

【土木建筑工程 / Architecture and Civil Engineering】

人工海岛建设技术现状与同步建造新思路

张明^{1,2}, 陈湘生³, 陈长卿^{1,2,4}, 周进威³, 陈佛赐^{1,2,4}, 李强³, 关军^{2,5}, 苏栋³

1) 中国建筑工程(香港)有限公司, 中国香港 999077; 2) 中国建筑国际集团有限公司, 中国香港 999077; 3) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 4) 中国建筑土木工程有限公司, 中国香港 999077; 5) 中海建筑有限公司, 广东深圳 518057

摘要: 随着城市发展、海洋资源开发以及旅游业需求的不断增长, 人类开展了人工海岛的建设工作。然而, 传统的非围堰式填海和围堰式湿法填海方法存在显著不足: 地基处理缺乏系统性的加固措施, 容易导致较大沉降; 回填材料施工过程中易对海洋环境造成扰动, 影响水质和生态系统; 后续工程施工中存在重复开挖工序, 增加了工程量和成本。为了解决上述不足, 提出一种同步建造人工海岛城市的施工方法, 即围堰式干法填海。该方法的具体操作是: 在预定区域的外侧两端相向构筑围堰, 同时对填土区进行海上水泥土搅拌桩地基加固; 围堰施工完成后, 抽取海水并在原状海底平整铺设垫层; 进行建筑桩基础施工, 开展底部标高处的隧道、管廊和地下室等装配式地下结构的施工, 并同步进行土体分层回填; 回填至上一层结构的施工工作面, 完成结构施工后再次回填, 如此循环, 直至回填至指定标高。同步建造人工海岛的方法能够减少填筑材料的用量以及再开挖施工的费用, 极大地缩短建设周期、降低建设成本, 并且减轻填海过程对海洋环境造成的污染。研究成果可为大型人工海岛的建造提供新的思路和参考依据。

关键词: 岩土工程; 人工海岛; 同步建造; 围堰结构; 地基加固; 装配式结构

中图分类号: TU44

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.01019

Review of artificial island construction technology and innovative approaches to synchronous construction

ZHANG Ming^{1,2}, CHEN Xiangsheng³, CHEN Changqing^{1,2,4}, ZHOU Jinwei³,
CHEN Foci^{1,2,4}, LI Qiang³, GUAN Jun^{2,5}, and SU Dong³

1) China State Construction Engineering (Hong Kong) Co. Ltd., Hong Kong 999077, P. R. China

2) China State Construction International Holdings Limited, Hong Kong 999077, P. R. China

3) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

4) China Construction Civil Engineering Co. Ltd., Hong Kong 999077, P. R. China

5) China Shipping Construction Co. Ltd., Shenzhen 518057, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: With the continuous growth of urban development, ocean resource exploitation and tourism demands, the construction of artificial islands has become increasingly important. Traditional methods for constructing artificial islands mainly include non-cofferdam reclamation and cofferdam-based wet reclamation. However, these methods have several problems: the ground treatment lacks systematic reinforcement measures, which can easily lead to

Received: 2024-05-21; **Accepted:** 2024-11-08; **Online (CNKI):** 2024-12-20

Foundation: National Natural Science Foundation of China (52090084); Shenzhen Science and Technology Program (20220808143139001); Shenzhen University 2035 Research Excellence Program (2022B007)

Corresponding author: Professor SU Dong (sudong@szu.edu.cn)

Citation: ZHANG Ming, CHEN Xiangsheng, CHEN Changqing, et al. Review of artificial island construction technology and innovative approaches to synchronous construction [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(1): 19-29. (in Chinese)



significant settlement; the construction process of backfill materials is prone to disturbing the marine environment, affecting water quality and the ecosystem; and there are repetitive excavation procedures in subsequent engineering construction, increasing the workload and costs. To address these issues, a synchronous construction method, namely dry reclamation with cofferdam, is proposed for building artificial-island cities. The specific procedures of this method are as follows: cofferdams are constructed facing each other on the outer sides of the designated area, while offshore cement-soil mixing piles are used to reinforce the ground in the filling area; after the cofferdam is completed, seawater is pumped out and a cushion layer is evenly laid on the original seabed; building pile foundation are then constructed, followed by the installation of prefabricated underground structures such as tunnels, pipe galleries, and basements at the bottom elevation. Simultaneously, soil backfilling is carried out layer by layer. This process is repeated structural construction and soil backfilling until the backfill reaches the specified elevation. The synchronous construction method can reduce the amount of filling material and the cost of re-excavation, which can greatly shorten the construction period and lower overall costs, and reduce environmental pollution during the reclamation process. The research results can provide a new option and reference for construction of large-scale artificial islands.

Key words: geotechnical engineering; artificial island; simultaneous construction; cofferdam structure; foundation reinforcement; prefabricated structure

近年来,随着城市发展的需要和海洋资源利用的要求增加,人们通过填海技术,将海洋转化为可供人类居住、工作和经济活动的陆地.这种发展模式不仅能够满足城市扩张的需求,还能够提供更多的发展空间和经济机会^[1-2].人工岛建设在全球范围内有着广泛的发展.一方面,人工岛的发展和类型将从单功能^[3]、多功能向复合功能、综合功能转化^[4-5],逐步进入远岸及深水区域^[2,6-7];另一方面,生态经济的发展理念也在海岛建设中得到体现,强调以旅游业、渔业为主,离岸金融业、工业和自贸区建设等为辅,并注重环境保护和可持续发展.

人工岛的建设用途包括机场^[8-9]、港口^[10]、桥隧转换^[11-12]和旅游^[4,13]等功能.早在20世纪50年代,美国开始修建人工岛,日本20世纪80年代修建神户人工岛和关西国际机场人工岛等著名工程,中东地区沙特阿拉伯和阿联酋等国家修建人工岛始于20世纪,主要用于打造旅游业发展需求,中国人工岛的发展开始较迟,但港珠澳人工岛和深中通道人工岛闻名世界.世界著名人工岛工程代表如表1所示.

人工岛的建设具有重要作用,但人工海岛建设也面临着一系列挑战,如环境影响和生态破坏等问题,尤其需要注意生态系统的保护与修复^[13-14].与此同时,同步建造技术的应用对人工海岛建设产生了积极影响.同步建造技术是一种将设计、施工和运营进行无缝衔接的建设方法,通过优化建筑流程、提高效率和质量控制,使得人工海岛项目能够

表1 世界著名人工岛工程

Table 1 World famous artificial island projects

工程名称	竣工年份	岛屿面积/km ²	用途	国家
美国汉普顿路桥隧道	1957	0.22	桥隧转换	美国
日本神户人工岛	1981	4.34	港口	日本
日本关西国际机场	1991	5.11	机场	日本
东京湾横断跨海公路人工岛	1997	0.17	桥隧转换	日本
朱美拉棕榈岛	2006	28.00	旅游	阿联酋
港珠澳大桥人工岛	2018	0.28	桥隧转换	中国
沙特吉赞人工岛	2018	1.20	港口	沙特阿拉伯
海南海花岛	2020	7.84	旅游	中国
深中通道人工岛	2024	1.34	桥隧转换	中国
大连金州湾国际机场	2024	20.87	机场	中国

更加高效地实施.该技术使得人工海岛建设能够在更短的时间内完成,并且减少了不必要的资源浪费和环境影响.

本研究综述了当前人工海岛建设的现状,探讨各种填海技术在不同人工海岛建设中的应用.同时,介绍同步建造技术在人工海岛建设中的优势和挑战,并展望其未来的发展前景.通过对人工海岛建设现状与同步建造技术应用的综述,进一步了解填海技术的发展趋势,为推动人工海岛建设的可持续发展提供支持和指导.

1 现有人工海岛建设方法

人工岛建设根据围堰特点可分为非围堰式填海和围堰式填海。

1.1 非围堰式填海技术特点

1.1.1 抛石填海

抛石填海是一种将石头抛入海中以进行填海造地的方法,这种方法利用石头等材料的自身重力或外力作用进行密实堆积,随着时间的推移,石头等材料会逐渐漏出水面,通过机械设备压实,最终形成填海造地的基础。当水下软土厚度小于5 m时,直接抛石挤淤;当软土厚度大于5 m时,结合水下爆破挤淤法和强夯挤淤法,借助外力作用,确保抛填石块置换到指定位置;当淤泥厚度大于10 m,则需要疏浚部分淤泥再进行抛石,完成土石材料对淤泥的替换^[15]。抛石填海只是一种施工方法,不能单独完成填海造地工作,通常需要与其他施工方法如吹沙填土和挖泥船作业等配合使用。由于没有围堰的阻挡,抛石填海适用于隐蔽性较好的海域。

1.1.2 吹砂填海

吹砂填海技术是指将河道或海底的沉积物通过喷射、输砂管或其他方式推到相应地方进行填海造

地的一种技术。吹砂填海是在填海点的周围用吹砂的方式堆砂造地^[16]。近距离吹砂不用管道,远距离吹砂填海需要长短不一的管道,最长的延伸几公里。吹砂填海用挖泥船的泵或管道将圈外海底的泥砂和海水一起吹进目标圈内,通过排出海水,圈内的海面就被不断吹进的砂填成了陆地^[17]。同时由于吹砂填海的填土具有孔隙比大、可压缩性大、抗剪强度低和渗透系数小的特点,通常处于软塑性至流体塑性的状态,需要经过地基处理才能进行后续工程建设。

1.2 围堰式填海技术(湿法)特点

1.2.1 人工岛围堰施工技术

围堰式填海是一种建设围堤将海洋的一部分封闭起来,然后通过排水和填埋沉积物的方式在围堤内部逐步形成新陆地的方法,围堰结构形式如表2,典型工程应用可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S1。建造人工海岛涉及围堰区及填筑区域的地基处理、围堰结构施工、填筑材料及加固和设置护岸结构4方面的建造过程^[18]。为克服填海造陆过程容易受到风浪等自然条件影响的问题,人工岛的结构需要满足整体性好、预制装配程度高和水下施工作业小的特点。

表2 围堰结构种类

Table 2 Types of cofferdam structure

围堰结构	围堰形式	工程名称
抛石围堰	斜坡式	美国汉普顿路桥隧道工程、香港机场第三跑道工程、朱美拉人工岛工程和海南海花岛
预制钢筋混凝土沉井	直立式	东京湾横断道路川崎人工岛工程
钢板桩	直立式	深中通道东人工岛工程
钢管桩	直立式	东京湾横断道路木更津人工岛工程、日本港湾人工岛和伶仃洋大桥东锚碇人工岛
抗浪沙袋	斜坡式	深中通道伶仃洋大桥西锚碇人工岛工程
大直径钢圆筒	直立式	港珠澳大桥人工岛工程和深中通道西人工岛工程

1.2.2 人工岛地基加固处理技术

大多数海洋人工岛工程都会遇到海相沉积的淤泥质地层,在围堰结构施工完后需对围堰区域进行加固。通过在围堰结构内填筑砂土(钢圆筒围堰),利用竖向排水法和深层搅拌桩法进行加固^[19],以及通过深层水泥土搅拌桩^[20-21]、挤密砂桩^[7,22]和钢管桩^[20]等措施对围堰结构内外侧进行加固,保障围堰结构的安全。不同工程的地基加固方式如表3所示。人工海岛在建设一般会遇到较厚的软弱土层,如果直接进行填筑材料回填,不仅会造成填筑材料固结而产生的较大沉降,而且也会导致软土地基发

生破坏。因此,为了确保人工岛的地基稳定性和较少地基沉降,在进行填筑前需对海底软弱土层进行处理和加固后再实施填筑工程。一般会用到疏浚软弱淤泥法^[7]、排水固结法^[4,15]和深层水泥土搅拌桩法^[23]等一种或几种结合的地基处理方法。

1.2.3 人工岛填土加固技术

人工海岛的填筑在水中进行,无法像在陆地进行边填筑边碾压的压实施工工序。人工海岛的填筑工程有多种方式,一般在水中进行抛填粗砂等填筑材料,当填筑物的高度达到水面高程后,再进行压实施工^[24-25],采用地基处理方法对填筑物进行加

表3 不同工程的地基加固方式
Table 3 Foundation treatment technologies

加固方式	工程名称
强夯法	东京湾横断道路工程、香港机场第三跑道填海工程、深中通道伶仃洋大桥西锚碇人工岛和南海海花岛
挤密砂桩法	港珠澳大桥人工岛和东京湾横断道路工程
联合堆载预压法+塑料排水板	港珠澳大桥人工岛和深中通道西人工岛
钢管混凝土桩	美国汉普顿路桥隧道工程
压实法	朱美拉棕榈岛
疏浚表层软弱层	港珠澳大桥人工岛工程和深中通道西人工岛的围堰区域

固, 或者利用碎石、砂和疏浚土作为填筑材料经过加工处理后进行回填^[3]. 为减少填筑材料固结产生的地面沉降, 通过挤压密实法、固结促进法^[26]和化学加固法^[3, 27-28]等一种或几种方法联合使用, 进行

填筑材料的加固. 不同工程的加固技术如表4. 典型工程应用可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S2.

表4 不同工程的填土加固技术
Table 4 Soil filling reinforcement technology

回填材料类别	工程名称	加固方式
清洁砂	港珠澳大桥人工岛工程和深中通道西人工岛的围堰区域	塑料排水板法、挤密砂桩法和高压旋喷桩法和深层水泥搅拌桩法
人工水泥土	东京湾横断道路工程	水泥土、深层水泥搅拌桩法和挤密砂桩法
施工弃土	木更津人工岛工程	水泥土、深层水泥搅拌桩法和挤密砂桩法
惰性建筑垃圾	香港机场第三跑道填海工程	塑料排水板法和深层水泥搅拌桩法
土层	南海海花岛和日本港湾人工岛	水泥搅拌桩复合地基和强夯法

1.2.4 护岸结构设计

人工岛护岸旨在维护人工岛和海岸线的稳定和安全. 它涉及采用一系列工程措施来防止海浪侵蚀、滑坡和侵蚀等自然力量对岛屿和海岸造成的破坏^[29]. 人工岛护岸工程包括护岸结构的建设、岸边整治、植被保护和海洋生物栖息地恢复等形式, 通过这些措施增强岸线的稳定性和抗冲击能力, 如图

1. 其目的是保护人工岛及周围海岸的完整性, 同时减少海洋环境对岛屿的损害, 提供更安全、可持续的水域生活和发展环境. 作为人工岛建设中的重要环节, 人工岛护岸分为斜坡式和直立式^[30]. 其中, 采用斜坡式人工岛护岸的有美国汉普顿路桥隧道工程、香港机场第3跑道工程、港珠澳大桥人工岛工程、深中通道人工岛工程和川崎人工岛工程

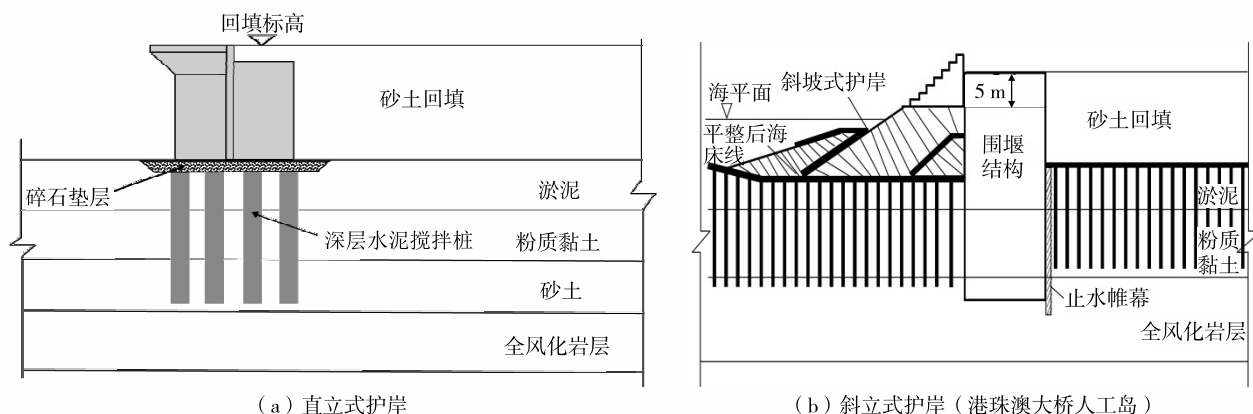


图1 护岸结构类型

Fig. 1 Types of revetment structures. (a) Vertical revetment and (b) inclined vertical revetment (Artificial Island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge).

等; 采用直立式人工岛护岸的有川崎人工岛护岸、日本港湾人工岛、日本神户人工岛和沙特吉赞人工岛等。斜坡式护岸采用石混凝土块或人工异型块体护坡, 如港中澳大桥的人工岛在建造时就是采用这种方式先抛入碎石堆成斜坡, 然后放入扭王字块形成的护岸。直墙式护岸则采用钢板桩或钢筋混凝土板桩墙^[31], 多用于港口工程的人工岛。

1.3 人工海岛建设面临的主要问题

非围堰式填海和围堰式湿法围堰在地基处理方面都面临一些问题, 如表5所示。人工海岛修建过程中, 围堰式填海通常在填海过程中不进行特殊的地基处理。相反, 非围堰结构的施工主要依赖于抛石和挤淤泥的方式来实现填充和地形改造。然而, 这种填海方式可能会对海洋环境产生一定程度的污

染。抛石是将岩石和石块等材料从船上抛洒到海底目标区域, 以积累、沉积和形成新的陆地。在此过程中, 抛洒的石块可能造成海底沉积物的扰动和悬浮, 导致水质的浑浊和富营养化, 影响海洋生态系统的生态平衡。目前人工岛回填材料主要包括建筑垃圾、碎石和砂, 回填过程容易造成填筑颗粒溢出围堰, 对海洋环境产生扰动^[32]。回填材料处于流塑状态, 未完成固结, 容易产生回填沉降, 且沉降量可达到几米^[33]。由于传统填海都是依照地基处理、围堰施工、回填材料和填土区地基加固等步骤依次施工, 会造成建设工期长和建设时间浪费等问题。同时后续地下工程施工要对填筑材料进行再次开挖, 并运输建筑弃土。

表5 人工海岛建设面临的主要问题

Table 5 The main problems of artificial island construction

存在问题	非围堰式填海	围堰式填海(湿法)
地基处理	无地基处理, 抛石挤淤泥, 对海洋污染大	一般是疏浚表层淤泥, 换填砂垫层, 然后进行水泥土搅拌桩、挤密砂桩和钢板桩加固地基, 对海洋污染较小
围堰结构	抛石挤淤泥或者吹砂填筑, 形成斜坡式围堰, 一般用于较浅海域, 对海洋环境扰动大	—
回填材料	建筑垃圾、碎石和砂, 对海洋产生扰动, 容易产生沉降	回填和排水同时进行, 填筑材料中的颗粒物溢出对海洋产生污染, 容易产生沉降
建设时间	各个工序依次进行, 建设时间长	各个工序依次进行, 建设时间长
后续工程施工	需要再次开挖, 进行地下结构建设	需要再次开挖, 进行地下结构建设

2 人工海岛同步建造新思路

2.1 人工海岛同步建造技术的定义

人工海岛同步建造技术指的是在进行人工岛围堰结构施工后, 同步进行岛内装配式地下结构施工, 再进行人工岛填筑材料的回填, 形成完整的人工岛的施工过程。同步建造主要施工步骤为: 在预定区域的外侧两端相向建造围堰, 填土区进行海上水泥土搅拌桩地基加固, 围堰结束后进行海水抽取和原状海底平整铺设基础的砂垫层; 桩基础施工后, 进行隧道、管廊和地下室等装配式地下工程结构施工, 并把回填土旋转于下一个结构的施工工作面, 待进行结构施工后再进行回填, 直至指定标高。人工海岛同步建设具有节约建造时间、减少填筑材料使用、降低造价和绿色环保等优点。

2.2 人工海岛同步建造技术的施工方法

为了解决上述存在建设周期长及重复开挖、支

护的问题, 提供一种同步建造人工海岛城市的施工方法, 即围堰式填海(干法), 如图2。该方法充分利用预制装配式结构的优点, 在填筑过程中同时进行地下结构施工, 减少填筑材料的使用量和再开挖施工的费用, 大幅缩短建设周期, 减少填海过程中对海洋环境的污染(图3)。主要施工步骤包含:

- 1) 在填土区利用水上水泥搅拌桩进行地基加固(铺设砂垫层);
- 2) 构建围堰结构并进行止水措施;
- 3) 将步骤1)的封闭止水围堰区域内的海水抽排干后, 对原状海底整平, 铺设基础砂垫层, 同时对围堰结构外护岸结构进行施工;
- 4) 进行装配式结构基础施工以及超高层建筑桩基础施工, 进行装配式地下室、地下通道和管廊等地下工程结构施工;
- 5) 根据回填厚度和结构标高进行分层回填, 对地下基础设施永久结构同步进行装配;
- 6) 进行装配式结构基础施工, 重复步骤4)和

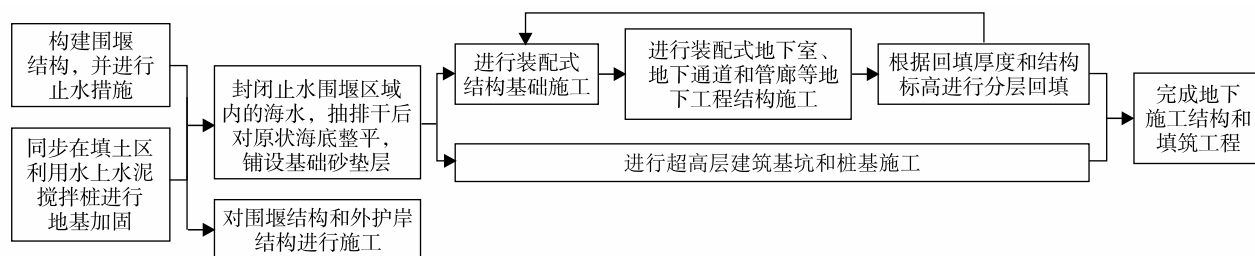


图2 同步建造施工技术过程

Fig. 2 Synchronous construction technology process.

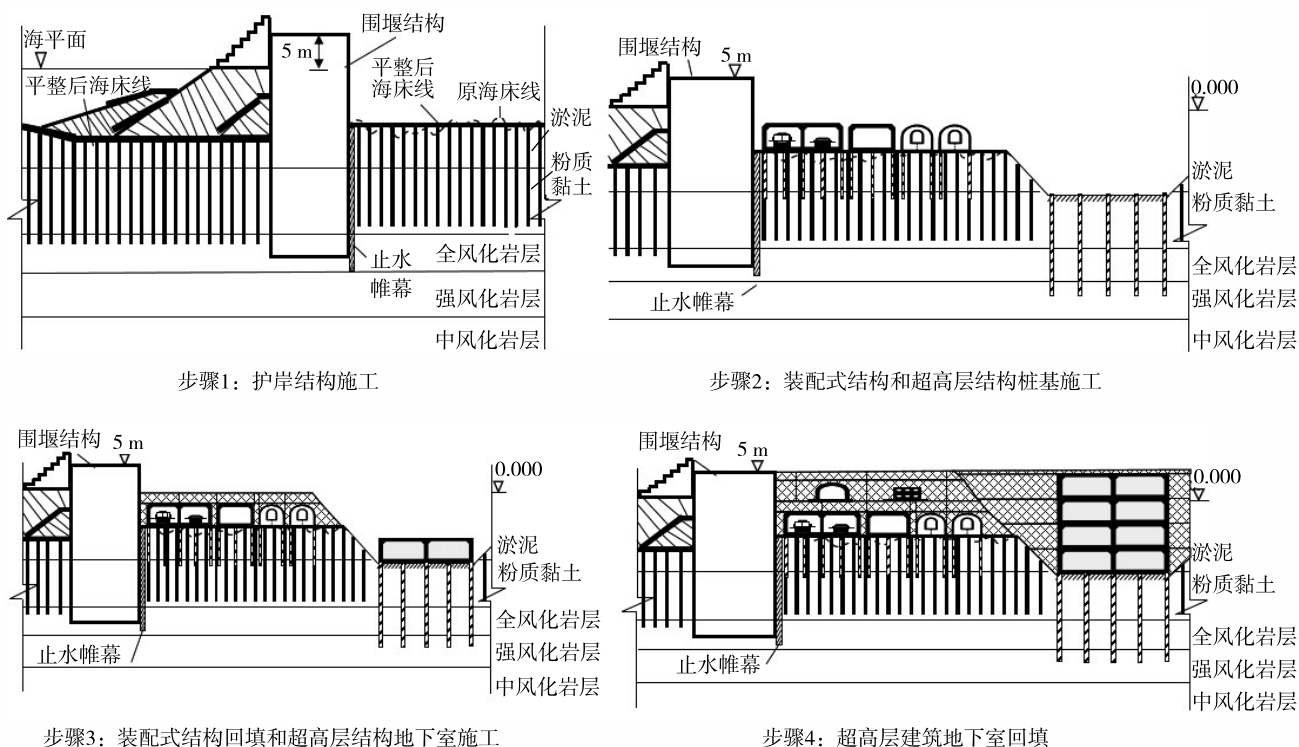


图3 同步建造施工关键技术

Fig. 3 Synchronous construction technology process. Step 1: revetment structure construction; step 2: prefabricated structure construction, super high-rise structure pile foundation construction; step 3: prefabricated structure backfill construction, super high-rise structure basement construction; step 4: super high-rise building basement backfill.

步骤5), 直至装配式地下结构施工及填筑工作完成.

2.3 人工海岛同步建造关键技术

2.3.1 围堰结构稳定性

围堰结构的稳定程度直接影响到水利工程的安全和质量. 海上人工岛钢圆筒围堰的稳定性分析是一个复杂的过程, 受到围堰结构施工技术、施工后受到的波浪冲击和岛内结构施工技术等因素的影响.

1) 围堰施工技术. 人工海岛的围堰结构施工可采用数字表面模型(digital surface model, DSM)法硬土层辅助贯入施工技术, 通过机械搅拌硬土层同

时喷射泥浆, 软化和松动硬土层. 外海施工条件下处理要满足围堰平面位置偏差小于 100 mm、垂直度小于 1% 的高精度要求^[34]. 以 DSM 技术进行围堰结构施工, 能够使钢圆筒围堰结构保持稳定. 钢圆筒之间采用插入式圆弧钢板副格, 通过 T 型榫槽接头与钢圆筒连接, 实现围堰结构整体连接^[35], 保证围堰结构施工期间结构的稳定性和保证施工的精度.

2) 波浪作用. 由于人工岛项目施工工期长, 碰上台风等极端天气情况, 需要考虑大直径钢圆筒围堰面对波浪和极端天气海浪的稳定性分析. 通过离心模型试验, 可以确定波浪荷载作用下插入式钢

圆筒结构的变位特点、土压力和筒身拉应变等特征值的分布特性^[36]。在波浪荷载下钢圆筒的失稳模式主要为倾覆破坏,而非整体平移。在设计和施工过程中,应充分考虑波浪荷载的作用,可采用加大钢圆筒的壁厚、改变筒体的几何形状或者采用更高强度的材料等方式,以确保钢圆筒在波浪下的稳定性。

3) 岛内施工技术。在围堰结构完成后,排干海水,进行装配式地下结构施工。围堰结构处于悬臂状态,外侧受到海水侧压力和波浪作用。为避免在进行地下装配式结构施工期间,围堰结构发生倾覆破坏等情况,需要对该工况进行受力分析。在结构设计时,考虑抽干海水后钢圆筒土压力分布、基底结构的稳定性以及围堰与周围环境的相互作用等因素,确保围堰结构不会发生倾覆、滑动或变形等不稳定现象。在钢圆筒围堰施工后,通过在筒身布设土压力计,对钢圆筒在成岛过程中各个工序下的受力状况进行监测,客观反映钢圆筒工作状态下的土压力分布形式和分布规律。根据监测数据,应对突发事件,采取适当措施保证钢圆筒的稳定性。

围堰结构的施工要能够保证施工效率、围堰结构稳定性和工程造价的协调。围堰结构在后续施工过程中需要进行实时监测,并建立预警系统^[19],部署传感器,以实时监控围堰的位移、倾斜和应力等关键参数,建立基于数据的分析模型,对可能的危险状态做出预警,确保工程安全。

2.3.2 地下结构施工

在填筑过程中,地下结构施工与土方填筑同时进行,这种并行操作不仅缩短了整个施工周期,降低了工程成本,而且避免了因土体变形对地下结构造成的潜在风险。在施工中还应用了预制装配式结构。预制构件具有工厂化生产的优势,确保了构件质量的稳定性和一致性,从而提高了整体工程质量,同时也提高了施工效率。采用水上水泥搅拌桩等技术进行地基加固,增强了地下结构的承载能力和稳定性,确保了工程的安全。根据不同的回填厚度和结构标高,进行分层回填,确保了地下基础设施永久结构的装配质量,防止了由于回填不当导致的结构问题。地下结构施工的关键技术特点体现在同步建造、预制装配式结构、围堰式填海(干法)、地基加固、分层回填、绿色环保以及质量与安全保障等方面,这些技术的综合应用为实现高效、安全、绿色的地下工程建设提供了有力支撑。

2.3.3 地面沉降控制

在同步建造人工海岛时,地下结构施工后的填土区地面沉降控制是非常重要的一环,填筑后前几年发生的沉降最大,沉降时间持续达几十年^[24]。地面沉降不仅会影响岛屿的稳定性,还会对周边环境造成不良影响。因此,采取有效的控制方法、技术和途径对于保障人工海岛的安全和可持续发展至关重要。

1) 优化设计和施工方案。在人工海岛的装配式地下结构施工过程中,应充分考虑填土区的地质条件、地下水位等因素的影响,合理选择填土材料和施工方法。

2) 采用先进的地基加固和填土技术。在人工海岛建设的过程中,通过DSM技术进行地基处理,保证地基承载力,在填土过程中可以采用一些先进的填土技术来控制地面沉降。例如,采用振动碾压和强夯等压实方法,提高填土层的稳定性;还可以采用预应力锚杆和土工格栅等支护结构,增强填土层的抗变形能力。在地下结构布置区域设置钢管桩,利用基岩承载,减少地基承受荷载。

3) 加强填土区的监测和管理。在人工海岛建设过程中,应加强对填土区的监测和管理^[37]。具体措施包括:建立填土区地面沉降监测体系,实时监测填土区地面沉降的变化;制定填土区地面沉降应急预案,确保在发生地面沉降时能够及时采取有效措施进行应对;加强对填土区周边环境的保护,防止地面沉降对周边环境造成不良影响。

2.4 人工海岛同步建造技术的优点

发展地下结构装配式建造技术,探索人工筑岛和地下结构同步建造方式,具备以下优点。

2.4.1 大幅缩短建设时间

传统人工岛及其地下空间传统建造方法是先在水域中填筑围堰,待围堰形成后再以吹填砂或淤泥等方式回填料造陆,进行软基加固,在人工陆域(岛)上进行围护结构施工,相继进行地下基坑开挖^[38-39]。传统式填岛技术使用串联式(流水式)施工方式,建设周期长。同步建造技术采用并联式施工方式,采用预制装配式地下结构,在回填土过程中进行地下工程施工,提高施工效率,降低建设时间。以 $2.4 \times 10^6 \text{ m}^2$ 的造岛为例,传统人工海岛建设通过地基处理、围堰建设、回填砂土、基坑开挖和地下工程施工,工期大概需要126个月。同步建造方法通过地基处理、围堰建设、岛内排水、结构

施工和回填砂土修建人工岛, 工期约 66 个月, 节省 60 个月时间。

2.4.2 减少填筑材料回填

目前人工海岛城市地下空间建造采用明挖基坑, 或暗挖、盾构掘进和顶管等非明挖的施工方式^[40], 把填筑材料再次挖走, 浪费地下结构铺设的

空间的填筑材料, 造成填筑材料的二次运输, 产生资源浪费和增加工程量负担。同步建造施工采取“施工一层结构、回填一层土体”的形式进行人工海岛建设, 当人工海岛地下结构施工完毕后, 人工海岛填筑结束, 节省了地下空间体积部分的填筑材料, 如图 4。

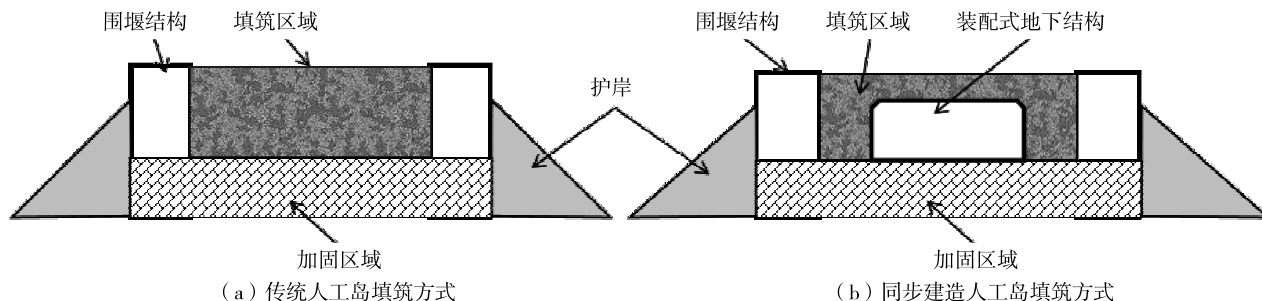


图 4 不同人工岛填筑方式的区别

Fig. 4 Differences of filling methods for different artificial islands. (a) Traditional artificial island filling method, (b) synchronous construction of artificial island filling method.

2.4.3 节约建设成本

以 240 万 m^2 的人工岛工程为例, 同步建造技术通过缩短建造时间和优化建设工序, 采用预制装配式地下结构, 减少填筑材料的开挖和运输, 针对地铁、地下道路、地下综合管廊和地上建筑的基坑工程, 考虑土方开挖、运输和地下临时围挡支护工程, 总造价将节约 127.12 亿港元, 有效节约建设成本, 如表 6 所示。

表 6 节约建设成本

Table 6 Save construction costs

工程类别	工程体量	土方开挖及 运输/万港元	支护结构工 程/万港元	合计/ 万港元
地铁	2.56 km	28 950	22 250	51 200
地下道路	48.0 km	103 680	71 520	175 200
地下综合 管廊	12.0 km	17 880	12 960	30 840
建筑基坑	400 万 m^3	894 000	120 000	1 014 000

2.4.4 减少对海洋环境的污染

相对于传统抛石填海和吹砂填海等填海技术, 在围堰结构未完成时进行填海, 填海区域直接与围堰区域外海洋进行连接, 围堰区域填筑会造成附近海域扰动, 填土区域填筑材料颗粒也会漂浮到附近海域, 对环境造成污染。同步建造技术通过大量使用预制装配式地下结构, 围堰结构施工完成并进行止水后再对填土区域施工, 填土区域与海洋环境进行

隔绝, 减少现浇混凝土和填筑材料的使用, 降低了填海过程对于海洋环境的污染。

2.4.5 实现低碳减排目标

在人工海岛建设中, 采用预制装配式地下结构替代传统的现浇混凝土结构, 有助于在各阶段提升碳减排效益。在运输阶段, 由一体式装配结构的运输代替施工材料和机械的运输, 可减少运输次数, 提升装载效率, 降低燃料消耗, 减少温室气体排放。在施工阶段, 减少了开挖阶段各类施工机械使用过程中产生的碳排放, 以及临时支护材料在上游生产过程产生的碳排放。此外, 与现浇混凝土结构施工相比, 采用预制装配式地下结构施工可以缩小地基处理的范围, 减少碳排放量。

结 语

人工岛海岛工程与地下基础设施同步建造方法是涉及城市整体规划、海上地基处理、海墙施工、岛屿回填工程以及岛上基础设施建设的一种全新技术方法, 主要步骤包含地基加固、围堰结构构建、海水抽排、原状海底整平、地下工程结构施工和分层回填等, 流程清晰有序。这种方法的应用, 可以提高建设效率, 缩短工期, 降低建设成本, 同时能够确保人工岛城市的可持续发展和整体建设质量, 可用于大型居住式人工岛建造, 具有广泛的应用前景。然而, 人工海岛的建设涉及多个工程主管部门

和多个业主单位的综合性项目,需要各个部门之间的紧密合作和协调,确保各方利益的平衡和整体规划的顺利进行。同时,同步建造技术需要严格控制围堰结构的稳定性和地面沉降的沉降量,需要较高的建造技术和管理方法,该技术还需在实践中不断完善。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52090084);深圳市科技计划资助项目(20220808143139001);深圳大学2035追求卓越研究计划资助项目(2022B007)

作者简介: 张明(zhangming@cohil.com),中国建筑工程(香港)有限公司高级工程师。研究方向:隧道建设与施工。

引文: 张明,陈湘生,陈长卿,等.人工海岛建设技术现状与同步建造新思路[J].深圳大学学报理工版,2025,42(1):19-29.

参考文献 / References:

- [1] RADHI H, SHARPLES S, ASSEM E. Impact of urban heat islands on the thermal comfort and cooling energy demand of artificial islands: a case study of AMWAJ Islands in Bahrain [J]. Sustainable Cities and Society, 2015, 19: 310-318.
- [2] NIEUWENHOUT C, ANDREASSON L M. The legal framework for artificial energy islands in the northern seas [J]. International Journal of Marine and Coastal Law, 2023, 39(1): 39-72.
- [3] 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):72-83,120.
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, 120. (in Chinese)
- [4] 陈祥龙,江舜武,金亚伟,等.海南海花岛软基处理工程中真空预压法的改进与机理分析[J].土木建筑与环境工程,2017,39(2):75-83.
CHEN Xianglong, JIANG Shunwu, JIN Yawei, et al. Amendment of vacuum preloading technique in the application at Hainan sea flower Island and its improvement mechanism [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2017, 39(2): 75-83. (in Chinese)
- [5] 黄道金,杨志远.沙特吉赞人工岛设计浅析[J].珠江水运,2021(13):113-116.
HUANG Daojin, YANG Zhiyuan. Analysis on the design of Jizan Artificial Island in Saudi Arabia [J]. Pearl River Water Transport, 2021 (13): 113-116. (in Chinese)
- [6] 刘宪博.外海人工岛护岸堤顶高程及越浪量研究[D].长沙:长沙理工大学,2015.
LIU Xianbo. The research on revetment crest elevation and overtopping of offsea man-made island [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [7] 王彦林,闫禹.港珠澳大桥外海人工岛快速成岛技术[J].施工技术,2012,41(8):47-51,66.
WANG Yanlin, YAN Yu. Rapid island-formation technology about artificial island in open sea in Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge [J]. Construction Technology, 2012, 41(8): 47-51, 66. (in Chinese)
- [8] 李翔,唐伟.公众填料在香港国际机场第三跑道填海工程的应用[J].中国港湾建设,2022,42(2):6-9.
LI Xiang, TANG Wei. Application of public fill in the main reclamation works of Hong Kong International Airport three runway system project [J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(2): 6-9. (in Chinese)
- [9] 王诺,郁艸兰,吴暖,等.大连海上机场人工岛护岸结构整体波浪物理模型试验研究[J].水运工程,2015(4):19-23.
WANG Nuo, YU Tiaolan, WU Nuan, et al. Experimental study on whole physics wave model of revetment structure of Dalian offshore airport artificial island [J]. Port & Waterway Engineering, 2015 (4): 19-23. (in Chinese)
- [10] 黑耀光,刘文萍.打破马六甲困局,为海上丝绸之路提供安全保障的两个港口——瓜达尔港、皇京港[J].地理教学,2017(11):53-55.
HEI Yaoguang, LIU Wenping. Break the Malacca dilemma and provide security for the two ports of the Maritime Silk Road-Gwadar port and Huangjing port [J]. Geography Teaching, 2017 (11): 53-55. (in Chinese)
- [11] 林鸣,裴岷山,刘晓东,等.港珠澳大桥岛隧工程建设技术[J].东南大学学报自然科学版,2023,53(6):955-964.
LIN Ming, PEI Minshan, LIU Xiaodong, et al. Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge island-tunnel project building technology [J]. Journal of Southeast University Natural Science Edition, 2023, 53(6): 955-964. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 龚文平,李昌宇,林国尧,等.DELFT 3D在离岸人工岛建设中的应用——以海南岛万宁日月湾人工岛为例[J].海洋工程,2012,30(3):35-44.
GONG Wenping, LI Changyu, LIN Guoyao, et al. Application of DELFT 3D model for plan design of an artificial island—a case study for the artificial island construction

- tion in the Riyue Bay, Wanning City, Hainan Island [J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(3): 35-44. (in Chinese)
- [14] 闫禹, 何杰, 徐贝贝, 等. 港珠澳大桥人工岛水下滩槽演变的数值模拟与工程检验[J]. 海洋工程, 2022, 40(4): 1-10.
- YAN Yu, HE Jie, XU Beibei, et al. Engineering effect test and inspection of the evolution of the seabed level near the artificial island of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. The Ocean Engineering, 2022, 40(4): 1-10. (in Chinese)
- [15] 董志良, 刘嘉, 朱幸科, 等. 大面积围海造陆围堰工程关键技术研究及应用[J]. 水运工程, 2015(2): 9-17.
- DONG Zhiliang, LIU Jia, ZHU Xingke, et al. Key technology research and application of cofferdam construction in large-area reclamation project [J]. Port & Waterway Engineering, 2015 (2): 9-17. (in Chinese)
- [16] 席明军, 荣万岭, 钱华伟, 等. 外海人工岛工程施工技术[J]. 中国港湾建设, 2009(4): 49-54.
- XI Mingjun, RONG Wanling, QIAN Huawei, et al. Construction technologies of man-made island projects on open sea [J]. China Harbour Engineering, 2009 (4): 49-54. (in Chinese)
- [17] 人民网. 科伦坡港口城填海造地完工[EB/OL]. (2019-01-18) [2024-10-14]. <http://world.people.com.cn/gb/n1/2019/0118/c1002-30575633.html>.
- People's Daily Online. Land reclamation of Colombo Port City completed [EB/OL]. (2019-01-18) [2024-10-14]. <http://world.people.com.cn/gb/n1/2019/0118/c1002-30575633.html>. (in Chinese)
- [18] 林鸣, 林巍, 王汝凯, 等. 人工岛快速成岛技术: 深插大直径钢圆筒与副格[J]. 水道港口, 2018, 39(S2): 32-42.
- LIN Ming, LIN Wei, WANG Rukai, et al. Artificial island rapid construction technique: deep-insert and large diameter steel cylinders and auxiliary cells [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(S2): 32-42. (in Chinese)
- [19] 匡一成, 杨铠波, 尹平保, 等. 吹填人工岛软基处理及围堰变形监测分析[J]. 中外公路, 2023, 43(6): 21-26.
- KUANG Yicheng, YANG Kaibo, YIN Pingbao, et al. Cofferdam deformation monitoring and soft foundation treatment for hydraulic reclamation artificial island [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 21-26. (in Chinese)
- [20] 姚志安. 深中通道伶仃洋大桥筑岛围堰施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2020, 48(2): 15-19.
- YAO Zhian. Key construction techniques for artificial island cofferdam of Lingdingyang bridge on Shenzhen-Zhongshan link [J]. World Bridges, 2020, 48(2): 15-19. (in Chinese)
- [21] TATSUOKA F. Cement-mixed soils in trans-Tokyo bay highway project [J]. Soils and Foundations, 2010, 50(6): 785-804.
- [22] 林鸣, 梁桁, 刘晓东, 等. 海上挤密砂桩工法及其在港珠澳大桥岛隧工程的应用[J]. 中国港湾建设, 2012, 32(4): 72-77.
- LIN Ming, LIANG Hang, LIU Xiaodong, et al. Method for construction of offshore sand compaction piles and its application for island and tunnel project for Hongkong-Zhuhai-Macao bridge [J]. China Harbour Engineering, 2012, 32(4): 72-77. (in Chinese)
- [23] 吴加武. DCM 桩在岛体斜坡式围堰地基加固中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 164-167, 193.
- WU Jiawu. Application of DCM piles in foundation reinforcement of slope cofferdam of artificial island [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(3): 164-167, 193. (in Chinese)
- [24] 赵熠. 金州湾填海造陆区碎石土性质及机场沉降研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2021.
- ZHAO Yi. Study on properties of gravel soil and airport settlement in Jinzhou Bay reclamation area [D]. Jilin: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [25] 刘腾飞, 赵亚州. 铺砂驳船分层铺砂施工技术在填海造地工程中的应用研究[J]. 珠江水运, 2023(16): 112-114.
- LIU Tengfei, ZHAO Yazhou. Research on the application of layered sand placement technique using hopper barge in reclamation projects [J]. Pearl River Water Transport, 2023 (16): 112-114. (in Chinese)
- [26] 李建宇, 王征亮, 林佑高, 等. 饱和回填砂及深厚软土地基同步加固技术在港珠澳大桥人工岛中的应用[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(11): 52-57.
- LI Jianyu, WANG Zhengliang, LIN Yougao, et al. Application of synchronous reinforcement technology of saturated backfill sand and deep soft soil foundation in the artificial island of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(11): 52-57. (in Chinese)
- [27] 张明, 蒋瑞波, 樊金, 等. 大规模填海造地工程试验段地基处理方案优选[J]. 河南工程学院学报自然科学版, 2015, 27(4): 30-34.
- ZHANG Ming, JIANG Ruibo, FAN Jin, et al. Optimization for foundation treatment schemes in large-scale land reclamation project [J]. Journal of Hennan Institute of Engineering Natural Science Edition, 2015, 27

- (4): 30-34. (in Chinese)
- [28] 孙洪春, 张焕. 港珠澳大桥东人工岛工程深厚软基处理综合技术[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(11): 15-19.
- SUN Hongchun, ZHANG Huan. Deep soft foundation treatment comprehensive technology in east artificial island project of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(11): 15-19. (in Chinese)
- [29] 琚烈红, 刘清君, 黄哲, 等. 海堤安全风险评估技术研究[J]. 海洋工程, 2022, 40(3): 93-104.
- JU Liehong, LIU Qingjun, HUANG Zhe, et al. Research on seawall safety risk level assessment technology [J]. The Ocean Engineering, 2022, 40(3): 93-104. (in Chinese)
- [30] 文杰, 周书东, 田锦虎, 等. 预制直立式桩墙护岸工程技术研究与应用[J]. 低碳世界, 2021, 11(11): 120-122.
- WEN Jie, ZHOU Shudong, TIAN Jinhu, et al. Research and application of prefabricated upright pile wall shore protection engineering technology [J]. Low Carbon World, 2021, 11(11): 120-122. (in Chinese)
- [31] 胡彦伟, 谢勇, 潘柏安. 简述马尼拉某人工岛临港侧护岸的结构选型[J]. 港工技术, 2023, 60(3): 78-82.
- HU Yanwei, XIE Yong, PAN Baian. Structural selection for port-adjacent revetment of an artificial island in Manila [J]. Port Engineering Technology, 2023, 60(3): 78-82. (in Chinese)
- [32] 曹海峰, 吴鹏. 吹填法填海造地悬沙对施工工艺的影响[J]. 中国水运, 2020, 20(5): 228-229.
- CAO Haifeng, WU Peng. Impact of blown reclamation reclamation of suspended sand on construction processes [J]. China Water Transport, 2020, 20(5): 228-229. (in Chinese)
- [33] YU Zhifa, LI Bin, QIU Wen, et al. Research on settlement test and numerical calculation of west artificial island foundation of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 16(S2): 56-65.
- [34] 安秀山, 冯宝强. DSM法硬土层辅助贯入施工技术的研发与应用[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(5): 16-19, 54.
- AN Xiushan, FENG Baoqiang. Development and application of DSM-assisted penetration construction technology for hard soil layer [J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(5): 16-19, 54. (in Chinese)
- [35] LIU Aimin, LI Bin, CHEN Junhao, et al. Research and application of large diameter steel cylinder island construction technology in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge project [J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 16(S2): 33-41.
- [36] 刘文彬, 王雪奎, 洪兆徽. 波浪荷载作用下插入式钢圆筒稳定性的离心模型试验研究[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(6): 31-36.
- LIU Wenbin, WANG Xuekui, HONG Zhaohui. Centrifuge model test on the stability of plug-in steel cylinder under the action of wave load [J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(6): 31-36. (in Chinese)
- [37] 黄丰, 段书苏, 周智, 等. 时序InSAR技术在吹填人工岛礁沉降监测中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(7): 696-702.
- HUANG Feng, DUAN Shusu, ZHOU Zhi, et al. Application of time-series InSAR technology for settlement monitoring of hydraulic artificial island-reef [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(7): 696-702. (in Chinese)
- [38] 徐杰. 吹填人工岛硬土层中超深沉井施工关键技术[J]. 山西建筑, 2021, 47(12): 77-79.
- XU Jie. Key technology for construction of ultra-deep well in hard soil layer of dredging human island [J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(12): 77-79. (in Chinese)
- [39] 刘坤, 郑诺, 侯禹辰, 等. 钢支撑伺服系统在海域人工岛中明挖基坑施工中的应用[J]. 铁道建筑, 2023, 63(12): 143-147.
- LIU Kun, ZHENG Nuo, HOU Yuchen, et al. Application of steel support servo system in construction of open cut foundation pit under artificial island in sea area [J]. Railway Engineering, 2023, 63(12): 143-147. (in Chinese)
- [40] 童辉, 赵德志, 陈扩晋, 等. 填海造陆过程中的“筑岛”运砂施工技术[J]. 建筑施工, 2018, 40(2): 168-171.
- TONG Hui, ZHAO Dezhi, CHEN Kuojin, et al. Construction technology of sand transportation for "building island" in the process of land reclamation from sea [J]. Building Construction, 2018, 40(2): 168-171. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】



补充材料