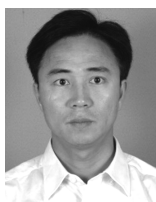


· 地基与基础 ·



工程弃土的陆域回填再利用技术

廖雄飞^{1,2}, 王 婧^{1,3}, 张璟泓^{1,3}

(1. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510290;

2. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230; 3. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 随着国家对环保的日益重视, 中粗砂等优质填料的价格也快速上涨, 致使许多陆域回填工程的成本大幅增加。针对回填中粗砂紧缺、价格高的问题, 进行工程弃土的陆域回填再利用技术研究, 采用室内试验及现场试验的方法, 分析工程弃土的工程性质、环保特性及工程弃土环保填埋后的利用效果。结果表明, 工程弃土代替中粗砂进行回填技术可行, 满足环保要求且经济社会效益显著。

关键词: 工程弃土; 陆域回填; 地基处理; 分层碾压; 再利用

中图分类号: U 655. 54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0185-07

Land backfill and reuse technology of engineering waste soil

LIAO Xiong-fei^{1,2}, WANG Jing^{1,3}, ZHANG Jing-hong^{1,3}

(1.CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2.Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

3. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: With the increasing attention of the country to environmental protection, the price of medium-coarse sand and other high-quality fillers have also risen rapidly, resulting in a large increase in the cost of many land backfill projects. Aiming at the problems of high price and shortage of medium-coarse sand in the land backfill project, we research the land backfill and reuse technology of engineering waste soil, and apply laboratory test and field test to analyze the engineering properties and environmental protection characteristics of engineering waste soil, so as the utilization effect of engineering waste soil after environmental protection landfill. The results show that it is feasible to replace medium-coarse sand with engineering waste soil for backfilling, which meets the requirements of environmental protection and has significant economic and social benefits.

Keywords: engineering waste soil; land backfill; foundation treatment; layered rolling; reuse

随着近年来国家对环保的日益重视, 大部分海砂料源点因环保问题关闭或暂停整顿, 致使整个华南乃至全国沿海地区海砂市场供不应求, 市场价格也一路暴涨。由于海砂市场价格异常飙升, 加之市场供应无法保证, 造成一些工程按照原设计方案采用回填中粗砂施工存在巨大的资金成本和工期风险。因此, 采用一些替代材料(如开山土、砂性土等工程弃土)替代回填中粗砂的方案也越来越受到建设和施工单位的青睐。码头陆域回填工程中, 选择

合适的回填料能够明显减少施工成本, 关于回填料的适用性研究一直受到学者们的广泛关注^[1-3]。采用工程弃土替代回填砂不仅能够解决海砂短缺问题, 也可以处理工程中的多余废弃物^[4-5]。但目前工程弃土在大面积陆域回填的应用研究方面多处于试验阶段^[6-7], 相关工程实例较少。本文依托实际工程, 采用室内试验及现场试验的方法, 研究工程弃土的工程性质、环境特性及现场应用技术, 为其工程应用提供可靠的技术支撑。

收稿日期: 2020-09-18

作者简介: 廖雄飞(1976—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程项目管理。

1 工程概况

1.1 工程分区

本文依托深圳液化天然气应急调峰站项目配套码头工程，位于深圳大鹏湾东北岸迭福片区。

本工程陆域回填面积约 25.4 万 m²，工程分区见图 1，地基处理面积约 25.16 万 m²，地基处理根据地质和使用要求分别采用堆载预压和分层碾压。

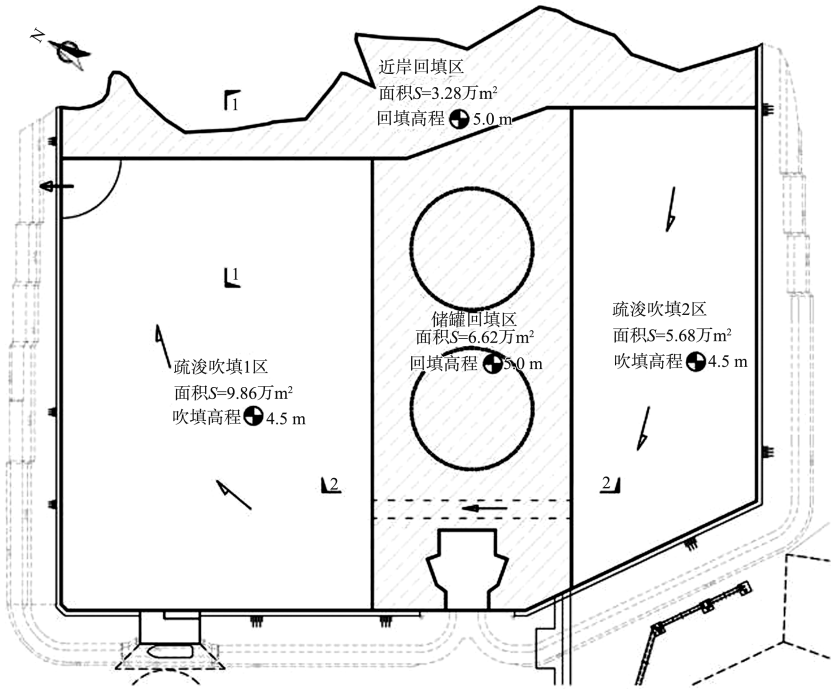


图 1 工程分区

1.2 地质条件

工程弃土主要应用于储罐回填区与近岸回填区域，两个区域的地质条件存在一定差异，两个区域的地层描述为：1) 近岸回填区的表层为粉细砂层，力学性质弱，地基承载力低，其下为粉质黏土层及强风化层，力学性质较好，地基承载力较高。2) 储罐回填区的表层为淤泥层，自西向东逐渐变薄，力学性质弱，地基承载力低；其下为粉质黏土层，该层自西向东逐渐变薄。其下揭示的残积土及基岩风化层包括全风化层及强风化层连续分布，力学性质较好，地基承载力较高。

2 工程弃土性质

2.1 工程弃土来源

根据实地考察，在距施工地 10 km 左右的玫瑰海岸周边和深宇科技园等处存在大量工程弃土(超 100 万 m³)，供应强度可达 1.2 万~1.5 万 m³/d，满

足首次回填要求。

二次回填主要采用储罐区基坑开挖所产生的工程弃土，土体类型主要为首次回填工程弃土、原状表层淤泥和粉质黏土。

2.2 物理力学性质

首次回填工程弃土物理力学指标如下：天然密度 $\rho > 1.65 \text{ t/m}^3$ ，塑性指数 $I_p < 17$ ，填料最大粒径 $\leq 150 \text{ mm}$ ，检测结果见表 1。根据样品检测结果，首次回填所采用的工程弃土能够满足设计要求。

储罐基坑开挖的工程弃土主要为储罐区回填土、原状表层淤泥和粉质黏土，采用浅层固化法进行处理，即在淤泥中掺入土壤固化剂进行机械拌和，通过化学反应形成一定强度的固化土。二次回填所使用工程弃土的含水率在 50%~80%，为使其改性固化后满足回填要求，根据实际施工经验及配合比试验结果，固化剂占弃土的质量百分比选择在 6%~8%，固化前后土体性质对比见表 2。

表 1 首次回填的工程弃土参数

样品编号	各粒径质量含量百分数/ <i>%</i>				密度/ (<i>t</i> · <i>m</i> ⁻³)	液限 <i>w_L</i> / <i>%</i>	塑性指数 <i>I_p</i>
	巨粒组 (>60 mm)	粗粒组(0.075~60 mm)		细粒组 (<0.075 mm)			
		砾(角砾) (2~60 mm)	砂 (0.075~2 mm)				
1	0	17.4	42.2	40.4	1.71	29.4	11.3
2	0	3.2	17.1	79.7	1.69	36.1	11.1
3	0	4.0	17.2	78.7	1.73	36.6	11.5
4	0	5.7	27.6	66.7	1.71	35.7	10.4

表 2 二次回填工程弃土固化前后参数对比

工程弃土	外观形态	含水率/%	无侧向抗压强度/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	体积变化率/%
固化前	泥浆	50~80	—	1.0~10	3~10	100
固化后	土状固体	<40	0.2~0.8	>30	>25	70~80

2.3 环境特性

大鹏湾风景宜人，自然环境优越，因此，在使用工程弃土时不仅要考虑施工效果还需要考虑工程

弃土对周围自然环境的影响。对回填所使用的工程弃土进行重金属、砷和有机污染物检测，重金属和砷的检测 results 见表 3，有机污染物检测结果见表 4。

表 3 工程弃土样品重金属检测结果

样品编号	镉	铬	铅	铜	镍	汞	砷
							mg/kg
1	0.04	88.17	36.36	23.92	21.79	0.04	18.34
2	0.01	17.82	39.70	3.95	5.50	0.01	6.97
3	0.03	124.56	19.04	27.70	56.31	0.01	12.32
4	0.08	85.12	31.18	23.11	34.21	0.03	21.41
5	0.03	22.27	71.68	6.79	5.55	0.06	4.34
6	0.02	11.55	43.71	2.90	4.34	0.16	5.07
7	0.02	197.21	39.69	53.25	45.44	0.06	51.44
8	0.09	91.43	44.62	18.74	20.94	0.07	11.76
9	0.04	140.85	27.46	30.66	26.07	0.02	15.59
10	0.11	85.60	60.62	21.56	19.89	0.08	31.31
11	0.09	105.02	45.62	30.14	35.54	0.03	36.63
12	0.04	123.40	22.43	29.24	28.14	0.02	15.78
13	0.11	116.24	17.99	29.56	47.86	0.05	9.75
14	0.02	18.48	48.81	5.41	3.32	0.06	3.93
二类用地筛选值 ^[8-9]	65	1 000	800	18 000	900	38	60

表 4 工程弃土样品有机污染物检测结果

样品编号	PCB28/ (μg·L ⁻¹)	PCB52/ (μg·L ⁻¹)	PCB101/ (μg·L ⁻¹)	PCB118/ (μg·L ⁻¹)	PCB153/ (μg·L ⁻¹)	PCB138/ (μg·L ⁻¹)	BHC/ (μg·kg ⁻¹)	DDT/ (μg·kg ⁻¹)	总石油烃/ (μg·L ⁻¹)
2	未检出	0.960	未检出	1.36	未检出	未检出	0.112	0.665	740
3	未检出	未检出	9.67	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	829
9	未检出	1.235	未检出	0.88	未检出	未检出	未检出	1.238	623
12	未检出	未检出	8.23	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	412
二类用地筛选值	多氯联苯 PCB 总量<380						300	6 700	4.5×10 ⁶

由表 3 可看出，所有回填土中重金属和砷含量均未超过《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》及《土壤重金属风险评价筛选值 珠江三角洲》中所规定的建设用土壤污染风

险管控标准第二类用地筛选值。这表明，按照目前建设用土壤污染风险管控标准，所采用的工程弃土可以不需要修复和风险管控直接作为建设用土壤。

由表 4 可看出, 土体中多氯联苯 PCB、双对氯苯基三氯乙烷 DDT、六氯环己烷 BHC、总石油烃等主要有机污染物含量均未超过规范中建设用地土壤污染风险管控标准第二类用地筛选值, 其对生态环境及人体健康污染效应无影响且不具备潜在的环境风险。

3 工程弃土的陆域回填再利用技术

3.1 陆域回填

本工程首次陆域回填面积约 25.4 万 m², 其中

近岸回填区面积 3.28 万 m², 采用工程弃土代替原设计方案中的中粗砂进行回填, 交工高程 5 m。储罐回填区面积 6.62 万 m², 3 m 高程以下回填工程弃土, 3~4 m 高程处设置中粗砂垫层, 4 m 高程以上回填工程弃土, 交工高程为 5 m。完成首次陆域回填及地基处理后, 对储罐区储罐位置进行基坑开挖, 利用基坑开挖产生的工程弃土进行第二次陆域回填, 第二次陆域回填去除基坑区域面积后共 25.16 万 m², 第二次交工高程为 5.7 m。近岸回填区和储罐回填区的典型断面如图 2 所示。

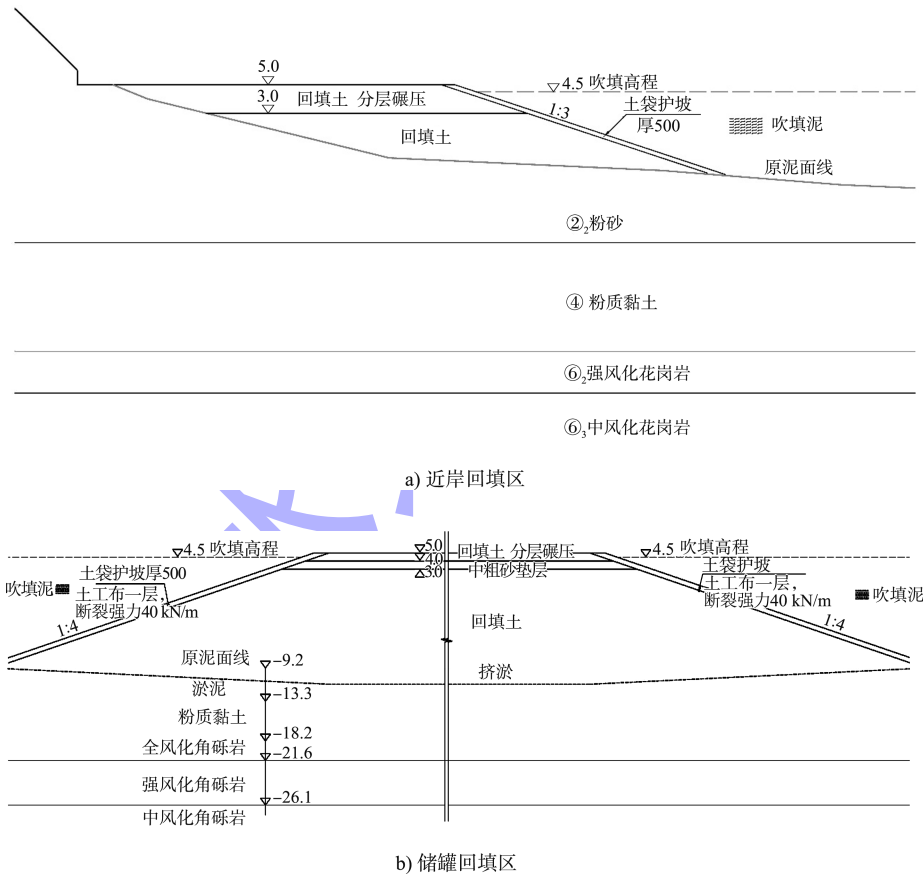


图 2 近岸回填区和储罐回填区的典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

3.2 地基处理

1) 近岸回填区: 高程 3~5 m 采用 20 t 振动压路机分层碾压, 压实后最大分层厚度不超过 50 cm, 各级土层碾压后, 压实度不低于 85%, 表层压实度不低于 94%。设计承载力 ≥120 kPa。

2) 储罐回填区: 高程 3~5 m 采用 20 t 振动压路机分层碾压, 回填至高程 4 m 后插塑料排水板

(储罐圆形基坑范围内不插板); 压实后的最大分层厚度不超过 50 cm。各级土层碾压后, 压实度不低于 85%, 表层压实度不低于 94%。设计承载力 ≥120 kPa。

3) 二次回填: 第二次陆域回填及地基处理采用储罐区域基坑开挖所产生的工程弃土, 弃土经固化处理后回填至场地内, 碾压至第二次交工高程 5.7 m。

4 工程弃土应用效果评价

为控制地基处理效果, 在每层碾压后对场地高程进行测量, 达到合格标准后进行压实度试验, 均合格后才能进行下一层的回填, 保证地基处理效果。最后, 对地基土采用平板荷载试验进行验收。

4.1 回填高程控制

对储罐回填区 3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.0 m 回填碾压后的高程进行检测, 每层高程检测点数量为 80 个, 允许偏差值为 ± 100 mm, 检测合格率见图 3。

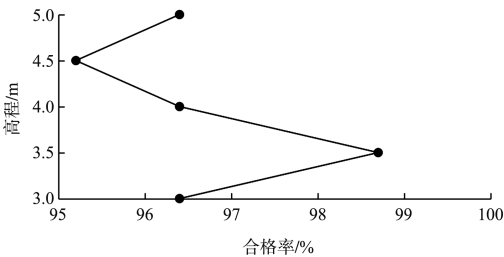


图 3 储罐回填区不同高程处检测合格率

由图 3 可看出, 采用工程弃土进行回填时, 回填高程的检测合格率较高, 各高程合格率均大于 95%, 能够达到回填高程的控制要求。

4.2 压实度评价

对储罐回填区西部和东部高程 3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.0 m 处分别进行压实度试验检测, 每个区域每个高程进行 10 次试验取平均值进行验收, 压实度平均值见图 4。

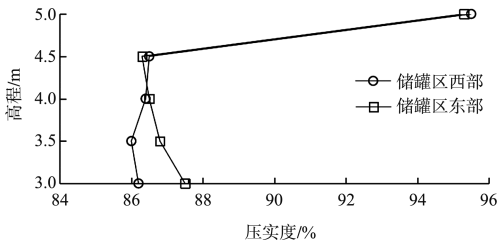


图 4 储罐区不同高程处压实度平均值

由图 4 可以看出, 在 3.0~4.5 m 储罐区的压实度 $\geq 85\%$, 在 5 m 处压实度 $\geq 94\%$, 均能满足设计要求。

4.3 承载力评价

分别在近岸回填区和储罐区进行平板荷载试验确定地基处理后的承载力, 承压板采用边长为 1.2 m 的方板, 试验位置如图 5 所示。近岸回填区的试验结果如图 6 所示, 储罐回填区的试验结果如图 7 所示。

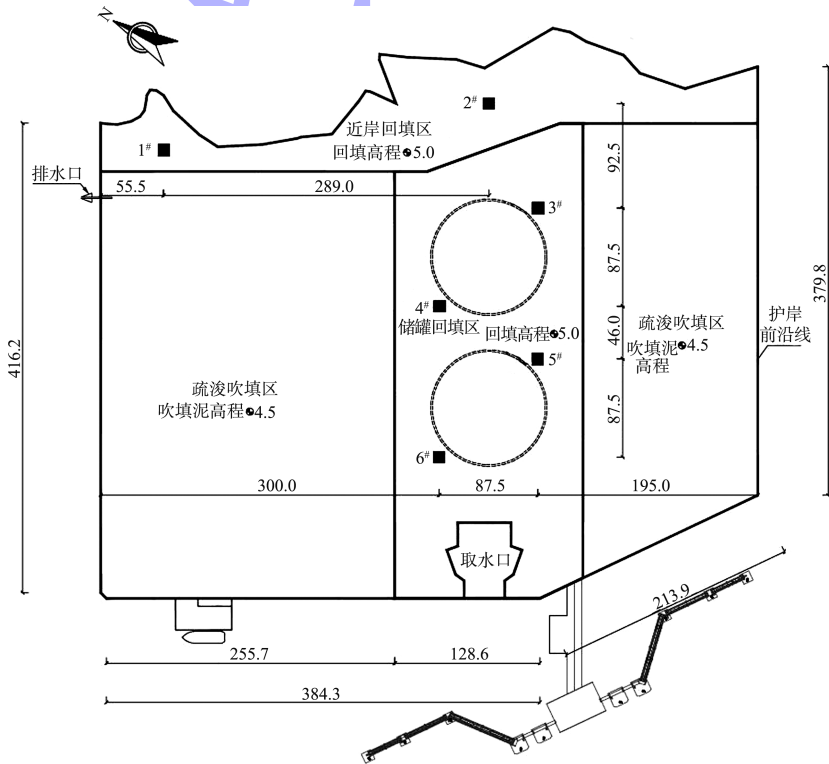


图 5 平板荷载试验位置 (单位: m)

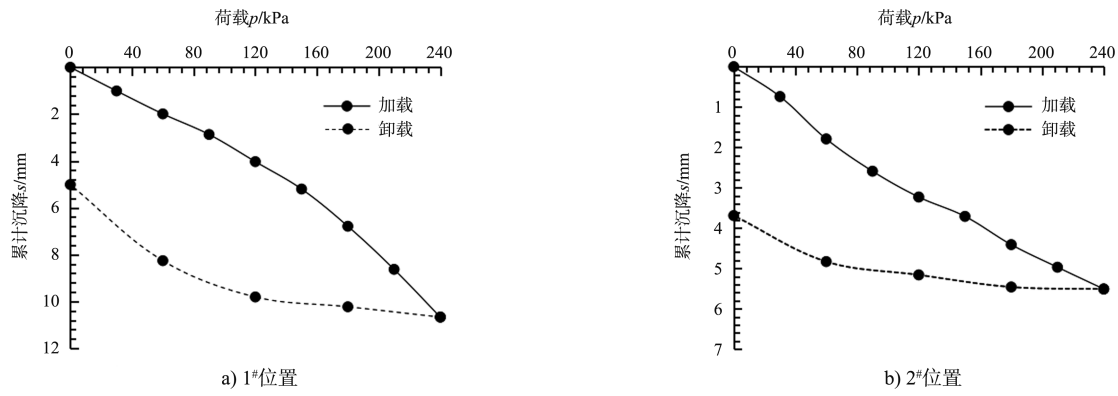


图 6 近岸回填区平板荷载试验 $p-s$ 曲线

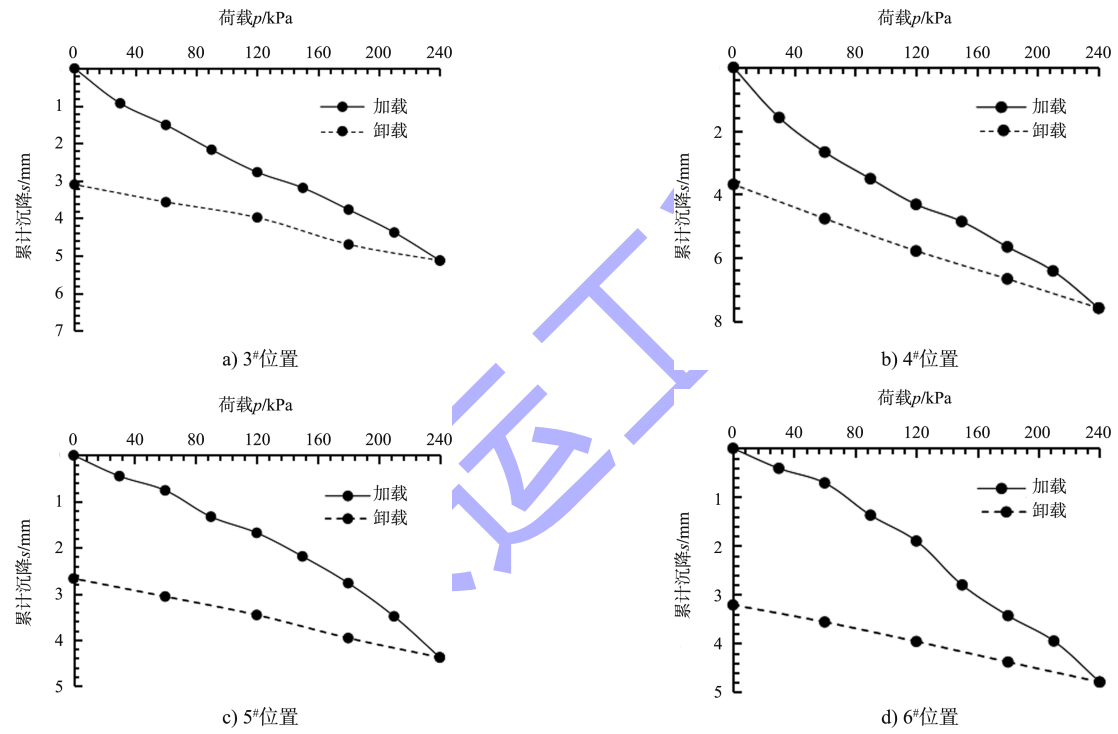


图 7 储罐回填区平板荷载试验 $p-s$ 曲线

由图 6、7 可看出，近岸回填区和储罐回填区的试验荷载均能达到 240 kPa 的极限荷载，因此，取试验极限荷载一半所对应的荷载值为单个试验点的容许承载力，两个区域的承载力特征值均大于等于 120 kPa，工程弃土在经过地基处理后能够满足设计要求。

4.4 经济效果评价

由于海砂价格已由设计之初的 40~50 元/m³，暴涨至 180~200 元/m³，涨幅近 400%，且仍有上涨的趋势。与原中粗砂方案对比，采用工程弃土作为替代材料，将直接减少工程成本约 277 万元。

另外，由于海砂市场供应无法保证，造成了

本工程回填中粗砂施工存在较大的施工工期风险，将严重影响后续陆域回填吹填施工及地基处理施工进度，进而影响项目的总体建设进度计划。采用工程弃土进行替代后，陆域回填已按计划进度顺利进行，间接经济效益可达 2 500 万元以上。

5 结论

1) 本工程使用工程弃土代替中粗砂回填料，并采用分层填埋碾压的方法进行地基处理，其地基承载力可以达到要求，经济和社会效益显著，工程弃土的陆域再回填技术实际应用效果较好。

2) 工程性质较好的工程弃土可直接采用分层

回填, 回填后可采取碾压的方式进行地基处理, 分层厚度宜小于等于 50 cm, 每次分层碾压后应进行高程测量及压实度检测, 保证每层的施工质量, 并在最后采用现场原位试验的方法进行承载力验收。

3) 对于回填较厚及底部土层较差的区域, 可设置中粗砂垫层及插设排水板等方法加快土体排水, 增强地基处理效果。

4) 工程性质较差的工程弃土可采用添加固化剂的方法进行再利用, 固化剂的种类及掺量应根据工程弃土的种类及现场实际情况确定。

5) 本技术能够降低陆域回填的施工成本, 缩短工期, 节约造价; 另一方面, 也能为施工单位采用类似技术时提供参考借鉴, 防范施工技术风险。

参考文献:

[1] 贺迎喜, 王伟智, 邱青长, 等. 红海地区珊瑚礁吹填料的压实效果研究与分析[J]. 水运工程, 2010(10): 82-87, 92.

(上接第 110 页)

[4] 许强. 德国的水路运输[J]. 珠江水运, 2004(7): 18-19.

[5] Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt e. V. System Wasserstraße [EB/OL]. (2018-01-12) [2019-12-25]. <https://www.binnenschiff.de/system-wasserstrasse/wasserstrasse/>.

[6] Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt e. V. System Wasserstraße [EB/OL]. (2018-08-20) [2019-12-25]. <https://www.binnenschiff.de/wp-content/uploads/2018/08/Bundeswassertrassen.pdf>.

[7] Marine Wir. Dienen. Deutschland. Fakten und Zahlen zur maritimen Abhängigkeit der Bundesrepublik Deutschland Jahresbericht 2018[EB/OL]. (2018-11-10) [2020-01-11]. <https://deutscher-marinebund.de/wp-content/uploads/2018/11/Jahresbericht-Marinekommando-2018.pdf>.

[2] 张勇. 高含量贝壳砂在陆域形成中的应用[J]. 水运工程, 2010(4): 46-50.

[3] 李松斌, 陈胜, 梁小丛. 高坡缕石含量灰岩回填料工程适宜性[J]. 水运工程, 2016(4): 154-159.

[4] 朱伟, 刘汉龙, 高玉峰. 工程废弃土的再生资源利用技术[J]. 再生资源研究, 2001(6): 32-35.

[5] 肖建庄, 沈剑羽, 高琦, 等. 工程弃土现状与资源化创新技术[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(4): 1-13.

[6] 袁静, 陈金友, 宫达. 建筑废弃物再生材料在地基处理中的应用建议[J]. 地基处理, 2020, 2(1): 14-24.

[7] 王婧, 曾庆军, 陈平山, 等. 废弃渣土造陆的分层填埋方式对比[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(8): 6-9.

[8] 生态环境部南京环境科学研究所, 中国科学院南京土壤研究所, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 等. 土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 36600—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[9] 广东省生态环境与土壤研究所, 广东省地质调查院. 土壤重金属风险评价筛选值珠江三角洲: DB44/T 1415—2014[S]. 广州: 广东省质量技术监督局, 2014.

(本文编辑 王璁)

[8] DNV.GL Maritime[EB/OL]. (2018-12-10) [2020-09-11]. <https://www.dnvgl.com/news/marpol-annex-vi-update-in-force-from-1-january-2019-on-nox-bdn-ship-implementation-plan-135180>.

[9] International Maritime Organization. Marine Environment [EB/OL]. (2010-07-01) [2020-10-8]. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx>.

[10] 章强, 马彦勇, 王学锋. 港口治理模式研究: 一个基于多元主体互动的新的分析框架[J]. 浙江海洋学院学报(人文科学版), 2016, 33(6): 1-8.

(本文编辑 武亚庆)