~100cm,不均匀混有大量砂砾、花岗岩风化土及少量黏性土。设计线位应选择水道河床稳定和水流并不过急的地方,便于沟槽开挖和管道浮运。

工程位于珠江口伶仃洋西岸,属亚热带海洋性季风气候,年平均气温22.4℃,平均相对湿度达79%。夏季多受台风影响,易出现暴雨、大风天气。施工船舶应结合抗风等级、风期长短等因素,考虑相应的防风措施。

## 2.2 沉管设计研究

### 2.2.1 沉管管材选择

常规给排水管材一般采用钢管、混凝土管及塑料管,为保证安全,沉管管材一般选用施工工艺较为成熟的钢管或预制钢筋混凝土管。钢管适用范围广,但是防腐及焊接技术要求较高,对于长距离海上沉管来说,钢管防腐是一大难题。钢管外防腐一般采用环氧玻璃鳞片、100%固体无溶剂刚性聚氨酯或双层熔结环氧粉末涂层防腐,干膜厚度达600 $\mu\text{m}$ ,但施工过程中涂层损坏程度难以把控。同时受潮汐及风浪影响,咸湿环境下焊接条件恶劣,海上对焊难度较大,造成水上施工时间长,管道弯曲应变难以控制。而预制钢筋混凝土管一般用于低压或无压管道,管节接口多且涉及临时干坞施工,周期较长。

塑料管中的PE管可耐多种化学介质的腐蚀,具有质量轻、焊接简单、强度高、施工方便且造价低等优点,可充分解决长距离沉管过程中的组对焊接及管道防腐问题;与钢管相比,弹性模量仅800~1000MPa,管道最小曲率半径也小得多,可适应沉管施工过程中的轴向扭曲、环向变形、纵向弯曲等现象,但是应避免尖锐物体损伤。因此,综合工期、施工条件、输送介质及焊接防腐等因素,工程考虑采用SDR11型PE100塑料管,公称压力1.6MPa。

### 2.2.2 管道组装设计及浮运配重

#### ① 管道组装设计

为缩短工期,考虑采用水面浮运法沉管设计,沉管整体组对拼装、整体浮运、整体沉放。因单根管道整体接长后达800m,岸上施工空间有限,故宜分段制作,接头采用热熔连接。即下水前在陆地上根据实际情况,将PE管若干管节进行组对热熔连接后,在专用发射装置上将各分段进行连接。

#### ② 接口质量控制

PE管连接形式一般采用热熔对接连接、电熔连接或承插式密封圈连接,而承插式密封圈连接仅适用于小口径管道且接口刚度差,不适合拖拽;电熔连接熔接质量好但材料较贵,常用于熔接要求高或不便于器具热熔的场合,如公称直径 $<90$  mm的管道。热熔连接适用范围广,机具生产厂家多,施工方便、经济,因此,热熔对接适用于沉管施工。

为满足施工及运行质量要求,热熔接头连接应严格遵守操作规程,控制好温度、压力和时间三个参数,连接完成后应对接头进行100%的翻边对称性、接头对正性检验和不少于10%的翻边切除检验。

### ③ 浮运配重

区别于钢管及预制钢筋混凝土管自身重量较大,需要采用刚性浮筒或柔性浮囊的方法进行浮托,PE管道自身重量小于浮力,需要设置配重块才能下沉。由于PE管与水的密度相当( $0.95\text{ g/cm}^3$ ),为较好地控制下沉速度,且在坑底就位后能够起到稳固作用,每米管道压重一般不宜小于管道浮力的40%~60%。为防止在水上拖运及沉放时配重块沿管线滑动,配重块在设计时预设钢筋环。安装时将尼龙绳穿过配重块钢筋环并打结,从而确保配重块位置及固定。管道下水时对管道两端进行封堵,利用驳船牵引的办法将发射架上的PE管牵引过河。牵引绳固定在配重块上,拖船牵引至施工水域轴线,整条管线在陆上轴线控制技术人员的指挥下进行。工程设计为DN600给水、DN500污水两根管道需分两次进行浮运。

## 2.3 沉管设计方案

整体施工流程见图2。

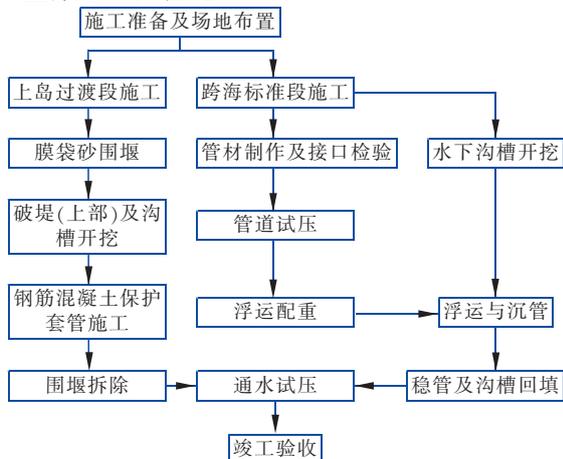


图2 沉管施工流程

Fig. 2 Flow chart of sinking pipeline construction

钢制管道或预制钢筋混凝土管道沉管一般先实施水下标准段,然后再通过围堰采用干地施工法实施上岸过渡段。而PE管道由于具有特有的柔韧性及延展性,刚度小,铺设完成后不宜重压,因此需要先行围堰实施上岸过渡段。

### 2.3.1 上岛过渡段设计

上岛过渡段场地分布大量堤围抛石,且存在淤泥质软土,结构松散,密实度不均匀,未完成自重固结,层厚2.60~14.80 m。为避免挡墙压载及后期沉降对管道造成损坏,港珠澳大桥珠澳口岸人工岛临时上岛管线过渡段设计采用D800 mm钢筋混凝土管作为保护套管。同时考虑采用变形适应性强的膜袋砂围堰结构,并用吸砂泵输泥机进行充填,砂袋材料满足抗拉强度及伸长率要求。围堰临水面坡比为1:2.5,背水面坡比为1:1.5,为防止海水渗入围堰内,在临海面及堰顶设防渗土工膜,土工膜上部加压片石。

### 2.3.2 水下沟槽开挖

水下沟槽开挖一般采用挖搅船(配置搅拌机)、吸泥泵开挖,并配置高压水枪、螺旋输泥机及泥浆泵等不同的挖泥机。水下沟槽开挖到一定的长度后,须打设跨海管道的定位桩,并由测量小组逐一进行测量复核和监测。碎石基础抛填完成后,按照设计要求吊放钢筋混凝土预制垫梁。经过检验,基础达到承载力要求之后才能进行管道吊装安装。

### 2.3.3 过河管道浮运与沉管

PE管道采用整体直线漂浮下沉方式,管段沉入是整个沉管施工的重要环节,主要程序:拖运管道至沉放现场→用吊船定位管段→注水下沉。

管道分为DN600给水管及DN500污水管,需分二次进行浮运沉管。当管道运抵就位后,须将其定位于挖好的基槽上方,管道的中线应与管道的轴线基本重合,定位完毕后开始灌注压载水,管道即开始下沉。初始下沉时,先灌注压载水使管道下沉力达到规定值的50%,然后进行位置校正,位置无误后再继续灌水直至下沉力完全达到规定值,并使管段开始以40~50 cm/min的速度下沉,直到管底距设计标高40~50 cm为止。整个进程需要将管道沉放与位置校正交替进行,直至稳定着底,一般持续3 h。

利用管道自身弹性应力进行沉管敷设,管道及管道接口设计应满足相应的力学性能要求。管道发射时的“拱弯”与沉管时在水中形成的“垂弯”均不

得超过管材允许的弹性范围,满足天津市《给水排水管道水下沉管工程施工及验收规程》(DB/T 29—242—2016)的要求。管道最小曲率半径( $R_{Emin}$ )可参照钢管计算公式并按下式计算:

$$R_{Emin} = \frac{ED_0}{2[\sigma]} \quad (1)$$

式中: $E$ 为管材的弹性模量,根据《埋地塑料给水管道工程技术规程》(CJJ 101—2016),取1 000 MPa; $D_0$ 为管道外径, DN500 管外径为 0.63 m, DN600 管外径为 0.71 m;  $[\sigma]$ 为管道的材料弯曲强度,取 16 MPa。

根据式(1)计算得出 DN500 及 DN600 的 PE100 管的最小曲率半径分别为 19.7、22.2 m。

### 2.3.4 稳管及水下回填

#### ① 稳管设计

受涨落潮影响,设计的 2 根 DN500 污水管及 DN600 给水管容易发生漂移、缠绕,因此需要采取稳管措施,使管道稳定在所要求的位置上。

a. 为了确保两根管道间距按设计要求布置,管道之间考虑增设横向钢管支撑(见图 3),并采用管箍固定,纵向间隔 5 m 布置一处。管箍钢板厚 5.0 mm,宽 500 mm,管箍扁钢两边对折边宽度为 100 mm,管箍扁钢钻孔,螺栓拧紧固定。管箍与管道之间设一层 3 mm 厚橡胶保护层。

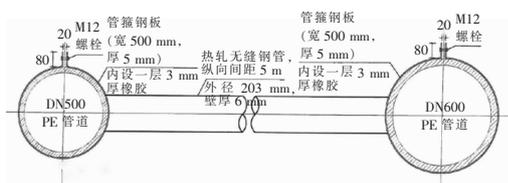


图3 管道横向支撑连接

Fig. 3 Pipe transverse support connection

b. 海上沉管段,设计采用施打钢管桩的办法来控制两条管线不受漂移而偏离坐标,达到保证工程质量目的。因现场淤泥层较厚,为保证施工质量,钢管桩采用  $D500$  mm 管(壁厚 15.0 mm),长度不少于 32.0 m,间距为 25.0 m。分别在两根过海段管线的外侧施打,对面错开,呈梅花形布置,如图 4 所示。

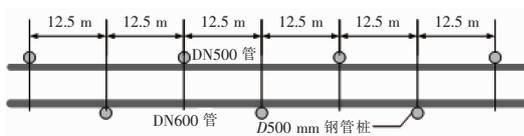


图4 钢管桩平面布置示意

Fig. 4 Plane layout of steel pipe pile

#### ② 水下沟槽回填设计

水下回填需采用运输船及起重船,并由潜水员配合进行。根据管道抗浮稳定设计要求,除了在管底设置 30 cm 厚碎石垫层和钢筋混凝土垫梁(2 000 mm × 200 mm × 200 mm)外,管顶以上填一层 600 ~ 700 mm 的片石层(掺 40% 碎石),卸填完成后,由潜水员使用水枪回填平整,然后覆压 2 000 mm × 600 mm × 500 mm 预制混凝土块压重,最后再抛填一层约 1 000 mm 厚的块石层。在碎石层、片石及块石回填完成后,由挖泥船挖运周边河床自然土进行平整回填,形成施工后的自然淤积线。经验算,管道抗浮稳定系数不小于 1.1。

跨海标准段水下沉管施工断面见图 5。

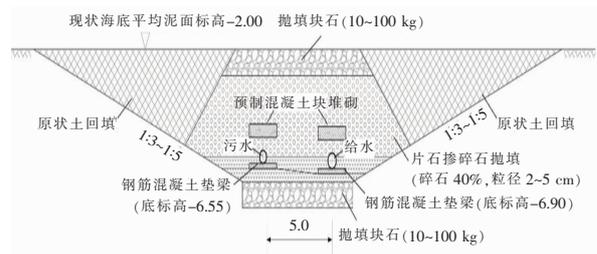


图5 跨海标准段水下沉管施工断面

Fig. 5 Cross-section of underwater sinking pipeline construction in cross sea standard section

#### ③ 混凝土预制块制作及安装

根据场地周边现状情况,设计管道钢筋混凝土垫梁及预制混凝土压重块均采用场外制作,再用驳泥船运至施工部位安装。安装前严格控制管线的测量位置,管底标高经核定标、导标后方能安装,确保垫块中心与管道轴线一致,安装过程必须由潜水员水下检查确保准确性。在安装垫块时跟踪测量,及时调整垫块标高下沉到位,采用水准仪跟踪,平直段用测量绳。根据水面标尺高程控制整块标高。

### 2.4 施工过程控制

#### ① 开工前准备

在水下沟槽开挖前,应先到航运部门办理停航手续,保证工程施工的合法性和可行性。同时需要做好工程地质、水文的调查,并针对不同的天气和特殊情况,制定相应的技术措施,编制应急预案。

#### ② 施工放样及过程监测

鉴于水下沟槽开挖的特殊性,施工放样应根据管道轴线采用导标的方法进行控制,导标布置间距不应大于施工段长度的 20%。首先在跨海两岸设置岸标,以此确定沟槽开挖方向。设置两对岸标,分

别指示出沟槽的两条边线,并在水中抛设浮标,随时采用经纬仪进行校核。

在进行沟槽开挖过程中,相关监测人员、潜水员必须不断跟踪测量,确保工程开挖质量。在沉管过程中必须对整个施工过程做好监测工作,首先应在沉管段上设置不少于2个监测点,施工中应对管道下沉的轴线位置及深度及时控制,以保证施工质量。

### ③ 船舶定位

海底暗流涌动、水流湍急,对抛投块石的冲距影响较大。每次抛投前都需进行试抛,以确定冲距参数,从而确定不同水文条件下对应的水面抛投位置。然后采用GPS全球定位放样,建立水中浮标,通过岸边地锚或首尾抛锚的方式锚固船体。定位完成后采用人工抛投的方式进行回填。

### ④ 制定网格化块石抛投方案

采用水下抛石压重方式以满足运行期间管道抗浮和冲刷的需要。施工前需对抛石区水下地形进行复测,得出海床原始地形,并据此对抛投区进行网格划分,每个单元尺寸为10 m×10 m。根据设计沟槽回填断面计算出每个网格单元需要的抛石数量。按照“由远及近、由点成线、从上游到下游、先深后浅”的顺序进行分层抛投。每次抛投前后均需进行水下地形测量,通过前后数据对比来核查施工质量,发现漏抛和超抛情况应及时修正。

### ⑤ 沉管落底后的保护固定

按轴线、坡脚线区域网格计标回填,需潜水员观察回填变化情况并及时指挥调整,直至达到设计标高。分层回填片石掺碎石进行压重,每层片石厚约30 cm,调均匀放后回填碎石,再用高压水枪形成骨架密实结构。达到设计标高后,在碎石面抛填1 m厚的块石至原海床顶面标高,形成防冲刷保护层。

### ⑥ 管道变形控制

施工中的管道变形主要包括管道自身的弯曲变形和管侧回填造成的环向挤压变形。对于弯曲变形,应实时监测管道的“拱弯”或“垂弯”,确保大于管道最小曲率半径。对于管侧回填造成的挤压变形,应根据回填土类别和压实度进行综合评价,确保土体的综合变形模量不超过管材允许的弹性范围。

## 2.5 通水试验

在制作PE管时应一端设进水阀,另一端设排气阀,采用钢阀门三通与PE法兰盘连接密封。压力表试压前需由第三方检测单位进行检验和校正。

水压试验分两次进行,第一次为PE管整条热熔连接完成,第二次为沉管施工完成。管道设计工作压力为0.5 MPa、试验压力为1 MPa。预试压时,管段采取分级升压(0.2 MPa)至试验压力并稳压30 min,管身无破损及漏水现象发生时停止注水补压,并稳定30 min后压力下降不大于60 kPa,再稳压2 h后压力下降不大于20 kPa,试压结果即为合格。

## 3 结语

沉管过程精细而复杂,需要每项工作、每个环节都能严格把控,任何分项出现纰漏均可能导致工程失败。这就要求除了沉管基槽挖深和中心轴线能满足设计要求外,更要注重管材及管节组对拼装接口的质量,以满足管道最基本的功能需求;最后还要注意沉管过程的控制,确保整个进程无轴向扭、环向变形和明显轴向突弯等现象发生。港珠澳大桥珠海口岸人工岛管线上岛工程采用PE100管双管沉管设计,施工快捷、方便,很好地解决了管道防腐和焊管对接问题。经过3~4年的运行,情况良好。目前在珠海地区使用PE管作为跨海沉管的案例比较少见,该案例可为其他工程提供参考。

## 参考文献:

- [1] 于孝民,丁北斗,方建国,等. 大直径长距离输水管沉管施工技术研究[J]. 中国水利,2018(16):52-55.  
YU Xiaomin, DING Beidou, FANG Jianguo, et al. Research on immersed pipe construction technology of the large diameter long-distance water delivery pipe [J]. Water Resources of China, 2018 (16): 52 - 55 (in Chinese).
- [2] 张志明,刘连生,钱立明,等. 海上大型人工岛设计关键技术研究[J]. 水运工程,2011(9):1-7.  
ZHANG Zhiming, LIU Liansheng, QIAN Liming, et al. On key design technology for large offshore man-made island [J]. Port & Waterway Engineering, 2011 (9): 1 - 7 (in Chinese).

作者简介:杨国洪(1988-),男,四川成都人,硕士,工程师,注册咨询工程师(投资),主要从事市政给排水、河道治理、海绵城市、综合管廊等规划咨询设计工作。

E-mail:245593075@qq.com

收稿日期:2020-12-13

修回日期:2021-01-10

(编辑:衣春敏)