

· 施 工 ·



海上人工岛浅插式钢圆筒护岸结构设计要点

张博杰¹, 陈海锋¹, 王婷婷², 唐 云¹

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290; 2. 广州航海学院, 广东 广州 510330)

摘要: 针对某超大规模海上人工岛工程在水深浪大、硬质土地基条件下需快速形成的关键技术问题, 提出浅插式钢圆筒护岸结构, 并对其结构稳定性、高程合理性及结构耐久性进行深入研究。采用规范公式、三维有限元数值模拟与离心模型试验相结合的方法, 综合验算了结构稳定性能够满足要求; 通过规范公式、波浪断面物理模型试验及波浪三维局部整体物理模型试验进行对比分析, 验证了设置扭王字块消浪平台可有效降低护岸顶高程; 采用防腐涂层、牺牲阳极与外加电流阴极保护、混凝土包覆的联合防腐措施, 并结合腐蚀余量, 论证了结构耐久性可满足百年使用要求。结论表明, 该浅插式钢圆筒护岸结构安全可靠、技术可行, 可为类似海上人工岛工程快速成岛设计提供参考。

关键词: 海上人工岛; 浅插式钢圆筒; 护岸结构; 设计要点; 稳定性; 耐久性

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0227-06

Key design points of shallow-inserted steel cylinder revetment structure for offshore artificial islands

ZHANG Bojie¹, CHEN Haifeng¹, WANG Tingting², TANG Yun¹

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., GuangZhou 510290, China; 2. Guangzhou Maritime University, GuangZhou 510330, China)

Abstract: To the key technical issue of rapidly forming a containment structure for a super-large-scale offshore artificial island project under conditions of deep water, large waves, and hard soil foundation, a shallow-inserted steel cylindrical revetment structure is proposed. In-depth research is conducted on the structural stability, elevation rationality, and structural durability of this structure. The structural stability is comprehensively verified to meet the requirements by combining the normative formula, three-dimensional finite element numerical simulation, and centrifugal model tests. Through comparative analysis using the normative formula, physical model tests of wave section, and three-dimensional local and overall physical model tests, it has been verified that the installation of a twisted block wave dissipation platform can effectively reduce the top elevation of the revetment. The structural durability is demonstrated to meet the century-long usage requirements by adopting a combined anti-corrosion measure of anti-corrosion coating, sacrificial anode and external current cathodic protection, and concrete coating, in combination with corrosion allowance. The research conclusion indicates that the shallow-inserted steel cylindrical structure revetment is safe, reliable, and technically feasible, which can provide reference for the rapid island formation design of similar offshore artificial island projects.

Keywords: offshore artificial island; shallow-inserted steel cylinder; revetment structure; key design points; stability; durability

近年来, 沿海地区经济的快速发展导致陆域空间日趋紧张。海上人工岛作为高效利用海洋空间、缓解用地压力的措施, 受到广泛关注。护岸

作为海上人工岛的重要组成部分, 是人工岛形成的先决条件, 需率先快速利用护岸形成围蔽, 方能开展人工岛陆域回填作业, 因此护岸的选型和

收稿日期: 2025-09-19 录用日期: 2025-10-27

作者简介: 张博杰(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程结构设计工作。

设计至关重要。常规的护岸结构包括抛石斜坡式结构、重力式沉箱结构等,但鉴于不同地区的自然环境和地质条件等差异,护岸结构往往需根据实际情况开展设计工作,诸多学者针对海上人工岛不同的护岸结构进行了大量深入研究^[1-6]。

钢圆筒护岸作为一种新型结构形式,具有施工工期短、结构受力条件好等诸多优点。近年来在港珠澳大桥岛隧人工岛工程、深中通道西人工岛工程得以广泛应用^[7-8],岛体护岸主体结构采用钢圆筒结构作为临时施工止水围堰结构,但上述工程中钢圆筒结构都是在深厚软土地基中实施,可较好地沉入软土地基以达到较大的人土深度,并且仅作为临时结构。本文基于某海上人工岛工程,提出在硬质土地基中使用浅插式钢圆筒作为永久护岸结构,探讨其结构设计要点,可为后续类似工程项目提供参考。

1 工程概况

某海上机场人工岛建设规模超大,其用海面积为2 995.2万 m^2 ,陆域形成面积为2 398.7万 m^2 ,陆域填方量约62 652.8万 m^3 ,人工岛护岸总长为19 537 m,人工岛平面见图1。由于老机场的旅客及货物吞吐量已趋近饱和状态,且近年来始终保持高速增长,急需尽快启用新机场。然而受土地资源、地理环境、空域管制等诸多条件的限制,新机场只能通过填海造陆的方式形成。海上人工岛作为新机场建设的基础工程,其按时完工对新机场整体建设进度起着决定性作用,因此必须尽早完成。

护岸是海上人工岛形成的关键先决条件,在海上人工岛建设过程中,只有外侧护岸形成围蔽后,方可确保陆域在施工及后续使用中免受波浪和潮流的冲刷破坏。但工程区水深浪大,其中南侧护岸平均水深达24 m,且经常遭受台风的袭击,同时该区域地处外海,常年盛行长周期波,并且

地基土多为硬土质,给护岸结构的设计带来了巨大挑战。针对该工程区的特点,提出先开挖基槽后换填砂的浅插式钢圆筒护岸结构,并采用规范公式、三维有限元数值模拟及离心模型试验分别验算结构的稳定性;同时通过在护岸顶部设置扭王字块消浪平台降低护岸顶高程,并采用规范公式、波浪断面物理模型试验及波浪三维局部整体物理模型试验验证高程的合理性;另外采取预留腐蚀余量、防腐涂层、牺牲阳极阴极保护,外加电流阴极保护及混凝土包覆联合防腐措施,确保钢圆筒护岸结构百年使用要求。

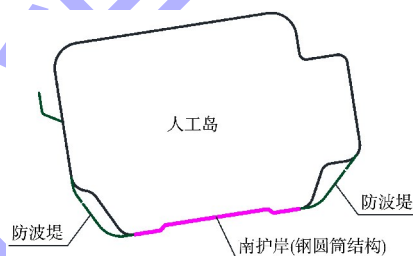


图1 人工岛平面

Fig. 1 Artificial island plan

2 设计条件

该海上人工岛设计使用年限为100 a。护岸结构安全性使用期按300 a一遇水位+300 a一遇波浪设计,施工期按施工水位+25 a一遇波浪设计。护岸越浪量按照100 a一遇水位+100 a一遇波浪设计,越浪量 $\leq 0.05 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。

工程区域内所揭示的地层主要为海陆交互沉积的地层,上部为第四系全新统地层,包括淤泥、淤泥混砂、松散-稍密的中粗砂及其混合土层,下部为第四系中更新统北海组土层,包括中等-坚硬状的黏土-粉质黏土、中密-极密实的粉细砂、中粗砂、砾砂层。土体主要物理力学参数见表1。

该工程设计高水位为1.84 m,设计低水位为0.09 m,极端高水位为2.66 m,极端低水位为-0.65 m,300 a一遇高水位为3.10 m,100 a一遇高水位为2.80 m。设计波浪要素见表2。

4 护岸结构选型要点

该海上人工岛工程位于离岸约4 000 m处, 周边无任何掩护条件, 直接暴露于外海环境。外海海况复杂, 常年盛行长周期波, 且台风频发, 对工程施工构成极大挑战。根据人工岛工程施工总体要求, 必须尽快完成南护岸建设, 为陆域回填作业创造可靠的掩护条件, 确保整个工程的顺利推进。因此, 南护岸的结构选型至关重要。

若选用传统的沉箱结构, 会面临沉箱预制周期冗长的问题, 难以满足施工工期的紧迫需求; 并且沉箱海上浮运、安装过程极易受长周期波浪的干扰, 导致精准定位困难, 安装难度显著增加。若采用传统的抛石斜坡堤结构, 所需块石数量极为庞大, 石料供应根本无法满足实际需求; 并且在施工过程中, 抛填的堤心块石一旦露出水面, 便会遭受长周期波浪的冲击而遭到破坏; 同时受频繁来袭台风的影响, 施工期内难以及时形成具备防护功能的有效坡面结构, 势必会遭受大面积的破坏。

钢圆筒结构具备制造工艺简单、制造周期短等优势, 单个钢圆筒的生产周期仅需30 d左右, 其薄壁构造使得整体质量较小, 单个钢圆筒质量约为700 t, 可通过平板驳直接从预制场地运输至工程区, 平板驳单次可运输多个钢圆筒。钢圆筒现场安装采用12锤联动振动下沉技术, 安装效率极高, 钢圆筒夹持、吊运、定位、下沉及振沉, 一般仅需5 h左右。此外, 该结构在施工期间能维持良好的稳定性, 可有效抵御长周期波浪与台风的侵袭, 形成良好的遮蔽效果。由此可见, 相比于传统方案, 钢圆筒结构在制造、安装速度及稳定性方面表现更佳, 能够满足人工岛工程快速成岛的需求, 因此南护岸最终推荐采用钢圆筒结构方案。

5 地基处理设计要点

该人工岛工程区域地质条件较好, 除表层分布较薄的淤泥层外, 下部均为承载力较高的黏土或砂层, 不同于港珠澳大桥和深中通道人工岛工程的软土地基, 钢圆筒可以通过沉入较深的地基

土, 依靠侧向土压力来维持稳定。工程区域的地质条件总体上分布相对均匀, 但由于钢圆筒直径较大, 沿筒壁周围的地质状况难免会存在分布不均匀的情况, 而钢圆筒壁厚较薄, 在振沉过程中很可能因为地质差异导致筒体倾斜, 将会增加大量的时间和精力进行钢圆筒的纠偏和反复振沉作业, 显著增加海上作业时间和难度, 同时也需要更长的施工窗口期。此外若局部表层地质较硬, 还可能出现钢圆筒无法下沉的情况, 进而无法确保钢圆筒达到设计的入土深度, 难以满足稳定性要求, 并且钢圆筒顶部超出设计高程的部分也很难割除。

针对工程的实际情况, 提出了浅插式钢圆筒结构方案, 充分利用钢圆筒自身的质量, 并结合部分侧向土压力, 共同维持钢圆筒结构的稳定性。钢圆筒基础采用先开挖基槽后换填砂的方案, 换填砂厚度5 m, 实际启动振动锤振沉仅需2 min左右即可穿透换填砂层, 整个振沉过程仅约为1 h。该方案不仅确保了钢圆筒能够顺利振沉至设计高程, 还显著降低了施工技术难度, 加快了施工进度, 同时换填砂层也为钢圆筒提供了一定的侧向支撑力, 保证了钢圆筒振沉后的稳定性与安全性。

由于基槽换填砂密实度不高, 即使经过振冲密实, 也不足以满足钢圆筒结构承载力的要求, 钢圆筒的垂直度也无法得到有效控制, 因此钢圆筒需要进入承载力较高的原状土层作为持力层。根据地质资料分析, 高程-31.5 m位置地质均匀性较好, 且基本为坚硬黏土-粉质黏土层或砂土层, 适合作为钢圆筒的持力层。考虑到基槽开挖超深因素、基槽开挖对于原状土的扰动以及原状土泡水软化等影响, 经综合考虑, 基槽开挖至高程-30.5 m, 即钢圆筒按照沉入原状地基土1 m设计。

6 护岸结构稳定性

浅插式钢圆筒结构作为一种新型护岸结构, 在国内仍处于起步阶段, 计算理论不完善, 设计经验有限, 行业内尚无统一认可的结构稳定与变

位的计算理论和方法, 同时浅插式钢圆筒结构受力复杂, 其在横向荷载作用下的受力模式兼具桩基结构和重力式结构的受力特征。为确保钢圆筒护岸结构的安全性, 采用 *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan* (TSC-PHFJ, 2025)^[9] 和 Plaxis 3D^[10] 三维有限元软件分别计算结构的稳定性, 同时采用离心模型试验进一步验证, 确保结构的安全性。

TSC-PHFJ 把三维空间问题简化成平面问题, 将钢圆筒结构作为支撑于弹性地基上的刚体, 建立作用在刚体上的外力与土体抗力平衡方程进行计算, 计算结果见表 3, 可见钢圆筒护岸结构施工期和使用期安全系数均满足规范 ≥ 1.2 的要求。

表 3 基于 TSC-PHFJ 计算结果
Tab. 3 Calculation results based on TSC-PHFJ

工况	安全系数			地基承载力
	抗滑稳定性	抗剪切稳定性 (沿泥面)	抗剪切稳定性 (沿筒底)	
施工期	2.81	1.33	1.66	4.16
使用期	3.58	1.21	1.23	3.87

采用 Plaxis 3D 三维有限元软件建立浅插式钢圆筒护岸结构施工期和使用期的计算模型来计算其位移和整体稳定性, 计算模型分别见图 3, 位移计算考虑了土体的塑性变形, 整体稳定性采用强度折减法, 计算结果见表 4, 可见钢圆筒护岸结构施工期和使用期计算位移基本能满足护岸的使用要求, 整体稳定性满足安全要求。

为进一步验证浅插式钢圆筒护岸结构的稳定性, 采用离心模拟试验进行验证。根据试验结果, 钢圆筒结构发生一定位移, 但能趋于稳定, 其筒顶施工期和使用期的水平位移稳定值分别为 0.353 和 0.730 m, 沉降稳定值分别为 0.187 和 0.220 m。试验结果表明, 浅插式钢圆筒护岸结构在施工期和使用期结构整体稳定, 设计方案安全合理。

表 4 基于 Plaxis 3D 计算结果
Tab. 4 Calculation results by Plaxis 3D

工况	水平位移/m	整体稳定性安全系数
施工期	0.42	1.81
使用期	0.45	1.62

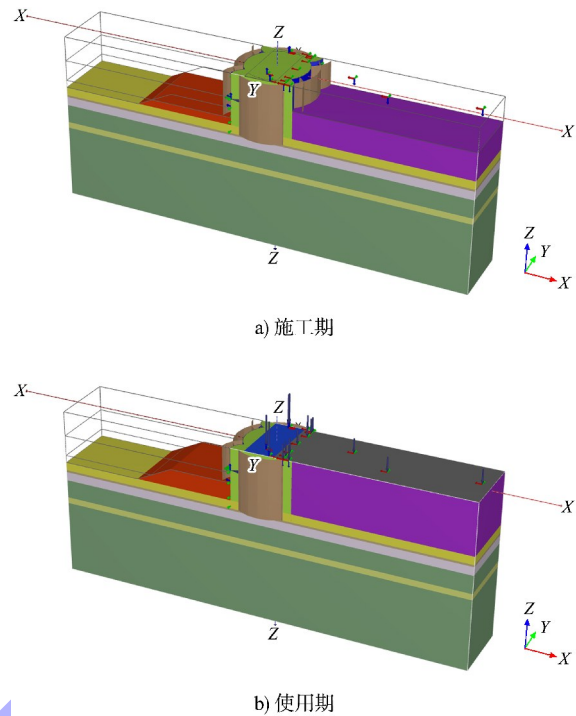


图 3 护岸三维有限元计算模型
Fig. 3 3D finite element model of revetment

7 护岸顶高程设计要点

该项目人工岛工程护岸顶高程根据越浪量确定, 设计标准按照 100 a 一遇水位+100 a 一遇波浪的组合条件, 越浪量 $\leq 0.05 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。鉴于机场周边严格的限高要求, 兼顾经济性和美观性, 需尽可能降低护岸顶高程, 因此提出将防浪墙合理后移并在前方设置扭王字块消浪平台的方案。在消浪平台前方, 3 块扭王字块嵌入至钢圆筒顶部封顶混凝土内, 形成稳固的压脚, 后方扭王字块以此为依托, 呈正反式规则排列布置, 达到消浪效果的同时还提升了结构的美观性。

护岸结构越浪量根据 *Coastal engineering manual*^[11] 中越浪量公式进行计算, 计算防浪墙顶高程为 13.7 m 时, 越浪量为 $0.049 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。但由于计算公式未考虑防浪墙前消浪平台的影响, 防浪墙顶高程与越浪量将根据物理模型试验结果进一步优化, 为此开展了波浪断面物理模型试验和波浪三维局部整体物理模型试验。试验结果表明, 护岸防浪墙顶高程为 11.5 m 时, 波浪断面物理模型试验(90°正向浪)的平均越浪量为 $0.041 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$, 波浪三维局部整体物理模型试验(实际浪向)的多

测点平均越浪量为 $0.026 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，可见越浪量满足要求。

8 钢圆筒防腐设计要点

海洋工程钢结构防腐蚀措施一般可采用防腐涂层、阴极保护或包覆等方式。综合考虑该工程钢圆筒表面积大且分别处于不同的腐蚀区域，钢圆筒采用防腐涂层、牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护及混凝土包覆联合防腐措施，结合预留腐蚀余量，确保钢圆筒护岸结构满足 100 a 的使用年限。

钢圆筒外壁海侧浪溅区和水位变动区采用防腐涂层+混凝土包覆层；钢圆筒外壁海侧水下区和泥下区采用防腐涂层+牺牲阳极阴极保护；钢圆筒外壁陆侧和内壁回填区、泥下区采用防腐涂层+外加电流阴极保护。防腐涂层采用无溶剂环氧涂层，钢圆筒外壁海侧浪溅区和水位变动区涂层厚度为 $1\ 500 \mu\text{m}$ ，外壁海侧水下区为 $1\ 200 \mu\text{m}$ ，其余部位为 $900 \mu\text{m}$ 。高效铝合金牺牲阳极阴极保护首次安装设计寿命 25 a，每隔 25 a 更换 1 次；外加电流阴极保护首次安装设计寿命为 50 a，隔 50 a 更换 1 次；100 a 使用年限内阴极保护系统始终连续运行，保护度不低于 90%。钢圆筒海侧外壁浪溅区、水位变动区采用 0.25 m 厚混凝土包覆，钢圆筒表面间隔 0.2 m 焊接钢钉，确保混凝土和钢圆筒的连接性，同时为便于混凝土浇筑，外侧采用钢模板焊接于钢圆筒壁。

9 结语

1) 钢圆筒结构具有制造安装快、稳定性好等特点，可满足复杂海况条件下海上人工岛护岸快速形成围蔽的要求。

2) 在硬质土地基条件下，提出浅插式钢圆筒护岸结构方案，其基础采用先开挖基槽后换填砂方案，确保了钢圆筒振沉的可行性，并采用规范公式、三维有限元数值模拟以及离心模型试验验证结构的稳定性，该结构合理可行。

3) 钢圆筒护岸结构顶部设置扭王字块消浪平台，能够有效降低防浪墙高程。

4) 钢圆筒结构采用防腐涂层、牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护及混凝土包覆联合防腐措施，结合预留腐蚀余量，可满足百年使用要求。

参考文献：

- [1] 刘堃, 吴争光. 低桩承台直立结构在海堤工程中的应用[J]. 水运工程, 2018(9): 76-80.
LIU K, WU Z G. Application of low pile platform vertical structure in sea embankment project [J]. Port & waterway engineering, 2018(9): 76-80.
- [2] 王婷婷, 卢永昌, 彭志豪. 深厚软土地基上插入式钢圆筒的结构稳定性[J]. 水运工程, 2019(9): 294-299.
WANG T T, LU Y C, PENG Z H. Stability of inserted steel cylinder structure on deep soft foundation [J]. Port & waterway engineering, 2019(9): 294-299.
- [3] 王诺, 郁蔚兰, 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 N, YU T L, WU N, 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.
- [4] 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 Y W, XIE Y, PAN B A. Structural selection for port-adjacent revetment of an artificial island in Manila [J]. Port engineering technology, 2023, 60(3): 78-82.
- [5] 邓涛, 龙俞辰, 陈良志. 带肩台坡式护岸结构在海上人工岛的应用[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(10): 36-39.
DENG T, LONG Y C, CHEN L Z. Application of bermed sloping revetment structure for offshore artificial island [J]. China harbour engineering, 2022, 42(10): 36-39.
- [6] 陈波, 孔莉莉, 孙大洋. 珠澳口岸人工岛填海工程护岸设计方案[J]. 港口科技, 2020(1): 45-49.
CHEN B, KONG L L, SUN D Y. Revetment design scheme for artificial island reclamation project at Zhuhai-Macao Port [J]. Port science & technology, 2020(1): 45-49.

(下转第 240 页)