

DOI: 10.11779/CJGE201708020

珊瑚礁砂作地基吹填料及振冲加固试验研究

邱伟健¹, 杨和平^{*1}, 贺迎喜², 余东华³

(1. 长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230;

3. 中交四航局第五工程有限公司, 福建 福州 350003)

摘 要: 珊瑚礁砂作为一种特殊的地基填筑材料, 其基本特性是结构疏松、压实难、压缩性大、承载力低, 实际的工程应用还鲜有报导。结合沙特吉达 RSGT 码头修建项目, 对红海珊瑚礁的矿物成分、基本物理力学性质开展试验研究, 分析将珊瑚礁砂用作码头吹填地基填料的可行性, 并采用振冲挤密法对该珊瑚礁砂地基进行加固处理。通过对比振冲加固前后地基的 CPT 检测结果, 并利用振冲加固后的标贯 SPT 数据对处理地基进行沉降分析计算, 得出该珊瑚礁砂料是一类工程性质较好的新型填料, 填筑地基经振冲挤密后的加固效果显著, 既经济又环保, 特别适合于沿海岸珊瑚礁大量分布地区的港口码头造陆工程建设。

关键词: 珊瑚礁砂; 填料; 振冲; CPT; SPT; 地基沉降

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2017)08 - 1517 - 07

作者简介: 邱伟健(1991 -), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程、特殊土路基研究。E-mail: qwj910718@163.com。

Experimental study on coral reef sand as hydraulic filling materials for foundation and its vibroflotation compaction

QIU Wei-jian¹, YANG He-ping¹, HE Ying-xi², YU Dong-hua³

(1. Transportation Engineering College, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 3. The Fifth Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: As a special foundation filling material, the coral reef sand has many basic characteristics, such as loose structure, difficult compaction and low bearing capacity, while the practical engineering application is rarely reported up to now. Based on the Saudi Jeddah RSGT wharf construction project, the mineral composition, basic physical and mechanical properties of the red sea coral reef are studied, and the feasibility of the coral reef sand as the hydraulic filling materials for foundation is analyzed. Furthermore, the method of vibroflotation to reinforce the coral reef sand is adopted. Through the comparison of CPT testing results before and after vibroflotation and the settlement calculation on the related foundation using the measured SPT data after vibroflotation, it is approved that the coral reef sand is a new kind of good filling materials for engineering. The reinforced effect is remarkable with the excellence of environmental protection and economy when it is used as filling materials for foundation after vibroflotation, which is especially suitable for the mass distribution of coral reef in the coastal areas of reclamation for port construction projects.

Key words: coral reef sand; filling; vibroflotation; CPT; SPT; foundation settlement

0 引 言

沙特阿拉伯吉达市毗邻红海, 附近水域分布大量珊瑚暗礁与岛屿, 该类珊瑚礁石大多由海洋微生物经漫长地质年代进化形成, 属于生物化学沉积岩。2009 年吉达市修建 RSGT 集装箱码头时, 吹填及原陆域需处理的地基达 $41 \times 10^4 \text{ m}^2$, 需大量砂石填料, 于是在航道区域开挖珊瑚礁形成港池并吹填其形成码头陆域, 若用珊瑚礁砂做地基填料成功, 既能解决航道疏浚时珊瑚礁碎屑堆场问题, 又可缓解围海造陆填料紧

缺矛盾, 大大降低工程造价并缩短工期, 为沿海码头建设探索一条新路。

国外已有珊瑚礁研究多集中于物质特性及对环境的影响, 甚少涉及工程利用; 国内对其工程性质的零星研究始于 20 世纪 70 年代, 主要针对南沙、西沙岛礁, 实际工程应用也鲜有报导^[1-3]。可见, 无论从岛礁

收稿日期: 2016 - 04 - 23

*通讯作者 (E-mail: cscuyang@163.com)

工程建设前瞻性，还是促进其工程地质领域理论、技术全面发展角度分析，研究珊瑚礁碎屑沉积物经科学手段处理并用作工程填料都有十分重要的意义^[1]。作为一种特殊岩土材料，珊瑚礁砂具有疏松、多孔隙、易碎性、压实难、压缩性大等特点，目前国内外有关地基勘察设计规范中填料系列均未将其列入。而当前沿海大型码头越建越多，填筑材料特别紧缺，人们不得不考虑就地取材，利用它做码头堆场填料，实现工程建设节能、经济、环保。显而易见，开展珊瑚礁砂工程应用研究是十分必要和有益的。本文依托 RSGT 集装箱码头修建，开展红海珊瑚礁物质成分、基本物理力学及工程性质试验研究，分析用它做地基吹填料的可行性，并用振冲挤密法对吹填地基进行加固。

1 珊瑚礁的物质成分及基本特性

1.1 主要成份

珊瑚礁分礁岩和碎屑土两大类。礁岩按成因又分原生和次生两类，都属碳酸岩中的生物礁灰岩，主要成分为文石和高镁方解石，摩氏硬度 3~5，主要化学成份是 CaCO₃ (含量达 90%~97%)，岩土类别属碳酸类土或钙质土^[4]。碎屑土为原生或次生礁岩和珊瑚、贝壳残骸等经风化或海水动力搬运堆积或残积尚未胶结的土，从上至下土层颗粒变细，从无胶结到弱胶结，呈松散一中密状态^[5]。

1.2 基本物理力学与化学特性

世界不同地区珊瑚礁砂因所处环境不同，其 CaCO₃ 含量、密度和孔隙比均有较大差异 (见表 1)。

表 1 不同地区珊瑚礁砂的物理性状对比

Table 1 Comparison of physical characteristics of coral reef sand in different regions

| 采样地点 | CaCO ₃ 含量 /% | 颗粒密度 / (g·cm ⁻³) | 孔隙比 范围 |
|-----------|-------------------------|------------------------------|-----------|
| 南沙永暑礁 | 96.7 | 2.73~2.80 | 0.75~1.26 |
| 西沙群岛 | 93~96 | 2.75~2.83 | — |
| 爱尔兰海域 | 92.5 | 2.72 | 1.62~1.98 |
| 印度西大陆架 | 75 | 2.80 | 0.75~1.07 |
| 澳大利亚西北大陆架 | 94 | 2.72 | 1.22~1.92 |
| 澳大利亚东南大陆架 | 88 | 2.73 | 0.54~1.01 |
| 美国佛罗里达海域 | 92 | 2.80 | 1.00~2.97 |

表 2 珊瑚礁石、砂基本性质指标

Table 2 Basic properties of coral reef stone and sand

| 名称 | 比重 | 密度/(kg·m ⁻³) | 吸水率/% | CaCO ₃ 含量/% | NaCl 含量/% | 抗压强度/MPa | 细度模数 |
|------|-----------|--------------------------|---------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 珊瑚礁石 | 2.40~2.55 | 1050~1150 | 3.0~4.5 | 90~97 | 0.05~0.16 | 63.0~75.6 | — |
| 珊瑚礁砂 | 1.86~1.94 | 983~1028 | 2.1~3.3 | 92~96 | 0.03~0.63 | 72.8~83.2 | 1.42~4.68 |

RSGT 码头水域附近的珊瑚礁石多由微生物经漫长地质年代进化而成，属生物化学沉积岩，颜色洁白或灰白，按风化程度不同可分为礁石和礁砂两类，它们的基本性质指标见表 2。

2 珊瑚礁砂作地基填料的可行性分析

采集疏浚开挖的珊瑚礁砂料做颗粒分析、击实、常规直剪及加州承载比试验，获得其基本土性及工程性质。该类材料属含砾石类砂土，内摩擦角为 33°~42°，无黏聚力，力学性质较为稳定。图 1 为其颗粒分析曲线，不均匀系数 C_u 为 12.6~65.1，曲率系数 C_c 为 0.25~0.72，为级配不良砂。

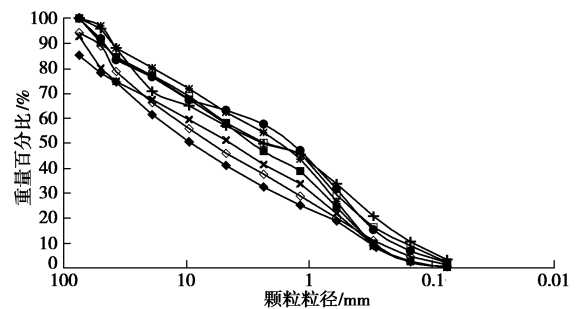


图 1 珊瑚礁砂颗粒分析试验曲线

Fig. 1 Test curves of coral reef sand particles

本项目为中交四航局承包的国际援建工程，执行的是欧美权威土木工程行业标准，击实试验采用美国材料与试验协会行业标准 (ASTM)^[6]。考虑到礁砂材质不均匀，现场选取了 12 组礁砂样完成击实试验，表 3 列出试验的汇总结果，图 2 为代表性 1 号样的击实曲线。由表 3 知，除 6, 10 号样外，其它礁砂的最大干密度均在 2.24 g/cm³ 以上。

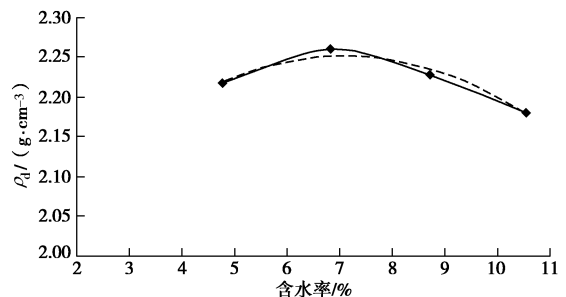


图 2 试样 1 击实曲线

Fig. 2 Compaction curves of sample 1

表 3 击实试验结果汇总

Table 3 Summary of compaction test results

| 试样编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 最大干密度/(kg·m ⁻³) | 2.260 | 2.252 | 2.264 | 2.261 | 2.276 | 1.880 | 2.274 | 2.240 | 2.241 | 1.740 | 2.240 | 2.273 |
| 最优含水率/% | 6.8 | 7.4 | 7.9 | 6.9 | 8.0 | 8.0 | 7.0 | 7.5 | 8.0 | 7.8 | 8.5 | 6.5 |

表 4 CBR 试验结果汇总

Table 4 Summary of CBR test results

| 试件编号 | CBR/% | 试件编号 | CBR/% | 试件编号 | CBR/% | 试件编号 | CBR/% | 试件编号 | CBR/% | 试件编号 | CBR/% |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| C1 | 37.8 | C8 | 61.2 | C15 | 70.1 | C22 | 62.4 | C29 | 41.4 | C36 | 58.7 |
| C2 | 63.0 | C9 | 38.7 | C16 | 49.6 | C23 | 59.0 | C30 | 37.3 | C37 | 59.8 |
| C3 | 61.7 | C10 | 48.3 | C17 | 63.2 | C24 | 47.3 | C31 | 57.9 | C38 | 68.3 |
| C4 | 44.0 | C11 | 59.5 | C18 | 53.0 | C25 | 44.8 | C32 | 38.0 | C39 | 47.5 |
| C5 | 35.6 | C12 | 60.1 | C19 | 56.7 | C26 | 55.7 | C33 | 40.3 | C40 | 54.7 |
| C6 | 49.2 | C13 | 44.9 | C20 | 36.3 | C27 | 60.7 | C34 | 40.0 | C41 | 40.7 |
| C7 | 36.4 | C14 | 35.1 | C21 | 51.6 | C28 | 58.9 | C35 | 59.9 | C42 | 55.6 |

表 5 地基土物理力学指标

Table 5 Physical and mechanical indices of foundation soils

| 土类 | 土性描述 | 天然 含水率 /% | 天然 干密度 /(g·cm ⁻³) | 最佳 含水率 /% | 最大 干密度 /(g·cm ⁻³) | 黏聚力 /kPa | 内摩擦角 /(°) |
|-----------|---------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------|--------------|
| 吹填珊瑚礁砂 | 疏浚开挖形成的珊瑚礁砂、粉土、砾石混合物 | 12~38 | 1.57~1.82 | 6.5~8.0 | 1.740~2.276 | 0 | 33~42 |
| 珊瑚礁地层 (1) | 珊瑚礁强风化物, 主要为珊瑚礁砂、粉土、砾石混合物 | 12~35 | 1.62~1.91 | 9.4~10.9 | 1.921~2.005 | 0 | 36~40 |
| 珊瑚礁地层 (2) | 珊瑚礁微风化物, 相当于“硬黏土”或“软岩” | 15~40 | 1.380~2.10 | | | 5 | 28~36 |
| 海相淤泥 | 主要为软黏土, 夹杂松散粉细砂 | 24~68 | 1.00~1.20 | | | 2~5 | 22~27 |

按项目合同要求, 本文室内 CBR 试验执行英国土木工程技术标准 BS 1377^[7], 共选取 42 个试件完成 CBR 试验, 表 4 给出汇总测试分析结果。不难看出, RSGT 码头礁砂的最小 CBR 值是 35.1%, 完全满足技术规范对现场垫层材料强度的设计要求 (CBR 大于 30%)。

工程实践表明, 前期吹填礁砂形成陆域过程中若工艺控制不好, 往往造成吹填料粒径不均、级配较差, 此时如实施碾压, 填料中粒径过大颗粒将影响压实效果, 因其与压路机碾压面作用机率增加, 会大大削弱周围细粒的压实功效, 不利于地基土碾压密实^[8]; 而大粒径礁砂得不到有效分散易形成礁石集中, 使同一层填料即使用相同功能施压也将产生不均效果, 而碾压不均的地基日后必产生压缩变形不均现象, 引起运营期码头堆场不均匀沉降发生。不过目前要有效控制吹填工艺十分艰难, 加上机械碾压的作用深度有限, 直接导致用压实来加固吹填地基的质量难以保证, 根本达不到吹填地基处理的深度要求。考虑到该处珊瑚礁砂中含近 40% 的砾石, 非常适合用振冲法加固密实

地基, 尤其通过振冲过程地基中形成砾石桩, 更能有效地提高其整体强度和抗地震液化的能力。

由上述分析论证可知, 该珊瑚礁砂用作 RSGT 码头地基填料可行, 只要针对场地条件, 精心设计并实施好振冲工艺, 加固的地基土应能满足抗液化标准、承载能力和沉降控制等多方面的设计要求。

3 场地工程地质条件

分析图 1 礁砂的颗分试验结果, 可知该填料为含碎、块石的砂砾土, 并含有少量细砂和贝壳物。考虑填料客观存在的差异, 码头造陆区上部采取分层吹填施工, 覆盖礁砂总厚 6~15 m; 局部区域地基中有软弱夹层, 主要为粉土、粉质砂土和粉细砂, 厚度 0.5~2.0 m, 埋深在 0~7 m 范围。经过疏浚吹填珊瑚礁砂下部的海相地层土是珊瑚礁形成物, 分布在距场地设计标高约 6~20 m 深度, 主要成分为粉土、砂、砾石, 并夹杂贝壳物; 而部分独立区域的层位还存在海相淤泥, 成分为软黏土并夹杂些松散粉细砂。表 5 给出场区内不同层位的各类地基土及其基本物理力学性质,

图3为其典型地质剖面。

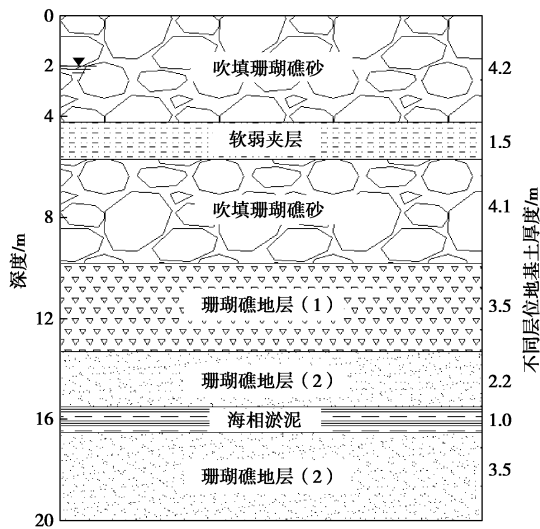


图3 典型地质剖面

Fig. 3 Typical geological sections

4 地基振冲加固及效果分析

振冲法是 20 世纪 30 年代由 S.Steuernan 最先提出，中国到 1977 年才有应用，分振冲置换法与振冲挤密法。置换法适合不排水、抗剪强度大于 20 kPa 的黏、粉、饱和黄土及人工填土地基；挤密法适合处理砂土和粉土地基，不加填料时仅适合黏粒含量 < 10% 的粗、中砂地基，对夹杂有粉细砂的地基须加填料，否则很难达到加固要求^[9-11]。因此，本工程选用加填料振冲挤密法，一方面利用振冲器的强力振动使饱和礁砂液化、砂粒重新排列、孔隙减小、相对密度及摩擦角增大；另一方面靠振冲时强大水平振动力挤压密实加填料砂层，可避免地基不均匀沉降并提高其承载能力和抗液化性能。

4.1 振冲加固目标

堆场从围堰至码头外侧的回填区均用珊瑚礁砂填筑，常规区域加固的设计深为 16 m，轨道梁区域依断面类型从码头前沿方向逐渐递增至 12 m。地基加固目标根据设计方提供的计算书要求制定，沉降控制要求见表 6，抗液化性要求见图 4，5 中 CPT 设计曲线。

表 6 地基验收标准——沉降控制

| Table 6 Foundation acceptance criteria (settlement control) | | | |
|-------------------------------------------------------------|----|----|-----|
| 时间/a | 5 | 25 | 50 |
| 沉降控制指标/mm | 25 | 75 | 150 |

4.2 振冲施工技术参数

对珊瑚礁砂吹填区进行全面振冲加固前，先在现场选定了 1858 m² 做试验区（分 A、B 两区），严格按项目部经方案论证确定的施工技术参数及振冲挤密工艺开展试验区的振冲施工。试验结束后，在 A、B 区

各选一代表性点位（SPT-A 和 SPT-B）进行标贯 SPT 试验，图 6，7 和表 7 分别给出振后 SPT 曲线及振冲前、后对比测试结果。

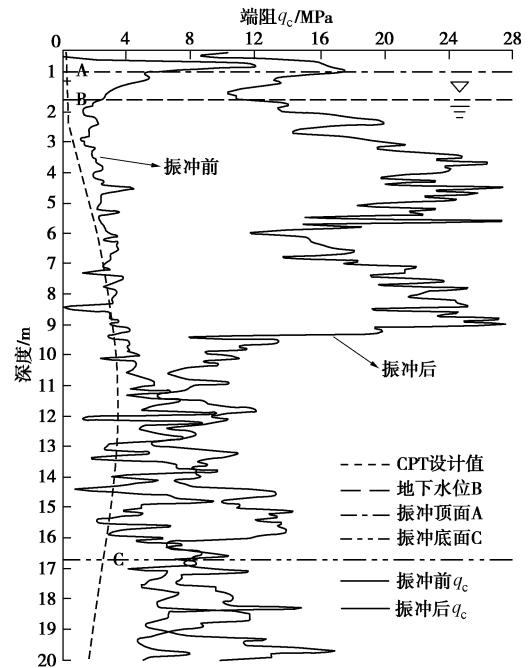


图4 常规区域 CPT-1 点测试结果对比

Fig. 4 Comparison of CPT results (general region of CPT-1 point)

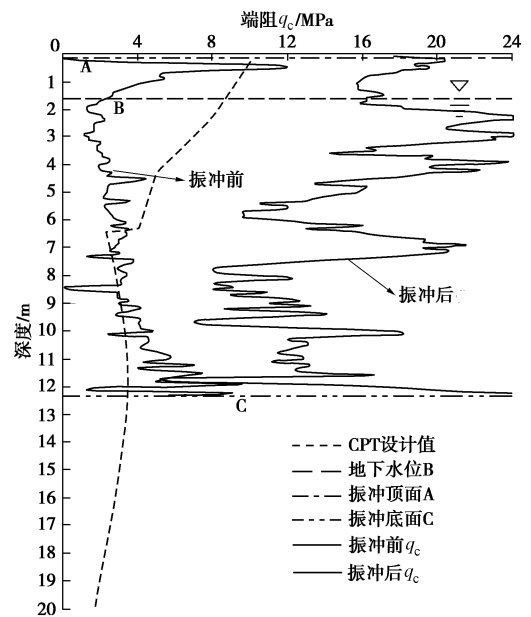


图5 轨道梁区域 CPT-2 点测试结果对比

Fig. 5 Comparison of CPT results (track beam region of CPT-2 Point)

分析表 7 和图 6，7 可知，经加填料振冲挤密处理的吹填地基效果良好，其 SPT 击数明显提高，均能满足设计要求。在试验获得成功的基础上，为更好推广振冲施工工艺，项目部对设计方案做了进一步论证和优化，确定用 132 kW 大型振冲器施工的最终技术参数：

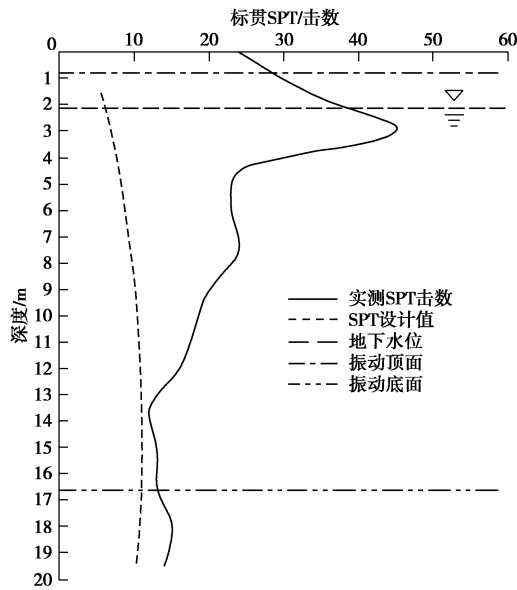


图 6 标准贯入试验结果 (SPT-A 点位)

Fig. 6 Standard penetration test results (SPT-A point)

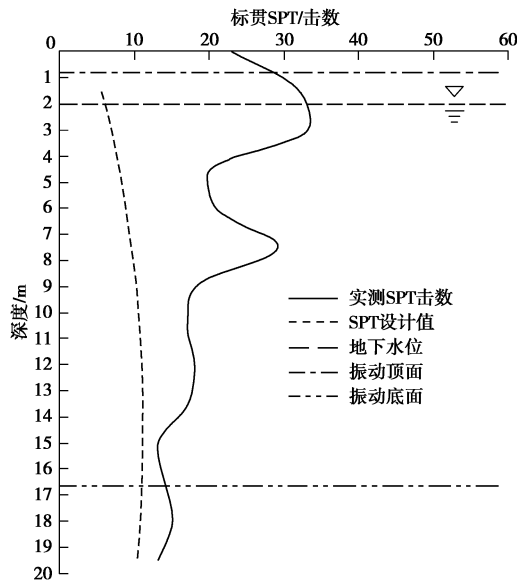


图 7 标准贯入试验结果 (SPT-B 点位)

Fig. 7 Standard penetration test results (SPT-B point)

表 7 振冲前后标贯 SPT 结果对比

Table 7 Comparison of SPT results before and after vibroflotation

| 深度 /m | 标贯 SPT (击数) | | | |
|-------|-------------|----------|----------|----------|
| | SPT-A 振前 | SPT-A 振后 | SPT-B 振前 | SPT-B 振后 |
| 1.5 | 6 | 31 | 5 | 32 |
| 3.0 | 7 | 45 | 7 | 33 |
| 4.5 | 6 | 24 | 7 | 20 |
| 6.0 | 8 | 23 | 8 | 21 |
| 7.5 | 9 | 24 | 9 | 29 |
| 9.0 | 10 | 20 | 11 | 18 |
| 10.5 | 11 | 18 | 9 | 17 |
| 12.0 | 9 | 16 | 10 | 18 |
| 13.5 | 7 | 12 | 11 | 17 |
| 15.0 | 10 | 13 | 8 | 13 |
| 16.5 | 12 | 13 | 9 | 14 |
| 18.0 | 9 | 15 | 10 | 15 |
| 19.5 | 10 | 14 | 9 | 13 |

(1) 振冲孔按等边三角形布置, 轨道梁区域内的间距 3.0 m, 一般区域间距为 3.5 m。

(2) 填料用珊瑚礁砂, 加料方式为连续下料 (即振冲器不提出孔口面直接在孔口投料), 每次加料厚度 0.5 m。

(3) 成桩作业: ①慢速振冲下沉至地面下设计深度处, 留振 120 s; ②慢速振冲上拔 0.5~1.0 m, 留振 20~25 s, 密实电流控制在 11~130 A (轨道梁区域要达到 130~150 A); ③重复步骤 b, 振冲器贯入与上拔速度控制在 1~2 m/min, 直至孔口, 再留振 60 s, 成桩结束。

4.3 振冲加固效果分析

(1) 检测加固效果

因振冲检测点位多, 只在常规区域和轨道梁区域各选一代表性点位 (CPT-1 和 CPT-2) 做振冲前、后静力触探检测, 两测点均位于振冲三角桩中心处, CPT-1 的检测设计深为 20 m, CPT-2 的深度 12.3 m, 检测结果见图 4, 5。

(2) 测试结果分析

分析图 4, 5 可知, 振冲后常规和轨道梁区域地基质量都有显著提高。天然吹填礁砂较松散, 实测 10 m 深内土层 CPT 线接近抗液化合格线, 部分层低于设计值, 说明其承载能力差工后沉降大。振冲加固后, 常规区域深 10~16 m 内, 土层 CPT 端阻平均值由原不足 3 MPa 提至 10 MPa, 部分层达 25 MPa 以上; 而轨道梁区域深 7~9 m 范围内, 土层 CPT 均值由原基本达不到抗液化要求提至 14 MPa, 深 9~12 m 范围内, CPT 均值也达 12 MPa。综合分析, 按设计振冲技术参数加固地基的有效深度均达到设计要求。处理后回填礁砂已达中~密实状态, 充分说明加填料振冲法处理吹填礁砂地基切实可行。

5 振冲后地基沉降分析

5.1 地基验收标准

基于本项目吹填礁砂工程特性及地基振冲加固实际效果, 提出优化后地基检测验收指标。

(1) 软弱夹层区域: 标贯 $N > 10$ 击; 非软弱夹层区域: $N > 15$ 击; 工后沉降 ≤ 75 mm。

(2) 地基土抗液化要求: 标贯 $N > 7.5$ 击。

(3) 如软弱夹层区域局部标贯 7.5 击 $< N < 10$ 击, 经由施莫法计算的工后沉降需 ≤ 75 mm。

5.2 沉降分析计算方法

大多数情况下, 土体弹性模量随其深度变化。施莫特曼沉降算法 (Schmertmann's method) [12] 非常适合分析弹性模量随深度变化的地基沉降, 其基本思

路是用一按三角形分布的纵向应变建立的“2B-0.6”模型进行沉降计算，典型模型见图8。

运用施莫法做沉降分析时，先需获取基础下各土层的弹性模量，而该值取决于土体类型及密实程度，可由SPT或CPT测试值和地质情况定。

1996年Bowles推出一经验公式，确定砂性地基土标贯值 N 与弹性模量 E_s 的函数关系：

$$E_s = 500(N + 15) \quad (1)$$

式中， N 为标贯SPT击数， E_s 为弹性模量值(kPa)。

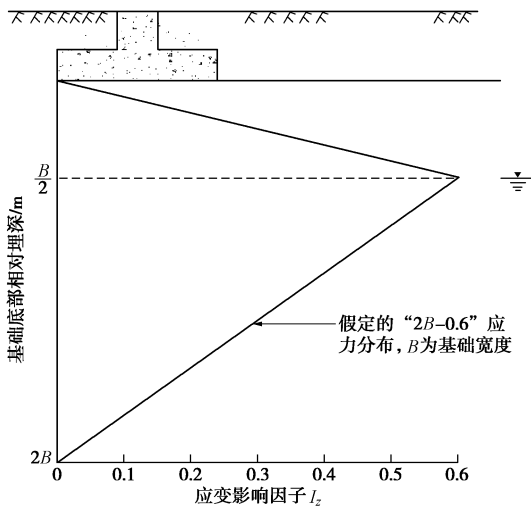


图8 地基沉降模型

Fig. 8 Foundation settlement model

基于上述沉降模型的施莫法认为地基沉降的80%发生在建造期，约85%~90%的总沉降发生在所有外部荷载施加后4个月内，而实际显著性沉降却发生在建筑物完工一年以后，原因是没有考虑到加固地基工后长期沉降。为此，施莫特曼建立了修正后的应变影响因子 I_z 分布模型(见图9)。本文分析地基沉降采用 I_z 经修正后的施莫特曼沉降算法，以下式(2)、(3)为计算公式，分别适用方形和条形基础：

$$S = C_1 C_2 \Delta P \sum_0^{2B} \frac{I_z \Delta z}{E_s} \quad (2)$$

$$S = C_1 C_2 \Delta P \sum_0^{4B} \frac{I_z \Delta z}{E_s} \quad (3)$$

$$C_1 = 1 - \frac{P_0}{2\Delta P} \quad (4)$$

$$C_2 = 1 + 0.2 \lg(10t) \quad (5)$$

式中 S 为地基沉降(m)； B 为基础宽度(m)， Δz 为基础下各土层厚(m)； I_z 为应变影响因子，查图8定； E_s 为土体弹性模量(kPa)； C_1 为埋深修正系数，建议 $C_1 \geq 0.5$ ； C_2 为蠕变修正系数； P_0 为地基土压力(kPa)； ΔP 为基础附加应力(kPa)； t 为时间单位(a)。

根据上述，考虑到现场集装箱码头为方形基础，该项目设计年限 t 取25a，进行本加固地基工后沉降

分析，将修正的 I_z 代入式(2)进行计算。

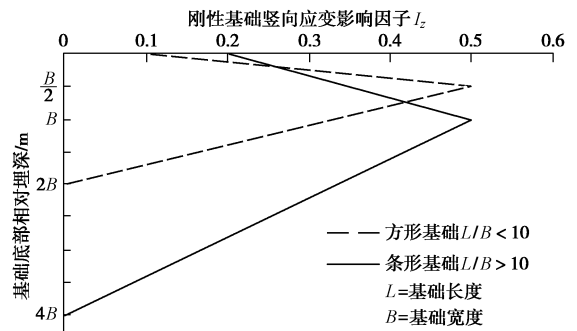


图9 修正的应变影响因子 I_z 分布

Fig. 9 Distribution of simplified strain influence factor

5.3 沉降分析计算结果

同样因本项目SPT检测点多，下面仅列出3个代表性点位的检测数据(见表8~10)。

表8 标贯检测数据(软弱夹层区域SPT-1点位)

Table 8 Standard penetration test data (soft interlayer SPT-1 point)

| 岩土名称 | 标贯起点 /m | 标贯终点 /m | 击数 | 高程 /m | 设计击数 |
|------|---------|---------|----|-------|------|
| 粉细砂 | 1.50 | 1.95 | 17 | 2.70 | 10 |
| 中砂 | 2.50 | 2.95 | 27 | 1.70 | 10 |
| 中粗砂 | 3.50 | 3.95 | 31 | 0.70 | 10 |
| 粉土 | 4.50 | 4.95 | 9 | -0.30 | 10 |
| 碎石 | 6.00 | 6.45 | 33 | -1.80 | 10 |

表9 标贯检测数据(软弱夹层区域SPT-2点位)

Table 9 Standard penetration test data (soft interlayer SPT-2 point)

| 岩土名称 | 标贯起点 /m | 标贯终点 /m | 击数 | 高程 /m | 设计击数 |
|------|---------|---------|----|-------|------|
| 中砂 | 1.50 | 1.95 | 15 | 2.58 | 10 |
| 粉砂 | 2.50 | 2.95 | 16 | 1.58 | 10 |
| 粉土 | 3.50 | 3.95 | 16 | 0.58 | 10 |
| 粉土 | 4.50 | 4.95 | 8 | -0.42 | 10 |
| 粗砂 | 6.00 | 6.45 | 29 | -1.92 | 10 |

表10 标贯检测数据(非软弱夹层区域SPT-6点位)

Table 10 Standard penetration test data (non-soft soil SPT-6 point)

| 岩土名称 | 标贯起点 /m | 标贯终点 /m | 击数 | 高程 /m | 设计击数 |
|------|---------|---------|----|-------|------|
| 中砂 | 1.50 | 1.95 | 21 | 2.84 | 15 |
| 中砂 | 2.50 | 2.95 | 19 | 1.84 | 15 |
| 中粗砂 | 3.50 | 3.95 | 31 | 0.84 | 15 |
| 细砂 | 4.50 | 4.95 | 17 | -0.16 | 15 |
| 粗砂 | 6.00 | 6.45 | 34 | -1.66 | 15 |

先由SPT-1、SPT-2、SPT-6三点位的击数求出各土层弹性模量值，再将其代入式(2)进行沉降计算，求得最终工后沉降分别为18.5、19.6和18.1mm，均满足验收设计要求(≤ 75 mm)。此外还选另外4个代表点位进行分析，其沉降计算汇总见表11。

表 11 沉降计算汇总

Table 11 Summary of settlement calculation

| 区域 | 检测孔编号 | 工后沉降量/mm |
|---------|-------|----------|
| 软弱夹层区域 | SPT-1 | 18.5 |
| | SPT-2 | 19.6 |
| | SPT-3 | 18.8 |
| | SPT-4 | 19.3 |
| | SPT-5 | 18.5 |
| 无软弱夹层区域 | SPT-6 | 18.1 |
| | SPT-7 | 18.2 |

不难看出, 绝大多数加固礁砂层满足设计要求, 少数含软弱夹层部位虽稍低于设计指标, 但按 5 测点 N 值推算的最大工后沉降为 19.6 mm, 仍满足设计要求且能消除液化风险。而无软弱夹层所有土层均满足设计要求, 更能消除地基液化风险。

6 结 论

RSGT 码头严格按照欧美技术标准体系修建, 2010 年投产至今运营情况良好, 吹填礁砂区地基沉降稳定, 经过实践检验, 加固工程已获成功。

(1) 现场试验检测表明, 采取合理施工工艺和技术参数, 采用振冲挤密法加固红海岸码头珊瑚礁砂吹填地基切实可行, 能达到预期的效果。

(2) 沉降分析计算表明, 珊瑚礁砂吹填地基用加填料振冲挤密加固, 能有效提高承载及抗液化能力并满足工后沉降要求, 且就地取材、降低造价、缩短工期, 技术、经济和环保效益良好。本研究可供珊瑚礁海域类似海岸工程建设借鉴。

(3) 目前有关珊瑚礁砂用作工程填料研究甚少, 国内外相关规范均无该类岩土基本信息, 有必要深入开展其理论与应用研究, 以有效解决沿海大型码头大量兴建而工程填料奇缺之矛盾。

参考文献:

[1] 余 强, 姜振春. 珊瑚礁砾石土压实特性试验研究[J]. 土工基础, 2015, **29**(1): 106 - 109. (YU Qiang, JIANG Zhen-chun. Experimental study on compaction characteristics of coral gravel soil[J]. Soil Eng and Foundation, 2015, **29**(1): 106 - 109. (in Chinese))

[2] 严与平, 柯有青. 浅谈珊瑚礁工程地质特性及地基处理[J]. 资源环境与工程, 2008, **12**: 47 - 49. (YAN Yu-ping, KE You-qing. Discussion on the geological characteristics and foundation treatment of the coral reef engineering[J]. Resources Environment & Eng, 2008, **12**: 47 - 49. (in Chinese))

[3] 袁 征, 余克服. 珊瑚礁岩土的工程地质特性研究进展[J].

热带地理, 2016, **36**(1): 87 - 93. (YUAN Zheng, YU Ke-fu. Research progress in the engineering geological characteristics of coral reef[J]. Tropical Geography, 2016, **36**(1): 87 - 93. (in Chinese))

[4] 汪 稔, 宋朝景, 赵焕庭, 等. 南沙群岛珊瑚礁工程地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997. (WANG Ren, SONG Chao-jing, ZHAO Huan-ting, et al. Spratly Islands coral reef engineering geology[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese))

[5] 孙宗勋, 詹文欢, 朱俊江, 等. 南沙群岛珊瑚礁岩体结构特征及工程地质分带[J]. 热带海洋学报, 2004, **23**(3): 11 - 20. (SUN Zong-xun, ZHAN Wen-huan, ZHU Jun-jiang, et al. Structural features and engineering geological zoning of coral reef in Spratly Islands[J]. Journal of Tropical Oceans, 2004, **23**(3): 11 - 20. (in Chinese))

[6] ASTM D1557—2 Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort[S]. United States: ASTM International Press, 2003.

[7] BS 1377—9 Determination of the in-situ california bearing ratio[S]. London: British Standard Institution Press, 1990.

[8] 王 钊, 胡海英, 邹维列. 路堤压实的影响因素和压实度要求[J]. 路基, 2004(8): 91 - 96. (WANG Zhao, HU Hai-ying, ZOU Wei-lie. Influence factors of embankment compaction and compaction degree requirement[J]. Subgrade, 2004(8): 91 - 96. (in Chinese))

[9] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (Foundation Treatment Manual Compilation Committee. Foundation treatment manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2000. (in Chinese))

[10] 邓筱鹏, 吴庆飞, 周 健, 等. 大面积粉细砂吹填成陆地基加固技术应用[J]. 水运工程, 2005, **5**: 42 - 47. (DENG Xiao-peng, WU Qing-fei, ZHOU Jian. Improvement technology of Large-area silty sand reclaimed foundation[J]. Port & Waterway Engineering, 2005, **5**: 42 - 47. (in Chinese))

[11] 周 健, 贾敏才, 池 永. 无填料振冲法加固粉细砂地基试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(8): 1350 - 1355. (ZHOU Jian, JIA Min-cai, CHI Yong. No filler vibroflotation test research and application of sand foundation[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(8): 1350 - 1355. (in Chinese))

[12] ROBERT W. Foundation engineering handbook: design and construction with the 2006 international building code[M]. United States: RR Donnelley Press, 2006.