

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.010

水下隧道中人工岛建设现状及主要问题

朱伟^{1,2}, 王璐^{3,4}, 钱勇进^{3,4}, 方忠强^{1,5},
陆凯君^{3,4}, 魏斌^{3,4}, 孟立夫^{3,4}

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 河海大学水科学研究院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;
5. 水下隧道智能设计、建造与养护技术与装备交通运输行业研发中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 针对跨海水下隧道工程中人工岛建设的研究现状及主要问题, 收集了典型的跨海水下隧道人工岛的工程实例, 总结了跨海水下隧道人工岛的地基处理、围堰构建和填土加固的关键施工技术, 指出软弱地基处理及填土加固方案组合和工序优化以及疏浚土在国内人工岛建设中利用较少是跨海水下隧道人工岛建设过程中两大主要问题; 基于现有的人工岛建设技术, 人工岛建设的未来发展方向是通过预制人工岛构件实现绿色快速筑岛。

关键词: 水下隧道; 人工岛; 地基处理; 围堰; 填土加固; 工程实例

中图分类号: P752 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2023)03-0072-12

Research status and main problems of artificial island construction in underwater tunnel

ZHU Wei^{1,2}, WANG Lu^{3,4}, QIAN Yongjin^{3,4}, FANG Zhongqiang^{1,5}, LU Kaijun^{3,4}, WEI Bin^{3,4}, MENG Lifu^{3,4}
(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2. Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

5. Research and Development Center of Transport Industry of Technologies and Equipments for Intelligent Design, Construction and Maintenance of Underwater Tunnel, Nanjing 210014, China)

Abstract: In view of the research status and main problems of artificial island construction in the underwater tunnel engineering, this study collects typical engineering cases of artificial island in the underwater tunnel projects, and summarizes key construction technologies of foundation treatment, cofferdam construction and fill reinforcement of artificial islands. Two main problems in the construction process of underwater tunnel artificial islands were proposed: firstly, the combination of schemes and process optimization for the soft foundation treatment and the soil filling reinforcement; secondly, the utilization rate of dredged soil in the construction of artificial islands in China was relatively low. Based on the existing construction technology of artificial islands, the future development direction of artificial island construction is to achieve the green and rapid island building through prefabricated artificial island components.

Key words: underwater tunnel; artificial island; foundation treatment; cofferdam; fill reinforcement; engineering case

随着社会经济以及科学技术的发展, 穿江越海的长距离隧道工程越来越多, 使用盾构法修建长距离跨海隧道时, 采用隧道海底对接的方式能够缩短盾构机单向单线的开挖距离^[1], 此外, 人工岛的建设也在跨海隧道中得到广泛使用。功能上跨海水下隧道人工岛主要是用于桥隧转换或隧道始发, 也具有缩短隧道施工距离、作为隧道通风井、提供隧道检修场地等功能。与填海造陆相比, 跨海水下隧道人工岛大多处于海的中央, 离岸较远, 水深相对较深。建设跨海交通连接线时可以采用桥梁和隧道的形式, 考虑到通航、距离和环境等

基金项目: 2020 年江苏省省级战略性新兴产业发展专项资金(苏发改高技[2020]645); 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX20_0436); 中央高校基本科研业务费专项(B200203081)

作者简介: 朱伟(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事盾构隧道、环境岩土工程研究。E-mail: zhuweiteam.hhu@gmail.com

通信作者: 王璐(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事盾构隧道研究。E-mail: luwang@hhu.edu.cn

引用本文: 朱伟, 王璐, 钱勇进, 等. 水下隧道中人工岛建设现状及主要问题[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 72-83.

ZHU Wei, WANG Lu, QIAN Yongjin, et al. Research status and main problems of artificial island construction in underwater tunnel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 72-83.

因素,出现了使用岛屿(包括天然岛屿和人工岛)将桥梁和隧道组合的桥岛隧组合越江、跨海通道。表 1 为国内外 12 条著名的桥岛隧组合跨海通道和 1 条岛隧组合的跨海通道。

表 1 结合岛屿的跨海通道
Table 1 Cross-sea channels combining islands

工程名称	国家	竣工时间	桥梁总长/km	隧道总长/km	岛屿		隧道类型
					类型	数量	
旧金山-奥克兰海湾大桥	美国	1936 年	6.243	0.16	天然岛	1	山岭
汉普顿路桥隧道(HRBT)	美国	1957 年	5.60	4.56	人工岛	2	沉管
切萨皮克湾跨海大桥	美国	1964 年	22.20	3.20	人工岛	4	沉管
Monitor-Merrimac 纪念桥隧	美国	1992 年	5.10	1.46	人工岛	2	沉管
东京湾跨海公路及其联络线	日本	1997 年	4.40	9.60	人工岛	2	盾构
大贝尔特桥	丹麦	1997 年	13.40	8.02	天然岛	1	盾构
厄勒海峡大桥	丹麦-瑞典	2000 年	7.85	4.05	人工岛	1	沉管
上海长江隧桥	中国	2009 年	16.60	8.90	天然岛	1	盾构
釜山巨济大桥	韩国	2010 年	3.52	3.20	天然岛	2	沉管
港珠澳大桥	中国	2018 年	22.90	6.70	人工岛	2	沉管
深中通道	中国	2024 年	17.20	6.85	人工岛	2	沉管
汉普顿路桥隧道拓展项目	美国	2025 年	加宽 HRBT 的桥梁	2.40	人工岛扩建	2	盾构
费马恩隧道	丹麦-德国	2029 年		18.10	天然岛	2	沉管

较早的桥岛隧组合工程为美国的旧金山-奥克兰海湾大桥^[2],距今约有 90 a 的建造史,但是其隧道为山岭岩石隧道,不同于表 1 中其他的跨海通道工程。表 1 的 13 个工程中有些直接利用天然岛屿进行桥隧转换,如美国的旧金山-奥克兰海湾大桥、丹麦的大贝尔特桥、中国的上海长江隧桥和韩国的釜山巨济大桥;有些对天然岛屿的沿线进行填海扩建,如连接丹麦和德国的费马恩隧道;更多的工程是通过建造人工岛完成桥隧转换或隧道始发。

与在陆地上的施工不同,台风影响、海水侵蚀、地层软弱等因素使人工岛的建设面临挑战。本文通过相关文献调研对国内外水下隧道人工岛的研究现状进行分析,结合工程实例,总结跨海水下隧道人工岛的主要问题及发展方向,为未来跨海水下隧道人工岛的施工提供一定的借鉴。

1 跨海水下隧道人工岛的工程现状

人工岛是利用工程技术人工建造而非自然形成的岛屿,是一种围海造陆的工程模式。人工岛的建设一般涉及围堰及填土区域的前期地基处理、围堰及护岸的构建和填土加固三方面的建造过程。

1.1 地基处理技术

人工岛建造前期围堰区域及填土区域天然地基处理方法总结见表 2,其中,费马恩隧道是利用疏浚弃土沿两个天然岛屿进行填海造陆,因此与典型的水中建造人工岛有所不同。

表 2 隧道人工岛工程的地基处理方法

Table 2 Foundation treatment methods of tunnel-artificial island project

工程名称	地层	围堰区地基处理	填土区地基处理
东京湾横断道路	冲积土、洪积土	疏浚,换填砂垫层,挤密,深层水泥搅拌桩,钢管桩	深层水泥搅拌桩和挤密
厄勒海峡大桥	冰川沉积物、哥本哈根石灰岩	疏浚表层软弱层	疏浚
港珠澳大桥	淤泥、淤泥质黏土、淤泥质黏土混合砂	疏浚表层软弱层	疏浚表层软弱层
深中通道	淤泥、粉砂、淤泥质土、全风化花岗岩	疏浚表层软弱层,东人工岛近桥墩处打设钢管桩	疏浚表层软弱层
汉普顿路桥隧道拓展项目	淤泥、硬黏土、砂土	疏浚,换填砂垫层,钢板桩,钢管桩,深基础桩,钢管混凝土桩	疏浚,换填砂垫层
费马恩隧道(沿两个天然岛屿填海造陆)	古近纪黏土、冰后期砂、盆地沉积土、冰碛土	疏浚表层软弱层	

大多数海洋人工岛工程都会遇到海相沉积的软黏土地层,若直接在海底堆填砂等筑岛材料,不但会引起填土产生长期、过大的沉降,也会直接导致软土地基发生破坏,因此,比较常见的是预先对海底软土地基进行

处理后再实施填土工程,而疏浚软弱层法、换填砂垫层法、排水固结法和复合地基法是较为常见的地基处理方法。由表2可以看出,围堰区的地基处理方式主要分为两类:

a. 疏浚表层软弱层结合换填砂垫层。以下3种情况可以考虑采用该方式进行地基处理:①当软弱层较薄,或软弱层下方为较硬的岩层时,如厄勒海峡大桥;②虽然软弱层较厚,但是围堰是预制的整体结构,且能插入不透水地层中,如港珠澳大桥;③进行岛屿扩建,且扩建部分用作自然海滩和湿地等,对地基处理的要求不高,如费马恩隧道。

b. 疏浚表层软弱层后使用桩基础进行地基加固。围堰区的地基处理方式除了受软弱层厚度的影响外,也与选择的围堰结构及后续填土的加固技术密切相关。除去适合采用疏浚表层软弱层结合换填砂垫层方式的其他情况下,尤其是有临近建筑物时,则考虑结合桩基础进行地基加固,如深中通道通过打设钢管桩以保持邻近桥墩的稳定性。

1.2 围堰及护岸的构建

围堰是建造人工岛的初期工程,一般对天然地基进行处理后建造围堰,在拟建人工岛海域通过围堰的方式形成造陆界限,在围堰内部进行填土施工。围堰起到挡土结构、稳定填土边坡、与表面棱体一起抵抗风浪的作用,有时也作为码头、填筑的操作平台和交通通路。国内外跨海水下隧道人工岛围堰形式、围堰结构和围堰区域的加固方法见表3。

Table 3 Cofferdam overview for the artificial island of underwater tunnel			
工程名称	围堰形式	围堰结构	围堰区域加固方法
东京湾横断道路	直立式	川崎人工岛:地下连续墙,预制钢筋混凝土沉井;木更津人工岛:钢管桩围堰	川崎人工岛:挤密砂桩和深层水泥搅拌桩;木更津人工岛:打蜂窝式钢管桩,蜂窝间填方的压实采用加实砂桩法
厄勒海峡大桥	斜坡式	抛石围堰	压实
港珠澳大桥	直立式	大直径钢圆筒围堰	围堰外侧采用挤密砂桩处理软基,钢圆筒内回填中粗砂,采用塑料排水板联合堆载预压法
深中通道	直立式	东人工岛:钢板桩围堰;西人工岛:大直径钢圆筒围堰	东人工岛:高压旋喷桩,深层水泥搅拌桩;西人工岛:钢圆筒内回填中粗砂,插入塑料排水板,振冲密实
汉普顿路桥隧道拓展项目	斜坡式	抛石围堰	北岛:压实;南岛:压实,打钢管桩
费马恩隧道	斜坡式	抛石围堰	压实

围堰的形式分为斜坡式和直立式。斜坡式抛石挤淤围堰一般用于处理较薄的淤泥层^[3-5],采用压实法加固围堰。当淤泥层较厚时,抛石挤淤围堰需要消耗大量土石方,抛石过程中会快速产生大量悬浮物,水质发生变化,对生态环境产生不利影响。此时可以考虑采用大直径钢圆桶法^[6-8]、地下连续墙法、钢板桩法和钢管桩法等桩-墙结合的直立式围堰,围堰本身深入到地基深部具有足够垂向承载力的地层中,同时较大的结构刚度也提供了充分的水平承载力。大直径钢圆筒法是为解决在深厚超软弱地层中成岛困难问题而发展出的新型成岛技术,通过将数个预制的钢圆筒振沉至软弱层下具有承载能力的地层中,快速形成围堰,并在钢圆筒内回填中粗砂,利用竖向排水法和深层搅拌桩法等方法加固圆筒内的地基。东京湾横断道路的川崎人工岛采用了内径为98 m的预制钢筋混凝土沉井作为围堰结构,采用挤密砂桩法和深层水泥搅拌桩法进行软基加固,沿岛壁的内外两侧打设两圈钢管桩墙,并用导架结构支撑;在两道钢管桩墙之间进行钢筋混凝土地下连续墙的施工,施工完成后撤除内圈的导架结构和钢管桩墙^[9]。深中通道则采用钢板桩法建造围堰,并设置三道横向钢支撑。

围堰建成后在围堰外侧建造护岸。人工岛护岸的建设涉及地基处理^[10]、位移和沉降^[11-13]、防洪防浪^[14]、生态和景观^[15-16]等多个方面。水下隧道人工岛的护岸主要为抛石挤淤斜坡式,如厄勒海峡大桥、港珠澳大桥、深中通道和汉普顿路桥隧道拓展项目等工程中的人工岛,护岸的地基处理多采用表层疏浚,配合挤密砂桩、深层水泥搅拌桩和高压旋喷桩进行软基加固。

1.3 填土加固技术

形成围堰后,一般会在围堰内展开填土施工。由于人工岛填土在水中进行,通常无法进行边填筑边碾压与陆地类似的压实施工。因此,人工岛填土大多都是在水中抛填,等填料露出水面后在再在表面进行压实施工,或采用地基处理的方法对填筑体进行加固,也有直接将碎石、砂和疏浚土作为填筑材料制作成流动化固化土直接浇筑成型。国内外常见的人工岛填土加固技术见表4。

人工岛填土成陆后一般会作为人工地基进行加固,加固方式主要有压实法、挤压密实法、固结促进法和化学加固法 4 种。

- a. 强夯法为常用的压实法,强夯区域和夯击能需要根据回填土强度和所需地基承载力确定^[17],若邻近有海堤或建筑物,需要采取措施减弱对强夯区域外的影响。
- b. 挤压密实法主要包括挤密砂桩法和振冲密实法。港珠澳大桥工程中,岛体内填砂后,将填砂表面压实整平,然后采用挤密砂桩法进行软基加固,针对堆载区和非堆载区设计相应的挤密砂桩置换率、桩间距和桩深度^[18]。

c. 固结促进法主要包括打设塑料排水板、砂井联合真空预压和堆载预压等方法。在超软弱的淤泥质地基中直接使用塑料排水板会出现明显的排水板弯曲问题^[19]。处理港珠澳大桥人工岛内部软基时,先回填砂形成陆域,插打塑料排水板,采用降水联合堆载预压法加速地基排水固结。其中,西人工岛所用塑料排水板的长度为 23 ~ 38.5 m^[20],堆载预压的超载比为 1.45 ~ 2.1。

d. 化学加固法主要包括高压旋喷桩法和深层水泥搅拌桩法。此外,当以疏浚淤泥为填筑材料时,通过预先加入固化剂进行固化,使用流动化固化土进行浇筑成岛也是最近兴起的一种方法。在日本的中部国际机场人工岛^[21]、羽田机场 D 跑道人工岛^[22]、爱知县东海市海中造岛^[23]及神户港岸壁修复^[24]等工程中都应用该方式进行填筑施工。东京湾横断道路的川崎人工岛和木更津人工岛也将填筑材料制作成流动化固化土进行浇筑,固化材料分别使用浆体(湿式)和粉体(干式)的方法进行混合。填筑斜坡区和平坦区固化土填料的目标强度分别为 1 MPa 和 0.4 MPa,以利于后续盾构机开挖。国内学者也开展了固化淤泥性能的相关研究。朱伟等^[25-26]研究了固化淤泥的基本力学特性;黄英豪等^[27]研究了新拌固化淤泥的流动性和流变参数之间的关系;彭劭等^[28]研究了高分子吸水树脂对固化淤泥无侧限抗压强度、压实性、耐久性 & 干缩性的影响;Wu 等^[29]以大连湾跨海公路工程的人工岛为工程背景,研究了大连湾的淤泥经水泥固化后的强度、流动度、压缩性及渗透特性。但国内目前尚无固化淤泥筑岛的工程经验。

填土加固技术的选择要综合考虑人工岛的用途、回填材料的性质、地基承载力、工程成本和工期要求等,在需要进行桥隧转换或隧道水下对接的区域,填土加固后除了要满足沉降要求外,还要控制强度上限,不能对隧道穿越产生限制。

2 人工岛工程实例

2.1 东京湾横断道路

2.1.1 工程概况

东京湾横断道路是日本一般国道 409 号线横跨东京湾的海上部分,主要由海底隧道、连续梁桥、川崎人工岛和木更津人工岛构成,全长 15.1 km,其中,海底隧道长 9.5 km,桥梁长 4.4 km。木更津人工岛用于桥隧转换;川崎人工岛用于盾构机始发,并作为换气风井。东京湾横断道路的地质剖面如图 1 所示,可以看出盾构机基本在洪积土中开挖,两座人工岛需要在超软弱的冲积土和洪积土中进行地基处理、围堰建造和填土加固。

2.1.2 川崎人工岛

东京湾地震较多,工程要在 0.5 ~ 0.6 MPa 的高水

表 4 人工岛填土加固技术
Table 4 Filling and reinforcement technology of artificial islands in underwater tunnel projects

工程名称	回填材料	填土加固技术
东京湾横断道路	川崎人工岛:泥浆状人工水泥土;木更津人工岛:干式水泥土、川崎人工岛弃土	水泥土,深层水泥搅拌桩法和挤密砂桩法
厄勒海峡大桥	疏浚弃土	预压排水,挤密砂桩法和深层水泥搅拌桩法
港珠澳大桥	清洁砂	塑料排水板法,降水联合堆载预压法,挤密砂桩法,无填料振冲法
深中通道	清洁砂	塑料排水板法,挤密砂桩法,高压旋喷桩法,深层水泥搅拌桩法
汉普顿路桥隧道及其拓展项目	清洁砂,疏浚等工程弃土	钢板桩法,钢管桩法,钢管混凝土桩法
费马恩隧道	疏浚弃土	压实填土法

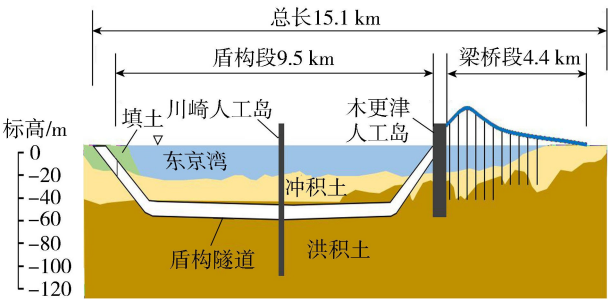


图 1 东京湾横断道路地质剖面

Fig. 1 Geological profile of the Tokyo Bay Aqua-Line

压和超软弱且复杂的地基中施工,整条海底隧道由8台直径为14.14 m的超大型泥水盾构在海底地层中穿越接通。川崎人工岛就是为了缩短盾构的掘进距离而修建的^[30]。因为该区域位于航道的中心,因此在满足空间需求的情况下建造人工岛的面积应尽可能小。按照能够容纳4台直径为14.14 m的盾构机及相应的通风设备、满足盾构机始发等需求,川崎人工岛的顶部宽约为200 m,施工位置在川崎港中离岸5 km的海面,水深约28 m,海底约有30 m的软弱层。

a. 地基处理。川崎人工岛在进行地基处理时,疏浚了海底约5 m的软弱淤泥层,通过铺设砂垫层,采用挤密砂桩法和深层水泥搅拌桩法等进行软基加固,然后进行围堰部分的施工。

b. 围堰。川崎人工岛面积不大,为快速成岛,降低成本,采取沉置一内径98 m的预制圆筒形钢筋混凝土沉井的方式造岛,并采用厚2.8 m、长119 m的地下连续墙作为围堰结构,断面数据见文献^[31]。沿岛壁的内外两侧打设两圈钢管桩墙,并用导架结构作为内支撑,在两道钢管桩墙之间进行钢筋混凝土地下连续墙的施工。施工完成后,撤除内圈的导架结构和钢管桩墙,将地下连续墙作为基坑的防渗帷幕。采用防水板和钢衬以防止川崎人工岛外墙渗水;建造防撞块作为护岸结构以防止与船只发生碰撞并起到减震的作用。

c. 填土加固。在沉井支架下方和隧道通过的区域分别采用挤密砂桩法和深层水泥搅拌桩法进行填土加固。预制内沉井和预制外沉井之间约13 m宽的空间使用砂、少量水泥和粉状泥岩混合制成泥浆状人工填料进行填充,使填土成为水泥土。深层水泥搅拌法和人工填料的材料必须为低强度(约为1 MPa)且均匀,以免妨碍后续开挖。利用泵抽干沉井内的水,并使用大型起重机取出内沉井后,由盾构机进行隧道开挖。建成后的川崎人工岛如图2所示,在隧道掘进过程中,沉井充当了盾构始发竖井,在运营期间作为隧道通风塔。

2.1.3 木更津人工岛

木更津人工岛是一座连接桥梁和隧道,并集大型停车库和旅游、餐饮、娱乐等各种服务设施为一体的建筑物,长约300 m,宽60 m,共5层,施工现场的水深约为25 m,总建筑面积为3.8 hm²^[32],如图3所示。



图2 川崎人工岛
Fig.2 Kawasaki Island

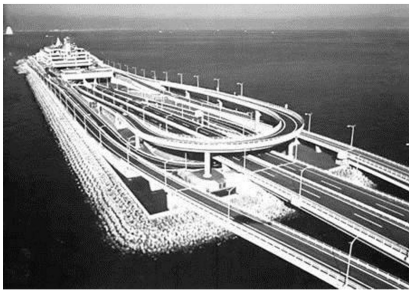


图3 木更津人工岛
Fig.3 Kisarazu Island

a. 地基处理。木更津人工岛的断面数据见文献^[31]。与川崎人工岛相比,木更津人工岛的上部建筑更多、用途更广,因此采取了更为安全的地基处理方法:地基改良采用疏浚清除全部软弱层,清淤深度最深为7 m,填入砂和碎石,然后打设蜂窝式钢管桩,钢管内部充填砂石,蜂窝间填方的压实采用加实砂桩法。

b. 围堰。木更津人工岛采用钢管桩直立型围堰,护岸形式为抛石斜坡式,可以保护岛屿免受波浪和船舶的影响。

c. 填土加固。木更津人工岛的填筑材料使用砂子和水泥制成干式水泥土,并采用了建造川崎人工岛产生的工程弃土。人工岛的斜坡区和平坦区分别采用深层水泥搅拌桩法和挤密砂桩法加固软基,填料的目标强度分别为1 MPa和0.4 MPa。

2.2 美国汉普顿路桥隧道及其扩展项目

汉普顿路桥隧道为桥隧组合的公路项目,位于美国弗吉尼亚州,北接汉普顿,南接诺福克,项目包括总长5.6 km的桥梁,南、北两座人工岛,以及修建在两个人工岛之间两条各长2.28 km的并行沉管隧道,项目总长约为10.16 km。汉普顿路桥隧道工程的南岛又名 Rip Raps,是一个占地约6.07 hm²的人工小岛,该岛建于1818年,最初建造的目的在于作为港口防御的一部分。南、北岛位置如图4所示。



图4 汉普顿路桥隧道的南岛和北岛
Fig.4 South Island and North Island of Hampton Roads Bridge-Tunnel

示。南、北岛及隧道区域内的地层从上到下依次为软弱淤泥层、硬黏土层、松散中粗砂层和密实砂层。

汉普顿路桥隧道最初于 1957 年完工并通车,是有史以来第一个利用人工岛建造的桥隧跨海通道。1970 年,汉普顿路桥隧道进行了第一次扩建,包括对南北两座人工岛的扩建。为缓解交通压力,2020 年开始进一步全面扩建汉普顿路桥隧道,扩建工程主要为对现有车道和桥梁的加宽,南、北两座人工岛的扩建,和在现有东行隧道的西侧修建两条并行的双车道隧道,约比现有的沉管隧道深 15.24 m。新建隧道采用盾构法施工,直径约为 13.7 m,为北美直径第二大的盾构隧道。扩建完成后,两个人工岛之间将连接 4 条隧道。该项目于 2020 年开工,预计 2025 年完工。

2.2.1 北岛的扩建

a. 地基处理。图 5 为北岛的扩建平面图,可以看出需要容纳新建隧道、盾构机接收井和隧道引道结构。首先,将大约 170 个桩沿着现北岛西岸打入,形成一道岸边防渗墙,以保护现有的隧道结构免受岛屿扩建产生不稳定的情况。然后,开始疏浚工作。北岛的扩建面积约 6.64 hm²,通过疏浚去除该部分泥浆,考虑环境保护等因素,疏浚量非常保守,疏浚深度约 0.91 m,疏浚泥浆通过驳船运输至处置点。将系泊桩(80 根直径 1.07 m 的管桩)从驳船上沿该岛扩建线每隔 12.19 m 用振动锤打出,桩底被振动到海底以下 0.6 ~ 0.9 m;在隧道竖井和隧道引道结构西侧安装板桩墙,从驳船用振动锤打出,目的是分开内部填充的砂子与周边砾石。

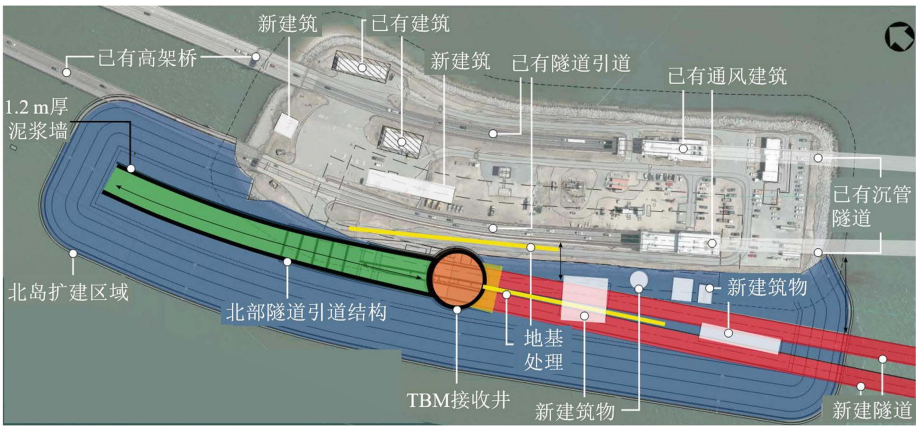


图 5 北岛扩建平面
Fig. 5 Expansion plan of North Island

b. 围堰。北岛的典型设计断面如图 6 所示,采用抛石挤淤法建造斜坡式岩石围堰。新的护岸、岩石围堰和冲刷坡脚由 4 种岩石组成。护岸底部采用直径为 50 ~ 100 mm 的碎石或砾石,护面岩石的平均重量为 6 500 kg。

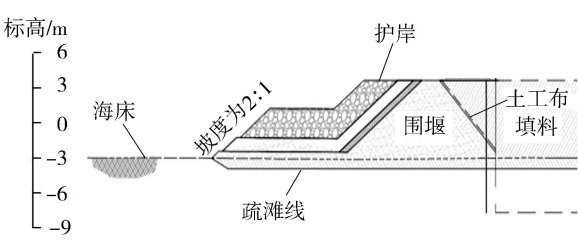


图 6 北岛的典型设计断面
Fig. 6 Typical design section of North Island

c. 填土加固。将现有岛屿西侧护坡的护面石移除并运输至指定位置,扩建大约需要 15.75 万 m³级配良好的填砂。使用推土机放置和压实填砂,最终将填料振动压实至海床下方约 6 m 的深度。

2.2.2 南岛的扩建

a. 地基处理。南岛的扩建平面如图 7 所示。盾构机从南岛向北岛掘进,修建第一条扩建隧道,在北岛接收后调转盾构机,再向南岛掘进,修建第二条扩建隧道。地基处理时,首先,在扩建区域(约 1.06 hm²)内进行疏浚,以清除淤泥、减少沉降和清除障碍物(从海岸冲走的护面石),疏浚深度为 0.91 m。由于地基土软弱,在驳船上用振动锤和冲击锤将直径 0.61 m 的钢管桩和直径 0.91 m 的混凝土深基础桩打入海床下约 29 m。疏浚后,在海床上铺设 1 ~ 2 m 的砾石垫层,构成新结构的基础,并在海床与上方较大的围堰及护岸的岩石块之间进行分隔。与此同时,利用带有振动锤的驳船安装板桩墙,用于封闭隧道引道结构。

b. 围堰。南岛的典型设计断面如图 8 所示,围堰下方打设钢管桩以减少沉降。与北岛类似,也采用了抛石挤淤斜坡式围堰和斜坡式护岸。

c. 填土加固。疏浚后用砂填筑岛体;采用钢管混凝土桩加固软基;在回填岛体和现有陆面之间打设钢

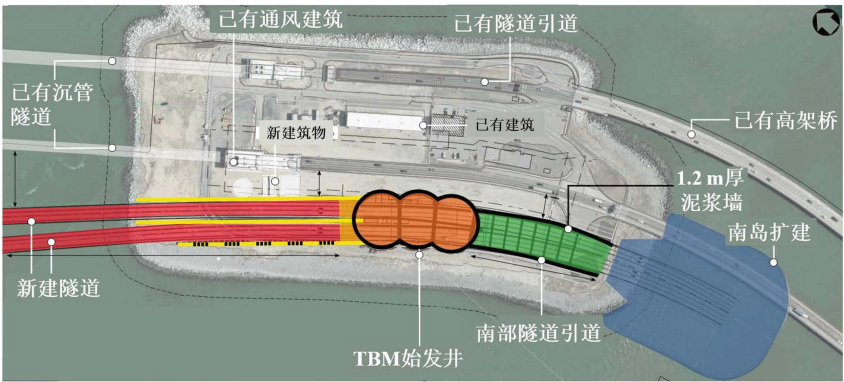


图 7 南岛的扩建平面

Fig. 7 Expansion plan of South Island

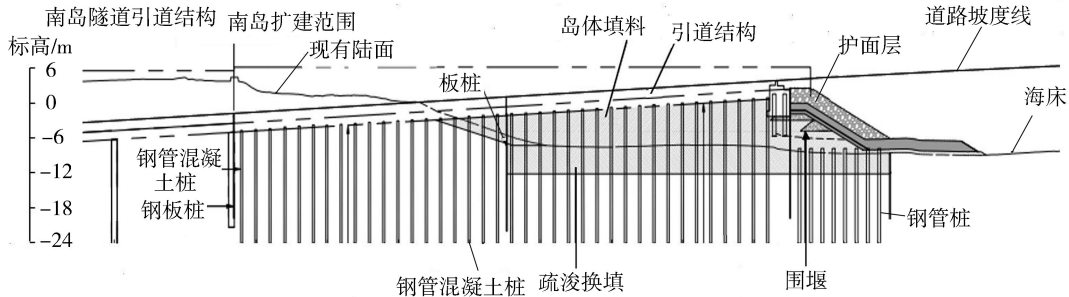


图 8 南岛典型断面

Fig. 8 Typical design section of South Island

板桩来维持原有陆面的稳定;在南岛已有隧道引道结构外侧打设钢板桩,使其在扩建过程中保持稳定。

南岛的盾构始发井和隧道引道结构等构筑物的修建将挖掘出约 23 万 m³ 的砂质材料。根据化学和物理分析结果,其中约 15 万 m³ 的清洁砂质材料可用于北岛扩建;在盾构机掘进过程中开挖的渣土经过筛分等处理后得到的砂也可用于北岛的扩建。

2.3 费马恩隧道(丹麦-德国)

费马恩隧道穿越了波罗的海的费马恩带,是一条用于连接丹麦洛兰岛和德国费马恩岛的沉管隧道,地理位置参见文献[33]。大贝尔特桥(丹麦,1997 年建成)、厄勒海峡大桥(丹麦-瑞典,2000 年建成)和费马恩隧道(丹麦-德国,预计 2029 年建成)组成了丹麦的跨海交通网络。沉管隧道长约 18 km,最深处达 40 m,由 79 个标准管节和 10 个特殊管节组成。单个标准管节长 217 m,宽 42 m,高 10 m,质量 7.3 万 t;特殊管节长 39 m。费马恩隧道建成后将成为世界上最长的公路和铁路隧道。费马恩隧道纵向地质断面参见文献[34]。填海区域的地层主要为古近系黏土和冰碛土,沉管隧道基槽需要在不同的冰川沉积物中疏浚。费马恩隧道基槽部位的上层土主要由黏土覆盖的冰川融水砂组成;在这些地层之下,主要是不同类型的冰碛层(也称为巨砾黏土或冰碛黏土),局部有融水砂和淤泥;更深的地层是比第四纪更古老的白垩和古近系黏土。

费马恩隧道虽然不需要修建新人工岛,但是在建设沉管隧道之前需要在丹麦和德国沿海区域建设工作港和大型填海区,建筑项目所需的建筑材料将从工作港运出。

a. 填海区及工作港地基处理。费马恩的 Puttgarden 和洛兰岛的 Rødbyhavn 正在建设工作港。Rødbyhavn 工作港较大,是生产隧道管片构件的地方。洛兰岛的工作港及填海区的布置图参见文献[33]。从目前的洛兰海岸线延伸,在工作港两侧规划了一约 330 hm² 的大型填海区,长约 7 km,宽达 0.5 km。这个大型填海区主要是大面积的沿海草原、自然区和两个新海滩,未检索到填海前的地基处理措施。

b. 填海区及工作港围堰。目前采用抛石挤淤法建造一长约 2 500 m 的花岗岩防波堤,以保护约 50 hm² 的工作港免受费马恩海峡的海浪侵袭。

c. 填海区及工作港填土加固。建造防波堤后在堤内填海造陆。在下沉隧道构件之前,需沿隧道走线疏浚一长约 18 km、深 12 m 的沟槽,沟槽宽度根据海的深度和海床的组成而变化,共疏浚约 1 900 万 m³ 的砂、石和土壤用于填海区的建设,实际的填海面积取决于疏浚的弃土量。由于填海区的功能为自然区和海滩,因此不需进

行加固处理。

2.4 厄勒海峡大桥(丹麦-瑞典)

厄勒海峡大桥(Øresund Bridge)全程跨度约16 km,连接丹麦的哥本哈根和瑞典第三大城市马尔默,1995 年动工,2000 年完工,是世界上已建成的承重量最大的斜拉索桥。大桥从马尔默出发,海峡中建造了一座人工岛(Peberholm 人工岛,属丹麦),靠近哥本哈根的一段是铁路与公路合用的海底隧道,因此大桥由三部分组成,即8 km的桥梁、4 km的人工岛上公路和4 km的海底沉管隧道^[35],如图9所示。马尔默和哥本哈根之间有一座天然岛屿——萨尔特岛,但是萨尔特岛是一个重要的鸟类栖息地,出于环境保护原因,排除了使用该天然岛屿连接桥梁和隧道的方案。因此,在萨尔特岛南部建造一个人工岛。沉管隧道总长3.51 km,宽约41.7 m,高8.5 m。沿沉管隧道方向的地质断面参见文献^[35]。沉管隧道现场的地质剖面包括近期海洋沉积物、冰积土、哥本哈根石灰岩和苔藓虫石灰岩,其中哥本哈根石灰岩属于破裂的软岩。沉管隧道底部完全建在哥本哈根石灰岩中,引道构筑物位于冰积土或用于建造人工半岛和人工岛的疏浚填土中。

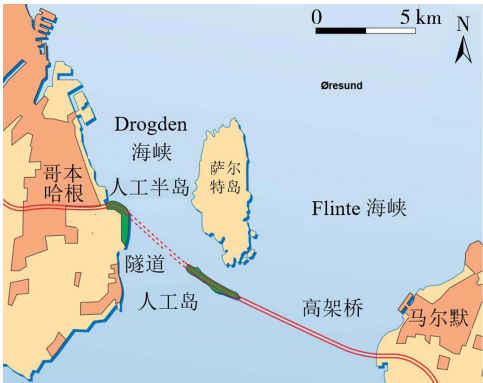


图9 厄勒海峡大桥布置
Fig.9 Layout of the Øresund Bridge

a. 人工岛地基处理。Peberholm 人工岛长约4 km,平均宽度为500 m,高约20 m,面积130 hm²。人工岛建造区域内软弱层较薄,疏浚部分软弱层后,即可利用石灰岩作为人工岛的基础。

b. 人工岛围堰。桥梁施工和隧道沟槽疏浚施工期间产生大量的含有砂、石的弃土,这部分弃土被用于填海造岛。使用弃土填筑斜坡式土石围堰,如图10所示,围堰外侧采用抛石挤淤法建造斜坡式护岸。



图10 Peberholm 人工岛围堰施工现场
Fig.10 Peberholm artificial island

c. 人工岛填土加固。使用弃土逐步在围堰内填土形成陆域,利用预压排水法进行填土的地基处理,并配合挤密砂桩法和深层水泥搅拌桩法进一步加固土体。同时,Peberholm 人工岛也是一个指定的自然保护区,允许动植物自然发展,不受人为干扰。

2.5 港珠澳大桥

港珠澳大桥东连香港、西接珠海和澳门,是集桥、岛、隧为一体的跨海通道,全长35.6 km。大桥共分为珠海和澳门接线、珠澳口岸人工岛、大桥主体工程、香港连接线及香港口岸人工岛六部分,其中岛隧工程是控制性工程^[6]。沉管隧道长5.664 km,位于伶仃西和铜鼓航道处,为实现桥隧转换,隧道两端各设置一长约625 m的海中人工岛,造陆面积各约10 hm²^[36-37]。港珠澳大桥东人工岛西侧与隧道衔接,东侧与桥衔接,地理位置接近香港大屿山^[38],如图11所示。岛体平面基本为椭圆形,东西方向长约625.0 m,南北方向长约215.0 m。港珠澳大桥沉管隧道段的地质剖面如图12所示,可以看出沉管隧道



图11 港珠澳大桥平面布置
Fig.11 Floor plan of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

主要位于软弱淤泥层中,东、西人工岛场区的地层以软弱土-中软土为主,包括淤泥层、粉质黏土、粗砾砂、粉细砂及中砂等,特别是软弱淤泥层的厚度大,会产生沉降周期长且沉降量大的问题,需要采取合适的软基加固措施。

a. 东、西人工岛地基处理。港珠澳大桥东、西人工岛工程地点场地标高为-2.3~-3.0 m,海底地势平坦,自北向南呈平缓斜坡,表层分布平均厚度约10.44 m的淤泥-淤泥质土层,实测标贯击数N仅为0~2。同时,工程海域易受台风影响,海水对钢筋及混凝土具有腐蚀作用,而海相沉积地层覆盖层厚度达30~89 m,工

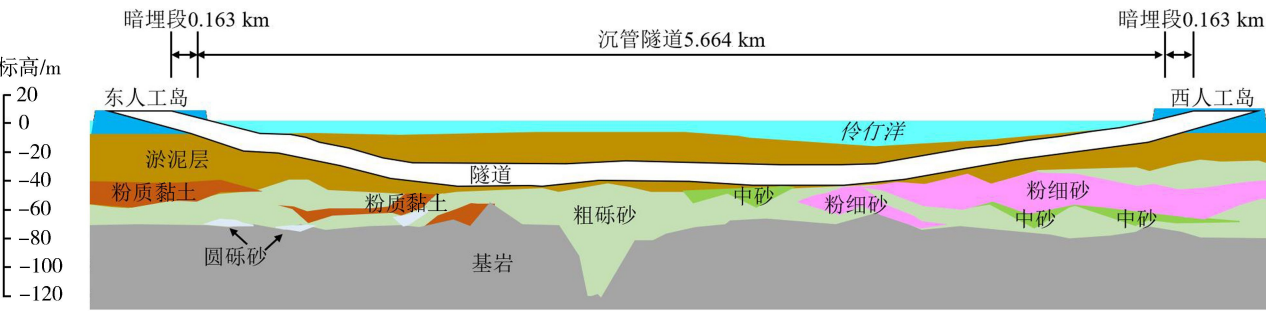


图 12 港珠澳大桥沉管隧道地质剖面

Fig. 12 Geological profile of immersed tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

程在技术层面上面临很大的挑战。如何快速成岛及处理软基是港珠澳大桥两个人工岛需要克服的关键技术问题。经研究论证,港珠澳大桥东、西人工岛均采用大直径钢圆筒快速成岛方法,如图 13 所示,避免了大量疏浚。开挖表层 8 m 的淤泥层后,振沉钢圆筒,然后对围堰内软基进行加固处理。



图 13 港珠澳大桥快速成岛施工技术

Fig. 13 Construction technology of rapid island formation of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

b. 东、西人工岛围堰。东、西人工岛的岛体围堰结构分别由 59 根和 61 根直径为 22.0 m、厚度为 16.0 mm、高度为 40 ~ 50 m 的大直径钢圆筒及安插在钢圆筒之间的圆弧形副格板构成,开挖表层 8 m 的淤泥后,大直径钢圆筒振沉至海床深度 20 ~ 30 m^[38],插入不透水层土体,快速形成人工岛体轮廓。护岸采取抛石挤淤斜坡式护岸。

c. 东、西人工岛填土加固。建造围堰后,在钢圆筒内及钢圆筒构成的岛体内回填中粗砂形成岛体,岛内水和岛外水可以隔离,采用塑料排水板联合堆载预压法(超载比 1.45 ~ 2.1)、水上挤密砂桩法处理软基,其中塑料排水板呈正方形布置,间距 1.0 ~ 1.2 m,穿透淤泥层。护岸部分开挖泥面底标高至-16 m,在距离钢圆筒边界 3.5 m 的位置采用 27.6% 置换率的挤密砂桩进行软基处理,最终形成稳定的岛体结构。相比传统的吹砂、抛石等成岛方法,这种新型施工技术缩短了项目工期,降低了施工风险和成本,减少了对环境的影响,包括对中华白海豚栖息地的影响^[37]。

2.6 深中通道

深中通道地处广东省珠江口的核心区域,北距虎门大桥约 30 km,南距港珠澳大桥约 38 km,项目全长约 24 km,其中跨海段长约 22.4 km,主要结构包括一条 6.845 km 的沉管隧道、西人工岛(岛面面积 13.7 hm²)、东人工岛(岛面面积 34.38 hm²)、一座悬索桥和一座斜拉桥^[7],平面布置如图 14 所示,是世界级的集桥-岛-隧-水下枢纽互通于一体的超大型跨海交通基础设施工程,人工岛用作桥隧转换。深中通道全线预计 2024 年建成,除了工程规模大之外,工程地质也复杂,东、西人工岛场区内存在深厚的软弱淤泥层、粉质黏

土、容易液化的粉细砂和风化软硬不均的花岗岩层。

a. 人工岛初期地基处理和围堰。东、西人工岛在建造围堰前疏浚部分软弱层,东人工岛采用长 27 m 的钢板桩形成围堰。由于东人工岛临近广深沿江高速主线桥的 42 个桥墩,桥墩的水平 and 垂直位移限制在 5 mm 以内。同时,工程区域内分布有厚 4.7 ~ 23.0 m 的软弱淤泥层,平均厚度约为 10 m,直接填砂筑岛可能造成桥墩附近产生较大的塑性变形区,因此在基坑开挖阶段,沿桥墩打设一圈钢管桩,在内侧设置横向支撑,以减弱基坑开挖对桥墩的影响^[39]。

西人工岛参考了港珠澳大桥人工岛的大直径钢圆筒快速成岛技术,通过振沉 57 个直径 28 m、高 35.5 ~ 39.5 m 的钢圆筒形成围堰,在围堰外侧采用抛石挤淤斜坡式护岸。

b. 人工岛填土加固。在围堰内分层回填中粗砂进行筑岛。东人工岛采用旋喷桩和深层水泥搅拌桩进行软基加固。西人工岛的岛壁断面参见文献[9]。在圆筒内及岛内填中粗砂造岛,通过打设塑料排水板、振冲密实和挤密砂桩等方法进行软基加固。护岸部分的地基采用疏浚表层淤泥并回填中粗砂的方法。

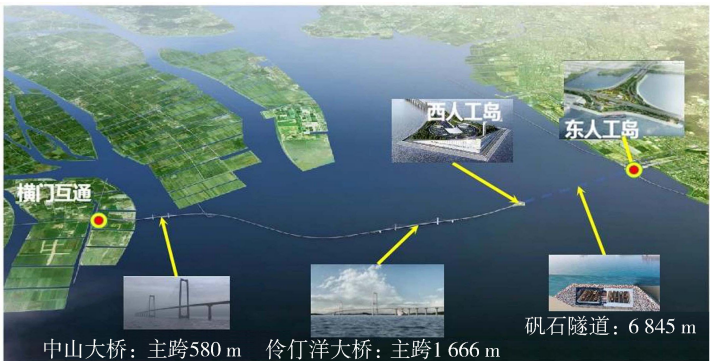


图 14 深中通道平面布置

Fig. 14 Layout of the Shenzhen-Zhongshan Link

3 人工岛建设过程中的主要问题与发展方向

3.1 人工岛建设过程中的主要问题

a. 软弱地基处理及填土加固的方案组合及工序优化。人工岛工程区域内普遍存在深厚的软弱淤泥层,填砂或吹填疏浚泥浆后可能出现不均匀沉降和固结速率慢等问题,需要通过地基处理和填土加固等方法解决。通过上述工程案例可以发现,地基处理和填土加固方法是通用的,软弱层较薄时,可以先采用疏浚进行简单的地基处理,将重点放在填土加固上;但是软弱层较厚或有邻近建筑物时,前期的地基处理也需要采取多种措施。针对不同软弱层厚度和工程要求,如何更合理组合地基处理和填土加固方案,对加快工程建设速度、提高工程建设质量和减小对生态环境的影响至关重要。此外,大多工程先进行围堰区地基处理,建造围堰结构,然后进行围堰区加固,等围堰封闭成岛后才开始岛内填土和填土加固。针对不同的围堰形式,如何优化地基处理和填土加固的工序,使围堰区和岛内区域同步施工是提高工效、产生创新的关键。

b. 疏浚土在国内人工岛建设中利用较少。由上述工程实例可以看出,修建一座人工岛及岛间的隧道或桥梁产生的工程弃土量是巨大的,废弃的通常是清淤出的高含水率的泥浆或泥浆-砂混合物,占地面积大,运输效率低。同时,建筑人工岛需要大量的填料,跨海水下隧道人工岛一般离岸较远,仅运输清洁填料就需要耗费大量的时间和成本。如果能将人工岛工程弃土在附近经过处理后用作人工岛的填料,则能节省填料的购买及运输成本,对整个工程的低碳环保具有重要意义。但是与国外的几个著名桥岛隧组合跨海通道利用疏浚弃土填岛或填海造陆的处理方式相比,国内主要还是采用填清洁砂的方案造岛,疏浚泥浆的泥砂分离困难、脱水效率慢、固化成本高等问题是造成疏浚弃土在人工岛中利用率低的重要原因。针对不同的疏浚泥浆,需要进一步研究高效泥砂分离、泥浆脱水和固化处理方法。

3.2 人工岛建设的发展方向

未来人工岛的建设应该更为绿色和快速,需要进一步发展预制人工岛的关键技术。由表 1 可知,沉管法广泛应用于长距离水下隧道的建设,主要原因之一是沉管法的管节可预制,可以缩短现场施工时间。人工岛的建设方法由传统的抛石围堰筑岛,创新性地发展出了预制大直径钢圆筒围堰筑岛方法,降低了对环境的影响,缩短了筑岛时间,说明通过预制的人工岛构筑物实现绿色、快速筑岛是先进、可行的。但是,相较于预制围堰,要实现大体量人工岛预制化建设需面临许多挑战,如将人工岛划分为多个可组合的预制构件,避免预制构件接缝渗漏,以及克服不均匀沉降等问题。

4 结 语

a. 对于建造跨海水下隧道人工岛天然软弱地基的处理,疏浚软弱层法、置换砂垫层法、排水固结法和复

合地基法是较为常见的方法。抛石挤淤斜坡式围堰是最传统的围堰形式;建造大规模的人工岛时,使用大直径钢圆筒围堰能够快速成岛,并且钢圆筒内和围堰内可以同时进行填土和地基处理。人工岛的护岸形式与围堰结构相关,抛石挤淤斜坡式护岸是主要的护岸结构。

b. 人工岛填土成陆后一般会作为人工地基进行加固,加固方法有压实法、挤压密实法、固结促进法和化学加固4种方式。国外人工岛实例中通常使用疏浚弃土、疏浚弃土和砂结合进行筑岛,国内大型跨海水下隧道人工岛的填料主要为清洁砂。

c. 结合工程实例和研究现状,提出跨海水下隧道人工岛建设过程中的两大主要问题,一是软弱地基处理及填土加固方案的组合及工序优化问题,针对不同的围堰形式,如何优化地基处理和填土加固的工序,使围堰区和岛内区域同步施工;二是疏浚土在国内人工岛建设中的利用较少,针对不同的疏浚泥浆,需要进一步研究高效泥砂分离、泥浆脱水和固化处理方法。

d. 基于现有的人工岛建设技术,认为人工岛建设的未来发展方向是通过预制人工岛构件的方法实现绿色、快速筑岛。

参考文献:

[1] 朱伟,钱勇进,王璐,等.长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):138-149. (ZHU Wei,QIAN Yongjin,WANG Lu,et al. Main problems and development trends of long-distance shield tunneling[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(1):138-149. (in Chinese))

[2] GE Y J, YUAN Y. State-of-the-art technology in the construction of sea-crossing fixed links with a bridge, island, and tunnel combination-science direct[J]. Engineering,2019,5(1):15-21.

[3] 柴田徹. 防災シリーズ2 埋立軟弱地盤の防災[M]. 东京:森北出版株式会社,1982.

[4] 蒋亚,张文渊. 抛石挤淤综合法在加固地基中的应用[J]. 土工基础,2005,19(6):8-9. (JIANG Ya,ZHANG Wen yuan. Application of riprap & displacement method for subgrade reinforcement[J]. Soil Engineering and Foundation,2005,19(6):8-9. (in Chinese))

[5] 黄彬. 泉州湾秀涂人工岛总体设计[J]. 水运工程,2016(7):36-39. (HUANG Bin. General design of Xiutu artificial island in Quanzhou Bay[J]. Port & Waterway Engineering,2016(7):36-39. (in Chinese))

[6] 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):60-66. (YIN Haiqing. Key technologies applied in design and construction of artificial islands and immersed tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge(HZMB) Project[J]. Tunnel Construction,2014,34(1):60-66. (in Chinese))

[7] 宋神友,陈伟乐,金文良,等. 深中通道工程关键技术及挑战[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(1):143-152. (SONG Shenyou,CHEN Weile,JIN Wenliang,et al. Key technologies and challenges of Shenzhong Link[J]. Tunnel Construction,2020,40(1):143-152. (in Chinese))

[8] 宋书东,张全林,张万达. 深中通道组合结构圆筒的围堰设计方案[J]. 水运工程,2019(增刊1):100-104. (SONG Shudong,ZHANG Quanlin,ZHANG Wanda. Designs scheme of combined cylinder cofferdam for passage from Shenzhen to Zhongshan[J]. Port & Waterway Engineering,2019(Sup1):100-104. (in Chinese))

[9] 谢世楞. 人工岛设计的进展[J]. 海岸工程,1995(1):1-7. (XIE Shileng. Development of artificial island design[J]. Coastal Engineering,1995(1):1-7. (in Chinese))

[10] 陈明阳,顾海英,曹利利,等. 复合桩基础在航道护岸工程中的应用[J]. 水运工程,2021(3):180-184. (CHEN Mingyang,GU Haiying,CAO Lili,et al. Application of composite pile foundation in waterway revetment[J]. Port & Waterway Engineering,2021(3):180-184. (in Chinese))

[11] 赵杰,程翔,王桂莹. 某大型填海造地工程人工岛护岸结构固结沉降及蠕变数值分析[J]. 水运工程,2013(5):150-156. (ZHAO Jie,CHENG Xiang,WANG Guixuan. Numerical analysis of consolidation settlement and creep deformation in artificial island bank protection structure of a large-scale marine reclamation land project[J]. Port & Waterway Engineering,2013(5):150-156. (in Chinese))

[12] 马哲超. 人工岛动静力灾害研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.

[13] 赵文. 考虑蠕变的人工岛护岸沉降预测[D]. 大连:大连理工大学,2020.

[14] 丛润泽. 斜坡式人工岛护岸越浪距离的试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.

[15] 马超. 人工景观水体生态型护岸设计研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.

[16] 浦伟庆,周俊辉,金晖. 双鱼岛海上人工岛设计特点[J]. 水运工程,2018(6):1-5. (PU Weiqing,ZHOU Junhui,JIN Hui.

- Design features of Shuangyu Artificial Island[J]. Port & Waterway Engineering,2018(6):1-5. (in Chinese))
- [17] 解林博,刘洋. 强夯振动对人工岛海堤影响及处理措施[J]. 中国港湾建设,2018,38(3):29-33. (XIE Linbo, LIU Yang. Influence of dynamic compaction vibration on artificial island seawall and its treatment measures[J]. China Harbour Engineering, 2018,38(3):29-33. (in Chinese))
- [18] 孙钧. 港珠澳大桥岛隧工程深厚软基与大回淤条件下的工程处治研究[J]. 隧道建设,2014,34(9):807-814. (SUN Jun. Countermeasures for deep and thick soft foundation under serious back-silting condition case study on artificial island and immersed tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Project[J]. Tunnel Construction,2014,34(9):807-814. (in Chinese))
- [19] 王海鹏,徐杨,唐彤芝,等. 超软地基排水板弯折特性与抗弯折结构[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):130-137. (WANG Haipeng, XU Yang, TANG Tongzhi, et al. Bending characteristics and anti-bending structure of drainage plate in super soft foundation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022,50(6):130-137. (in Chinese))
- [20] 马旭,冀晋,陈三洋. 港珠澳大桥西人工岛超厚回填砂上超长长度塑料排水板打设工艺[J]. 公路,2018,63(8):1-5. (MA Xu, JI Jin, CHEN Sanyang. Laying technology of super length plastic drainage board on super thick backfill sand of West artificial island of Hong Kong Zhuhai Macao Bridge[J]. Highway,2018,63(8):1-5. (in Chinese))
- [21] KITAZUME M, SATOH T. Development of a pneumatic flow mixing method and its application to Central Japan International Airport construction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement,2003,7(3):139-148.
- [22] NUMAJIRI Y, OHTA Y, MITARAI Y, et al. Application of pneumatic flow method to Central International Airport [C]//The Thirty-Seventh Japan National Conference on Geotechnical Engineering. Tokyo: IEEE Oceanic Engineering Society, 2002: 790-880.
- [23] TANAKA Y, KO C, IMAMURA T, et al. Reclamation of the artificial ground made of dredged soil and converter slag[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser B,2014,70(2):888-893.
- [24] WAKO T, TSUCHIDA T, MATSUNAGA Y, et al. Use of artificial light weight materials (treated soil with air form) for port facilities[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu,1998(602):35-52.
- [25] 朱伟,张春雷,高玉峰,等. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2005(10):103-107. (ZHU Wei, ZHANG Chunlei, GAO Yufeng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2005(10):103-107. (in Chinese))
- [26] 王东星,陈政光. 氯氧镁水泥固化淤泥力学特性应变速率效应研究[J]. 岩土力学,2021,42(10):2634-2646. (WANG Dongxing, CHEN Zhengguang. Strain rate effect on mechanical properties of magnesium oxychloride cement solidified sludge[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(10):2634-2646. (in Chinese))
- [27] 黄英豪,戴济群,徐锴. 新拌固化淤泥的流动性和黏滞性试验研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(2):235-244. (HUANG Yinghao, DAI Jiqun, XU Kai. Flowability and viscosity of freshly solidified dredged materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(2):235-244. (in Chinese))
- [28] 彭劼,商志阳,曹天赐,等. 高分子吸水树脂对无机结合料固化土工程性质的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(1): 99-104. (PENG Jie, SHANG Zhiyang, CAO Tianci, et al. Effect of super absorbent polymer on engineering properties of soil solidified by inorganic binder[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023,51(1): 99-104. (in Chinese))
- [29] WU S, ZHU W, LYU Y, et al. Quality control indexes and curing agent values for submerged poured solidifying-silt island; case study of the artificial island of Dalian Bay, China[J]. Construction & Building Materials,2018,190:664-671.
- [30] 沈华春. 东京湾横断道路设计概况[J]. 国外公路,1986(6):4-6. (SHEN Huachun. Design overview of Tokyo Wan Aqua-Line Expressway[J]. Journal of China & Foreign Highway,1986(6):4-6. (in Chinese))
- [31] SHIOI Y, ARAKAWA T. Man-made islands, Trans-Tokyo Bay Highway, Japan[J]. Structural Engineering International,1993,3(3):155-157.
- [32] 晏克非. 日本东京湾跨海横断道路工程[J]. 交通与运输,2000(6):27-28. (YAN Kefei. Tokyo Wan Aqua-Line Expressway project in Japan[J]. Traffic & Transportation,2000(6):27-28. (in Chinese))
- [33] PEDERSEN S K, BRØNDUM S. Fehmarnbelt fixed link: the world's longest road and rail immersed tunnel [J]. Civil Engineering,2018,171(CE5):1-30.
- [34] BJØRNSHAVE A, HANSEN I S, MAGAR V, et al. Fehmarnbelt-a new green link between Germany and Denmark[C]//The 34th PIANC World Congress. Panama: World Association for Waterborne, Transport and Infrastructure,2018:1-15.

[15] 樊科伟,严俊,刘苓杰,等. 木质素纤维改性季冻区膨胀土强度特性与微观结构研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 326-334. (FAN Kewei, YAN Jun, LIU Lingjie, et al. Study on strength characteristics and microstructure of expansive soil treated with lignin fibers in seasonal frozen area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 326-334. (in Chinese))

[16] 方瑾瑾,杨小林,冯以鑫,等. 干湿循环后膨胀土力学特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 1043-1055. (FANG Jinjin, YANG Xiaolin, FENG Yixin, et al. True triaxial experimental study on mechanical properties of expansive soils after drying and wetting cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 1043-1055. (in Chinese))

[17] 王佩,宋新江,徐海波,等. 水泥改性膨胀土基本特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 56-60. (WANG Pei, SONG Xinjiang, XU Haibo, et al. Experiments on basic characteristics of cement-modified expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 56-60. (in Chinese))

[18] 叶万军,吴云涛,杨更社,等. 干湿循环作用下古土壤细微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2126-2137. (YE Wanjun, WU Yuntao, YANG Gengshe, et al. Study on microstructure and macro-mechanical properties of paleosol under dry-wet cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 2126-2137. (in Chinese))

[19] 迟明杰,赵成刚,李小军. 砂土剪胀机理的研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 99-104. (CHI Mingjie, ZHAO Chenggang, LI Xiaojun. Stress-dilation mechanism of sands[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 99-104. (in Chinese))

[20] 袁俊平,邱豪磊,胡有方,等. 土石坝力学参数反演技术研究进展与展望[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 1-10. (YUAN Junping, QIU Haolei, XU Youfang, et al. Research progress and prospects on inversion technology of mechanical parameters for earth-rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 1-10. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-27 编辑:刘晓艳)

(上接第 83 页)

[35] BUSBY J, MARSHALL C. Design and construction of the øresund tunnel[J]. Civil Engineering, 2000, 138(4): 157-166.

[36] 刘晓东. 港珠澳大桥总体设计与技术挑战[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 太原: 中国海洋工程学会, 2011: 25-28.

[37] LIN M, WANG R, LIN W. Artificial island construction using large steel cylinders[J]. Structural Engineering International, 2020, 30(4): 484-492.

[38] 孙钧. 港珠澳大桥岛隧工程建设的科技创新和运营后应关注的若干问题[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1592-1602. (SUN Jun. Scientific and technological innovation and operation-related issues for island-tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macao Fixed Link Project[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(10): 1592-1602. (in Chinese))

[39] 刘健,董焱赫,刘迪. 深中通道东人工岛总体设计及关键技术[J]. 公路, 2021, 66(2): 234-238. (LIU Jian, DONG Yanhe, LIU Di. Overall design and key technology of the east artificial island of the Shenzhen-Zhongshan Link [J]. Highway, 2021, 66(2): 234-238. (in Chinese))

(收稿日期:2022-03-21 编辑:胡新宇)

(上接第 90 页)

[17] 牛岩,韩霖昌,雷光宇. 基于粒子群算法的圆形隧洞锚喷支护优化[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊1): 175-181. (NIU Yan, HAN Jichang, LEI Guangyu. Bolt-shotcrete support optimization of circular tunnel based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Sup1): 175-181. (in Chinese))

[18] 政府间气候变化专门委员会. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[R]. 神奈川: 日本全球环境战略研究所, 2006.

[19] 张鑫,靳春玲,贡力,等. 基于 PSO-RBF 神经网络模型的铁路隧道突水危险性评价[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(10): 143-148. (ZHANG Xin, JIN Chunling, GONG Li, et al. Evaluation of water inrush danger in railway tunnel based on PSO-RBF neural network model[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(10): 143-148. (in Chinese))

[20] 孔爱良,梁硕,李春来,等. 基于改进粒子群算法的微电网优化运行[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 550-555. (KONG Ailiang, LIANG Shuo, LI Chunlai, et al. Optimizing micro-grid operation based on improved PSO [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 550-555. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-29 编辑:胡新宇)