



复杂条件下防波堤结构设计方案比选

姚祎雯, 陈丽琴

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 依托某防波堤项目, 针对工程区域波浪大、地质条件差、工期紧等复杂条件下防波堤结构设计选型问题, 采用理论分析及数值计算方法, 从结构受力特点、耐久性使用、施工难易程度、施工工期及工程造价等多方面对地基处理和结构进行对比, 最终推荐较短时间内可对港区形成有效掩护的沉箱直立堤结构方案(地基处理采用水泥搅拌桩)。研究成果可为类似工程的结构选型提供参考。

关键词: 复杂条件; 防波堤结构; 设计方案比选

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0192-06

Comparison and selection of breakwater structure design schemes in complex conditions

YAO Yiwen, CHEN Liqin

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Based on a breakwater project, aiming at the problems of breakwater structure design selection under complex conditions such as large waves in the engineering area, poor geological conditions and tight construction period, this paper compares and discusses the foundation treatment and structures from the aspects of structural stress characteristics, durability, construction difficulty, construction period and project cost using theoretical analysis and numerical calculation. Finally, the vertical caisson embankment structure scheme (with ground treatment using cement mixed piles) which can provide effective protection to the harbor area within a relatively short period is recommended. The research results can provide reference for the structure selection of similar projects.

Keywords: complex condition; breakwater structure; comparison and selection of design scheme

1 工程概况

随着整车制造产业的入驻, 汽车滚装运输成为了某港区后续发展的重点。港区目前可作业天数约为241 d且泊稳条件相对较差, 无法满足汽车出运的要求^[1]。为提供较好的掩护条件, 亟需新建防波堤3 680 m, 其中东防波堤长2 020 m, 西防波堤长1 660 m。防波堤采用双环抱式平面布置方案, 东防波堤主要掩护ESE—SE向波浪, 西防波堤主要掩护SSW—SE向波浪。为避让生态红线, 采用岛式防波堤方案, 见图1。



图1 防波堤平面布置(单位: m)

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 姚祎雯(1991—), 女, 硕士, 工程师, 从事港口工程设计。

2 施工条件

2.1 工程地质

拟建防波堤原泥面高程为-10~-8 m, 表层为

淤泥、淤泥质土层, 底高程为-28~-20 m, 总厚度为 10~19 m, 主要物理力学指标见表 1。

表 1 软土层的主要物理力学指标

土体名称	含水率 $\omega/\%$	湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	直剪快剪黏聚力 c_{qk}/kPa	直剪快剪内摩擦角 $\varphi_{qk}/(^{\circ})$
① ₁ 素填土	24.4	1.99	0.691	11.1	0.57	28.9	5.4
② ₁ 淤泥-淤泥质土	59.6	1.65	1.626	19.4	1.77	8.0	2.0
② ₁₋₁ 淤泥混砂	31.4	1.86	0.910	8.4	1.80	9.9	11.7
② ₂ 淤泥质土	43.3	1.76	1.192	14.8	1.49	12.6	4.6
② ₃ 黏土-粉质黏土	36.4	1.85	1.022	14.8	0.99	12.5	6.4

2.2 设计波浪

海域主要受 ESE—S 向波浪的影响, 波浪较大, 口门位置 50 a 一遇 $H_{1\%}$ 波高达 8.09 m, 常浪

向为 SE、SSE 向, 出现频率分别为 32.7% 和 29.8%, 堤外前沿波浪采样点布置见图 2, 极端高水位下波浪要素见表 2。

表 2 堤头段极端高水位下设计波浪要素

计算点	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	平均波高 H_m/m	平均周期 T_m/s	平均波长 L_m/m	波浪角度 $D/(^{\circ})$
F_5	(8.09)	(8.09)	7.95	7.08	5.07	11.9	126	155
F_6	(8.09)	7.26	7.09	6.24	4.36	11.5	121	144

注: 括号中为破碎波高。

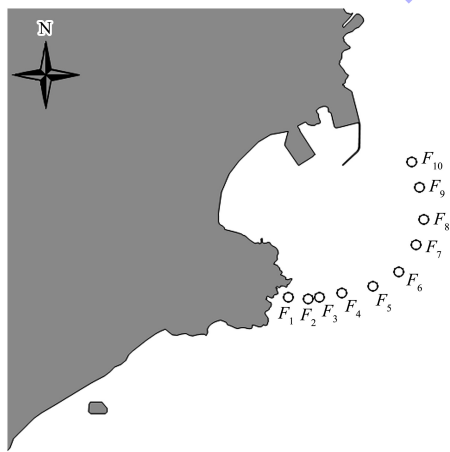


图 2 堤外前沿波浪采样点位布置

2.3 工期要求

为促进港区快速发展, 需要为已建码头及中远期规划建设的其他码头提供良好的掩护条件。为确保港区内滚装船出运, 防波堤工程应尽可能 1 a 内完成。

根据 2021—2023 年汕尾波浪观测数据进行施工窗口期测算(表 3), 观测点距施工现场 1.8 km, 坐标为北纬 22.7°、东经 115.05°, 有效波高 1 m

以下、周期 7 s 以下波浪的出现概率约为 45%, 即年有效作业天数约为 163 d。施工窗口期相对较短, 工期压力大。

表 3 施工窗口期测算

有效波高/m	周期/s	波长/m	窗口概率/%	窗口期/(d·a ⁻¹)
0.6	6	48.4	9	33.7
	7	59.8	15	53.8
0.7	6	48.4	13	47.7
	7	59.8	24	87.1
0.8	6	48.4	17	61.3
	7	59.8	32	116.8
0.9	6	48.4	19	70.9
	7	59.8	39	141.0
1.0	6	48.4	22	79.3
	7	59.8	45	163.6

综上, 本工程地质条件差, 淤泥和淤泥质土具有含水量高、孔隙比高、压缩性高、强度低、灵敏度高特点, 且设计波浪大, 施工海域风浪条件恶劣, 施工窗口期短, 工期压力大。结构方案需充分考虑工期要求, 以达到安全、可靠、耐用、施工便利的要求。

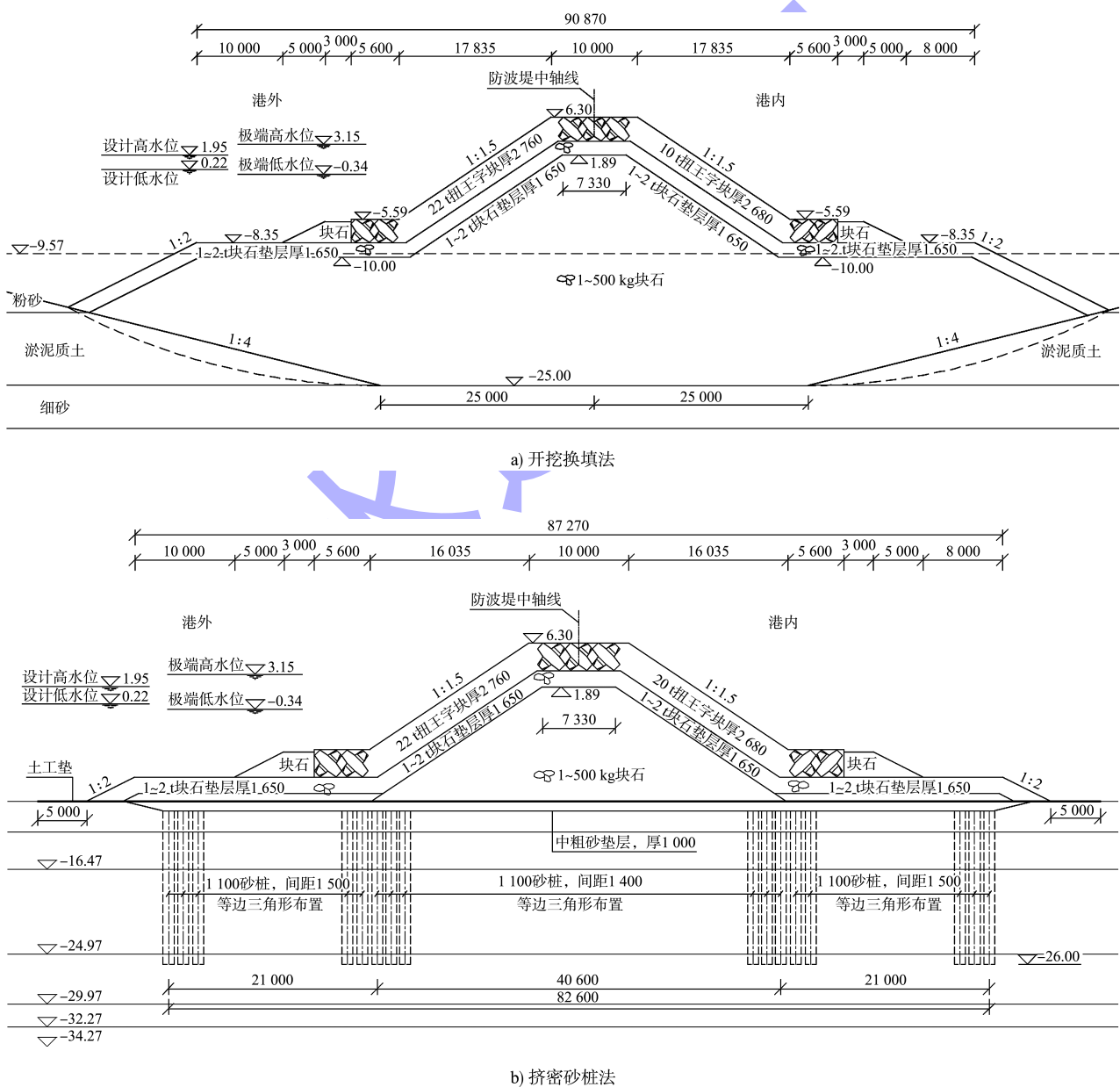
3 结构设计

3.1 基础处理

水运工程中常用的地基处理方案有：抛石(或爆破)挤淤法、预压排水固结法、开挖换填法、挤密砂桩(石)法、水泥搅拌桩法、高压喷射注浆法等。由于本工程范围内存在生态红线及渔业保护区，工期要求紧，抛石(或爆破)挤淤法^[2]及预压排水固结法不适用。

图3为斜坡堤结构3种地基处理方案的典型断面。本文从处理效果、施工条件、施工速度、

处理费用和对环境的影响等方面对开挖换填、挤密砂桩和水泥搅拌桩3种地基处理方案的优缺点进行分析，见表4。经技术经济比较后可见，开挖换填方案较水泥搅拌桩方案造价高出约49%，且挖泥需外抛，对环境的影响较大；而挤密砂桩方案的造价、承载能力和抗剪能力较水泥搅拌桩方案均无优势。海上深层水泥搅拌法具有加固效率高、成桩直径大、强度高、质量可控、环保、适用范围广等优势^[3]，故推荐采用水泥搅拌桩地基处理方案。



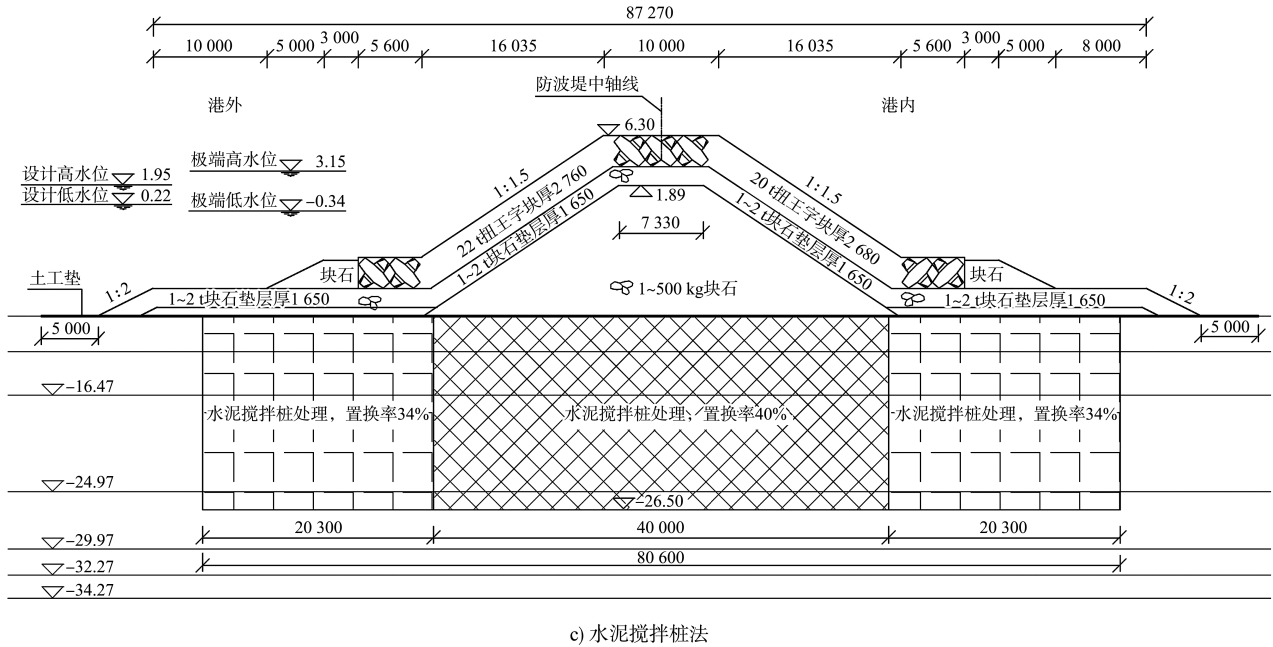


图 3 不同地基处理方案的斜坡堤结构典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

表 4 地基处理方案优缺点对比

地基处理方案	优点	缺点
开挖换填法	1) 施工难度相对较低; 2) 施工质量相对更易控制, 可靠性相对更高	1) 本工程淤泥深, 开挖换填量大, 对生态环境影响大; 2) 挖泥需外抛, 附近纳泥区收纳能力有限, 较难承接; 3) 石料用量大, 供应难度大, 石料价格波动会对工程实施造成较大影响; 4) 造价高 (约 44.3 万元/m)
挤密砂桩法	1) 开挖量小, 对周边生态环境影响相对较小; 2) 地基处理费用相对开挖换填节省	1) 施工难度相对较大; 成桩质量较难控制; 2) 桩身抗剪能力相对较差, 置换率高; 使用期沉降较大, 可能出现不均匀沉降, 使得结构存在安全风险; 3) 造价较高 (约 41.2 万元/m)
水泥搅拌桩法	1) 开挖量小, 对周边生态环境影响相对较小; 2) 地基处理费用相对较低 (约 29.8 万元/m)	1) 水上搅拌桩施工难度相对较大; 2) 对施工队伍要求高, 施工过程管控更严格

3.2 堤身结构方案选型

防波堤可采用斜坡式结构、直立式结构或其他结构形式^[4], 包括抛石斜坡堤、沉箱直立堤、大圆筒直立堤、斜顶钢管板桩结构及桶式基础结构等。本工程从结构受力特点、耐久性使用、施工难易程度、施工工期及工程造价等方面对不同结构进行对比论述, 其优缺点对比见表 5。

桶式基础结构防波堤由多组桶式结构单元排列组成, 具有可工厂化预制等优点^[5]。但本工程东、西防波堤普遍存在厚度 1~6 m 的连续砂层,

标贯 4~17 击, 大部分孔下沉力与下沉阻力的比例小于 1.5^[6], 不满足规范要求, 下沉存在较大困难, 需采取引孔、外加水冲等辅助下沉措施。由于类似工程案例少、缺少实际验证, 其效果仍存在较大不确定性, 且增加的辅助措施费用暂无法估算。鉴于项目水文、地质条件复杂, 施工有效作业天数少、工期紧, 桶式基础结构施工浮运、下沉结构安全风险大, 不可控因素多, 其结构实施具有较大风险, 因此不推荐。大圆筒直立堤结构^[7]和斜顶钢管板桩结构^[8]均存在钢材用量多、耐久性较差、使用期需定期维护、管理难度大及造价高的缺点, 因此不推荐。斜坡堤结构的石料

供应及施工窗口期制约着工期和造价^[9], 粤东地区某防波堤项目受石料及施工窗口期限制, 项目

施工工期约 8 a, 而本项目工期要求紧, 因此不推荐。

表 5 防波堤结构方案优缺点对比

结构方案	耐久性	工期	造价	施工难易程度	综合评价
斜坡堤结构	很好	1) 石料用量多(约 240 万 m ³), 工程造价及工期受石料市场影响大; 2) 施工工序多, 对港区形成掩护时间长(20 个月), 总工期长(27 个月)	1) 造价较低, 约 58.5 万元/m; 2) 石料用量较多, 价格受砂石料市场影响大	1) 施工较简单, 不需要大型起重设备; 2) 对地基处理质量要求不高, 可适应一定不均匀沉降; 3. 施工期防台要求高	工期较长, 造价较低
沉箱直立堤结构	很好	1) 沉箱为预制安装, 施工速度快(6 个月); 2) 对后方港区形成掩护时间较短(12 个月), 总工期较短(20 个月)	1) 造价低, 约 60.2 万元/m; 2) 砂石料用量较少(约 170 万 m ³), 受砂石料市场影响较小	1) 需要大型沉箱预制场及专用运输安装船机设备; 2) 对地基处理质量要求较高	装配式, 工期较短, 造价较低
插入式大圆筒结构	钢材用量多(约 12.5 万 t), 耐久性较差, 使用期需定期维护, 管理难度大	1) 圆筒不需要沉入持力层过深, 施工速度快; 2) 对后方港区形成掩护时间短(11 个月), 总工期短(18 个月)	造价高, 约 71.3 万元/m	1) 要求有一定厚度的中密砂层、硬黏土层作为持力层; 2) 需要大型起重及运输设备及专用振沉设备, 施工要求高	工期最短, 造价高, 耐久性差, 施工难度大
斜顶钢管板桩结构	钢材用量最多(约 19.5 万 t), 耐久性较差, 使用期需定期维护, 管理难度大	前墙基桩拔桩力大, 需要嵌岩, 施工难度大, 总工期长(30 个月)	1) 砂石料用量最少, 受砂石料供应影响小; 2) 工程造价高, 约 70.0 万元/m	1) 对地基适应性强, 无需对软弱地基进行处理; 2) 对起重运输设备及下沉工艺要求较低; 3) 施工期需要稳桩, 防台要求较高	工期较长, 造价高, 耐久性差
桶式基础结构	很好	施工速度较快	造价高, 约 59.4 万元/m	1) 本项目软土地基较厚(10~19 m), 且大部分钻孔浅层含夹砂层, 能否穿透夹砂层存在重大不确定性, 对于工期控制存在风险; 2) 其预制及下沉施工专业性强, 负压沉桩施工工艺, 现场施工难度大	工期较短, 造价高, 耐久性好, 施工难度大

综合考虑施工便利性、施工工期、工程造价、结构耐久性等因素(表 5), 工程要求在较短时间内对后方港区形成有效掩护, 推荐采用沉箱直立堤结构(地基处理采用水泥搅拌桩)。设计方案为: 沉箱内回填中细砂, 沉箱上现浇胸墙及防浪墙, 胸墙顶高程 4.8 m, 防浪墙顶高程 7.0 m。沉箱尺寸为(31.24~31.62)m×23.3 m×12.8 m(长×宽×高, 含前后趾尺寸), 前壁厚 0.4 m(局部区域加厚至 0.6 m), 后壁厚 0.4 m, 侧壁厚 0.3 m, 仓格平面尺寸为 4.5 m×4.0 m, 底板厚 0.65 m, 单个沉箱质量约 4 300 t。沉箱下设置 2 m 厚 10~100 kg

块石基床。港外侧设 1.5~2.0 t 块石护底, 其下抛填 2 层 100~200 kg 块石并铺设 1 层土工垫。港内侧设 100~200 kg 块石护底, 其下铺设 1 层土工垫。

由于防波堤区淤泥及淤泥质土层较厚, 为保证结构稳定, 采用格栅状布置的水泥搅拌桩进行地基处理, 置换率约为 56%。要求水泥搅拌桩的 28 d 强度不小于 0.8 MPa、90 d 强度不小于 1.1 MPa。地基处理之后, 开挖基槽至 -11 m, 开挖边坡为 1:3, 在其上抛填块石基床。沉箱直立堤结构典型断面如图 4 所示。

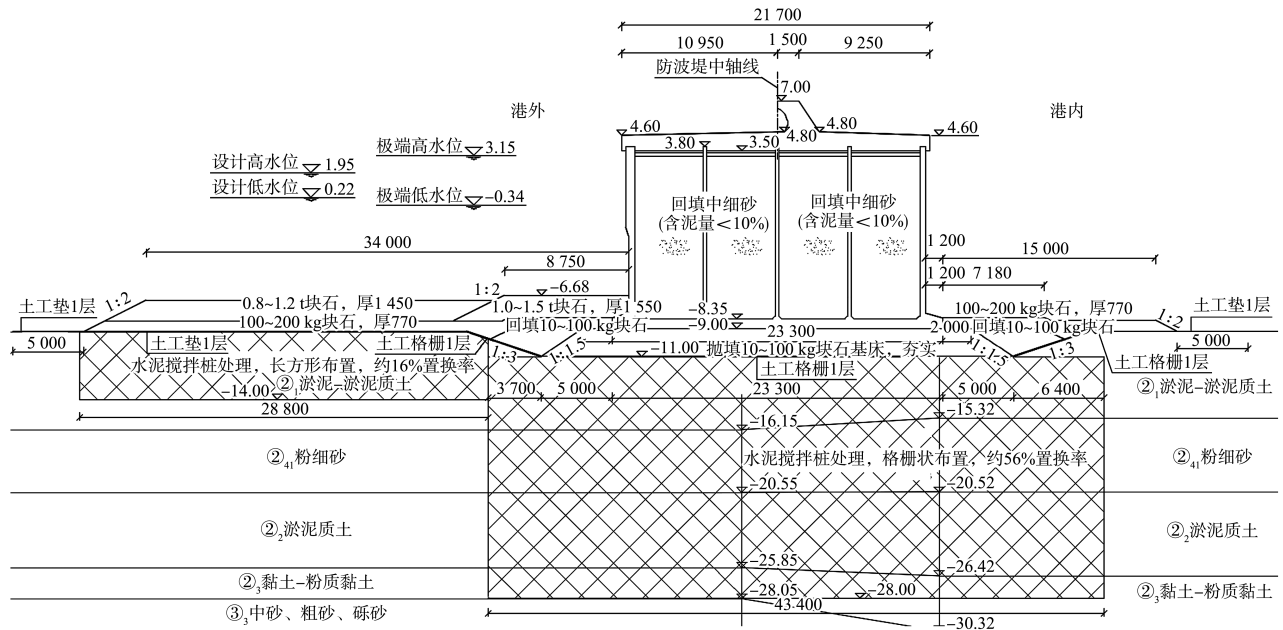


图 4 沉箱直立堤结构典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

4 结论

1) 工程所在粤东地区^[10]施工海域风浪条件恶劣、施工窗口期短, 选择斜坡堤结构时应充分考虑石料供应及施工窗口对于工期和造价的影响, 避免进度无法满足工程要求。

2) 针对桶式基础, 现有规范是在桶内为淤泥质土、黏性土时桶式基础破坏失效机理上形成的, 本工程桶内为粉质砂层, 土压力及地基失效破坏机理需要进一步研究。

3) 针对波浪大、地质条件差等复杂条件, 应综合考虑施工便利性、施工工期、工程造价、结构耐久性等因素, 使工程在较短时间内形成有效掩护, 最终推荐采用沉箱直立堤结构(地基处理采用水泥搅拌桩), 对于类似工程的结构选型有参考意义。

参考文献:

[1] 江建忠, 孙丽辉. 小漠国际物流港滚装船引航风险分析与对策[J]. 珠江水运, 2024(5): 78-81.

[2] 杜艳德, 郝志杰, 翁纪红. 爆破挤淤法在孤岛防波堤中的应用浅析[J]. 山西建筑, 2020, 46(13): 151-152.

[3] 何洪涛, 王征亮, 林佑高, 等. 海上深层水泥搅拌法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): 38-42.

[4] 黄剑聪, 李松樵. 软土地基条件下游艇码头防波堤的结构选型[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(2): 168-169.

[5] 高志伟, 李亚, 高树飞, 等. 徐圩防波堤工程桶式基础结构设计[J]. 水运工程, 2015(2): 224-229.

[6] 郜卫东, 盛佳珺. 桶式基础结构下沉受力特性[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(3): 54-58.

[7] 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.

[8] 吉战兵. 上海国际航运中心洋山深水港区一期工程斜顶桩板桩承台结构设计及研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.

[9] 李松樵, 周俊青. 某工程深水式防波堤结构选型对比[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(3): 159-160.

[10] 黎维祥, 李伟仪. 粤东海域的波浪特性分析[J]. 水运工程, 2009(7): 25-28.

(本文编辑 王传瑜)