

港珠澳大桥沉管隧道工程 厚软基处理关键技术研究

闫禹

(港珠澳大桥管理局, 广东 珠海 519060)

【摘要】 港珠澳大桥海中隧道是我国首条于外海建设的超大型沉管隧道, 技术含量高。本文研究了该隧道在厚软基处理方面的关键技术, 结合我国软基处理技术现状, 分析了该工程地基复合加固、地质勘察、挤密砂桩、施工装备及专题研究等应用情况, 以期为类似沉管隧道工程提供参考借鉴。

【关键词】 港珠澳大桥; 沉管隧道; 复合加固

【中图分类号】 TU753

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-3702(2017)07-0022-04

Research on the Key Ground Improvement Techniques for the Immersed Tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

YAN Yu

(Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Authority, Zhuhai Guangdong 519060, China)

Abstract: The immersed tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (HZMB) is the first one that is being built in the sea in China, which contains lots of innovation. This paper, based on the current development research of ground improvement techniques in China, studied the thick soft soil treatment methods in HZMB including hybrid stabilization technique, geologic investigation, sand compaction pile, equipment, research, which could provide reference for similar projects.

Keywords: Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; immersed tunnel; hybrid stabilization technique

0 引言

基础处理是沉管隧道工程的核心技术, 对管段结构损伤开裂、渗漏有根本性影响。港珠澳大桥 6.7km 沉管隧道穿越五种不同地层, 沿轴线方向隧道基础具有水深条件不同、基底地层物理力学性质差异性大、隧道上覆荷载及工况复杂等特点, 在国内外沉管隧道领域尚属首例, 应采取何种软基处理技术, 实现长大沉管隧道纵向不均匀沉降的控制, 是该工程的一大挑战。

作者简介: 闫禹, 男, 工程师, 硕士, 研究方向为水运工程、沉管隧道及人工岛技术管理。

1 我国软基处理技术现状

JGJ 79-2011《建筑地基处理技术规范》按照不同加固机理和施工方法, 将我国建筑地基处理主要方法划分为换填垫层、预压地基、压实地基、夯实地基、挤密地基、复合地基、注浆加固及微型桩共 8 类。JTS 147-1-2010《港口工程地基规范》根据适用土质情况, 将当前我国水运工程中常用的软土地基处理方法分为换填、排水固结、轻型真空井点、强夯、振动及水下深层水泥搅拌法 6 大类。香港《海港工程设计手册》中提出的地基处理方法主要包括: 清淤换填、深层水泥搅拌、碎石

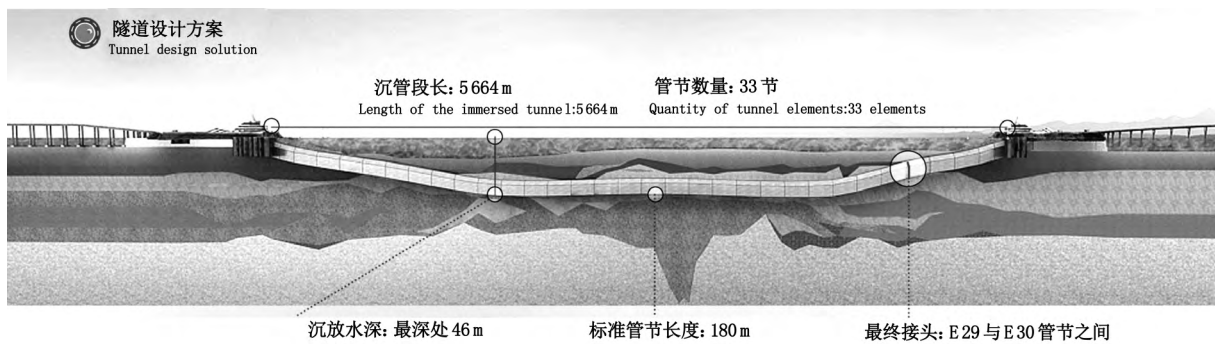


图1 港珠澳大桥沉管隧道纵断面图

桩、堆载预压法、强夯法及振冲密实法,与内地常用的方法基本一致,只是在施工中对环保要求更为严格。相比而言,由于对软基处理的实践经验更多,内地规范更为详细。

近年来,通过在工程实践中的不断总结提高,我国地基处理领域呈现出的一个典型趋势就是复合加固技术的发展及应用。

2 工程概况

2.1 港珠澳大桥工程

港珠澳大桥跨越伶仃洋海域,东接香港特别行政区,西接广东省珠海市和澳门特别行政区,总长约55km,设计使用寿命120年。其中,综合技术难度最大的海中主体工程全长约29.6km,采用桥岛隧组合方案,包含22.9km跨海桥梁、6.7km沉管隧道以及两个桥隧转换人工岛(东、西人工岛)。

2.2 大桥沉管隧道

隧道总长6.7km(见图1),沉管段长5664m,共分33节管节,一个标准管节长度180m,单节重约74kt,由8个22.5m长节段组成,最大沉放水深46m。隧道地处珠江入海口,属亚热带海洋性季风气候,海上作业受台风影响十分频繁;该海域基岩埋藏在海床面50m以下,软弱地层深厚;隧道横穿伶仃洋最繁忙主航道以及中华白海豚国家级自然保护区。

2.3 基础处理技术难点

大桥隧道基础主要功能是承受来自结构自身、回填防护层以及回淤、行车等荷载,提供均匀可靠的刚度支撑,实现沉管段、暗埋段及人工岛间的协调变形。沉管段全部位于软弱地基,地基不均匀沉降直接

影响沉管结构安全及防水^[1]。软基处理技术难点可归纳如下。

1) 隧道纵向呈W型布置,管节结构底板纵向分别穿越淤泥质土、黏土、粉质黏土及砂层等多种不同地层,各层土的埋深及应力历史均有所差异,地基刚度变异性大。

2) 岛外斜坡过渡段(E1-E6号管节、E24-E33号管节区域)、连接中间段(E6-E23号管节区域)天然地基与岛上复合地基,埋深变化较大,沉降计算量大,处理难度最大。

3) 沿纵向荷载分布差异大,人工岛岛头处隧道设置混凝土自重力式挡浪墙,岛外露出海床段设有宽体护坦,沉管中间段管顶运营期间回淤厚度达23m,并且规划在回淤土中疏浚两条30万t的航道。

4) 隧道两侧岛上段位于新建人工岛上,原海床面高程-8~-10m,成岛后岛面高程为+5m。基槽开挖至标高-16.0m,分级堆载中粗砂至标高+5.0m,填筑厚度约20m,人工岛总沉降量较大。

5) 隧道横卧珠江口,基槽内泥砂回淤量大,且上游人工采砂活动加剧了回淤,管节沉放前的基础回淤控制难度较大。

6) 均为水下隐蔽工程,最大作业水深超过40m,各道工序精度要求高。

3 复合加固方案的应用

在设计阶段,港珠澳大桥通过比选论证钢管支撑桩+碎石垫层、挤密砂桩(Sand Compaction Pile,简称SCP)+碎石垫层的隧道基础方案,认为前者存在碎石垫层传力机理及压缩模量不明、深水送桩施工精度难

控制等重大技术风险,而挤密砂桩具有排水固结和复合加固的作用,且深海施工作业能力强,优势明显,最终采用SCP复合加固方案。

复合加固方案将隧道基础全线分为人工岛岛头段、岛外斜坡过渡段、隧道中间段三类区段进行处理,依次采用刚性桩复合地基、SCP、天然地基。各区段具体处理方法如表1所示。地基处理完成后,在隧道底板下铺设碎石及块石层,其中岛头段刚性桩复合地基上部采用20~50cm碎石垫层;沉管段底板下设置1.3m厚带垄沟的碎石垫层,并对非堆载预压区的碎石垫层下设置2.0m(局部3.5m)水下夯平块石层。先铺的水下夯平块石层可以减缓回淤带来的不利影响,同时可提供纵向协调的地基刚度。

表1 港珠澳大桥沉管隧道基础各区段处理方法

区段	范围	基础处理方法
西人工岛岛头段	岛头现浇暗埋段至E1号管节部分节段,长约119m	暗埋段:降水联合堆载预压+预应力混凝土管桩(PHC);E1号管节岛上两节段:降水联合堆载预压+高压旋喷桩
西人工岛岛外过渡段	E1号管节部分节段至E6号管节部分节段,长约754m	SCP(部分堆载预压)
隧道中间段	E6号管节部分节段至E23号管节,长约3206m	仅挖除表层软土,充分利用天然地基
东人工岛岛外过渡段	E24号管节至E33号管节部分节段,长约1611m	SCP(部分堆载预压)
东人工岛岛头段	E33号管节部分节段至现浇暗埋段,长约276m	暗埋段:降水联合堆载预压+PHC;E33号管节岛上两节段:降水联合堆载预压+高压旋喷桩

截止目前,大桥沉管隧道已沉放33个管节,从对沉降位移及管节接头差异变形监测数据来看,地基处理效果较好,达到了控制沉降和协调地基刚度过渡的目的。

4 基础处理关键技术

4.1 精细化地质勘察

在初步设计阶段完成的初勘和详勘基础上,在施工图设计和施工总承包阶段,开展隧道补充地质勘察,参照英国标准,采用孔压静力触探(简称CPTU)方法,辅以部分地质钻探。CPTU有利于快速、连续地揭示

原位地质信息,以20mm/s的速度进行,每20mm采集数据1次。隧道区补勘共布置CPTU测试点387个,钻孔79个,孔压消散点22个^[2]。

补勘过程配备了带波浪补偿的海上钻探系统等先进设备,由设计岩土工程师全程跟进,对勘察工作进行动态管理,探明了地层连续地质参数、建立了三维地质模型及数据库^[3]。

4.2 挤密砂桩打设

水下挤密砂桩是通过振动设备和管腔增压装置把砂强制压入软弱地基中形成扩径砂桩,从而增加地基强度,加快地基固结,减少结构物沉降,提高地基的抗液化能力。与一般砂桩相比,挤密砂桩桩体密实性高,加固的置换率可达60%~70%,是一种地基加固新技术,具有广阔的推广前景。

岛外过渡段大规模采用SCP,布置在沉管底部,并向两侧扩5~7排挤密砂桩,SCP两侧布置排水砂井。由于荷载及地质条件的变化采用了不同置换率的挤密砂桩,桩径有1.5m、1.6m和1.7m三种,对应的置换率分别是42%、55%和70%。过渡段堆载预压区施工工序是:基槽挖泥→在开挖标高施打挤密砂桩→清除拱起淤泥至沉管底下3.3m或3.5m→基槽坡面上抛填2.0m排水碎石垫层→施打排水砂井→堆载至设计标高→满载预压约90d,预压荷载下固结度达到90%卸载,并开挖基槽→基槽开挖至沉管底标高下1.3m→水下铺填整平1.3m碎石垄→安放沉管。

挤密砂桩的施工技术要点包括:砂桩的砂料采用中粗砂,含泥量不宜大于3%,砂料中可混有少量(不超过10%)粒径5~20mm的砾料;通过现场成桩试验检验设计要求和确定施工工艺及施工控制要求,包括填砂量、提升高度、挤压时间、桩底标高等;施工过程中应保证砂桩桩身的连续性;必须对照设计要求、地质资料、水文条件,合理选择船机设备;水下地形测量宜采用GPS无验潮测量技术,并绘制水下地形图,以便确定砂桩顶面标高及砂桩长度。

4.3 碎石垫层铺设

在夯平块石顶面采用整平船铺设1.3m厚碎石垫层。碎石垫层顶面最终标高与隧道各管节结构底标高一致。碎石垫层设置V形槽,纵断面锯齿形,平面S型铺设。碎石垫层顶横向宽度41.95m(结构宽37.95m+结构

外缘线两侧各预留2 m),单垄顶纵向宽度1.8 m,V型槽顶纵向宽度1.05 m,管节间大槽顶宽4.35 m。由于隧道在施工和营运阶段会发生沉降,考虑长期使用要求,需在施工碎石垫层时预留沉降量(即预抛高)。预抛高值结合管节沉放施工监测资料、管节对接施工工艺要求、沉降分析等综合确定。整平精度要求垫层顶标高偏差在±40 mm以内。

碎石垫层铺设技术要点包括:与紧前工序合理衔接,流水作业,尽可能减少回淤对施工的影响,碎石垫层铺设前对块石顶回淤进行检测;垫层铺设应采用专用设备分粗平和细平两步进行,细平层厚度为30~35 cm;施工前应进行典型施工试验,确保整平精度满足设计要求;管节接头处应按设计要求预留凹槽,避免碎石影响管节对接;垫层铺设后,沉管沉放前,应对碎石垫层顶回淤等进行检测,并将检测结果反馈设计单位以确定清淤要求,清淤不应损坏已铺设碎石基床;整平船整平碎石垫层应在落管内保持一定预压力下进行铺设,铺设前应进行预压力测试。

4.4 专用施工装备研发

深水高精度施工必须依靠大型装备实现。大桥沉管隧道工程专项研发了一系列施工装备,发挥了不可替代的保障作用。

例如,研发的高精度碎石铺设整平船是能完成碎石垫层作业的唯一装备,由石料传送系统、整平台车、抛石管及其控制系统、测量系统及中央控制系统等组成,在不移动船体的情况下铺设整平作业范围可达48.2 m×25.2 m,具备作业最大水深达45 m、在7个船位、8个有效工作日内(最快速度为6 d)完成一个长180 m标准沉管管节的碎石基床铺设的高效率。作业工况为最大波高2.8 m,最大表面流速1.5 m/s,最大风速25.8 m/s。

研发的新一代挤密砂桩施工船,基本参数为:桩架高86 m,船型总长L:75 m、型宽B:26 m、型深D:5.20 m和设计吃水3.0 m,为三联管设计,三联管打桩间距可调。新代挤密砂桩船一般包括以下设备及系统,配备自行研制的500 kW的振动锤,布置有砂料输送系统、砂料提升系统、双导门进料系统、振动锤系统、超长桩管系统、压缩空气路系统和施工自动控制系统;同时引入了GPS无验潮测量定位系统,将实时潮位与挤

密式砂桩自动控制系统相连,确保打桩的施工高程满足设计要求;施工质量管理体系分为管理操作和打设两部分进行设计,施工员和管理人员任务明确,管理方便。作业工况为流速≤3.0 m/s,风速≤17.1 m/s(蒲氏7级), $H_{1/3}$ 波高≤2 m^[4]。

4.5 专题试验研究

为攻克技术难关,港珠澳大桥项目开展了隧道基础相关的一系列专题试验研究,解决了工程实际问题 and 需求,发挥了引领工程创新的作用。建设期的专题内容如表2所示。

表2 港珠澳大桥沉管隧道基础相关专题列表

科研工作的开展阶段	专题名称
初步设计阶段	沉管隧道基槽开挖工艺及回淤观测试验研究
	沉管段基础处理试验研究
施工图设计、施工总承包阶段	外海厚软基大回淤超长沉管隧道基础沉降控制技术研究
	深水碎石高精度整平设备开发及施工工艺
	海上挤密砂桩(SCP)地基处理关键技术
	静力触探试验结果评估专题研究
	基槽稳定性及长期回淤观测试验

5 结 语

随着一系列关键技术的不断完善,以及在世界范围的工程实践与交流,沉管隧道正受到越来越多的重视和应用,已在设计理论、施工工艺、配套工程等方面取得了较大发展,并逐渐成为修建水下大型隧道的重要选择方案。而基础处理,作为决定沉管隧道建设成败的关键技术,也必将在这一背景下得到不断的完善和更大的发展。①

参考文献

- [1]中交公路规划设计院有限公司联合体.港珠澳大桥主体工程岛隧工程施工图设计[Z].珠海,2011.
- [2]陈越.港珠澳大桥岛隧工程建造技术综述[J].施工技术,2013,42(5):4-5.
- [3]尹海卿.港珠澳大桥岛隧工程设计施工关键技术[J].隧道建设,2014,34(1):62-63.
- [4]交通运输部.港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与示范技术总结报告[R].珠海,2013.