

# 深水沉管隧道基槽精细化施工及监测技术

陶宗恒, 杨秀武

(中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510221)

**摘要:** 依托港珠澳大桥岛隧工程基槽疏浚工程实践, 通过设备技术改造和新工艺研究实现基槽精挖、清淤等关键工序高标准要求, 同时系统开发了沉管隧道施工监测技术严控基槽施工质量, 准确监测基槽回淤情况, 对异常回淤、边坡稳定性进行预警, 指导隧道沉管安放前的边坡清淤及槽底清淤, 防范施工风险。

**关键词:** 港珠澳大桥; 基槽; 精挖; 清淤; 回淤监测; 边坡清淤

中图分类号: U655.4

文献标志码: B

文章编号: 2095-7874(2020)05-0044-05

doi: 10.7640/zggwjs202005010

## Fine construction and monitoring technology of tube trench of deepwater immersed tunnel

TAO Zong-heng, YANG Xiu-wu

(CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510221, China)

**Abstract:** Relying on the dredging practice of the Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge island & tunnel project, through the equipment technical reform and the new technology research, the high standard requirements of key processes such as accurate dredging and desilting of the tube trench were realized. At the same time, the construction monitoring technology of the tube trench was systematically developed to strictly control the construction quality and accurately monitor the back-silting situation, to warn for abnormal back-filling and slope stability, to guide the dredging of the slope and the bottom of the tube trench before the placement of the tube immersed, to prevent construction risks.

**Key words:** Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge; tube trench; accurate dredging; desilting; back-silting monitoring; slope dredging

### 0 引言

港珠澳大桥沉管隧道处于深水、深厚软土地基的施工环境, 周围水域多为海况复杂的海域, 过往船舶频繁, 具有管节长度长、水深大、回淤严重、岛隧结合部受力和施工复杂、地基软弱且不均匀、沉降控制难等特点。对沉管隧道而言, 差异沉降是造成沉管管段间漏水的关键因素, 而差异沉降的控制与管段间剪力键、止水设施的设置以及剪力键的承载能力密切相关, 为确保沉管隧道在设计使用寿命内安全运营, 沉管隧道基槽开挖必须在适应大挖深工况下, 实现高质量成槽,

监测并有效清除各基础各工序间的回淤物, 从基础各工序上消除产生不均匀沉降的可能, 对确保港珠澳大桥岛隧工程的质量起着至关重要的作用, 因此深水基槽施工质量控制技术至关重要。

### 1 技术难题

1) 隧道基槽设计挖深大, 槽底开挖、边坡成型区开挖及清淤验评标准高: 为满足沉管 120 a 寿命的超高质量要求, 隧道基槽(含复合型边坡)开挖精度及清淤的设计标准要求, 远远高于常规的疏浚工程质量定额标准。常规技术和设备难以满足隧道基槽的开挖质量要求。

2) 伶仃洋海域海况复杂, 气候多变, 且沉管隧道几乎垂直于水流, 沉淀池效应导致基槽容易淤积。鉴于隧道基槽基础处理设计采取了高质量

收稿日期: 2019-10-17 修回日期: 2019-12-20

作者简介: 陶宗恒(1987—), 男, 河南漯河人, 工程师, 从事港口与航道工程。E-mail: 1032107452@qq.com

标准,而基槽底淤积后的泥浆与水体混合物增大了沉管沉放的困难,因此在隧道基槽基础处理的相关工序中及沉管沉放前,必须对隧道基槽进行高质量清淤。

3) 2015年2月,沉管隧道E15管节浮运安装前,E15管节北侧边坡出现滑塌现象,回淤物冲下基槽,破坏了已铺设好的碎石基床,导致E15管节的浮运安装中止。鉴于此,需要对基槽边坡上可能处于不稳定状态的淤积物进行合理处置,消除后续管节沉管安装期间再次出现回淤物失稳滑塌现象。

4) 需要进行高精度基准控制、槽底硬底质高程检测、槽底泥水密度检测等实现对水下地形进行精确测量,准确指导施工、把控施工质量。

5) 水域水深大、回淤严重的情况下,准确掌握基槽回淤情况,为基槽的施工与沉管的安放提供决策支撑。

## 2 基槽施工关键技术

### 2.1 精挖

为确保沉管隧道基槽开挖质量满足高标准要求,基槽开挖采用了不同的施工工艺与设备,包括上层开挖(亦称粗挖)、槽底及边坡成型区精挖,其中槽底及边坡成型区精挖是指槽底及边坡设计线以上2~3 m厚度泥层的精确开挖,除此之外皆为粗挖。基槽开挖断面示意图如图1所示。

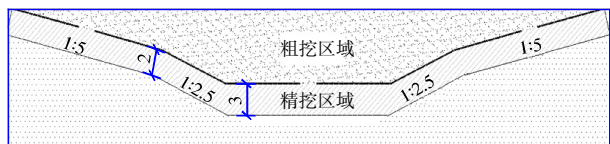


图1 基槽开挖示意图

Fig. 1 Schematic diagram for excavation of the tube trench

经过对比和论证,成功研发了专用精挖抓斗船,创新地提出直接高程控制挖泥模式,克服外海无掩护条件下风浪流对抓斗船施工精度严重影响;研制高精度抓斗船疏浚监控系统,具有可视、可控、可测、防超深及综合偏差调整等功能;研制挖掘机液力变矩器控制系统,采用迭代拟合的原理,使大型抓斗船的开挖精度达到0~50 cm<sup>[1]</sup>,由系统自动控制提斗钢丝绳,控制抓斗动态沉放,实现整个闭斗过程的实际切削土体的轨迹曲线为一条水平波纹线<sup>[2-3]</sup>。

### 2.2 基槽槽底高精度清淤

港珠澳大桥之前国内外基槽清淤工程多属于浅水域施工,对深基槽清淤的工艺研究尚未成熟。在作业空间受限的情况下,基槽清淤施工显然不适合采用耙吸船;尤其是在临近已安装沉管钢封门前范围内清淤具有相当高的施工安全风险,对吸淤头平面定位及高程控制要求都非常高的情况下,仅能采用精度控制高的定点清淤船,但本工程之前国内没有适合的清淤设备<sup>[4-7]</sup>。

为满足沉管隧道高精度、高风险的施工要求,新开发了专用清淤船,研制了用于多种工况使用的新型多功能清淤吸头装置,创新性研发了利用恒压技术的清淤防损系统和触底保护装置,实现各基础工序前高精度清淤;研发了80 m超长刚性桁架结构桥梁,采用多吊点恒张力同步起升技术,具有刚度好、重量轻的特点,满足外海基槽水深近50 m清淤要求;开发了高精度吸头定位监控系统,采用水下压力传感器、双向角度传感器等技术,修正了80 m长桥架变形对吸头定位精度的影响,实现了高精度定点清淤;研发了定点盖章式精确清淤施工工艺和快速装驳系统,有效解决了槽底变坡度清淤施工难题。

施工过程中,通过精确清淤计算机测控系统的GIS电子图形系统,可实时电脑屏幕显示、监测开挖深度,并自动生成开挖记录文件,对每一个定点清淤位置及完成深度进行记录,便于后期检测比对。“捷龙”轮定点清淤施工导航网格示意图见图2,清淤施工中,通过长排泥管线,采用过渡接头与水上管线相连实现装驳,将清淤泥浆通过排泥管线输送至锚泊的自航泥驳,满载后运至卸泥区抛卸。

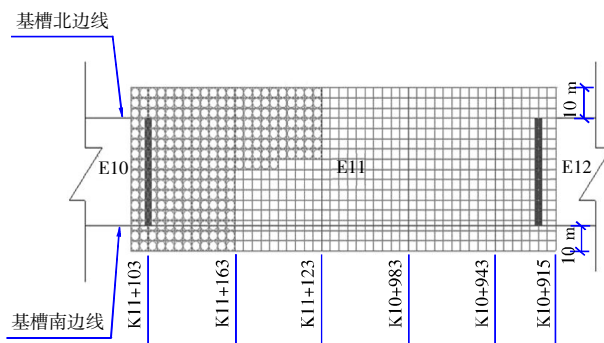


图2 定点盖章式清淤施工导航网格示意图

Fig. 2 Navigation grid diagram of the fixed point stamping type dredging construction

### 2.3 基槽边坡精确清淤

E15 管节北侧边坡出现滑塌发生后, 根据现场工况、船舶适用性及工期等, 抓斗船、专用清淤船均无法满足在基槽边坡快速、高效的清淤要求。根据前期大型耙吸式挖泥船定点高精度清淤试验成果, 在边坡选划一定范围, 利用采用具有 DPDT 系统、DTPS 轨迹显示系统的大型耙吸船开展基槽边坡淤积物处置的典型施工, 测定大型耙吸式挖泥船采用 DPDT 系统、DTPS 挖泥轨迹显示系统在复合边坡清淤的施工效果及施工工效均能满足工程需求。因此, 确定采用具有 DPDT 系统、DTPS 轨迹显示系统的大型耙吸船, 进行基槽边坡淤积物处置施工。

DPDT 系统是利用各类传感器测船的运动状态及风浪流等环境力, 通过计算机的实时计算来控制艏侧推、CPP 及舵产生适当的推力和转矩, 以抵消环境力的影响, 使得挖泥船尽可能在设定的船位、艏向或预定航迹进行疏浚施工, 从平面上进行控制, 保证对边坡区域全面覆盖, 减少漏清风险。DTPS 挖泥轨迹显示系统能够显示疏浚矩阵、差异矩阵, 可对水深测量文件色块视需要进行调整, 施工过程中动态显示挖泥断面, 且耙头与船体的比值图物完全相同, 操耙手可根据断面显示控制下耙深度, 使得清淤后断面控制在目标深度范围内。

耙吸船在基槽复合边坡上的精确清淤, 首先根据设计标准断面, 编制高差为 2 m 的台阶式施工导航文件, 均匀布线, 分层清淤。施工过程中船位布置见图 3。

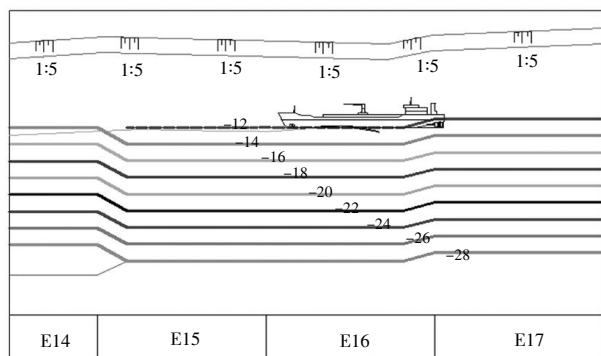


图 3 耙吸挖泥船边坡淤积物清除施工计划线布置示意图

Fig. 3 Layout of construction plan lines for slope sediment removal of trailing suction hopper dredger

施工过程中同时通过 DPDT、DTPS 导航系统清晰地获得开挖情况, 实时调整下耙深度, 船舶

由西往东以 0.5~1.0 kn 航速匀速前进, 总体施工方向由坡顶向坡底方向推进。采取不溢流、不开高压冲水作业方式对回淤边坡进行精确清淤施工, 装满舱容即停止施工。

### 3 基槽精确地形测量

基槽精确地形测量关键技术以多波束水下地形测量为主要监测手段, 在充分分析国内外水下地形测量应用的基础上, 针对影响测深系统测深精度的主要因素, 通过选择大型专用测量船来应对复杂水文环境下高精度施工测量, 采用船底固定安装换能器方法减小安装角度变化带来的误差影响, 通过对各设备位置精确校准消除相对位置偏差造成的误差影响, 系统地开展了误差分析、参数优化、精度比对训练, 研发了一套最优的水下地形精确测量的综合技术。

针对港珠澳大桥岛隧工程地形测量实践过程中, 不断研究多波束测深系统误差影响因素, 进行针对性分析, 通过有效的控制措施, 提高多波束测深精度, 实现了深水深槽地形测量的厘米级精度要求, 也为多波束测深系统精度的提高开辟了新的途径。

### 4 基槽施工回淤监测

#### 4.1 监测方法

沉管隧道施工监测主要是通过监测各个施工阶段沉管基槽的回淤状况以及边坡稳定性, 分析回淤规律, 为沉管基础各阶段施工提供回淤参考数据, 并对基槽异常回淤情况进行预警, 防范施工风险。施工监测方法以多波束水下地形测量为主, 人工潜水探摸、回淤盒纳淤为辅。

#### 1) 多波束水下地形测量

多波束水下地形测量是主要监测手段, 现场使用 R2 Sonic 2024 多波束系统, 采用 Qinsy 软件进行外业导航以及数据采集, 接收现场测量平台基站实时差分信号, 实现多波束系统搭载 RTK 的三维水下地形测量, 计算机自动采集并同步记录 RTK 实时定位数据、水下地形数据、罗经数据、三维涌浪数据等信息。三维水下地形测量外业采集直接采用 RTK-GPS 高精度的高程信息取代传统的水位观测数据, 有效减小船舶动吃水变化带来的误差, 提高了水深测量的精度<sup>[8-9]</sup>。

#### 2) 人工潜水探摸

人工潜水探摸是指潜水员通过潜水探摸基槽基床上回淤物的厚度以及分布等状况, 与多波束

水下地形测量结果相互比对,对基槽槽底的回淤状态作出综合的判断。人工潜水探摸通常是在抛石夯平、碎石铺设以及沉管安放等工序前进行。

### 3) 回淤盒

回淤盒主要是通过基槽槽底指定位置放置回淤盒,经过一段时间的自然淤积之后,将回淤盒从槽底取出,分析回淤盒中回淤物厚度、容重等物理性质,以分析某一阶段基槽槽底的回淤强度以及回淤物来源等规律。

## 4.2 施工监测内容与应用

### 1) 边坡稳定性监测

边坡稳定性监测是指利用多波束水下地形测量对基槽边坡整体的变化情况进行监测,其目的获得边坡精挖成型后,边坡坡面结构随时间变化的特征,同时初步分析变化的原因,为沉管基础各工序施工提供决策数据支持。稳定性数据分析是通过多波束水下地形测量数据绘制基槽横断面图及地形变化差值色块图,分析基槽边坡的回淤物淤积厚度变化、坡度变化及异常滑塌等情况,重点持续分析精挖完成后至边坡清淤前、沉管安放前边坡稳定性状态。选择典型管节,将回淤监测数据形成断面图与色差图进行分析,如图4。

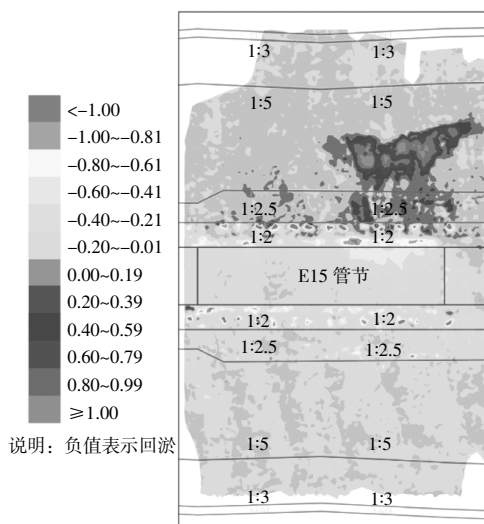


图4 E15管节边坡滑塌前后监测数据差值色块图

Fig. 4 Color block diagram of monitoring data difference before and after slope sliding of E15

边坡回淤监测可评估基槽边坡回淤强度,汛期、台风等特殊天气条件下的回淤发展趋势,当局部边坡坡面淤积到达承载极限时,引发局部范围滑塌现象。通过基槽边坡稳定性监测,为合理

安排耙吸船边坡坡面回淤物进行清淤处理提供了决策依据。

### 2) 基槽粗挖期间维护性回淤监测

基槽粗挖期间维护性回淤监测侧重槽底区域淤积变化,通过多波束水下地形测量反映整个基槽在粗挖间歇阶段的回淤状态。回淤监测成果数据分析,指在粗挖间歇期内对沉管隧道基槽槽底持续监测分析,获得回淤变化情况,综合分析回淤强度及规律。选择典型管节进行分析,如图5。

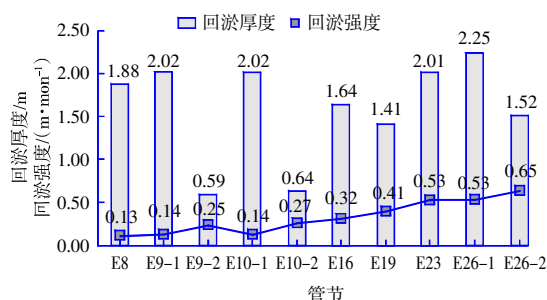


图5 基槽粗挖期间维护性槽底回淤厚度和强度统计图

Fig. 5 Statistical chart of back-silting thickness and strength at the bottom of maintenance trench during rough excavation of tube trench

### 4.3 精挖前回淤监测

精挖前回淤监测是基槽在粗挖结束后至精挖开始前的监测工作,主要目的是获得基槽粗挖完成后槽底回淤情况随时间变化的特征。回淤监测成果数据分析,针对基槽槽底各管节粗挖施工完成后、精挖施工之前晾槽时间相对较长时,开展持续性监测,分析基槽在此段时间的回淤强度及规律。

### 4.4 抛石夯平前回淤监测

抛石夯平前回淤监测通过多波束水下地形测量结合人工潜水探摸方式实施,反映基槽在精挖结束后至抛石夯平前的回淤状况。正常情况下,基槽精挖结束后,即刻开展抛石夯平施工,但如遇台风、石料供应中断等原因,则会造成部分管节精挖完成后晾槽时间长,因此,施工过程中重点对这些管节开展持续性回淤监测,分析基槽在此段时间回淤强度及规律。

### 4.5 碎石铺设前回淤监测

碎石铺设前回淤监测通过多波束水下地形测量结合回淤盒、人工潜水探摸方式实施,分析基槽在抛石夯平后至碎石基床铺设开始前的槽底淤

积状况。利用基槽各管节施工晾槽期监测数据计算抛石夯平块石面上回淤厚度,分析基槽在抛石夯平后至碎石基床铺设开始前的回淤规律及强度。

#### 4.6 沉管安放前回淤监测

沉管安放回淤监测通过多波束水下地形测量结合回淤盒、人工潜水探摸方式实施,通过测量数据分析反映已铺设的碎石基床在沉管安放前的回淤情况,若碎石基床上回淤物淤积超过设计允许值,则需处置已铺回淤碎石基床。沉管安放回淤监测成果分析主要是利用碎石基床铺设后,根据多次多波束监测数据制作已铺基床回淤差值图等,分析基床上回淤情况,监测碎石垄顶回淤情况,包括平均回淤厚度值、最大回淤值,结合人工潜水探摸结果,碎石基床已不满足沉管安放的要求,必须对回淤的碎石基床进行处置,为施工安排提供至关重要的决策依据。

#### 5 结语

深水基槽疏浚施工技术已成功应用于港珠澳大桥岛隧工程,通过对基槽成套疏浚施工技术的研究,成功地解决了港珠澳大桥施工中遇到的难题,同时对我国海底隧道建设、疏浚行业均有积极的推进作用,填补了我国高端疏浚技术的空白,使我国隧道基槽施工技术达到世界领先水平。

#### 参考文献:

- [1] 林镇定. 抓斗式挖泥船 offshore 深基槽精确挖泥施工工艺研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.  
LIN Zhen-ding. Research on the precise dredging technology of grab dredger in offshore deep foundation trench[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [2] 中交股份联合体港珠澳大桥岛隧工程第 IV 工区项目经理部. 港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道基槽精挖施工方案[R]. 2012.  
Project Management for Work Area IV for Island and Tunnel Project of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge Joint Venture of China Communication Construction Co., Ltd. Fine excavation construction scheme for foundation trench of immersed tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge island & tunnel project[R]. 2012.
- [3] 刘国生,曹湘波,刘烈晖,等. 抓斗船精挖计算机测控系统[J]. 中国港湾建设,2018,38(4):68-73.  
LIU Guo-sheng, CAO Xiang-bo, LIU Lie-hui, et al. The computer measurement and control system for the grab bucket dredger[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(4): 68-73.
- [4] 张琦,朱淋淋. 港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道基槽开挖及清淤施工的质量控制[J]. 中国港湾建设,2016,36(7):97-100.  
ZHANG Qi, ZHU Lin-lin. Quality control for excavation and desilting of foundation trench for immersed tunnel for island and tunnel project of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. China Harbour Engineering, 2016, 36(7): 97-100.
- [5] 中交股份联合体港珠澳大桥岛隧工程第 IV 工区项目经理部. 港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道基槽清淤施工方案[R]. 2012.  
Project Management for Work Area IV for Island and Tunnel Project of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge Joint Venture of China Communication Construction Co., Ltd. Foundation trench desilting construction scheme of immersed tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge island & tunnel project[R]. 2012.
- [6] 陶宗恒,何波. 深水基槽高精度清淤施工技术研究[J]. 公路,2018(8):219-222.  
TAO Zong-heng, HE Bo. Construction technology for the high precision dredging of the deepwater tube trench[J]. Highway, 2018(8): 219-222.
- [7] 朱淋淋,何波. 已安沉管尾端钢封门前清淤施工风险防范[J]. 中国港湾建设,2016,36(7):101-104.  
ZHU Lin-lin, HE Bo. Preventive measures against risks of desilting in front of steel door of installed immersed tunnel section for Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. China Harbour Engineering, 2016, 36(7): 101-104.
- [8] 潘满,何波. RTK 三维多波束水深测量在港珠澳大桥岛隧工程中的应用[J]. 中国港湾建设,2016,36(7):5-8.  
PAN Man, HE Bo. Application of RTK three-dimensional multi-beam bathymetry for island and tunnel project of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. China Harbour Engineering, 2016, 36(7): 5-8.
- [9] 孙阳阳,徐良,张建军,等. 基于多波束测深的海底基床监测与分析[J]. 中国港湾建设,2015,35(11):46-48.  
SUN Yang-yang, XU Liang, ZHANG Jian-jun, et al. Monitoring and analysis of seafloor subgrade using multi-beam bathymetry[J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(11): 46-48.

欢迎订阅