

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.001

港珠澳大桥沉管隧道技术难点和创新

李英, 汉斯·德维特

(荷兰隧道工程咨询公司, 荷兰奈梅亨 6522 DK)

摘要: 港珠澳大桥连接香港、澳门和珠海, 全长 55 km, 是桥、岛、隧集群工程, 桥梁和隧道的转换通过两个海中人工岛来实现。约 6.7 km 长的沉管隧道是世界上目前已建和在建工程中最长的混凝土公路沉管隧道, 也是主体工程的控制性工程, 为了将来 30 万 t 油轮满载通航, 隧道最大埋深达到海底 45 m; 如果考虑本工程相对差的地质条件、隧道断面大跨度、恶劣的海上施工条件、人工岛与隧道的复杂过渡段等, 港珠澳大桥沉管隧道可以被看作世界上最具挑战性的隧道工程之一。从岛隧工程咨询单位的角度, 介绍了港珠澳大桥的基本情况, 详细分析了沉管隧道的主要技术难点, 包括: 隧道结构设计、隧道基础设计、隧道管节的制造、隧道管节的浮运沉放、最终接头、耐久性等, 最后将介绍作者对港珠澳大桥沉管隧道创新点的看法。文章发表之时, 恰逢海底沉管隧道施工贯通之际, 也意味着港珠澳大桥全线贯通, 作为参与方特以此文表示祝贺。

关键词: 沉管隧道; 基础处理; 管节; 工厂化预制; 浮运沉放; 最终接头; 耐久性

中图分类号: U459

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)02-0001-16

The Technical Difficulties and Innovations of Immersed Tunnel in Hongkong Zhuhai Macao Bridge Project

LI Ying, HANS De Wit

(Tunnel Engineering Consultant-TEC, Nijmegen 6522 DK, Netherlands)

Abstract: The Hongkong Zhuhai Macao Bridge (HZMB) Project, 55 km long, links Hongkong, Macao and the Mainland China Zhuhai city. It is a combination engineering of bridges, islands and tunnel in which the two offshore artificial islands are used as transition between bridges and tunnel. With a length of approximately 6.7 km, the immersed tunnel becomes the world's longest highway concrete immersed tunnel. It is the controlling work of the whole link. To accommodate the passing of 3 million tons vessels, the maximum tunnel depth is 45 m below sea level, being one of the deepest in the world. When also taking into account the varying and relative poor soil conditions, the large tunnel spans, the offshore conditions for construction and the complex connection of two artificial islands which are reclaimed in poor soil conditions, the HZMB Link can be considered as one of the most challenging projects worldwide. From project consultant point of view, the paper introduces the general information of HZMB project but with details on the technical difficulties of the immersed tunnel, which includes: Tunnel structural design, tunnel foundation design, tunnel element production, transport and immersion, closure joint, durability, etc. Finally, the opinion on the main innovations of the immersed tunnel will be introduced. It will be right the time of "through-going" of whole tunnel construction when the paper is to be published, which also means the "through-going" of the whole link construction. As one of the involved companies, this paper expresses also our congratulation to this great milestone of the project.

Key words: immersed tunnel; foundation treatment; tunnel element; factory production; transport and immersion; closure joint; durability

收稿日期: 2017-05-29

作者简介: 李英(1970), 女, 湖南长沙人, 荷兰隧道工程咨询公司驻中国代表, 港珠澳大桥岛隧工程咨询项目经理, 高级工程师, 一级注册结构师, 博士, 主要从事土木工程项目管理和技术咨询工作(e-mail) y.li2005@163.com; 汉斯·德维特(HANS De Wit), 男, 荷兰隧道工程咨询公司执行总裁, 沉管隧道专家, 港珠澳大桥岛隧工程咨询隧道专业总负责人(e-mail) hans.de.wit@rhdhv.com。

单位简介: 荷兰隧道工程咨询公司(Tunnel Engineering Consultants, TEC)为全球领先的隧道专业咨询公司, 是港珠澳大桥主体工程咨询联合体成员之一, 主要为港珠澳大桥主体工程的隧道及人工岛工程的设计、施工提供全过程咨询服务。

1 介绍^[1-5]

1.1 工程概况

港珠澳大桥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，是国家高速公路网规划中珠江三角洲地区环线的组成部分和跨越伶仃洋海域的关键性工程，将形成连接珠江东西两岸新的公路运输通道。港珠澳交通大通道，将增强香港及珠江东岸地区经济辐射带动作用，充分挖掘珠江西岸发展潜力，便捷粤港澳大湾区的交通联系和发展，提升珠江三角洲地区的综合竞争力。

港珠澳大桥工程包括三项内容：一是海中桥岛隧主体工程；二是香港、珠海和澳门三地口岸；三是香港、珠海、澳门三地连接线。根据达成的共识，海中桥岛隧主体工程（从粤港分界线至珠海和澳门口岸段）由粤港澳三地共同建设；海中桥隧工程香港段（起自香港氹石湾，止于粤港分界线）、三地口岸和三地连接线由三地各自建设海中主体工程采用氹石湾—拱北/明珠的线位方案，路线起自香港氹石湾，接香港口岸，经香港水域，沿23DY锚地北侧向西，穿（跨）越珠江口铜鼓航道、伶仃西

航道、青州航道、九洲航道，止于珠海/澳门口岸人工岛，全长约35.6 km，其中香港负责建设段长约6.0 km；粤港澳三地共同建设的主体工程长约29.6 km。主体工程采用桥岛隧结合方案，穿越伶仃西航道和铜鼓航道段约6.7 km采用隧道方案，其余路段约22.9 km采用桥梁方案。为实现桥隧转换和设置通风井，主体工程隧道两端各设置一个海中人工岛，东人工岛东边缘距粤港分界线约150 m。港珠澳大桥主体工程平面图详见图1，岛隧工程平面图见图2。

海中桥隧主体工程采用双向六车道高速公路标准建设，设计速度100 km/h，桥梁总宽33.1 m，隧道宽度约38 m、净高5.1 m。全线桥涵设计汽车荷载等级采用公路-I级，同时应满足香港《Structure Design Manual for Highways and Railways》中规定的活荷载要求，大桥的设计使用寿命120年。其他技术标准应符合原交通部颁发的《公路工程技术标准》（JTGB01—2003）中的规定。

口岸采用“三地三检”模式分别由各方建设、各自独立管辖，香港口岸区设置在香港境内；内地（珠海）口岸和澳门口岸在澳门明珠点附近内地水域

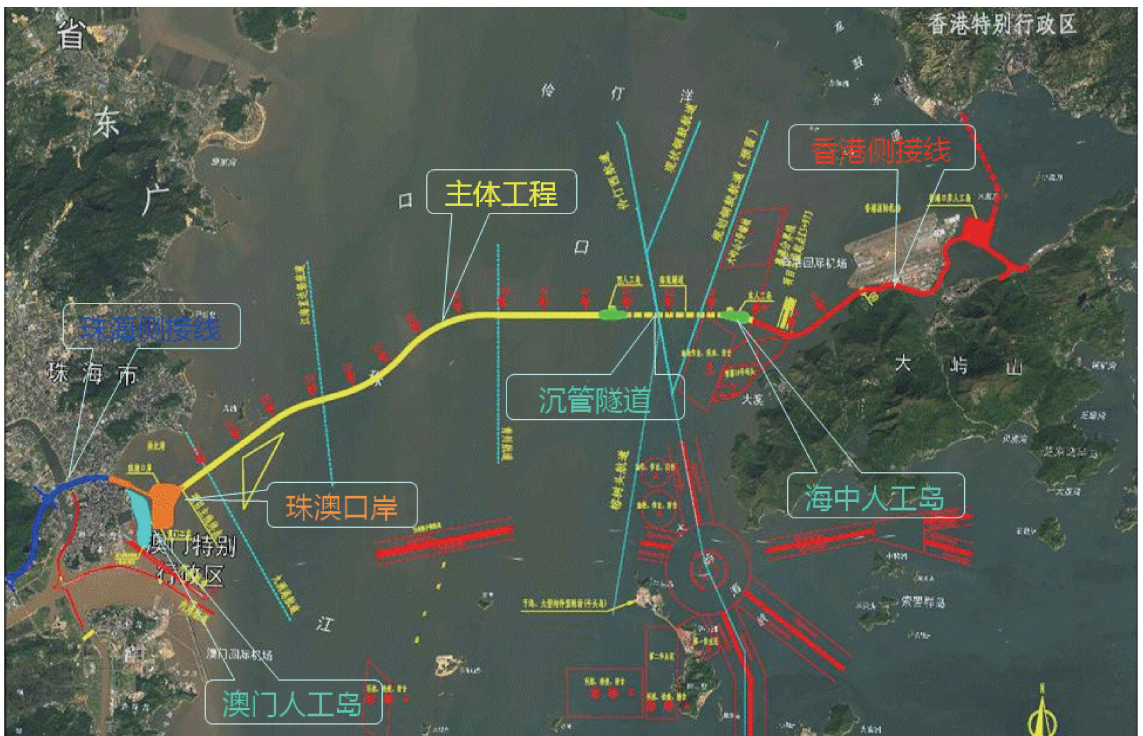


图1 港珠澳大桥工程平面图

Fig. 1 Plan view of the HZMB Link

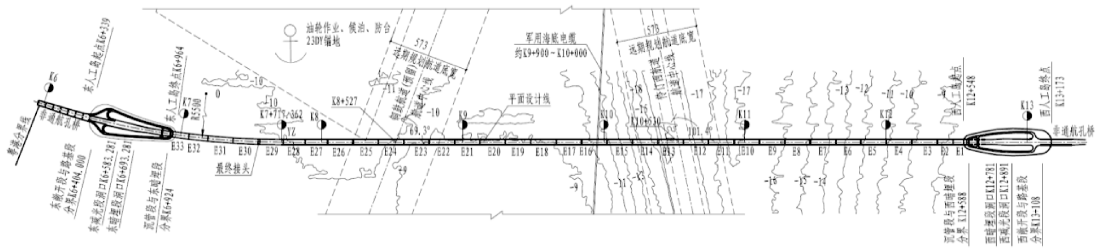


图2 岛隧工程平面布置总图^[8] (E-代表隧道管节编号)

Fig. 2 Plan view of tunnel and islands part^[8] (E-numbering of tunnel element)

填海同岛设置。内地(珠海)口岸和澳门口岸人工岛填海总面积约 2.164 km², 分为四个主要区域, 包括: 港珠澳大桥主体工程管理区、珠海连接线衔接区、珠海口岸管理区以及澳门口岸管理区。

1.2 工程特点

港珠澳大桥主体工程的投资和技术难度为世界罕见, 其主要特点为:

1) 项目规模宏大

主要工程包括三座通航孔桥、超长非通航孔桥、海底隧道、两个大型的连接隧道和桥梁的海上人工岛、岛上建筑等, 项目总投资约 380 亿元。

2) 项目建设条件复杂

本项目除跨海长桥所面临的共性问题外, 在风况、航运要求、防洪、航空限高、环境保护尤其对中华白海豚的保护、耐久性等方面均具有其特殊性, 多种因素综合影响使本工程建设难度加大。

3) 建设标准要求高

主体工程的设计和施工的规范、质量与技术标准应符合内地适用法律及工可报告有关规定, 并应以“就高不就低”为原则, 适当吸纳香港及澳门合适的相关规范、质量与技术标准, 形成适用于本项目的规范、质量与技术标准; 不足之处采用国际先进标准, 以 BS 标准优先。120 年设计使用寿命高于国内现有标准, 相应的材料性能与荷载代表值、结构耐久性等均要与其相适应。

4) 技术难度大

本项目工程种类多, 是目前世界范围内综合难度最大的项目之一, 涉及桥梁工程、隧道工程、填海和水运工程、及相关的交通工程和建筑工程等内容, 每一项都是技术复杂的庞大工程, 特别沉管隧道和深海人工岛都是国内经验欠缺国外少见的挑战项目。

5) 建、管、养模式独特, 建设合同模式独特

本项目“三地三检”模式体现了区域地理位置的特殊性, 由港珠澳大桥管理局统一负责大桥主体工程的建设 and 营运期管理工作, 并与香港、澳门管理中心实现信息链接。主体工程桥梁采用施工图设计和施工分开招标的传统模式, 而岛隧工程采用完全不同的施工图设计和施工总承包建设合同模式。

本项目的亮点在桥梁工程, 难点在岛隧工程。港珠澳大桥总的三大建设目标是:

- 1) 建造世界级的跨海通道。
- 2) 为用户提供优质服务。
- 3) 成为地标性建筑。

岛隧工程于 2011 年 1 月开工, 采用施工图设计和施工总承包模式, 2011 年 12 月, 海中人工岛建成; 桥梁工程于 2012 年开工, 采用传统的施工合同模式; 2016 年 9 月, 海上桥梁贯通; 2017 年 3 月, 最后一节沉管在伶仃洋底安装到位; 2017 年 5 月成功完成沉管隧道最终接头安装和永久刚接头焊接, 6 月中旬完成隧道最终接头基础注浆及管外回填。进展顺利的情况下, 有望在 6 月底实现岛隧工程暨主体工程全线贯通。

2 沉管隧道及其主要技术难点

港珠澳大桥全线原希望采用全部桥梁方案, 但香港端落脚点香港机场航空限高的要求使大跨度桥梁只能采用低桥塔的方案成为不可能, 而只能采用隧道方案; 海底隧道需要穿越两个主航道和两个次航道, 使隧道的长度又达到 6 km。为了将来 30 万 t 油轮满载通航, 隧道最大埋深达到海底 45 m 深; 由于较差的地质条件和相关的风险, 经过早期比选在本项目的特定条件下, 沉管隧道方案优于盾构隧道方案而成为施工图实现的方案。如果考虑本工程 120 年的设计使用寿命、高标准的质量要求、相对差的

地质条件、隧道断面大跨度、恶劣的海洋施工条件、在软弱底层上填海造成的两个人工岛与隧道的复杂过渡段、各种创新的设计施工手段和设备等,港珠澳大桥隧道工程可以被看作世界上最具挑战性的工程之一,也大大打破已有沉管隧道长度不到4 km的极限,真正成为世界上最长建成的公路沉管隧道。沉管隧道建设的主要历程见图3:根据施工图设计,沉管隧道全长6.704 km,沉管段长约5.664 km,共33节,其中曲线段管节5节,半径5 500 m,一个标准管节长180 m,由8个长22.5 m、宽37.95 m、高11.4 m的小节段组成,重约7.8万t,最大沉放水深45 m,基槽底标高最深处约-47.2 m。

隧道包括两个交通行车管廊(每个管廊行车为一个方向)和一个中间逃生和设备服务管廊。由于采用双向3车道的要求,行车廊单孔净宽达14.55 m,也成为超宽跨度隧道断面,隧道顶板至原始海床的回淤厚度达23 m的纵向长度约3 km,隧道的横断面和纵断面示意图分别见图4和图5所示。

2.1 隧道结构设计

2.1.1 沉管隧道技术简介

世界上的沉管隧道主要分为钢结构和混凝土结

构沉管隧道,其中混凝土沉管隧道纵向结构又可分为整体式和节段式两种最基本的形式,沉管隧道工法从上个世纪末开始逐步在中国大陆应用,在近10年得到较快的发展,其中主要以整体式混凝土沉管为主,港珠澳大桥沉管隧道是第一个采用节段式混凝土沉管隧道的项目,没有现成的规范可以借鉴^[6]。

节段式沉管隧道管节的长度一般约为100~200 m之间,管节与管节之间的接头称为沉放接头或者管节接头;一个管节由若干个节段组成,每个节段长度约20~30 m,节段与节段之间的接头则称为节段接头,完全断开,通过柔性止水带相连,示意图6。浮运沉放过程中,通过临时预应力将节段连接成一个整体进行一个管节的安装,安装到位后再择机剪断每个节段接头的临时预应力,使沉管隧道纵向恢复柔性,这种型式在欧洲采用广泛。而整体式沉管隧道管节的长度一般约为80~120 m,管节与管节之间的接头称为沉放接头或者管节接头;为了浇筑,一个管节划分成若干个施工缝分批浇筑,但是施工缝之间相连,最后形成混凝土结构整体,相邻施工缝之间的长度约20~30 m,这种型

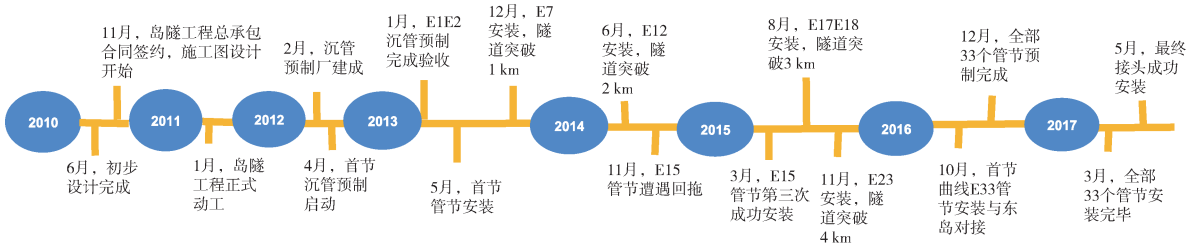


图3 沉管隧道建设主要历程

Fig. 3 The key construction process of the immersed tunnel

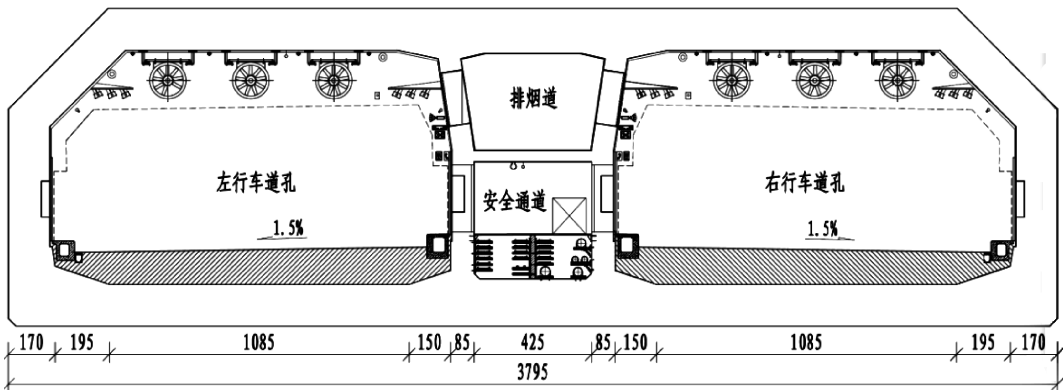


图4 隧道横断面示意图^[7]

Fig. 4 Typical cross section of tunnel element

式在亚洲采用较多, 如图 7 所示。

2.1.2 隧道设计的特殊边界条件

2.1.2.1 地质条件^[8-10]

沉管隧道结构设计重点是对土和结构相互作用的理解, 而规范包括欧盟规范对这一点的要求是不明确的。所以结构设计首先对地质情况了解清楚非常重要, 从而可以明确潜在的风险和可能的设计优化空间。从地质资料可以得出结论: 项目位置处(岛隧工程)的地质条件差, 短距离范围地质情况变化大。

海底标高在 -15 ~ -8 m 之间变化, 全新世地层包括淤泥、淤泥质粘土和淤泥质粘土混合砂, 被

评定为非常软弱、高压缩性和正常固结的土层。在全新世地层的下面是更新世晚期土层, 厚度变化为 37 m 到 102 m(局部), 超固结且主要由粘土夹松散到中等密实的砂层组成; 砂层和碎石层一般都在粘性土的下面。在更新世晚期土层下面就是岩层/花岗岩。地质断面图如图 5 所示。

2.1.2.2 偶然荷载

港珠澳大桥的沉管隧道要考虑下列一些偶然荷载:

- 1) 一个隧道管廊发生爆炸。
- 2) 通常货船的沉船荷载。
- 3) 掉锚荷载。

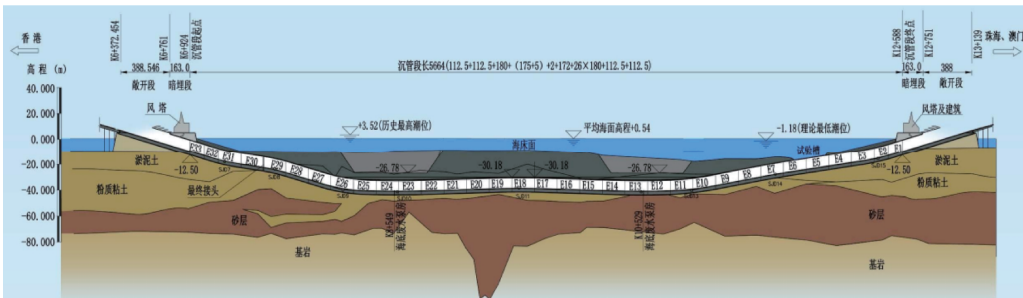


图 5 隧道及地质纵断面图^[7] (E-代表隧道管节编号)

Fig. 5 Indicative longitudinal geotechnical profile^[7] (E-numbering of tunnel element)

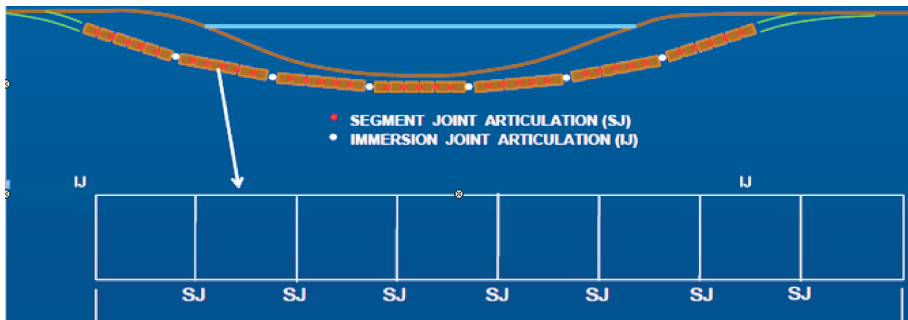


图 6 节段式管节纵向示意图(图中箭头为一个管节示意; SJ-节段接头; IJ-管节接头)

Fig. 6 Segmental tunnel element (The arrow indicates one element; SJ-segment joint; IJ-element joint)

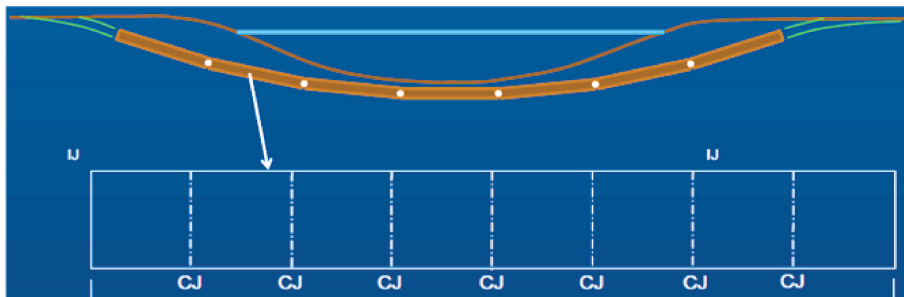


图 7 整体式管节纵向示意图(图中箭头为一个管节示意; CJ-施工缝; IJ-管节接头)

Fig. 7 Monolithic tunnel element (The arrow indicates one element; CJ-construction joint; IJ-element joint)

4) 极端高水位和波浪荷载。

5) 地震荷载。

2.1.3 隧道结构设计的难点

沉管隧道结构设计按照横向设计和纵向设计来介绍。

2.1.3.1 隧道结构横向设计

1) 大跨度公路设计

本隧道为双向三车道,横断面最大跨度达到14.55 m。

2) 水深

隧道区船舶通航最小埋深为设计最低通航水位(-1.18 m)以下29 m,包括综合考虑了30万t级油轮不乘潮时满载吃水最大水深、海底最大冲刷深度、施工超深、安全富裕深度及隧道顶面以上2 m保护层。隧道中部2 810 m范围内,管节顶板控制在-30.18 m以下,底板达到水深40 m以下,为沉管隧道结构水密性要求提出了挑战。

3) 隧道覆土荷载

由于埋深大,隧道施工完成后顶部的回淤速度和回淤密度无经验和类似项目参考,设计土压力荷载按全回淤到原海床面工况,回淤厚度最大达20 m,将成为世界上回淤荷载最大的一条沉管隧道。

4) 地质条件

地质条件较差,由于隧道旁的回填和回淤荷载引起随时间相关的沉降(加载状态),在隧道相当长的一段范围存在粘性土,超出原应力水平;同时隧道底部存在与时间相关的隆起,应力水平低于原状态(卸载状态)。这就意味着需要考虑各种不同的地基支撑情形,为了降低地质条件的复杂性,必须对相当范围隧道纵轴线下的地基进行处理。

5) 起浮能力

隧道管节在浮运沉放阶段必须能浮起来,这就意味着决定着管节重量的结构尺寸需要受到限制。

6) 地震分析

本项目位置属于中等抗震地区,纵向弯矩和曲率(竖向平面和水平面)和由局部地层变形诱发的横截面扭曲(挤压)、地震荷载都比邻国釜山沉管隧道的更大。管节接头和节段接头是在Ⅶ度地震烈度下的设计,接头的结构需满足地震状态下,其止水效果仍保持在工作范围内,或通过简化的维修能恢复到设计工况,接头的设计和止水带开发是本项目新

的挑战。

上述所有的方面考虑后,传统的钢筋混凝土方案的可行性已经接近极限,配筋率高,设计方也详细比较了对隧道施加横向(顶板和底板)后张预应力的方案,最终结论采用传统的方案在设定的条件下仍然可行,通过施工图设计阶段的优化,传统的方法在施工方面的限制更少;而横向后张预应力方案需要采取很多临时措施,锚头位置的配筋也很复杂而被放弃。

2.1.3.2 隧道结构纵向设计及其优化变更

该沉管隧道第一次在国内采用柔性管节,初步设计和施工图设计初始方案中,一个管节由8个22.5 m长的节段组成,节段之间采用柔性接头允许纵向变形和水平与竖向的转动;接头之间采用剪切键来限制接头水平和竖向不连续的位移。浮运沉放过程中,通过临时预应力将8个节段连接成一个整体进行管节海上运输和安装,因为本项目海上工况复杂,临时预应力配置相对比较多。

节段式管节和整体式管节设计单位在初步设计阶段通过下面几个方面进行了深入详细的比选:(1)地质条件(包括变异性);(2)超载(大小和变化性);(3)偶然荷载例如地震荷载和沉船荷载;(4)内力(弯距、剪力等);(5)造价。

结论是在本项目的条件下节段式管节更可行,更能吸收由于地震工况引起的内力;整体式管节需要配置非常多的纵向钢筋、外包防水层以及需要更多的浮运沉放次数从而带来更高昂的费用和风险。

节段式管节设计的最关键构件就是接头,目前节段接头设计采用了Omega止水带和中埋式钢边止水带双道防水措施,置于外墙的剪切键来适应隧道支撑、超载和地震荷载变化的影响,顶板和底板的剪切键主要用于吸收水平地震剪力。管节之间的沉放接头是采用传统的GINA和Omega止水带,剪切键设置类似节段接头。对于本项目因为地震因素必须采用比通常尺寸更大的GINA止水带来适应接头变形。

随着施工图设计的进展,设计单位研究了可获得的更多的详细地质资料和静力触探勘察资料,也和咨询单位进行了非常多关于柔性管节隧道纵向设计的讨论。因为本项目隧道长,接头数量多达到两百多个,每一个接头都面临水密性的风险,在2012年底设计对柔性管节方案提出变更,即变更为承包

人称之为的“半刚性”管节隧道方案,这种方法利用了节段式隧道(柔性)和整体式隧道(刚性)理念的优点,保留了最初用于运输和沉放的临时后张预应力钢绞线而不切断。通常在柔性管节隧道中,管节浮运、沉放时,通过体内纵向预应力将分段预制的节段张拉成为一个管节整体,在沉放安装到位后一定时机,剪断所有小节段接头(如图6的SJ位置)的预应力,从而降低结构受力;本项目通过纵向预应力将8个22.5 m长的小节段张拉成一180 m长的管节整体用于浮运沉放节段,最终变更的设计在运营期也永久保留这些预应力,使本项目沉管隧道形成一种新的纵向受力结构体系,目前施工已经全部完成。

2.2 基础设计

基础处理的控制因素是土体允许的刚度变化范围与总沉降,允许的差异土体刚度是通过分析隧道管节上的容许内力和接头最大允许张开量的要求来确定的。只有未经处理的天然地基无法保证通过合理的结构措施满足这些结构设计的要求时,才考虑对地基进行加固;同时基础处理也要有利于隧道基础结构从暗埋段到沉管段的平顺过渡,初步设计沉管隧道暗埋段的基础采用的是支承桩,沉管段基础分段处理详见表1, E1~E33管节的位置图见图2,施工图设计阶段基础处理优化前后的方案详见表2。

表1 沉管隧道基础分段处理方法(初步设计)

Tab.1 Ground treatments applied at HZMB tunnel (Preliminary design) (E-代表隧道管节编号)

分段	西岛头	西岛过渡段	西边斜坡段	隧道中间段	东岛过渡段	东岛头
相应的管节	E1	E2-E3	E4-E6	E7-E24	E25-E32	E33
处理方法	打入桩	打入桩(减沉桩)	换填砂	天然地基	打入桩(减沉桩)	打入桩

表2 沉管隧道基础分段处理方法(优化后施工图设计)

Tab.2 Ground treatments applied at HZMB tunnel (Detailed design after optimisation)

(E-代表隧道管节编号, S-代表管节的节段编号, SCP-挤密砂桩)

分段	西岛头	西岛过渡段	隧道中间段	东岛过渡段	东岛头
相应的管节	E1-S1~S2	E1-S3~E6-S2	E6-S2~E30-S4	E30-S4~E33-S4	E33-S5与E33-S6
处理方法	降水联合堆载预压+高压旋喷桩	SCP+堆载预压/SCP	天然地基/部分换填	SCP+堆载预压/SCP	降水联合堆载预压+高压旋喷桩

为满足沉降控制和平顺过渡的要求,初步设计采用了两种下列考虑:

1) 地基参数改良:强度、刚度和增加地基的均匀性。

(1) 利用合适的填料如砂石或碎石换填软土。

(2) 在软粘土处采用减沉桩(或称为沉降控制桩,非支承桩)。

(3) 在软粘土层采用深层搅拌桩。

(4) 挤密砂桩(SCP)。

2) 对地基土太软弱或太复杂(靠近人工岛位置)处采用基础桩支承在持力层上。

岩土问题是带来基础设计风险的主要因素,进而可能很大地影响施工成本和工期,因此关注岩土工程的风险非常重要,并且应努力将设计集中在解决这些风险问题上。根据对本项目地质资料的研究,应注重下列隧道基础加固的原则来优化地基处理方案:

(1) 尽量只在敏感位置进行地基加固。

(2) 调研隧道下部(除两头外)不需要基础处理的可能性。

(3) 横断面地基支撑模型的优化以及地层的摩擦力的考虑。

(4) 评估隧道对不均匀沉降的敏感性(如因地基的变化导致的不均匀沉降),以及确定均匀沉降与不均匀沉降之间的关系。

(5) 设计敏感性,包括最重要的施工细节(如:位于接头的剪力键,桩帽与隧道的连接)和施工容差。

由于前期地质勘察的结果不足,初步设计假设20%的地基土体刚度变化的依据不足;沉管段隧道、人工岛和隧道暗埋段的基础方案也未作为整体综合考虑,施工图设计阶段设计单位对地基处理进行了优化变更以达到风险最低造价最优。优化后隧道岛上段(暗埋段和敞开段)采用堆载预压+刚性PHC桩复合地基,岛外斜坡段采用挤密砂桩联合堆载预压的地基改良方案,其中挤密砂桩置换率逐段渐变以保证基础刚度平顺过渡。

沉管隧道基础设计还包括基础垫层(隧道结构和原状土之间的结构)的设计,因为通常基槽开挖疏浚后的精度不能满足结构设计关于不均匀支撑和差异沉降的限制条件。基础垫层可以采取隧道管节沉放安装后再实施的砂流法垫层(主要用于过江河

通道,无地震情况)。在本项目海洋环境的隧道处于中等抗震地区,垫层在初步设计中采用了碎石基础垫层(图8),安装示意如图9(a)所示,图9(b)为本项目开发的世界最大碎石基床整平安装船实景图。这种方法可以在管节沉放前取得很高的垫层高程精度,曾分别在厄勒海峡隧道和韩国釜山沉管隧道中使用,在本项目中设计单位对基础垫层进行了进一步优化,先将沉管基槽底增设2.0 m厚强夯抛填块石层,再施加1.3 m碎石垫层,以减少针对本项目比较大的槽底回淤影响,本项目碎石基床整平精度可以达到水下接近50 m深 ± 40 mm。从目前的监测结果显示,采用优化的基础垫层、天然地基和复合地基相结合地基处理方式,使整个隧道纵向刚度趋于一致,控制沉管总体沉降和不均匀沉降效果非常明显。

2.3 岛隧接口

本项目的岛隧接口非常复杂,隧道的设计原则就是要为结构提供均匀的刚度并且在不同区段之间实现刚度(暗埋段到沉管段)的平滑过渡,复杂的接口问题包括几何尺寸问题、岩土问题和结构问题等。

2.3.1 几何尺寸接口问题

连接沉管段和人工岛/暗埋段隧道的过渡段非常复杂,因为是人工岛和隧道分阶段施工(包括人工岛填海造陆,护岸结构施工,沉管隧道基槽施工,基坑,围护结构施工以及桩基施工等),各施工段之间距离非常近,相互干扰大;使得过渡段受到很多变化因素的影响,尺寸很容易出现错误或者不一致,又因为项目大,区段划分多,设计单位通过更多的沟通交流和提供这部分尽可能多的横向和纵向断面图来保证几何尺寸接口的统一。

2.3.2 岩土接口问题

隧道所处位置(隧道和人工岛)的地质条件相对较差且受时间因素影响而变化,在较短的距离范围内,地质剖面也有很大变化。同时各设计的组成部分受岩土条件很大影响。在大型的基槽开挖并进行基槽处理的土体卸载区域附近又同时进行大规模的填海造陆进行加载,人工岛随时间存在长期较大的沉降问题,填海之前的人工岛工程,同时也要进行多种地基处理,使得这部分的设计工作变得更加复杂,人工岛上暗埋段隧道的基础设计必须适应这些情况,这部分的施工工序进行了专门设计和审查。

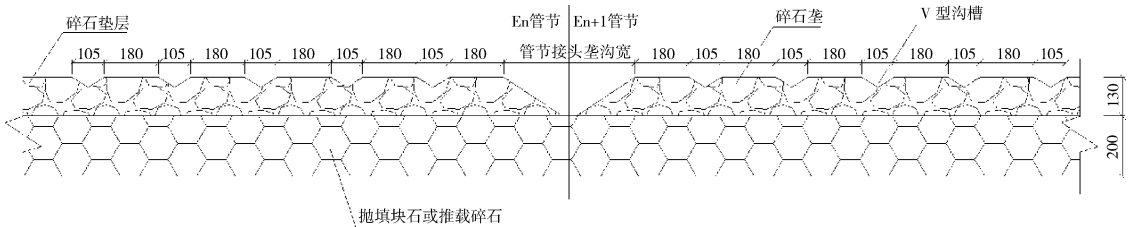
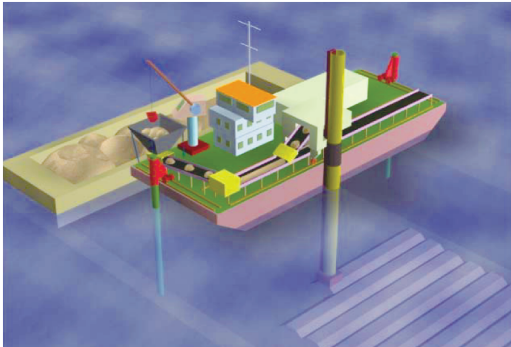


图8 隧道管节组合基础垫层示意^[7]

Fig. 8 Composite foundation bed for tunnel element^[7]



(a) 碎石基础垫层施工示意



(b) 碎石整平船实景图

图9 碎石整平船实景图 and 基础垫层施工示意图

Fig. 9 Gravel bed installation machine (left: indicative, right: real)

2.3.3 结构接口问题

首先要明确整个沉管隧道施工过程和其带来的复杂影响:首先进行基槽开挖疏浚,然后进行管节沉放、接着进行管节两侧和顶部回填锁定、最终隧道顶部逐步回淤到原海床面。基槽开挖疏浚将引起基槽底部隆起,随着隧道施工的逐步进行和上部压载的不断增大,隆起逐渐减弱,最后隆起将转变成沉降。另外沉管隧道本身只会经历整个隆起过程的一部分,因为在沉管沉放之前地基已经发生了一部分隆起。

最后设计选择的沉管段和暗埋段之间过渡段的堆载预压+刚性PHC桩复合地基方案,可以比较好地实现平顺过渡,另外PHC桩基和隧道的连接也很重要,要在海上条件下完成施工,因此必须考虑较大的施工容差。

可以得出的结论是应根据施工过程对下层土与时间的关系进行复杂的三维岩土过程(模拟)工作,即使采用最先进的三维地质有限元模型,对这些过程的预测也非常困难和准确。虽然沉管隧道本身能够承受一定的差异沉降,初步设计阶段可以预见将发生的沉降类型以及相关的差异沉降值还接近敏感的临界状态。

施工图设计阶段,设计开发了最先进的三维有限元模型,在模型中对过渡段在各个不同的施工阶段加以考虑。还根据施工中大范围的监控计划对该模型进行验证。这使设计单位根据工程进度做出更可靠的预测。这些信息可用于确认设计决策或者在设计/施工(逆向分析)中进行调整/优化。最终沉管隧道的基础施工质量非常好,总沉降和差异沉降都远小于设计值,这样的结果反过来让沉管隧道的结构更安全,同时也促成了一些优化和创新,比如纵向设计中保留临时预应力的创新。

2.4 浮运和沉放

本项目管节(尺寸约为 $180\text{ m} \times 38\text{ m} \times 11\text{ m}$,重量约7.6万t)是世界上体量最大最重的沉管隧道管节之一,浮运和沉放临时阶段对隧道管节的设计至关重要,本隧道管节需要在非常恶劣的海洋环境中进行浮运和沉放,需要明确和评估存在的各种风险并尽早设计预防和补救措施,采用基于风险的方法进行设计和施工决策,在昂贵的设计措施与可接收的风险水平之间寻求平衡。影响浮运沉放的因素有:管节预制方式和地点,传统干坞还是工厂化预

制,管节的生产周期和施工组织,临时系泊区的地点和系泊方式,海上浮运方式,超大水深的沉放设备和方法以及精确定位测量要求,天气、波浪和水流的精确预测系统,回淤问题等。

2.4.1 管节预制厂

管节预制地点影响到浮运的距离和海上的风浪条件,所以是浮运设计的可行性、风险和造价的关键影响因素。设计综合比选后选择了距离沉放点10 km左右的桂山牛头岛(如图10所示),运距短但缺点是这是一个相对比较孤立的岛,岛上基础设施不发达,水电原材料供应需要着重考虑。经过和传统干坞法的比较,本项目在中国第一次也是世界上第二次采用工厂法预制隧道管节(世界上第一个案例为厄勒海峡隧道,如图11所示),本项目也是世界上最大的沉管预制工厂,大体积混凝土管节预制工艺对本项目是一个非常大的挑战。

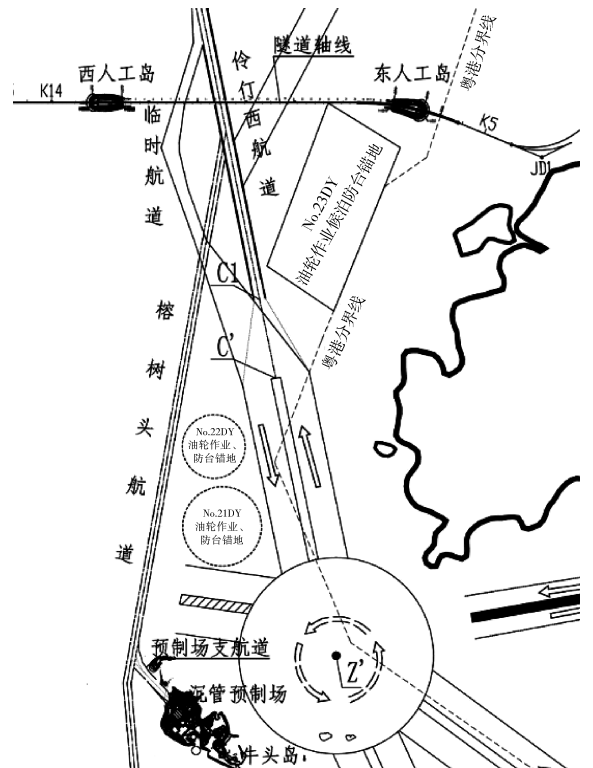


图10 港珠澳大桥沉管隧道施工海域^[8]

Fig. 10 HZMB construction sea area of immersed tunnel

预制厂内设置两条300 m余长的流水生产线,集成了钢筋加工、钢筋笼绑扎、混凝土浇筑、管节一次舾装、深浅坞蓄排水及管节起浮横移等全部156道工序,全景图见图12。管节生产采用了世界先进的大体量钢筋笼绑扎技术、两套世界最大液压



图 11 厄勒海峡通道沉管预制厂、浅坞、深坞全景图
(ØresundsbronKonsortiet 照片)

Fig. 11 Øresund tunnel element production factory, shallow and deep dock (photo from ØresundsbronKonsortiet)



图 12 港珠澳大桥沉管预制厂、浅坞、深坞全景图
(港珠澳大桥管理局照片)

Fig. 12 HZMB tunnel element production factory, shallow and deep dock (photo from HZMBA)

钢模板、世界上最高精度的顶推设备。每一道工序都关系着 120 年的设计使用寿命，每一个过程都充满风险，每一个环节都关乎产品质量^[11]。

为了保证超级沉管顺利生产，建设者先后开展了 6 次现场小尺寸模型试验，2 次足尺模型试验，进行 18 个人工岛沉箱混凝土浇筑验证，优选出满足超大型沉管性能要求，并具有低水化热、低收缩的混凝土配合比，综合采用多种温控技术，实现从骨料堆放到混凝土入模的全程温度控制，极大提高了混凝土的抗裂性能，为保证沉管隧道水密性提供了坚实的保障。

每节沉管分为八个小节段，预制第一节沉管时，第一个小节段生产耗时长达一个多月。随后随着操作和施工技术的逐步熟练和成熟，每个小节段生产的耗时逐步减少，从半个月到 10 d，并最终稳定在 8 d 一个小节段。也就是说两条生产线同时作

业，仅仅用时两个半月时间，建设者们便可完成两节巨型沉管的预制^[11]。每一节节段在工厂内预制完成，采用液压顶推设备顶推至浅坞区，一个管节 8 个小节段逐节累加顶推，最后 8 个节段约 7.6 万 t 的重量全部一起在轨道上顶推至浅坞，过程中需保证所有千斤顶的联动、均匀、保证不出现混凝土裂缝，如图 13 所示。



图 13 E22 管节整体长距离顶推施工完成 (叶常清摄)

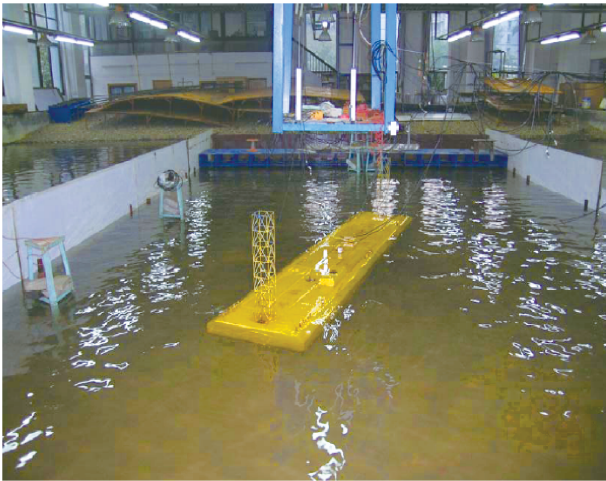
Fig. 13 Long distance jacking of heavy element
(photo by YE Changqing)

2.4.2 浮运沉放过程设计内力

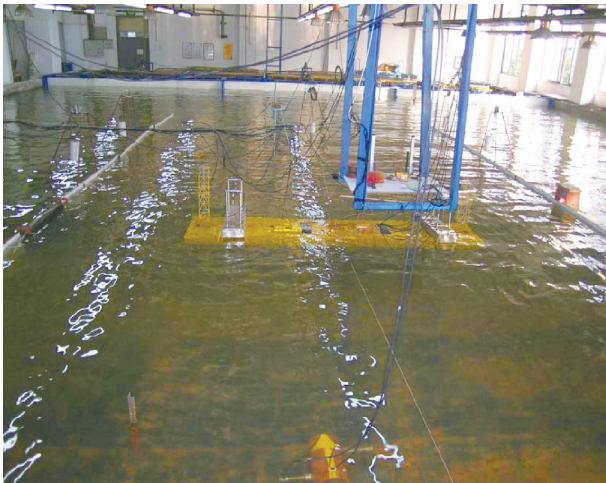
浮运沉放设计的重点是整个过程不同阶段设计内力的计算(弯距、扭矩、剪力和轴力)和起浮、沉放过程的竖向稳定性等，牵涉的因素有管节形状和尺寸、当地的风浪流情况、水深和力学影响等。与类似项目一样，本项目也在前期开发了先进的数学模型和物理模型，采用数学模型明确设计的关键事项，然后来定义和建立物理模型，最后再用物理模型的结果(如图 14 所示)来校正数学模型并执行不同阶段、不同波浪条件下不同的参数分析，从而确定设计内力。同时在每一个管节的实际浮运沉放过程中，根据实际受力情况可再进行后续管节受力的矫正和调整。

2.4.3 浮运沉放设计理念

隧道管节设计如果必须适应所有运输和沉放的波浪和气候条件，则在结构设计或造价上是不可行的，所以浮运沉放设计理念是基于波浪气候预报系统的决策模型，通过收集到尽可能多已有的波浪气候信息来开发浮运沉放的天气窗口预测模型，同时要在沉管所在位置放置监测仪器收集更多现场补充数据，从而决策每一次浮运沉放的时间。这一理念在厄勒海峡通道和韩国釜山沉管隧道的浮运沉放过



(a) 管节浮运物理模型试验



(b) 管节沉放物理模型试验

图 14 浮运沉放物理模型试验

Fig. 14 Physical model test of transport and immersion phase

程中得以成功实施, 该两个工程管节浮运的图片详见图 15 和图 16。港珠澳大桥沉管隧道将这一理念得到进一步完善和发展, 建设者开发了一整套适应本项目的浮运沉放系统, 涉及沉管安装施工组织设计、沉管隧道基础、基槽清淤、作业窗口、沉管浮运、沉管安装、安全风险、测量控制等施工专项方案和系统。港珠澳大桥沉管 E30 管节的浮运沉放图片如图 17 所示。三个项目图片相比, 浮运沉放过程看上去都非常类似, 其实厄勒海峡通道的天气和海况条件最好, 而港珠澳大桥沉管隧道施工海域的天气和波浪流条件最复杂、管节体量最大、天气窗口条件更苛刻、航道条件更复杂, 图中已看出港珠澳大桥沉管浮运时使用的拖轮数量远多于前两个项目。



图 15 韩国釜山沉管管节的浮运沉放 (Mergor 照片)

Fig. 15 Element transport and immersion of Busan Geoje (Photo Mergor)



图 16 厄勒海峡通道首节沉管的浮运 (照片 ØresundsbronKonsortiet)

Fig. 16 Transport of Øresund first tunnel element (Photo from ØresundsbronKonsortiet)



图 17 港珠澳大桥沉管 E30 管节的浮运 (薛安平, 陈立通 摄)

Fig. 17 Transport of E30 of HZMB tunnel (Photo by XUE Anping and CHEN Litong)

2.5 最终接头

沉管隧道最后一节沉放的管节不是直接与之前沉放的管节或者岛上现浇暗埋段对接, 其对接位置预留一定的空隙, 空隙典型宽度为 1.5~2.0 m 宽, 空隙处填充的短管节是在现场通过干作业或者湿作

业(水下)浇筑完成,这个短管节称为沉管隧道的最终接头。最终接头施工是每一个沉管隧道的难点,最终接头不但需要平衡锁定静水压力,同时要与隧道管节要满足同样的强度、水密性和耐久性。

港珠澳大桥沉管隧道最终接头设在 E29 和 E30 之间,位置见图 2,初步设计采用传统止水板最终接头,施工需要大量的临时工程包括水下临时工程,水下施工工期预计在 6 个月以上。施工图阶段为了提高施工质量和效率、减少工期风险,研究采用了创新设计,为上宽下窄的 V 形,采用钢壳内灌注混凝土形成的三明治组合结构(见图 18),全钢壳三明治组合结构用于沉管隧道到目前为止还仅在日本采用过,本项目借鉴学习了日本的三明治组合结构设计和施工经验和日本新型的最终接头 V 型块体工法,该工法是将 V 型块体插入沉管隧道最终的连接空隙,利用自重和楔形水力压接原理即 V 型块体顶底面的水压力差,使得预设已在已沉放管节端面上的 GINA 止水带充分压缩,实现止水,为完成最终接头提供干施工条件^[12-13],见图 19(a)。而港珠澳大桥沉管隧道的最终接头形式见图 19(b)。

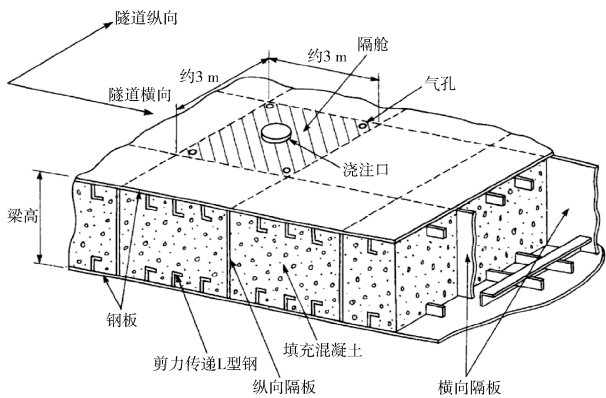
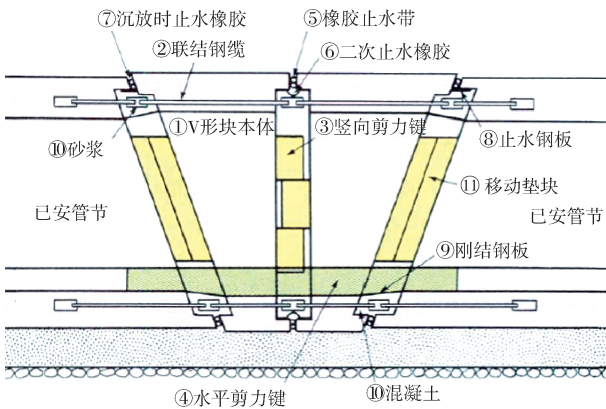
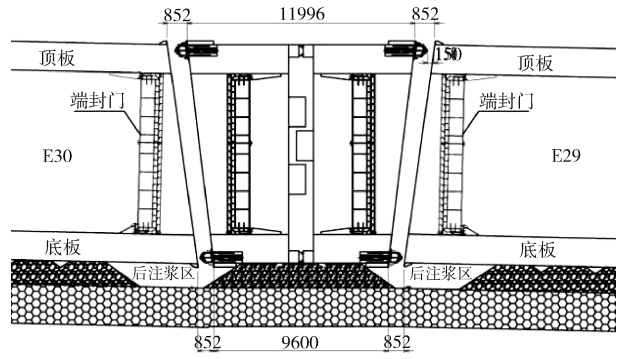


图 18 钢壳三明治组合结构示意图^[7]

Fig. 18 Steel sandwich structure^[7]



(a) 日本 V 型块体工法^[13]



(b) 港珠澳大桥沉管隧道整体预制式工法^[7]

图 19 最终接头型式

Fig. 19 Type of closure joint

港珠澳沉管最终接头采用整体预制式最终接头设计,在陆地工厂制造完成钢壳本体结构(图 20),然后在钢壳内按照划分的 200 多个分仓分阶段逐个灌注高流动性免振捣混凝土形成组合结构。最终接头加上各种临时构件后总重量达 6 000 t。

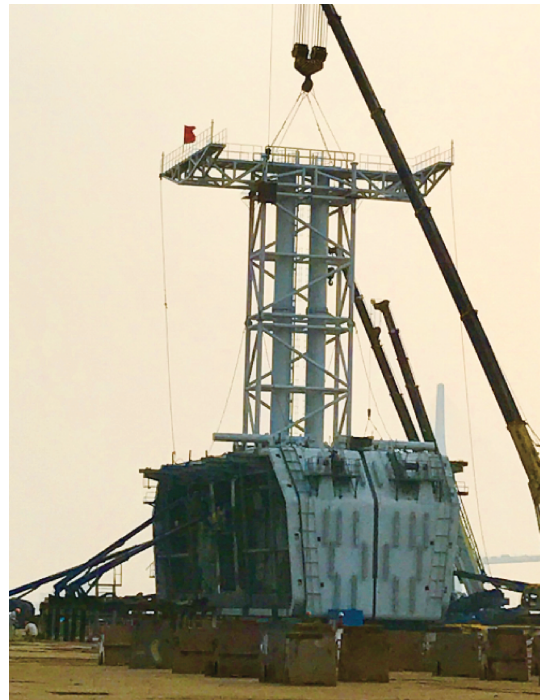


图 20 在南通制造过程中的最终接头本体钢壳结构 (顶部为测量塔,李英摄)

Fig. 20 Closure joint steel shell structure produced in Nantong (Top is survey tower, photo by LI Ying)

2017 年 5 月 2 日作为选择的作业气象窗口,最终接头被运输到位,采用世界最大单臂起重 1.2 万 t 浮吊吊装下沉(图 21),顶推内藏在最终接头内的千斤顶系统压缩临时 Gina 止水带实现最终接头和

对接的管节与海水隔离而临时止水,抽排结合腔水,形成沉管内干作业环境,在管内干环境,分别实现最终接头与E29、E30结构的焊接刚性连接,实现沉管贯通。

本最终接头与日本预制接头相比,根本不同点在于止水原理不同,本项目止水采用主动式水平止水(通过主动控制的千斤顶顶推Gina压缩止水),日本方法采用重力式被动止水,因而两者与止水系统相匹配的所有装置和设施都完全不同;同时本项目的整体预制安装式最终接头可实现更快速安装,大幅减少潜水作业量,结构性工作主要为工厂预制及沉管内条件作业,工程质量更可控。



(a) 最终接头吊放入水



(b) 1.2万t浮吊船和沉放驳

图21 最终接头安装(新华社照片)

Fig. 21 Installaiton of closure joint (photo from Xinhuanet:)

2.6 耐久性

2.6.1 港珠澳大桥120年设计使用寿命的挑战

本工程主体结构的设计使用寿命为120年,在

中国大陆第一次对基础设施提出如此高的要求,没有现成的规范可以借鉴和使用。自然地理位置及工程结构决定了港珠澳大桥处于严酷的腐蚀环境中。可能存在的腐蚀因素有:(1)海水氯离子强腐蚀环境;(2)深达40多米深水头压力下沉管隧道混凝土结构的抗渗;(3)水下及海泥潜在的硫酸盐、镁盐等化学侵蚀及盐结晶侵蚀;(4)环境及交通车辆尾气引起的混凝土结构碳化等等,沉管隧道混凝土的配合比、材料、浇筑质量、抗氯离子渗透能力都对保证耐久性起着重要作用。耐久性要求是一个非常综合的要求,覆盖了整个项目的方方面面。针对本项目需要制定了专项耐久性设计和施工标准、裂缝控制标准、砼配制技术等,同时充分借鉴欧美成熟的经验和规范。

2.6.2 设计方法和实施

借鉴欧盟Dura Crete项目的建议标准和《fib Mode Code for Concrete Structun》,在初步设计阶段,进行了耐久性专题研究,在施工图设计阶段进一步深化。基于港珠澳大桥实际环境和材料劣化模型的耐久性可靠度设计方法,即利用与港珠澳大桥具有相似腐蚀环境的湛江港暴露试验站长达20多年的暴露试验和华南海港工程的耐久性调查数据,进行与环境因素、材料性能及施工因素相关的耐久性模型参数概率统计分析,得出了混凝土保护层厚度、表面氯离子浓度、临界浓度以及氯离子扩散系数等模型参数的统计分布规律,并在一定的目标可靠指标水平上进行了耐久性各模型参数的分项系数计算,从而确定了具有一定目标可靠度的耐久性设计模型的输入参数,最终建立起具有预定可靠性的“设计使用年限-保护层厚度-混凝土氯离子扩散系数”之间的三元定量关系。这种基于实际环境和材料劣化模型的耐久性设计方法,在技术上是可靠的,所制定的满足120年实际使用年限的耐久性控制指标也是相对准确的。在此基础上,业主分别颁布了两本耐久性的项目专用标准:《港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计指南》^[14]和《港珠澳大桥混凝土结构耐久性质量控制技术规程》^[15],分别指导设计和施工。

尽管通过理论研究和计算,得出了一整套满足120年设计使用寿命的设计和施工要求,很显然,实际寿命还需要在施工过程中得以实现。不充分的砼密实度、不恰当的钢筋设计(影响施工性)、不合

理的混凝土配合比等等因素都可能导致预期的设计寿命达不到,那么作为项目的业主方港珠澳大桥管理局从一开始就意识到这个问题并制定制度和采取措施,与建设单位合力来减少和避免这些不合格质量行为的发生。最终回过头来看我们已经实现过的成果,我们的项目做得非常成功,能够达到最高的国际质量标准。在工程投入使用之前,业主将安排对主体结构及其附属构造物的技术状况进行第一次全面检查及等级评定,从而建立项目的初始基准状态。其目的是掌握使用前的初始缺陷、损伤、劣化的有无,同时进行耐久性初始评估,和耐久性再设计(如果需要),为使用阶段提供基准数据。

完工前,项目将完成运营与维护手册的编制,编制人员为直接参与项目设计、施工、咨询、管理过程的人员组成,熟悉项目全过程,为将来120年的设计使用寿命过程中,可建立准确、良好的项目检查、检测和维护、维修策略(包括结构和设备),这是确保本项目耐久性设计目标实现的重要组成部分,同时也是确保本项目三大建设目标之一“为用户提供优质服务”的基本手段。所以本项目的检查和维护策略贯穿以全寿命的理念指导设计和施工,以预防性维护为宗旨,以高效安全运营为目标。

3 对本项目沉管隧道创新的想法

像港珠澳大桥这样的大型基础设施项目为创新提供了非常好的条件和环境,因为如此大规模的项目才有机会为研究和科技创新预留更多合适的预算。此外这些大型基础设施项目经常包含需要超越当今最先进技术的挑战,所以可以看到世界上那些规划建设大型基础设施项目的国家都开展了各种各样的研究来促进项目的技术创新,因此技术水平也从大型项目中取得了极大的提升。

港珠澳大桥沉管隧道工程项目面临许多挑战,小结前面的主要挑战包括:

- 1) 非常差的岩土条件。
- 2) 超长的沉管隧道长度,接近6 km。
- 3) 隧道沉放深度很深(以便将来通航30万t油轮,吃水深度近30 m),双向三车道(横断面大跨度)、较高的地基载荷(隧道上部回淤>20 m)。
- 4) 每个管节重达7.6万t,世界上最重的管节。
- 5) 施工过程中所遇到的变化多端的恶劣气候和波浪条件。

6) 恶劣的海洋环境(耐久性)。

沉管隧道工程引入了相当一些新的技术来应对项目的各种挑战,将来国际隧道行业都可从这个项目受益。以下为对几个主要创新案例的看法:

3.1 沉管隧道管节永久预应力方案

管节纵向永久预应力方法(即永久保留沉管隧道管节节段接头之间的临时预应力)结合了节段式(柔性)和整体式(刚性)隧道方案的优点,保留了最初因浮运及沉放而设的临时后张拉预应力而不切断。柔性隧道通常比整体式隧道经济得多,但柔性隧道在浮运及沉放阶段需要设置临时预应力张拉将各个节段连接成一个管节整体,在管节安装完成后剪断临时预应力后可大大降低受力。

海外隧道的浮运及沉放条件非常具有挑战性,需要设置更大量的后张拉预应力。本项目方案就非常有意思,因为临时阶段所配置的后张拉预应力可以承受最终运营阶段隧道全刚性行为所导致的更大受力。本项目保留后张拉预应力不切断可以提高隧道的性价比,不但节省了所有预应力剪断工程,而且极大地降低甚至避免隧道节段接头的运动,这对隧道水密性是有益的。施工图设计中,当后张拉预应力的抗弯能力被超过时,允许节段接头有少许的转动,从而可以满足接头的受力要求;同时,节段接头采用法向力(后张拉预应力是其中重要组成部分)产生的摩擦力来提高节段接头的抗剪能力。

Piet Hein 隧道是世界第一个保留了后张拉预应力的隧道,该隧道采用了永久预应力的一些基本理念,然而中国工程师们真正将这个�方法提升了一个台阶,实现了真正的创新,经过各方大量的研究计算证明了这次变更的可行性,这种方法最终在工程中得以实现,这很好地展示了工程中的挑战是如何激发创新的。

3.2 隧道管节生产和安装的新型设备

项目的挑战包括超长的海底隧道长度是当今世界最长的公路隧道、隧道沉管管节的生产制造(一个管节重量大约7.6万t,也是现如今世界之最),要在规定可接受的工期内完成预制,要在最深接近水下50 m的海洋工况条件下连续完成沉管管节安装并达到苛刻的精度要求。生产制造及安装隧道管节的世界现有技术水平在这个项目得到了提升,如隧道管节的浇筑和顶推设备和工艺,这种方法仅在丹麦的厄勒海峡隧道使用过。设备中尤其是本项目

针对超大超重管节设计的顶推系统的改进和提升,降低了新浇筑混凝土的应力,极好地减少或避免了新浇筑混凝土的裂缝问题。

其它专门为项目研发的主要设备还包括:

- 1) 碎石基床整平安装设备。
- 2) 高效碎石基床清淤设备,而没有影响碎石基床质量。
- 3) 沉放管节的测量系统,严格的误差控制。
- 4) 管节沉放系统(大型沉放驳)。

3.3 地基处理和加固技术

项目位置局部土质极为软弱而且类型变化多样,深埋隧道管节要承受非常高的回淤覆土荷载(本项目达20 m深),隧道横断面跨径大,这些都使得港珠澳大桥工程隧道工程和其他项目非常不同。采用挤密砂桩的大型基础处理方法很成功,对靠近人工岛及人工岛位置非常软弱的土体条件进行加固,为人工岛及靠近人工岛的隧道段提供了坚实的基础,并取得了很好的基础刚度过渡,使沉降保持在可接受的范围。

3.4 为满足120年设计使用寿命要求专门研发的混凝土配合比

为了大批量进行大体积隧道管节生产,同时满足在恶劣的海洋环境条件下120年设计使用寿命的耐久性要求,对混凝土配合比和施工措施进行了大量的研究解决了混凝土强度、质量、耐久性和水密性等的挑战。

3.5 最终接头方案

最终接头方案基于V型块基本原理,结合采用了若干不太常用的已有技术,认为是针对本项目富有挑战性气候条件最合适的方案,大大降低和限值了海上施工作业时间。方案也同时包含了一个全三明治钢壳隧道设计,使中国的设计人员和施工人员能够熟悉这种只在日本采用过的方案。利用最终接头这种小型的钢壳隧道方案,再附加大量(包括足尺)模型试验的支持,可对以后中国的隧道项目采用全三明治钢壳隧道方案可行性进行验证,并有可能大规模地应用于隧道项目中。

4 结论

港珠澳大桥沉管隧道的建设实现了土建工程的技术进步和施工装备的提升,约6 km长沉管隧道的纵向计算分析是一项综合技术能力的体现;合理

的地基处理方式和质量控制是保证该隧道长期使用的根本保障;近300个不同形式隧道接头的结构设计和抗震措施战胜本项目的技术挑战;120年永久结构设计使用寿命的耐久性设计是合理全寿命理念的实践;大型专用施工装备的研发和应用将提升沉管隧道施工技术的跨越。

港珠澳大桥沉管隧道的建设将推进该领域的技术发展,在敏感的海洋环境和苛刻的建设条件下,采用世界上较高的设计和施工技术标准,面对沉管隧道设计与施工的极限挑战,通过所有参与建设工作者的共同努力,创造了沉管隧道建设史的辉煌,它的成功建设将是世界沉管隧道技术的里程碑。

机遇与挑战共存,辉煌依托不懈努力。

参考文献:

- [1] 中交公路规划设计院有限公司设计联合体. 港珠澳大桥初步设计文件报告[R]. 珠海: [s. l.], 2010.
HPDI JV. HZMB preliminary design reports [R]. Zhuhai: [s. l.], 2010.
- [2] 上海市政工程设计研究总院咨询联合体, 荷兰隧道工程咨询公司 TEC. 港珠澳大桥初步设计文件咨询审查报告[R]. 珠海: [s. l.], 2010.
SMEDI JV. HZMB preliminary design review reports [R]. Zhuhai: [s. l.] 2010.
- [3] 李英, 陈越. 第二十届全国结构工程学术会议特邀报告: 港珠澳大桥岛隧工程的意义及技术难点[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊2): 67-77.
LI Y, CHEN Y. Invited presentation in the 20th national conference on structure engineering: the importance and technical difficulties of tunnel and islands [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Supp. 2): 67-77.
- [4] SU Q K, CHEN Y, YING L, et al. Hongkong Zhuhai Macao Bridge link in China-stretching the limits of Immersed Tunnelling [C]. Helsinki: International Tunnel Association Press, 2011.
- [5] 中交公路规划设计院有限公司. 港珠澳大桥工程可行性研究报告[R]. 珠海: [s. l.], 2008.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. HZMB feasibility study report [R]. Zhuhai: [s. l.], 2008.
- [6] 李英, 汉斯·德维特. 节段式沉管隧道节段接头水密性设计与施工细节[J]. 地下工程与隧道, 2015(增刊1): 46-48+55.
LI Y, DE Wit J. Water-tightness and construction details of segment joint of immersed tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2015(Supp. 1): 46-48+55.
- [7] 中交公路规划设计院有限公司设计联合体. 港珠澳大桥主体工程岛隧工程施工图设计第四篇第一册: 总体设计(共三个

- 分册)[R]. 珠海: [s. l.], 2016.
- HPDI JV. Basic design, HZMB main bridge tunnel&islands part detailed design, Chapter 4, Volumn 1; total three sub-volumns [R]. Zhuhai: [s. l.], 2016.
- [8] 中交公路规划设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港珠澳大桥主体工程详勘地质报告(隧道) [R]. 珠海: [s. l.], 2009.
- CCCC Highway Consultants Co., Ltd., CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd. HZMB detailed survey report (tunnel) [R]. Zhuhai: [s. l.], 2009.
- [9] 中交公路规划设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港珠澳大桥主体工程初勘地质报告(隧道) [R]. 珠海: [s. l.], 2009.
- CCCC Highway Consultants Co., Ltd., CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd. HZMB preliminary survey report (tunnel) [R]. Zhuhai: [s. l.], 2009.
- [10] 荷兰隧道工程咨询公司/上海市政工程设计研究总院咨询联合体. 港珠澳大桥主体工程岛隧工程施工图设计第四篇第一册: 总体设计咨询报告[R]. 珠海: [s. l.], 2017.
- TEC/SMEDI JV. HZMB tunnel &islands basic design review report [R]. Zhuhai: [s. l.], 2017.
- [11] 佚名. 五年浇筑百万方混凝土, 世界最大沉管预制厂基本完成历史使命 [N]. 珠海特区报. 2017-04-24(04).
- Anon. Millions of concrete casted in 5 years, world largest immersed tunnel element production factory finishes its mission [N]. Zhuhai Daily, 2017-04-24(04).
- [12] HANS de Wit, 李英. 港珠澳大桥沉管隧道最终接头培训材料 [R]. 珠海: [s. l.], 2015.
- DE Wit J, LI Y. Training materials for HZMB tunnel closure joint [R]. Zhuhai: [s. l.], 2015.
- [13] 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(4): 1-4.
- LIN M, SHI F S, BIAO L. New construction method of Japanese immersed tunnel closure joint [J]. China Harbor Construction, 2012(4): 1-4.
- [14] 港珠澳大桥管理局. 港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计指南 [R]. 修订版. 珠海: 港珠澳大桥管理局, 2013.
- HZMBA. HZMB concrete structure durability design guidelines [R]. Rev. ed. Zhuhai: HZMBA, 2013.
- [15] 港珠澳大桥管理局. 港珠澳大桥混凝土结构耐久性质量控制技术规程 [R]. 修订版. 珠海: 港珠澳大桥管理局, 2013.
- HZMBA, HZMB concrete structure durability quality control specifications [R]. Rev. ed. Zhuhai: HZMBA, 2013.

(责任编辑 郑文棠)

【本刊讯】2016年4月21日, 中国能建广东院总工程师、《南方能源建设》主编裴爱国一行8人, 在荷兰隧道工程咨询公司李英博士陪同下, 调研了港珠澳大桥管理局和桂山牛头岛沉管预制厂(港珠澳大桥海底隧道沉管预制厂)。港珠澳大桥管理局副总工钟辉虹博士、总工办主管方磊博士向广东院讲解了港珠澳大桥建设过程的项目管理、人工岛设计和施工工艺、海底隧道沉管预制/顶推/浮放/防渗和对接技术。广东院主办的《南方能源建设》期刊与港珠澳大桥管理局主办的《港珠澳大桥》杂志相互赠阅并建立学术交流联系机制。本次调研拓宽了广东院对海底隧道设计施工的认识, 对广东院未来承接核电引水隧洞、电缆隧道等项目具有重要的工程借鉴意义。



中国能建广东院调研团队与港珠澳大桥管理局合影

(左四 李英博士、左五 钟辉虹博士、左六 裴爱国总工/主编、左七 方磊博士)