



旋喷桩复合地基在直立式防波堤结构中的应用

李世强, 周俊青

(大连中交理工交通技术研究院有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 伴随经济社会的不断发展, 国家对环保的要求愈加严格。港口工程中处理深厚软土地基传统上采用开挖换填方案, 对周边环境影响较大。与传统方案相比, 旋喷桩复合地基对原状土扰动程度低、对周边水质影响微弱、施工时占用海域面积少、对周边船舶通航影响较小。但是目前旋喷桩复合地基在新建直立式水工结构特别是防波堤结构中应用较少, 且多采用块式满喷基础。介绍旋喷桩复合地基在大连獐子岛直立式防波堤中的应用, 分析旋喷桩复合地基的结构特点和承载力, 为旋喷桩复合地基在港口工程的应用提供参考。

关键词: 旋喷桩; 复合地基; 格构基础; 直立式防波堤

中图分类号: U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0376-06

Application of composite foundation of rotary jet pile in vertical breakwater structure

LI Shi-qiang, ZHOU Jun-qing

(Dalian CCCC & DUT Institute of Communications Technology Co., Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: Along with the continuous development of the economy and society, the national requirements for environmental protection are becoming increasingly strict. The excavation replacement and filling scheme is traditionally used to deal with deep soft soil foundation in port engineering, which has a great influence on the surrounding environment. Compared with the traditional scheme, the composite foundation of rotary jet grouting pile has less disturbance to undisturbed soil, weaker influence on surrounding water quality, less sea area occupied during construction, and less influence on the navigation of surrounding ships. However, at present, the composite foundation of rotary jet grouting pile is seldom used in the new vertical hydraulic structure, especially in the breakwater structure, and the block full jet foundation is mostly used. This paper introduces the application of the composite foundation of rotary jet grouting pile in the vertical breakwater of the Dalian Zhangzi Island, analyzes the structural characteristics and bearing capacity of the composite foundation of rotary jet grouting pile, so as to provide reference for the application of the composite foundation of rotary jet grouted pile in port engineering.

Keywords: rotary jet pile; composite foundation; lattice foundation; vertical breakwater

复合地基是由地基土本体(天然或改良后)和增强体两部分组成的人工地基, 由地基土和竖向增强体共同承担荷载。地基处理过程中可通过增强部分地基土本体强度、置换部分软弱地基土本体等手段形成复合地基。根据复合地基增强体的类别可分为散体材料桩复合地基(如振冲碎石桩、

土挤密桩等)、有粘接强度增强体复合地基(如水泥搅拌桩、旋喷桩等)和多桩型复合地基(有粘接强度的 2 种桩组合、有粘接强度的桩和散体材料桩组合)。

港口水工建筑物中重力式结构对地基土的承载力要求较高, 一般须将表层软弱土层开挖至地

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 李世强(1987—), 男, 工程师, 从事港口、航道规划设计工作。

基承载力较高的持力层。近年来, 伴随港口建设的发展, 大量的新技术、新工艺不断被应用到港口工程中。对于承载力较低的砂土、粉土和黏性土, 已有较多工程采用振冲法、挤密法对软弱地基土进行处理。对于高饱和度的淤泥和淤泥质土, 在天津和烟台地区已有采用深层水泥搅拌桩法处理软基的案例。在大连地区亦有采用与深层水泥搅拌桩类似的旋喷桩处理淤泥质土的成功案例, 如在 2019 年某项目中, 采用旋喷桩块式满喷复合地基作为重力式沉箱结构的基础, 取得良好效果。上述类似工程的实施, 验证了旋喷桩复合地基应用于港工结构中的可行性与可靠性, 积累了宝贵

的工程经验, 为旋喷桩复合地基的推广和发展打下了基础。

1 项目概况

大连市长海县獐子岛位于黄海北部、长山群岛的南端、外长山水道的南侧, 项目位于獐子岛北侧海岸中部的沙包湾, 湾内自然水深即可满足船舶通航要求, 南部外海侧强浪向受岛体自身掩护, 港址天然条件良好。沙包港拟建码头北侧无掩护, 为开敞海域, 受北向波浪、潮流的影响较大。拟新建东、西防波堤掩护港内水域, 建成后将对港区形成环抱式掩护, 总平面布置见图 1。

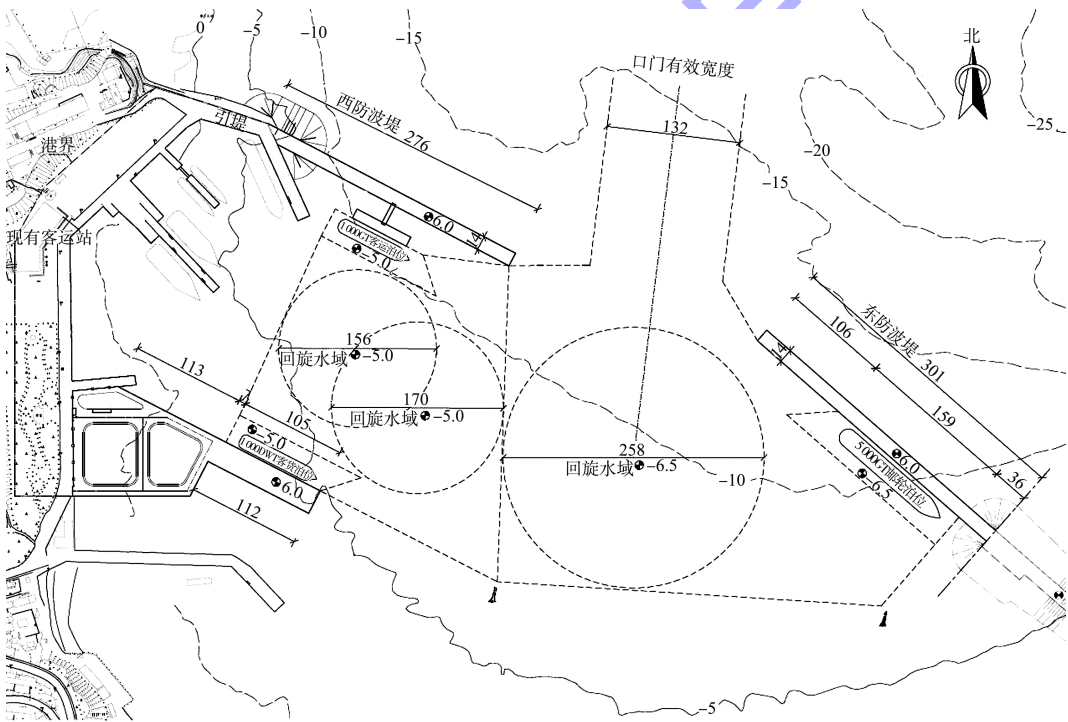


图 1 总平面布置 (单位: m)

獐子岛当地潮汐性质属于正规半日潮, 每日两涨两落, 设计高水位为 4.34 m, 设计低水位为 0.48 m, 50 a 一遇极端高水位为 5.26 m (高程自小长山理论最低潮面起算, 小长山理论最低潮面位于 1985 国家高程基准下 2.393 m)。

工程海域受岛体掩护, 外海波浪传播至工程区域主要为波浪绕射作用, 波高相应较小, 同时 NW、N 和 NE 向风成浪也影响工程区域, 设计波要素最大值多出现在 N 向或 NE 向。设计高水位、

重现期 50 a 一遇波浪作用下, 西防波堤各测点最大 $H_{1\%}$ 波高为 4.42 m (N 向), 东防波堤各测点最大 $H_{1\%}$ 波高为 4.41 m (N 向)。

该区域泥面高程在 -12.0 ~ -8.0 m, 表层为 3.0 ~ 10.8 m 厚的淤泥质粉质黏土层, 其下直接为强风化片麻岩层。淤泥质粉质黏土强度较低, 不宜做为基础持力层; 场区揭露的基岩分布广泛, 层位稳定, 强度较高, 强风化片麻岩承载力可达到 400 kPa, 为建筑物基础的良好持力层。

2 结构形式

东防波堤长 301 m，西防波堤长 276 m，东、西防波堤区域地质情况类似，结构功能相近，考虑采用相同的结构形式。工程区域泥面低、水深大，石料需从大陆外运，价格较高。项目前期阶段对防波堤结构分别比较了旋喷桩处理地基的直立式沉箱方案和打设塑料排水板、堤身分层抛填的斜坡式抛石堤方案。结果表明 2 个方案工程造价差距不大，但因斜坡堤堤身需分级加载，等待地基土排水固结的施工工期较长，此外东防波堤内侧 159 m 兼做邮轮码头，故不再考虑斜坡方案。由于工程区域表层淤泥质粉质黏土承载力很低，所以需要地基处理后作为直立式沉箱结构的持力层。

防波堤主体采用直立式沉箱方案。沉箱底高程 -10.0~-7.9 m，顶高程 2.5 m，沉箱底宽 16.0 m，箱内回填 1~100 kg 开山石。外海侧挡浪墙顶高程 9.3 m，内侧胸墙顶高程 6.0 m。沉箱下部为 10~100 kg 抛石基床。基床厚度为 0.5~1.5 m，坐落于经过地基处理的淤泥质粉质黏土层上。防波堤结构断面见图 2。

防波堤主体采用直立式沉箱方案。沉箱底高程 -10.0~-7.9 m，顶高程 2.5 m，沉箱底宽 16.0 m，箱内回填 1~100 kg 开山石。外海侧挡浪墙顶高程 9.3 m，内侧胸墙顶高程 6.0 m。沉箱下部为 10~100 kg 抛石基床。基床厚度为 0.5~1.5 m，坐落于经过地基处理的淤泥质粉质黏土层上。防波堤结构断面见图 2。

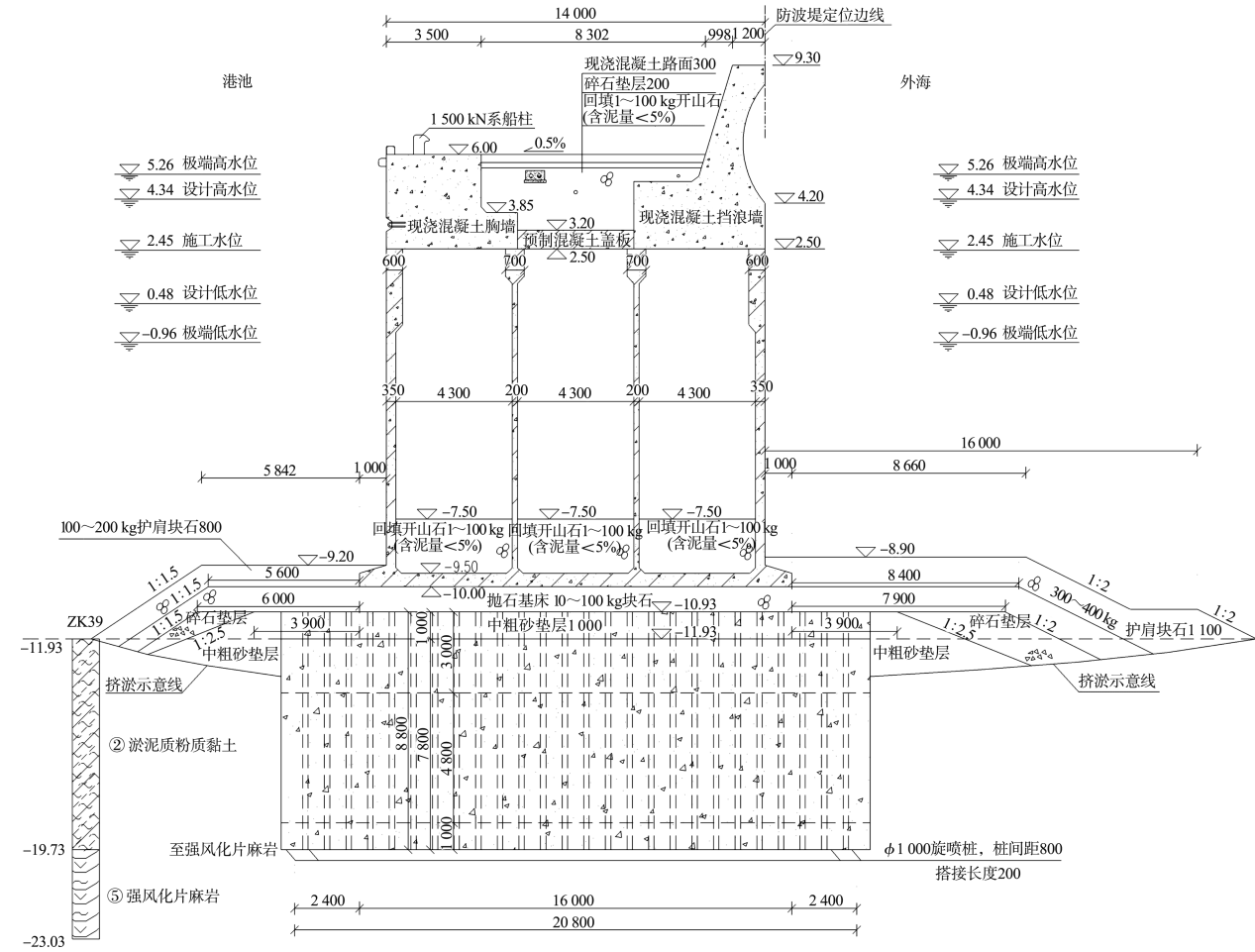


图 2 防波堤结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

对常规开挖换填和旋喷桩复合地基方案进行比选。推荐方案采用旋喷桩对地基土进行加固处理，加固体持力层为强风化片麻岩。该方案利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻进至淤泥质土层预定深度后，通过喷嘴向周围土体喷射高压浆液，借助高压喷射流使一定范围的土体结构遭到切削破

坏，并使土体与喷射浆液混合、胶结和硬化，从而在地基中形成具有较高强度的水泥土桩，达到改良土质、增加地基强度、减少土体压缩变形的目的。

旋喷桩桩径 1.0 m，桩间距 0.8 m，搭接长度 0.2 m。加固体布置与壁式基础相似，加固体断面

方向形成由长壁组成的连续墙，沿防波堤轴线方向相邻长壁间由短壁相连。为增强结构整体性，加固体顶部和底部分别设置深度为 3 m 和 1 m 的

短壁，同时相邻短壁间设置 4 根长桩，长桩间距 6.4 m，由常规壁式基础发展成格构式基础。旋喷桩复合地基结构见图 3。

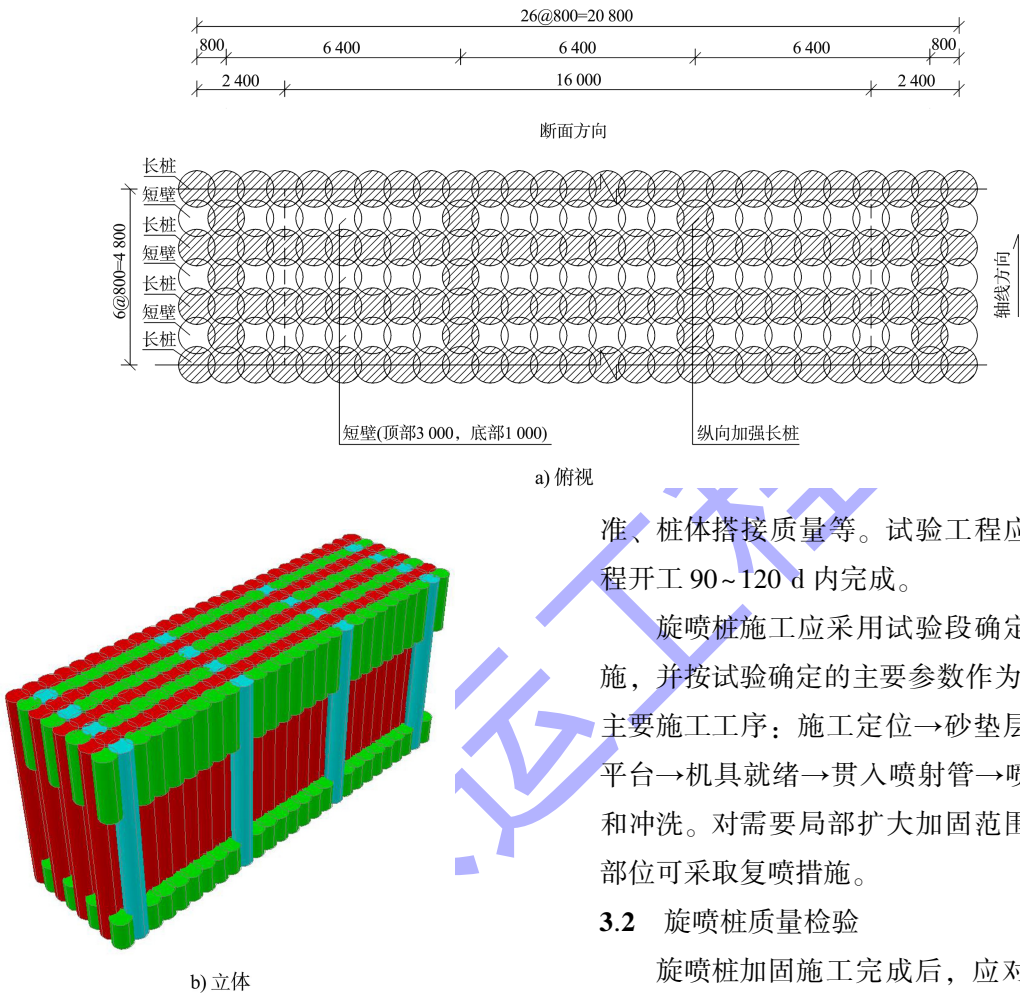


图 3 旋喷桩复合地基结构 (单位: mm)

3 旋喷桩施工与检验

3.1 旋喷桩施工

旋喷桩施工应设置试验段，以确定相关技术参数。试验段旋喷桩可采用以下设计参数：水泥采用 C42.5 普通硅酸盐水泥，高压水压力大于 20 MPa，喷嘴提升速度 8~12 cm/min，压缩空气气压 0.5~0.7 MPa，水泥浆液水灰比 1:0.8~1:1.2 不等。分区域试验多种参数组合，选择最优组合作为旋喷桩大规模施工的设计参数。试验内容包括水泥种类、外加剂和掺合料用量、水泥浆液的水灰比、水泥浆压力、流量、喷射管提升速度及转速、旋喷桩桩体强度、桩端着底情况和着底标

准、桩体搭接质量等。试验工程应在地基加固工程开工 90~120 d 内完成。

旋喷桩施工应采用试验段确定的机具设备实施，并按试验确定的主要参数作为施工控制指标。主要施工工序：施工定位→砂垫层铺设→搭设钢平台→机具就绪→贯入喷射管→喷射注浆→拔管和冲洗。对需要局部扩大加固范围或提高强度的部位可采取复喷措施。

3.2 旋喷桩质量检验

旋喷桩加固施工完成后，应对旋喷桩进行质量检验，检验内容包括桩体不同龄期的强度、均匀性和着底情况，以及桩位、桩垂直度、桩径、桩长、搭接长度等。检验采用钻孔取芯法进行。每个沉箱下旋喷桩体(每个分区)垂直钻孔取芯不少于 4 根，斜钻孔取芯不少于 1 根。采用钻直孔和斜孔取连续芯样观察并检验，高度方向原则上每米都要取样，以验证上、中、下部强度的均匀性、不同区段的均匀性以及相邻桩体间的搭接质量。钻孔取芯率不应低于 80%，当不同土层的桩体强度相差较大时，取芯率可按不同土层分别统计。钻取的芯样应进行室内物理力学试验，试验内容包括旋喷桩 90 d 龄期无侧限抗压强度、密度和含水率等。无侧限抗压强度平均值不小于 2.0 MPa，各土层芯样无侧限抗压强度值的变异系

数不大于 0.35。

4 结构计算

采用旋喷桩复合地基的直立式沉箱防波堤计算思路与普通沉箱结构相似：首先计算结构单位长度方向上的自重及外荷载，然后依次进行抗倾、抗滑稳定和基床承载力验算，主要区别在于需要对旋喷桩复合地基强度进行验算。因旋喷桩复合地基与水泥搅拌桩复合地基原理较为相似，且目前国内规范^[1-3]对水下旋喷桩复合地基强度验算无明确规定，故参照规范 JTJ/T 259—2004 中水下深层水泥搅拌桩复合地基以及日本标准^[4]

中旋喷桩复合地基相关公式进行计算。

4.1 桩体强度

旋喷桩体能够达到的强度是旋喷桩复合地基方案的关键之一。参照在大连南部某海域进行的旋喷桩施工经验，水泥浆液水灰比约为 1:1，水泥掺量为 420 kg/m³。施工完毕后采用钻孔取样的方法检验旋喷桩桩体强度，现场共钻取 24 组芯样(表 1)。经统计，芯样取芯率平均值为 91%，最小值为 86%；芯样 90 d 无侧限抗压强度 q_u 平均值为 2.68 MPa，最小值为 2.51 MPa；芯样密度 ρ 平均值为 1.624 t/m³，最小值为 1.504 t/m³。

表 1 旋喷桩芯样统计结果

取芯率/%	q_u /MPa	$\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	取芯率/%	q_u /MPa	$\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$
87.8	2.53	1.669	88.1	2.58	1.512
86.1	2.52	1.649	91.8	2.53	1.653
90.8	2.53	1.727	90.7	3.33	1.535
82.8	2.56	1.652	93.2	2.77	1.573
95.8	2.54	1.564	94.2	3.19	1.547
91.0	2.51	1.629	89.3	2.96	1.809
88.3	2.53	1.657	91.3	2.61	1.562
92.9	2.57	1.699	87.1	2.77	1.504
91.8	2.58	1.675	90.0	2.77	1.743
91.1	2.52	1.578	91.4	2.67	1.552
95.0	2.56	1.608	92.5	2.89	1.724
93.5	2.57	1.567	90.3	2.77	1.589

4.2 强度验算

旋喷桩复合地基强度验算主要包括加固体、加固土抗压承载力验算以及加固土抗剪承载力验算。参照日本标准，加固土指通过旋喷形成的水泥土，加固体指由加固土组成的基础(对于壁式基础,加固体包括壁间的原状土)。参照日标公式 7.4.1 计算，加固体的许用正应力值为现场加固土平均无侧限抗压强度的 1/5，加固土的许用正应力值按现场加固土平均无侧限抗压强度的 1/3 考虑(安全系数为 3)，许用剪应力为许用正应力的 1/2。

结合大连周边地区旋喷桩复合地基相关工程经验，现场加固土无侧限抗压强度平均值可按 2.0 MPa 考虑，即加固体许用正应力为 2 000 kPa/5=400 kPa，加固土许用正应力为 2 000 kPa/3=666 kPa，加固土许用剪应力为 666 kPa/2=333 kPa。加固体底面最大正应力、加固土底面最大正应力、加固土顶面和底面最大剪应力参照规范 JTJ/T 259—2004 中相关公式进行计算。旋喷桩复合地基强度验算结果见表 2。

表 2 旋喷桩复合地基强度计算结果

加固体正应力/kPa		加固土正应力/kPa		加固土剪应力/kPa			
最大值	许用值	最大值	许用值	加固土长壁最大值	顶部加固土短壁最大值	底部加固土短壁最大值	加固土许用值
312.49	400.00	624.99	666.00	120.64	49.52	125.96	333.00

5 方案比选

常规开挖换填方案采用抓斗挖泥船施工, 施工工艺成熟、简单。本项目疏浚量约 40 万 m³, 基槽挖泥的工期约 8 个月。开挖换填受施工工艺限制无法有效控制污染, 且由于疏浚深度大、开挖边坡缓, 挖泥范围可达防波堤外 50~60 m 区域, 污染水域相应扩大。獐子岛区域周边为幼苗养殖区, 多采用底播增殖和浮筏养殖, 对海水水质要求极高, 开挖换填方案的养殖动迁和赔偿费用较高; 此外, 工程附近无纳泥区或海洋倾倒区, 抛泥点距离较远(约 90 km)。工程地处外海孤岛, 无砂石料来源, 基础开挖后换填材料须从大陆外运, 填料价格较高; 且施工期占用海域面积较大, 对船舶进出港有一定影响。开挖换填方案虽工程费用略低(约 36 万元/延米), 但考虑养殖动迁和赔偿费用后, 整体经济优势不明显。

与常规挖泥方案相比, 旋喷桩复合地基方案对原状土的扰动较小, 对工程周边水质影响较小, 同时由于旋喷桩顶设置了中粗砂褥垫层, 可进一步减少施工浆液的外溢。项目防波堤所受外荷载较大, 地基处理的范围广、深度大, 旋喷桩方案水泥使用量较大, 工程造价相对较高(约 42 万元/延米), 但施工工期约为 5 个月, 地基处理时间较短, 占用海域面积较小, 对船舶通航影响小, 养殖动迁和赔偿费用省。

综上, 常规开挖换填和旋喷桩复合地基 2 种处理方案在工程造价上虽有一定差距(相差约 16%), 但考虑工程所在区域对水质要求较高, 应尽可能减小施工期对周边海域水质的影响, 综合

比较工程费用、养殖动迁和赔偿费用后, 选择旋喷桩复合地基方案作为推荐的地基处理方案。

6 结论

- 1) 旋喷桩复合地基可显著提高淤泥质软土的地基承载力, 软土地基经该方法处理后可作为重力式结构持力层;
- 2) 旋喷桩复合地基施工速度快、地基处理深度较大, 更适用于深水结构;
- 3) 旋喷桩复合地基施工对表层原状软土扰动小, 对工程周边水质影响微弱, 契合愈加严格的环保要求;
- 4) 随着该复合地基在港口工程实践中的不断应用, 其计算理论、施工工艺也将更加完善, 有望得到进一步推广。

参考文献:

[1] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[2] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[3] 中港第一航务工程局, 中交第一航务工程勘察设计院. 水下深层水泥搅拌法加固软土地基技术规程: JTJ/T 259—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[4] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 375 页)

参考文献:

[1] 远航, 任志杰, 王保华, 等. 外海钢管桩斜桩嵌岩混凝土芯柱成孔技术[J]. 水运工程, 2020(9): 191-195.

[2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[3] 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构施工规范: JTS 215—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[4] 青岛中航工程试验检测有限公司. 工程检测报告: BG-2019-JGT-529[R]. 青岛: 青岛中航工程试验检测有限公司, 2019.

(本文编辑 王璁)