



# 盐田东港区码头护岸工程软基处理技术\*

张逾诚

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 盐田东码头护岸建设安全等级高、设计荷载大。针对其下卧不良地质软弱土层埋藏深、厚度大, 分布广的问题, 进行软基处理方案研究, 从而确定合适的软基处理方法, 提高护岸整体稳定安全系数。提出开挖换填、水泥搅拌桩、碎石桩及轻质土4种软基处理方案, 计算结果表明, 采用4种软基处理方案后, 护岸整体稳定安全系数均可满足要求。从造价、施工便利性、可靠性、工期等方面进行综合比选, 并参考建设需求, 最终采用开挖换填方案进行地基处理, 该方案具有施工简便、工艺成熟、易于控制的优点。

**关键词:** 盐田东港区; 护岸; 整体稳定; 软基处理; 开挖换填

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0158-06

## Soft foundation treatment technology for revetment project in eastern Yantian Port

ZHANG Yucheng

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** The safety level of the wharf revetment construction in eastern Yantian Port is high and the design load is large. In view of the problems of deep burial, large thickness and wide distribution of the poor geological soft soil layer beneath the revetment, the soft foundation treatment scheme is studied, so as to determine the appropriate soft foundation treatment method and improve the overall stability and safety factor of the revetment. Four soft foundation treatment schemes are proposed, including excavation and replacement scheme, cement mixing pile scheme, gravel pile scheme, and lightweight soil scheme. The calculation results show that the overall stability and safety factor of the revetment can meet the requirements after adopting the four soft foundation treatment schemes. After comprehensive comparison from the aspects of cost, construction convenience, reliability and construction period, and referring to the construction requirements, the excavation and replacement scheme is adopted for weak soil treatment. The advantages of the recommended scheme are superior safety, convenient construction, mature technology, and easy quality control.

**Keywords:** eastern Yantian Port; revetment; overall stability; soft foundation treatment; excavation and replacement

### 1 工程概况

盐田东港区一期码头工程后方护岸总长1470 m, 采用抛石斜坡堤结构。结构安全等级为一级, 设计使用年限50 a, 设计荷载为均载30 kPa。护岸标准断面见图1。

盐田港区设计高水位(理论最低潮面)2.26 m

(高潮累积频率10%), 设计低水位0.22 m(低潮累积频率90%)。

盐田东港水陆交通便捷, 港区有约200万 $m^3$ 石料可供场地回填, 其余所需的水泥、黄砂、钢材等建材利用周边市场采购, 水运或陆运至现场。

收稿日期: 2024-09-27

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200)

作者简介: 张逾诚(1995—), 男, 工程师, 从事港口、海岸工程结构设计工作。

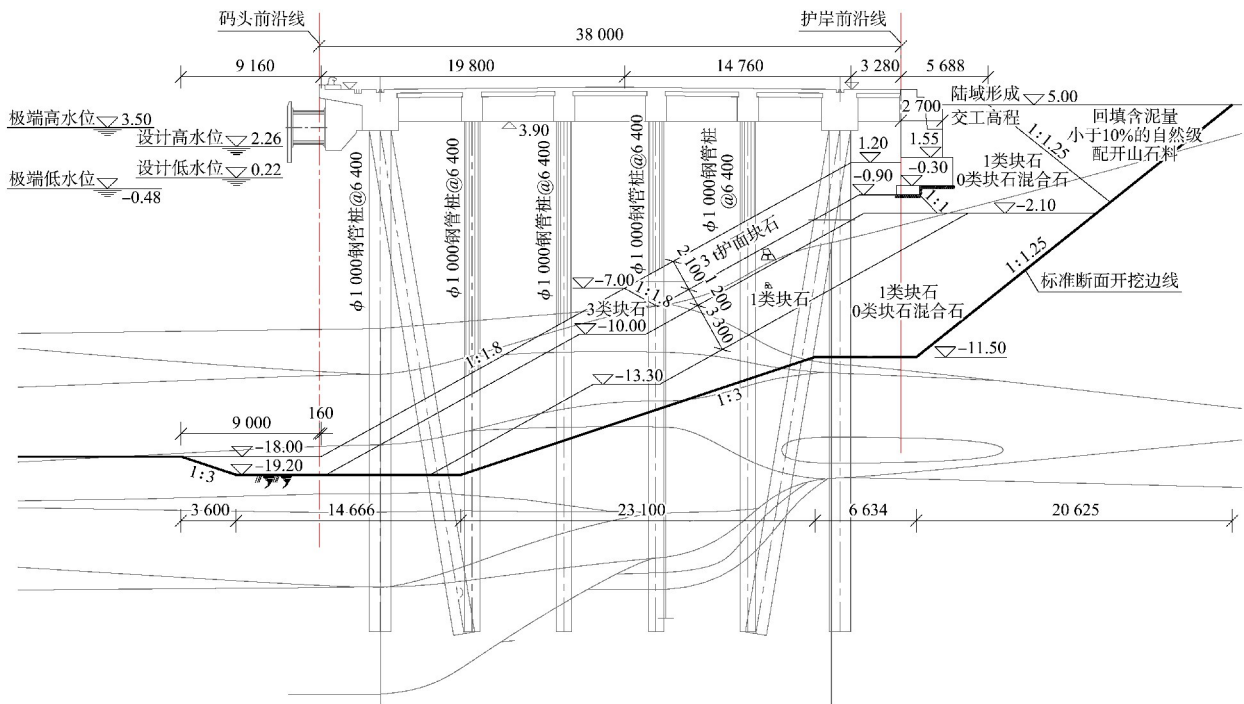


图 1 护岸标准断面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 1 Standard section of revetment (elevation: m; dimension: mm)

## 2 护岸软基处理重难点分析

典型断面中主要不良地质软弱土层为③<sub>2-1</sub> 灰色粉质黏土, 性质饱和, 软塑。该土层土质均匀, 切面光滑, 夹少量薄层或团块状粉砂, 局部为黏

土, 干强度中等-高, 韧性中等-高, 摇振无反应。实测标准贯入击数为 3~6 击, 平均为 5 击<sup>[1]</sup>。土体物理学指标见表 1, 典型地质断面见图 2。

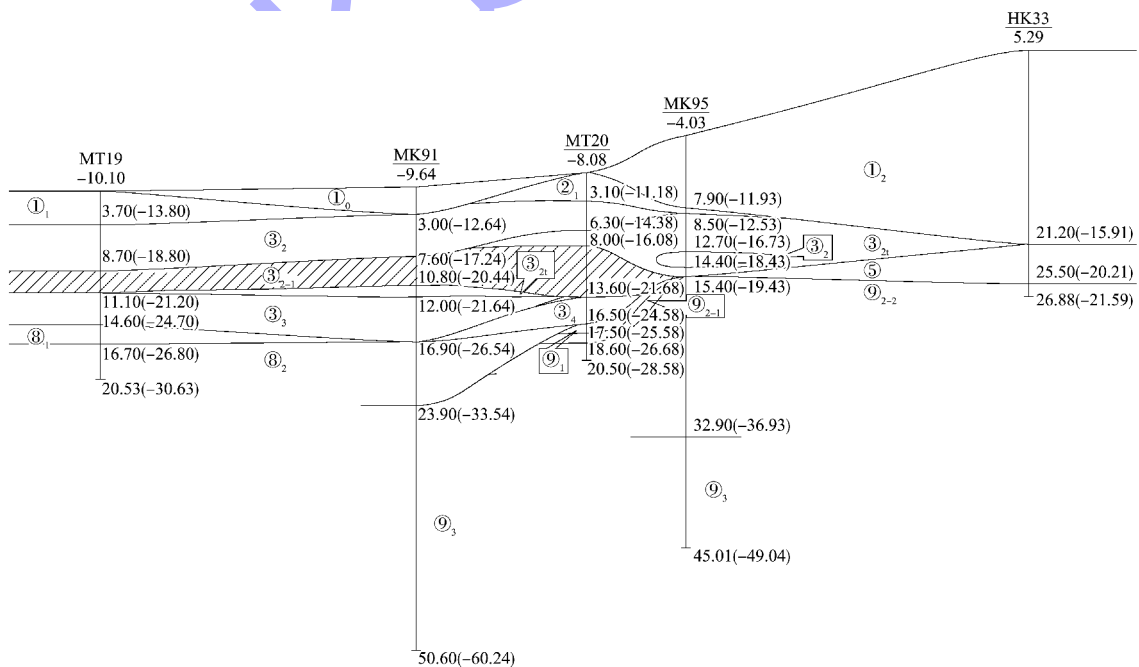


图 2 典型地质断面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 2 Typical geological section (elevation: m; dimension: mm)

表 1 土层物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical indexes of soil layers

土层编号	土层名称	含水量/ %	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	直剪固快		直剪快剪		标准贯入 击数/击
				内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$	$c/\text{kPa}$	
③ <sub>2-1</sub>	灰色粉质黏土	38.2	1.77	11.3	15.1	5.7	14.5	5

不良地质软弱土层③<sub>2-1</sub> 灰色粉质黏土埋藏于地表 8 m 以下，较厚处达 5.6 m，通常分布于拟建护岸的坡脚位置，呈现出埋藏深、厚度大、分布广的特点。

边坡破坏是由于岩土体在滑动面上的抗剪强度不足以抵抗实际的剪应力<sup>[2]</sup>。拟建护岸坡顶荷载较大，且工程区域雨量充沛，降雨作用下边坡稳定性随降雨时长及降雨强度的增加不断降低<sup>[3]</sup>。使用荷载和降雨作用均会增加相应剪应力，对护岸整体的稳定性产生不利影响。

为提高护岸的整体稳定安全系数，使其满足使用要求，需根据整体稳定计算结果中的圆弧滑动位置，确定软弱土层重点处理位置或区域，并采用合适的软基处理方法对重点位置或区域进行针对性处理，提高其物理力学指标。

本文主要进行整体抗滑稳定计算，选择最危险断面作为计算断面<sup>[4]</sup>，采用极限平衡理论进行边坡稳定性计算，将边坡失稳过程简化为一个滑动土体沿着未滑动土体滑动，通过滑动面上土体间的平衡状态判定边坡稳定性<sup>[5]</sup>。计算采用 Slide7.0 软件，计算方法为 Ordinary 法。

研究分为施工、使用及地震 3 种工况进行计算。

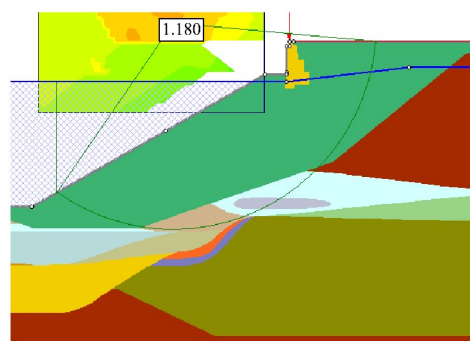
1) 施工工况：挡土墙海侧水位为设计低水位 0.22 m，挡土墙岸侧水位为设计高水位 2.26 m；2) 使用工况：挡土墙海侧水位为极端低水位 -0.48 m，挡土墙岸侧水位为极端高水位 3.50 m；3) 地震工况：挡土墙海侧水位为设计低水位 0.22 m，挡土墙岸侧水位为设计高水位 2.26 m。根据 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》<sup>[6]</sup>，施工工况整体稳定安全系数应  $\geq 1.05$ ，使用工况整体稳定安全系数应  $\geq 1.21$ ，地震工况整体稳定安全系数应  $\geq 1.05$ 。

### 3 护岸软基处理方案

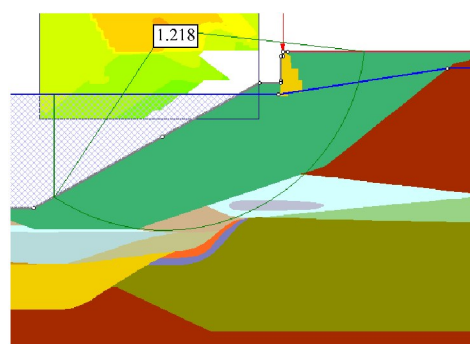
#### 3.1 开挖换填方案

该方案是将物理力学指标较差的土体开挖至一定程度，挖除后回填物理力学指标较好的岩土材料，可提高换填土体部分的抗剪强度，增加地基稳定性<sup>[7-8]</sup>。

针对项目典型断面，在护岸标准断面的基础上继续向下开挖至 -21.20 m，以 1:3 坡度向上放坡至 -11.50 m，再以 1:1.25 坡度向上放坡至坡顶。开挖后 -2.10 m 以下回填 1 类、0 类块石混合石，-2.10 m 以上回填含泥量小于 10% 的自然级配开山石料。软弱土层经开挖换填后，计算断面的整体稳定安全系数分别为施工工况 1.180、使用工况 1.218、地震工况 1.201，3 种工况的整体稳定计算见图 3。



a) 施工工况



b) 使用工况

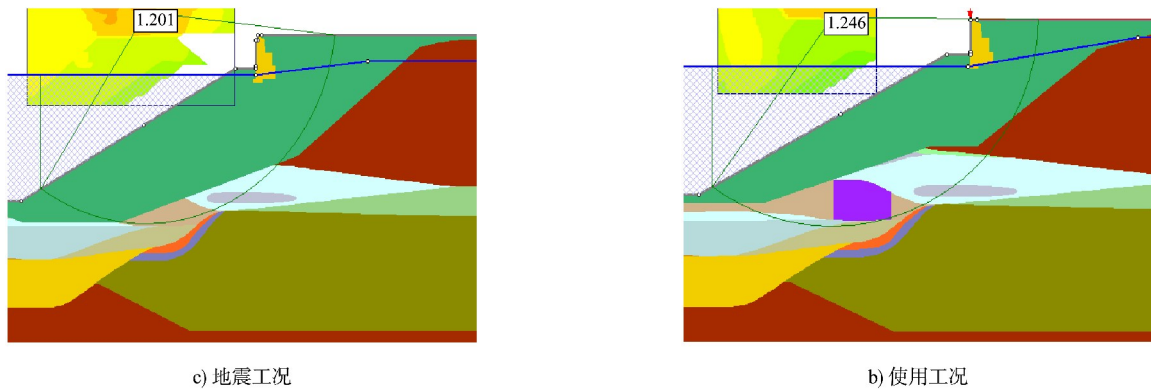


图 3 开挖换填方案 3 种工况整体稳定计算  
Fig. 3 Overall stability calculations of excavation and replacement scheme under three conditions

### 3.2 水泥搅拌桩方案

该方案利用深层搅拌桩机，将水泥喷入软弱土层，将二者进行搅拌，使喷入的水泥浆或水泥粉与原状土体发生物理化学反应后形成增强体，以提高加固范围软弱土层的抗剪强度。

针对项目典型断面，采用水泥搅拌桩法对堤身下的软弱土夹层进行加固，加固宽度 9.6 m，水泥搅拌桩法加固土层为③<sub>2-1</sub> 灰色粉质黏土，置换率约 20%。软弱土层经加固后的土体指标按 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》计算，见表 2。加固后的整体稳定安全系数分别为施工工况 1.197、使用工况 1.246、地震工况 1.203，3 种工况的整体稳定计算见图 4。

表 2 水泥搅拌桩加固后土层物理力学指标  
Tab. 2 Physical and mechanical indexes of soil layer after reinforcement by cement mixing piles

土层编号	土层名称	直剪固快		直剪快剪	
		$\varphi/(\text{°})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$c/\text{kPa}$
③ <sub>2-1</sub>	灰色粉质黏土	7.59	84.08	3.81	83.60

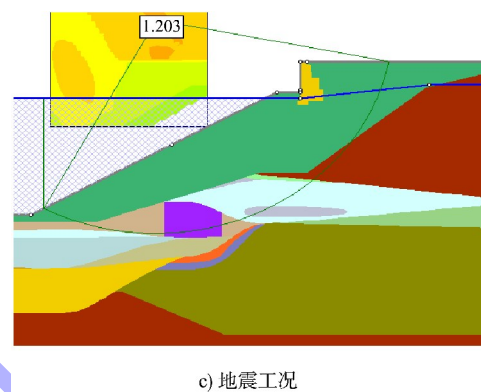
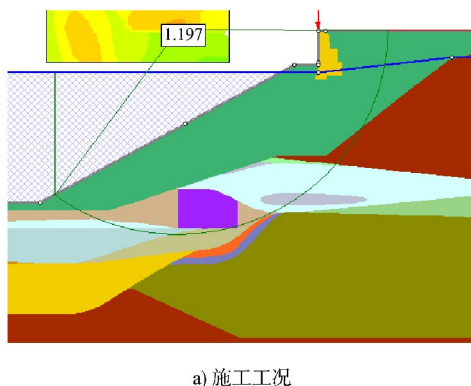


图 4 水泥搅拌桩方案 3 种工况整体稳定计算  
Fig. 4 Overall stability calculations of cement mixing pile scheme under three conditions

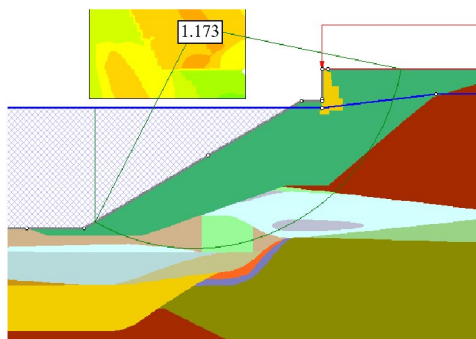
### 3.3 碎石桩方案

该方案通过振冲法、沉管法等施工工艺，在不良地质软弱土层中形成孔洞，把备好的碎石压入或填入孔中，成为碎石桩。碎石桩将部分软弱地基置换后，形成复合土体，从而提高置换范围内土体的抗剪强度。

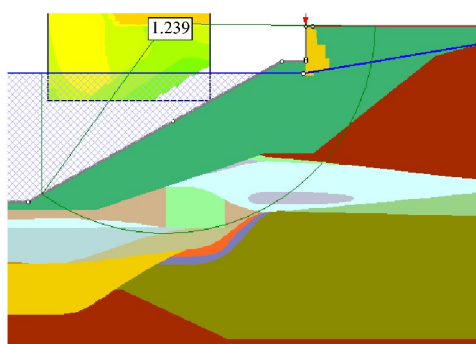
针对项目典型断面，采用碎石桩法对堤身下的软弱土夹层进行加固，加固宽度 10.7 m，碎石桩法加固土层为③<sub>2-1</sub> 灰色粉质黏土，置换率约 9%，加固后的土体指标按《水运工程地基设计规范》计算，见表 3。加固后的整体稳定安全系数分别为施工工况 1.173、使用工况 1.239、地震工况 1.055，3 种工况的整体稳定计算见图 5。

表 3 碎石桩加固后土层物理力学指标  
Tab. 3 Physical and mechanical indexes of soil layer after reinforcement by gravel pile

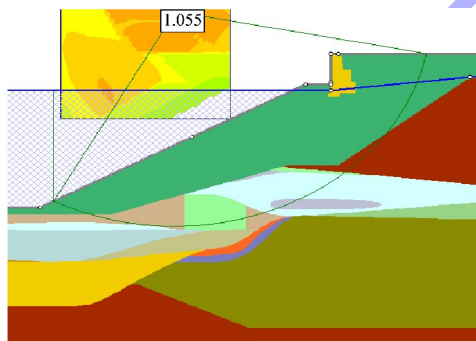
土层编号	土层名称	直剪固快		直剪快剪	
		$\varphi/(\text{°})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$c/\text{kPa}$
③ <sub>2-1</sub>	灰色粉质黏土	16.61	13.70	12.15	13.16



a) 施工工况



b) 使用工况



c) 地震工况

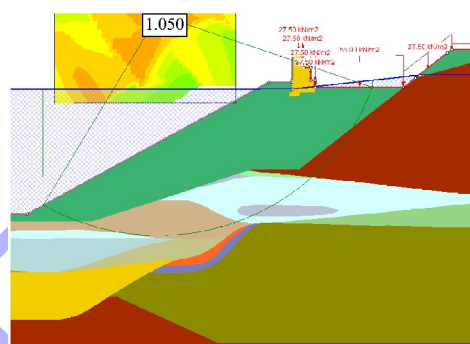
图 5 碎石桩方案 3 种工况整体稳定计算  
 Fig. 5 Overall stability calculations of gravel pile scheme under three conditions

### 3.4 轻质土方案

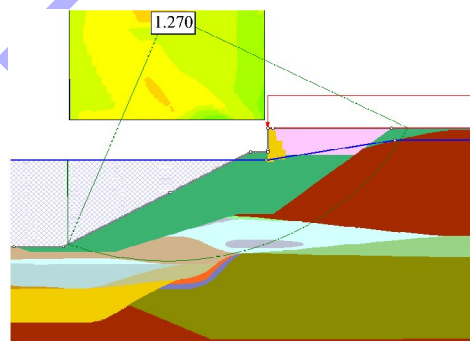
该方案拟采用新型材料泡沫聚合土，它具有自流平、自硬化、便捷高效、造价较低的特点，材料特性及功能介于普通土与混凝土之间，可通过调整配合比控制其性能，广泛应用于房建、公路、市政等行业<sup>[9-10]</sup>。将无机胶凝材料与泥浆(利用现场基土制作)进行混合并加入泡沫后形成泡沫聚合土，再采用现浇工艺浇筑至工程部位。

针对工程典型断面，将挡土墙岸侧约 14.5 m 宽范围 0.50 m 以上的回填料由块石更换为泡沫聚合土，以降低岸侧堤顶荷载。泡沫聚合土湿密度取值 1.0 g/cm<sup>3</sup>，硬化后密度取值 8.0 g/cm<sup>3</sup>， $\varphi$  取值 3°， $c$  取值 130 kPa。待堤身回填完成后，再分层回填泡沫聚合土。

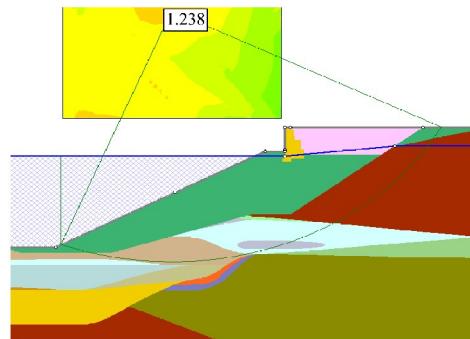
泡沫聚合土置换后的整体稳定安全系数分别为施工工况 1.050、使用工况 1.270、地震工况 1.238，3 种工况的整体稳定计算见图 6。



a) 施工工况



b) 使用工况



c) 地震工况

图 6 轻质土方案 3 种工况整体稳定计算  
 Fig. 6 Overall stability calculations of lightweight soil scheme under three conditions

#### 4 方案比选

1) 计算结果。4个地基处理方案的整体稳定安全系数均可满足《水运工程地基设计规范》对应条文规定。

2) 造价。开挖块石费用按 153 元/m<sup>3</sup> 考虑, 开挖淤泥质土费用按 47 元/m<sup>3</sup> 考虑, 回填块石费用按 31 元/m<sup>3</sup> (可利用开山石)。水泥搅拌桩按 600 元/m<sup>3</sup> 考虑 (不含进场费), 碎石桩按 600 元/m<sup>3</sup> 考虑 (不含进场费), 轻质土按 300 元/m<sup>3</sup> 考虑。通过计算, 典型断面 4 个地基处理方案每延米造价增加值分别为开挖换填方案 2.748 7 万元、水泥搅拌桩方案 0.587 4 万元、碎石桩方案 0.288 7 万元、轻质土方案 2.205 3 万元。造价从低到高排序为碎石桩、水泥搅拌桩、轻质土、开挖换填方案。

3) 施工。从施工角度分析, 开挖换填方案施工工艺流程主要为开挖及回填, 较为简单, 施工工艺较成熟; 轻质土方案需在堤身回填后再进行回填, 且需要先行制作泡沫聚合土再进行回填, 施工工艺较为复杂; 水泥搅拌桩及碎石桩方案需在开挖堤身前先行进行地基处理, 增加了施工工序, 且水泥搅拌桩及碎石桩方案为复合土体, 工艺相对比较复杂, 且施工质量与施工机械、操作人员等其他因素有关, 需要进行严格控制方能达到良好的效果<sup>[11]</sup>。

4) 方案比选。尽管水泥搅拌桩和碎石桩方案造价较低, 但由于工程地基拟处理区域上覆土层存在较厚抛填块石, 需要将其开挖后再进行地基处理, 而拟建挡土墙后方即为边防围网及巡检道路, 开挖后可能导致边坡失稳、边防围网及巡检道路受损。此外, 工程区域内需要打设钢管桩, 需先进行地基处理再进行沉桩作业, 施工过程中由于打桩偏位等原因, 可能对沉桩及处理后的地基造成不利影响。

轻质土方案需在堤身回填后, 再分层进行回填泡沫聚合土, 从而延长建设工期, 而工程建设方案需尽量压缩工期。且工程区域易受台风影响, 轻质土未回填区域长期暴露, 容易损坏。

经上述分析, 考虑到开挖换填方案较其他 3 个方案施工简便, 无需增加施工流程及工期, 且

施工工艺成熟, 处理效果易于控制。同时, 邻近的盐田港区集装箱码头三期扩建工程已采用开挖换填效果良好, 最终确定地基处理采用开挖换填方案。

#### 5 结语

1) 采用开挖换填、碎石桩、水泥搅拌桩及轻质土方案对拟建护岸进行软基处理后, 其整体稳定安全系数都能满足要求。

2) 从造价、施工便利性、可靠性、工期等方面综合比选, 参考建设需求并借鉴已建工程经验, 最终采用开挖换填方案进行地基处理。

3) 开挖换填方案可从根本上改善地基, 增加地基稳定性, 提高护岸整体稳定安全系数, 具有施工简便、工艺成熟、易于质量控制的优点。

4) 推荐方案开挖断面较标准断面扩大较多, 为保证开挖过程中的堤身稳定及施工安全, 堤身开挖过程中需加强位移和沉降观测。

#### 参考文献:

- [1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 深圳港盐田港区东作业区集装箱码头工程一期工程勘察测量项目 (水工部分) 岩土工程勘察报告 [R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2022.  
CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd. Geotechnical engineering survey report for the first phase of the container terminal project in east Yantian port area, Shenzhen Port (hydraulic part) [R]. Shanghai: CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., 2022.
- [2] 罗冰, 曾超, 何先志, 等. 含软弱土层边坡失稳机制与稳定性分析 [J]. 路基工程, 2024(6): 113-119.  
LUO B, ZENG C, HE X Z, et al. Instability mechanism and stability analysis of slope with weak soil layer [J]. Subgrade engineering, 2024(6): 113-119.
- [3] 张虎, 彭小勇, 马康. 降雨和地震共同作用下高填方边坡稳定性研究 [J]. 交通科技, 2024(4): 50-55, 140.  
ZHANG H, PENG X Y, MA K. Research on the stability of high fill slope under the combined action of rainfall and earthquake [J]. Transportation science & technology, 2024(4): 50-55, 140.