



沙特地区地质情况及地基处理技术

王德咏^{1,2}, 刘志军^{1,2}, 胡君龙^{1,2}, 谢尧^{1,2}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 近年来,我国共建“一带一路”倡议与沙特“2030 愿景”深入对接,越来越多中国企业参与到沙特基础设施建设中。针对沙特地区地质情况复杂、地基基础控制标准高的特点,结合我国企业近年来在沙特地区参与的项目实践,归纳并分析沙特阿拉伯王国(简称“沙特”)的地质与特殊岩土情况,并依此提出疏浚可挖性综合评价方法和疏浚吹填料细粒含量精细化控制流程,归纳了振冲密实法和强夯法对大面积砂性地基处理的适用性,以及珊瑚礁砂地基处理的方法;提出基于原位测试技术的地基处理检测验收方法,以期为我国企业参与沙特地区的工程建设提供技术支持。

关键词: 沙特; 特殊土; 陆域形成; 地基处理; 质量检测

中图分类号: U656.1+39; TU43

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0198-09

Geological conditions and foundation treatment technologies in Saudi Arabia

WANG Deyong^{1,2}, LIU Zhijun^{1,2}, HU Junlong^{1,2}, XIE Yao^{1,2}

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. CCCC Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, Guangzhou 510230, China)

Abstract: In recent years, the “Belt and Road” initiative has been deeply connected with Saudi Arabia’s “Vision 2030”, and more and more Chinese companies have participated in Saudi Arabia’s infrastructure construction. In view of the complex geological conditions and high foundation control standards in Saudi Arabia, combined with the project practices of Chinese companies in Saudi Arabia in recent years, the geological and special geotechnical conditions of the Kingdom of Saudi Arabia (referred to as “Saudi Arabia”) are summarized and analyzed. Based on this, a comprehensive evaluation method for dredging excavability and a refined control process for the fine particle content of hydraulic filling are proposed. The applicability of vibro-compaction and dynamic compaction methods for large-area sandy foundations and methods for coral reef sand foundation treatment are summarized. A foundation treatment inspection and acceptance method based on in-situ testing technology is proposed, in order to provide technical support for Chinese companies to participate in engineering construction in Saudi Arabia.

Keywords: Saudi Arabia; special soil; land formation; foundation treatment; quality inspection

自“一带一路”倡议被提出以来,中国基建企业积极走出国门,参与世界各地的工程建设。在沙特地区,中国企业精心耕耘,发挥优势,深度参与到沙特的港口码头、水利、房建、公路、管道、能源、市政等多领域的建设,为沙特石油经济转型和实现其“2030 愿景”提供助力。

沙特位于阿拉伯半岛之上,东濒波斯湾,西临红海。我国企业目前在沙特参与的工程大多数位于红海和波斯湾沿岸,如:海尔港、达曼港、延布工业港码头、吉达集装箱码头、吉赞港口等,均涉及疏浚吹填和地基处理。沙特地区工程项目多采用欧美标准体系,对吹填砂土质量控制和工后沉降往

收稿日期: 2024-09-26

作者简介: 王德咏(1982—),男,博士,正高级工程师,从事岩土工程地基处理和边坡等方面的工作。

往提出严格标准, 如细粒含量要求小于 15%, 10 a 工后沉降不应大于 25 mm。假如疏浚吹填过程质量控制不当, 砂土中细粒含量偏高或含软弱夹层则导致地基处理效果不佳, 会产生较大的工后沉降。

本文在调研分析沙特地区的地质情况的基础上, 结合大量工程实践, 分析红海和波斯湾沿岸疏浚吹填和地基处理项目中存在的问题, 并提出相应的对策。

1 工程概况

沙特地势西高东低, 由西向东可分为窄海岸

平原、中央高原区及东部平原区三类地貌, 地形地势呈现“东西低、中间高”的态势。如图 1 所示, 阿拉伯半岛可以分为 2 个工程地质分区: 1) 阿拉伯地盾 (Arabian Shield), 主要靠近红海岸线, 该部分地层岩性主要以火山岩和变质岩为主, 包含许多已经消失的火山和熔岩层, 通常被薄薄的冲积砂砾石沉积物覆盖; 2) 阿拉伯阳地 (Arabian Platform), 该区域主要为沉积岩组成, 大多是石灰岩、砂岩、粉砂岩和页岩, 表层通常覆盖有松散的风成沉积物, 或较厚的河谷冲积层或残留土壤, 含有丰富的油田资源。

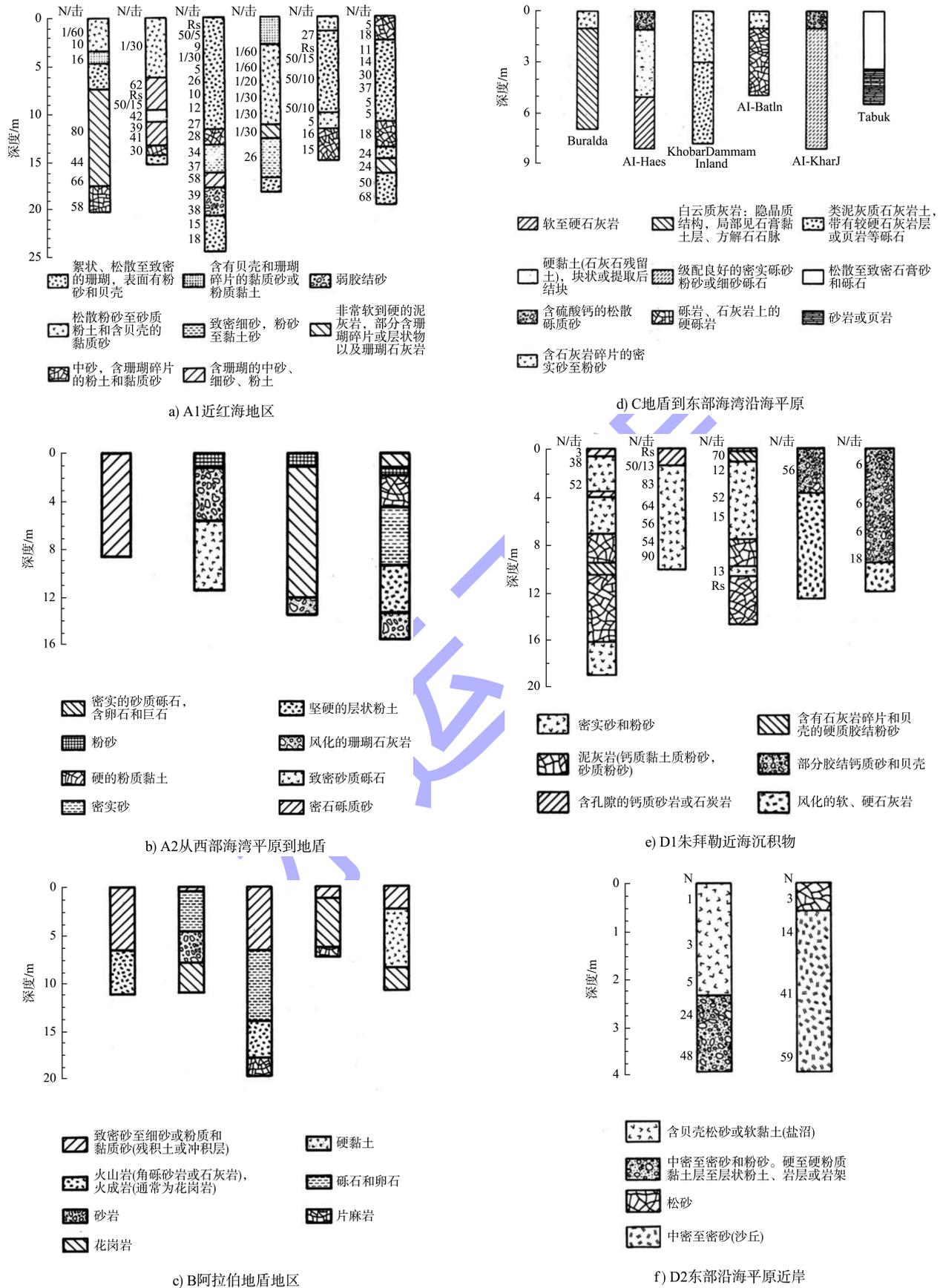


图 1 沙特地理位置及地形标识

Fig. 1 Geographical location and topographical features of Saudi Arabia

Oweis 等^[1]将沙特地区的典型岩土工程分为 4 个部分。1) A 区: 西部沿海平原, 细分为 A1 区, 一般覆盖有软盐沼沿海沉积物, 以及 A2 区, 覆盖有从海岸到阿拉伯地盾的冲积沉积物; 2) B 区: 阿拉伯地盾, 向北和向东延伸至海湾沿岸平原, 火成岩或变质岩上通常覆盖着一层浅层土壤, 风化程度各不相同; 3) C 区: 从地盾到海湾沿海平原的沉积岩。该地区的岩土工程问题包括石灰岩

基岩中的溶洞、盆地和排水不良地区的含石膏土壤、内陆盐沼以及同一地点地面条件的潜在变化, 例如岩石与残留黏土; 4) D 区: 东部沿海平原 (近波斯湾)。该地区的特点是存在含盐土壤或沙丘。通常, 在靠近海岸的低洼地区有一层相对较浅的软而松散的沉积物, 上面覆盖着中密至密实的砂, 可能会遇到厚达数米的硬黏土层或岩石透镜, 也可能遇到自流地下水条件, 见图 2。



注：标贯击数 N 为累计打入 30 cm 的锤击数，如锤击已达 50 击，贯入度未达 15 cm，记录实际贯入度 50/10(10 cm 50 击)。

图 2 沙特阿拉伯典型地质
Fig. 2 Typical geology of Saudi Arabia

沙特地区典型问题包括盐渍土、珊瑚礁砂与礁灰岩、深厚粉细砂、膨胀土、崩岗土和流动的沙丘。盐渍土在地基设计中是一个特殊的问题, 因为盐渍土具有高含盐量、低液塑限、低强度、遇水易软化失稳等特性, 盐分会对结构和地基的耐久性产生不利影响。

沙特沿海地区存在大量的珊瑚礁砂, 为钙质含量高达 90% 的珊瑚砂屑土, 与常规石英砂不同的是其多孔隙、颗粒易破碎、压缩性大, 为宽级配土体, 且吹填过程中存在水力分选现象, 同一

场地内的珊瑚礁砂级配与天然干密度存在一定差异, 最大干密度差异也较大, 见图 3。下层的珊瑚礁灰岩在自然状态下柔软、不均匀且多孔, 其上的桩基工程、地下空间建设对工程来说是一个挑战。对于深厚的粉细砂地基, 在地震作用下存在液化的可能。这些岩土场地需要进行地基加固, 降低灾害发生的可能性与危害性。在中部地区, 厚厚的风化石灰岩层含有方解石晶体, 可能含有溶蚀空洞和溶蚀塌陷角砾岩。

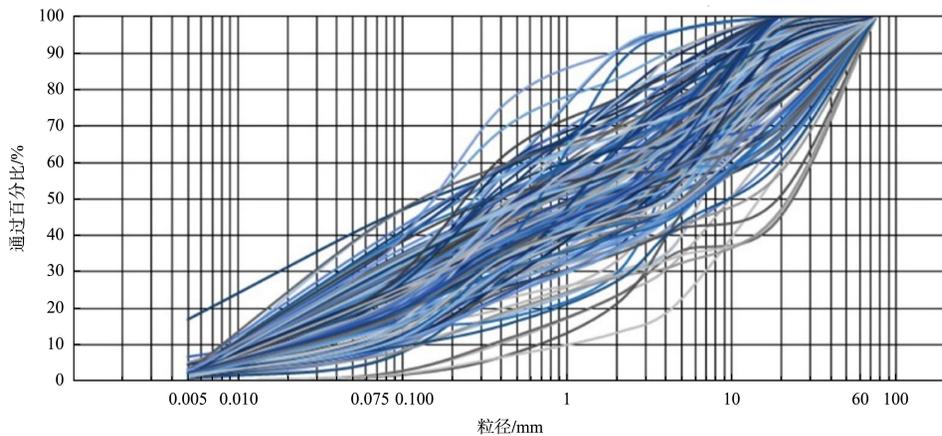


图 3 珊瑚礁砂典型配曲线

Fig. 3 Typical matching curve of coral reef sand

2 疏浚吹填技术问题

2.1 疏浚可控性综合评价

沙特等中东地区海洋沉积物由上到下分布为钙质岩帽层、贝壳类土、中粗砂层等。胶结的钙质岩帽强度极高, 贝壳类土为不合格吹填料, 一般不合格层厚约 1~4 m, 原状中粗砂的细粒含量约 20%~40%, 而一般陆域形成对回填料细粒含量的要求为 15%。

大型疏浚吹填作业一般采用绞吸船和耙吸船, 国际航运协会(PIANC)提出的疏浚适用性分析^[2]见图 4。对于偏软的黏土层或砂层, 一般采用链斗挖泥船(BLD)、抓斗挖泥船(GD)和耙吸船(TSHD); 对于偏硬的砂层、黏土层和岩层, 则以绞吸船(CSD)为主。在施工现场也可根据设备性能对岩石的可挖性等级进行划分^[3], 见图 5, 确定

相应的疏浚方式。关于挖泥船的疏浚效率, 可根据地质资料、回填料要求、疏浚设备等, 建立地层可挖性和船舶吹填效率、齿耗数等指标关系, 进而评估挖泥船吹填功效, 以提高疏浚效率, 流程见图 6。

一般在疏浚过程中, 不合格料清表可采用绞吸船和耙吸船联合施工, 硬质岩帽层利用绞吸船开挖, 接近合格砂料层再用耙吸船清挖。吹填时, 表层采用绞吸船吹填(短运距砂源区)或耙吸船接管船吹填(长运距砂源区), 吃水限制深度下可采用中型耙吸船抛填。

对于需要深层振冲密实处理的地基而言, 大粒径颗粒富集容易造成振冲头成孔困难, 细粒含量过多会影响振冲效果, 对于细粒含量控制要求高的区域可以多采用大型耙吸船挖砂, 然后进行抛填。

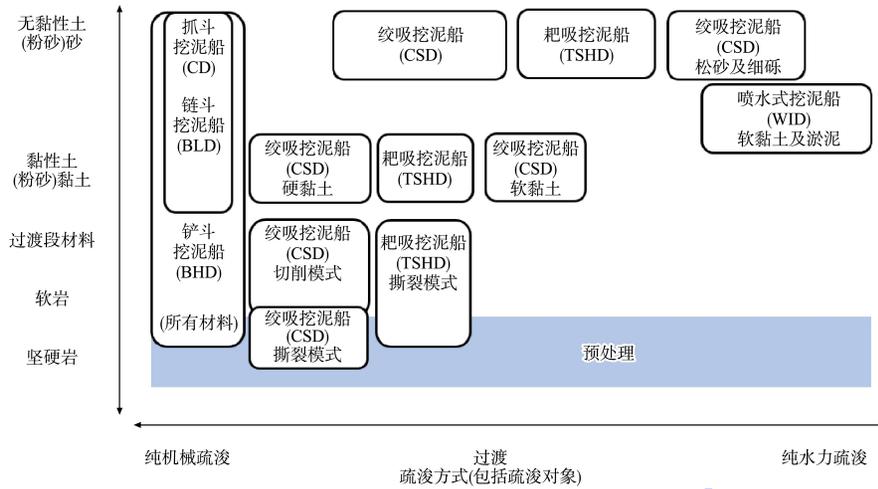


图 4 不同地层挖泥船的适应性及相应的开挖模式

Fig. 4 Adaptability of dredgers in different strata and corresponding excavation modes

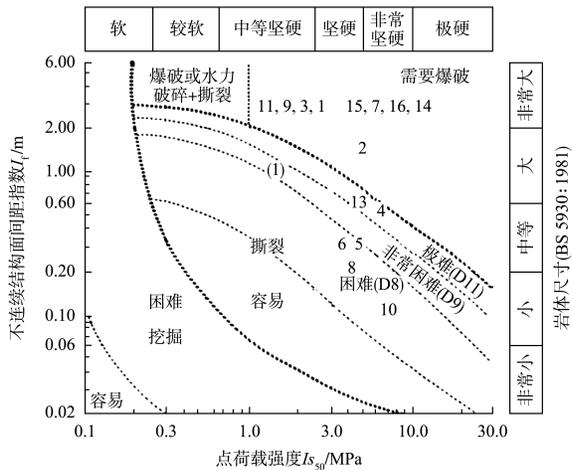


图 5 基于 Pettifer & Fookes 法的岩石可挖性分区

Fig. 5 Rock excavability zoning based on Pettifer & Fookes method

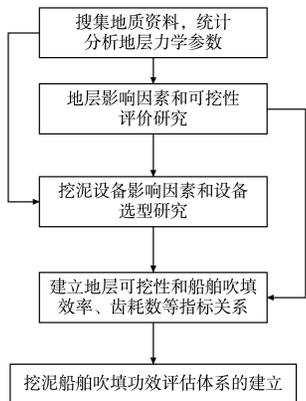


图 6 挖泥船吹填功效评估体系

Fig. 6 Evaluation system of dredger filling efficiency

2.2 吹填细粒含量控制

在沙特等中东地区进行大面积吹填砂造地时, 由于水力分选作用, 吹填的分布极不均匀, 为了控制吹填料的细粒含量, 科威特 LNG 项目^[4]在吹填过程中对取砂区、船舱、吹填区水下与陆域的土体细粒含量分布进行监测, 流程见图 7。项目及及时了解疏浚所在区域和深度砂料是否合格, 掌握不合格料在吹填施工过程中分布规律并及时进行有效清除, 在高标准要求下取得良好效果。

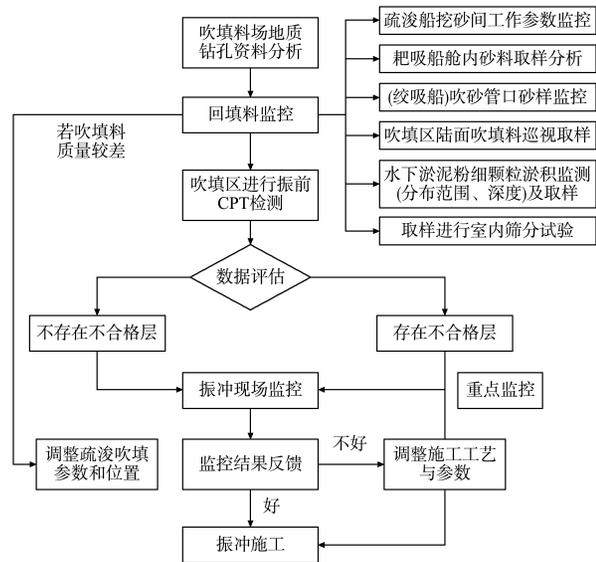


图 7 疏浚吹填料质量全过程监控流程

Fig. 7 Whole-process monitoring process of dredging filling quality

3 地基处理问题

3.1 大面积砂性地基处理

在沙特大面积的砂性地基处理工程中, 振冲密实法和强夯法是首选的两种方法^[5]。振冲密实法的单次处理深度可达 15 m, 强夯法一般处理深度在 10 m 以内。不过振冲密实法对加固土体的细

粒含量要求较高, 一般要求细粒含量不超过 15%。

振冲法适用处理土体划分见图 8, 其中 B 区砂土非常适合振冲密实处理, A 区也可以振冲处理, C 区为过渡区, 细粒含量偏高, 振冲效果一般, D 区土体适合振冲置换法加固。

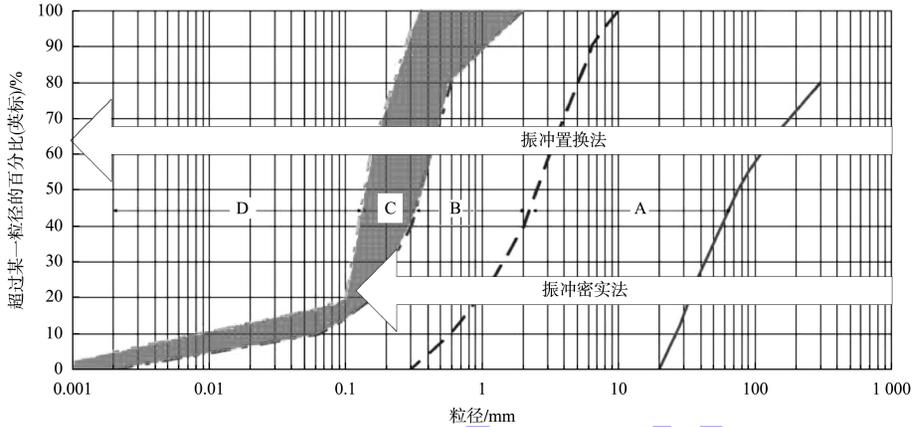


图 8 振冲法适用处理土体划分

Fig. 8 Classification of soils suitable for vibroflotation

Brown^[6] 对根据试验提出砂土地基的可振冲密实指数 S_N :

$$S_N = 1.7 \sqrt{\frac{3}{D_{50}^2} + \frac{1}{D_{20}^2} + \frac{1}{D_{10}^2}} \quad (1)$$

式中: D_{50} 、 D_{20} 、 D_{10} 分别为级配曲线上 50%、20%、10% 对应的粒径值, mm。在科威特 LNG 工程实践^[7] 中发现 S_N 小于 30 的砂土地基适合振冲密实法处理, S_N 大于 50 时地基适合振冲密实法处理。 S_N 越小, 加固效果越好, 此判别方法可以通过土工试验获得相关数据。

也可通过原位的 CPT 测试数据来判断砂土地基是否适合振冲密实法处理^[8], 见图 9。或基于 CPT 数据计算土体的类别指数 I_c ^[9] 与细粒含量 F_c ^[10]:

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log Q_{tn})^2 + (1.22 + \log F_r)^2} \quad (2)$$

$$F_c = \begin{cases} 0 & (I_c < 1.26) \\ 1.75 I_c^{3.25} - 3.7 & (1.26 \leq I_c \leq 3.50) \\ 100 & (I_c > 3.50) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_{tn} 为修正锥尖阻力; F_r 为摩阻比。

根据划分土体类别, 判断砂土地基的细粒含量, 进而判断其振冲密实法加固的可行性。当

$1.310 < I_c < 1.830$ 时, 砂土地基适合振冲密实法处理, 当 $1.830 < I_c < 2.276$ 时, 可用大功率振冲装备进行处理, $I_c > 2.276$ 时对应的细粒含量 (F_c) 大于 35%, 地基不适合振冲密实法处理。

对于振冲密实法地基处理设计, 其思路见图 10, 过程参考文献[7]。

强夯法适用处理土体划分^[11], 见图 11, 其中 1 区的砂土适合强夯, 2 区土体可以在降水情况下强夯。

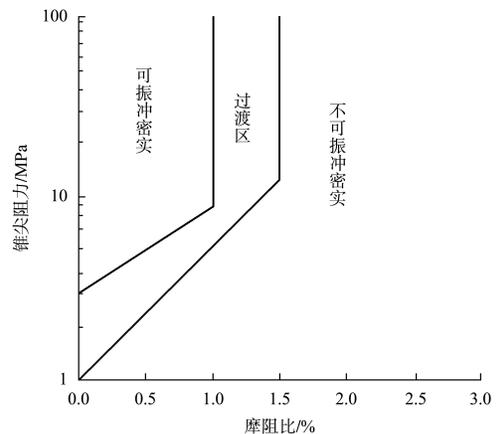


图 9 基于 CPT 的砂土可振冲密实性判别

Fig. 9 Determination of vibratory compactibility of sand soil based on CPT

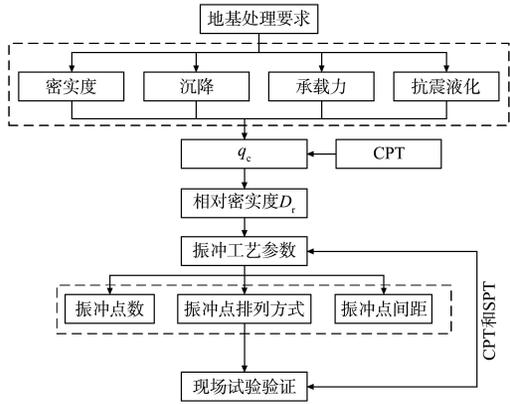


图 10 振冲密实地基处理流程

Fig. 10 Foundation treatment process of vibro-compaction

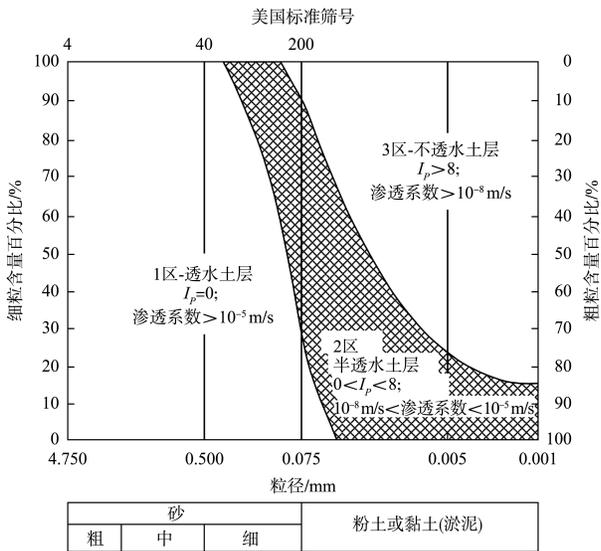


图 11 夯法适用处理土体划分

Fig. 11 Classification of soils based on for compaction method

3.2 珊瑚礁砂地基处理

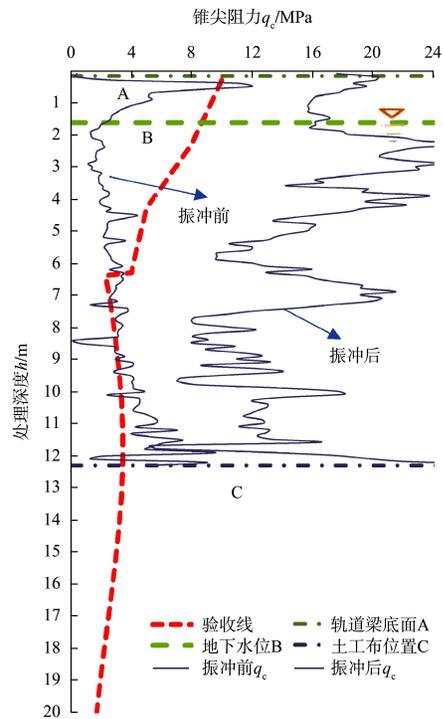
由于珊瑚礁地基和海洋环境的特殊性，比如珊瑚礁砂的抗液化强度并不随着相对密实度增加而一直变强，当相对密实度高于 80% 时^[12]，石英砂的抗液化强度则高于珊瑚礁砂，现有地基处理标准指导珊瑚礁地基处理缺乏针对性，需要根据珊瑚土地基的特殊性设计相应的地基处理工艺，尤其是具体的施工参数需要现场实验后确定。中交四航局参与了沙特 RSGT、苏丹港、东帝汶 Tibar 港、海南等工程，在珊瑚礁砂地基处理方面，积累了丰富的工程经验^[13]。对于珊瑚礁砂地基，密实处理可以采用强夯法、振冲密实法，由于珊瑚礁砂质脆易破碎，强夯会导致大量颗粒破碎、破坏钙质砂的结构强度等问题，因此单击夯

击能不宜太大，要经过现场试验确定施工参数。实践表明：振冲密实施工常采用功率为 75~180 kW 的振冲器，振冲间距取 1.5~3.5 m，在建构筑物附近施工宜采用功率较小的振冲器，水下施工宜采用功率较大的振冲器。对于以排水抗液化，可以采用碎石桩法；对于表层土体，可以采用碾压法处理。

4 工程质量检验问题

沙特等境外工程的地基处理多采用美标，沙特 RSGT 项目珊瑚礁砂地基处理曾因验收标准问题，分项工程完成 1 年后才通过咨工认可，优化后验收标准见图 12a)，多哈新港项目针对砂土和黏土地基分别提出了验收标准，见图 12b)。对于境外地基处理工程，必须熟悉基于原位测试的地基处理验收流程^[14]。

对于吹填造陆质量而言，吹填造陆全过程每个环节均需满足相关标准。沙特地区岩土勘察一般采用的标准包括：ASTM(美国材料与试验协会标准)、BS(英国标准)、ACI(美国混凝土学会标准)、Eurocode(欧洲标准系列)、AASHTO(美国洲际公路与交通官员协会标准)、SASO(沙特阿拉伯标准)。



a) 沙特RSGT项目振冲密实处理典型验收曲线

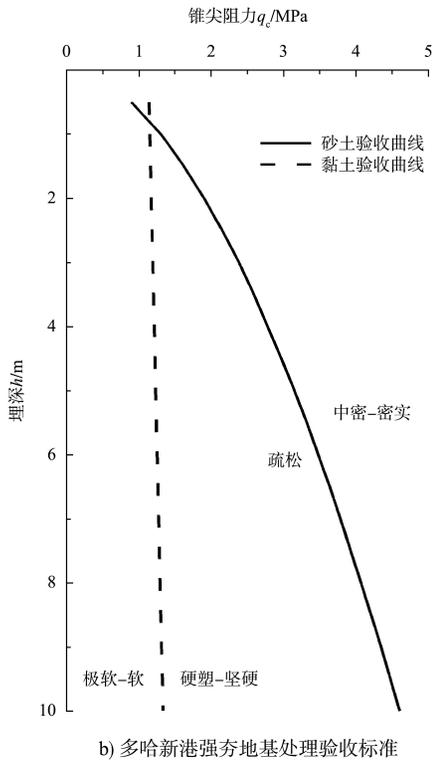


图 12 沙特等中东地区地基处理工程验收标准

Fig. 12 Acceptance standards for foundation treatment projects in Saudi Arabia and other Middle East regions

以沙特吉赞经济城项目为例, 其业主为沙特阿拉伯国家石油公司, 整个项目的设计、建设、体系运行必须执行沙特阿美公司标准, 对于走向国际的中国企业来说, 必须全方位熟悉国际标准, 掌握中国标准与国际标准的区别, 培养国际思维。

5 结论

1) 沙特地区存在较多的特殊性岩土, 特殊土包括盐渍土、珊瑚礁砂与礁灰岩、深厚粉细砂等, 在工程中必须弄清楚这些特殊土的工程特性。

2) 在沙特等中东地区进行疏浚吹填时, 疏浚可结合地质资料和已有装备, 建立挖泥船吹填功效评估体系, 进而提高疏浚效率; 吹填砂土时需沙源、疏浚船舶、吹填区全过程中控制细粒含量, 及时清淤。

3) 沙特地区大面积砂性地基处理多采用强夯和振冲密实法, 振冲密实地基处理可结合 CPT 测试技术在处理前、处理后全过程优化。

4) 沙特地区地基处理质量验收多采用欧美标准, 一般可根据场地的液化、压实度、承载力、

沉降等要求, 基于 CPT、SPT、ZLT 等原位测试技术建立验收曲线。

参考文献:

- [1] OWEIS I S, BOWMAN J. Geotechnical considerations for construction in Saudi Arabia [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1981, 107 (3): 319-338.
- [2] HOFF J, KOLFF A V D. Hydraulic Fill Manual For dredging and reclamation works [M]. London: CRC Press, 2012.
- [3] PETTIFER G S, FOOKES P G. A revision of the graphical method for assessing the excavatability of rock [J]. Quarterly journal of engineering geology, 1994, 27 (2): 145-164.
- [4] 王德咏, 梁小丛, 周红星, 等. 基于振冲密实法地基处理的吹填砂料质量控制[C]//中国土木工程学会. 第十五届全国地基处理学术讨论会论文集, 武汉: [出版者不详], 2018: 240-246.
WANG D Y, LIANG X C, ZHOU H X, et al. Quality control of sand filling materials for foundation treatment based on vibrocompaction method [C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of the 15th National Symposium on Foundation Treatment. Wuhan: [s. n.], 2018: 240-246.
- [5] 贺迎喜, 董志良, 王伟智, 等. 沙特 RSGT 码头项目吹填珊瑚礁地基加固处理 [J]. 水运工程, 2010 (10): 100-104.
HE Y X, DONG Z L, WANG W Z, et al. Reinforcement and treatment for coralline ground in port project of Saudi Arabia [J]. Port & waterway engineering, 2010 (10): 100-104.
- [6] BROWN R E. Vibroflotation compaction of cohesionless soils [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1977, 103 (12): 1437-1451.
- [7] 王德咏, 陈华林, 梁小丛, 等. 静力触探技术在吹填砂地基处理全过程中的应用 [J]. 水运工程, 2018 (5): 176-182.
WANG D Y, CHEN H L, LIANG X C, et al. Application of cone penetration test technology in whole process detection of reinforcing hydraulic fill sand ground [J]. Port & waterway engineering, 2018 (5): 176-182.
- [8] MASSARSCH K R, FELLENIUS B H. Ground

improvement-case histories [M]. Amsterdam: Elsevier Publishers, 2005: 539-561.

[9] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. Canadian geotechnical journal, 1990, 27(1): 151-158.

[10] ROBERTSON P K, WRIDE C F. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test[J]. Canadian geotechnical journal, 1998, 35(3): 442-459.

[11] GREEN R A, MITCHELL J K. Energy-based evaluation and remediation of liquefiable soils [C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of Geotechnical Engineering for Transportation Projects. Los Angeles: [s. n.], 2004: 1961-1970.

[12] 梁小丛, 陈平山, 刘志军, 等. 离心机振动台模型试验验证的珊瑚礁砂液化判别方法研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3173-3181, 3212.

LIANG X C, CHEN P S, LIU Z J, et al. A liquefaction evaluation method for coral sand based on dynamical centrifuge model test verification [J]. Rock and soil mechanics, 2023, 44(11): 3173-3181, 3212.

[13] 秦志光, 袁晓铭, 曹振中, 等. 吹填珊瑚礁砂地基处理方法适用性与加固效果应用研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 78-88.

QIN Z G, YUAN X M, CAO Z Z, et al. Applicability and quality evaluation of foundation treatment method for backfilled coral sand site [J]. Journal of natural disasters, 2021, 30(1): 78-88.

[14] 王德咏, 梅涛涛, 王婧, 等. 基于原位测试的深层密实法地基处理检测验收[J]. 水运工程, 2021 (8): 190-195.

WANG D Y, MEI T T, WANG J, et al. Detection and acceptance of foundation treatment by compact method based on in-situ test[J]. Port & waterway engineering, 2021(8): 190-195.

(本文编辑 赵娟)



(上接第 142 页)

[11] 罗梁. 长江上游航道瓦窑滩险滩整治措施分析[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(10): 137-138.

LUO L. Analysis of regulation measures for Wayaotan rapids in the upper reaches of the Yangtze River [J]. China Water Transport (the second half of the month), 2012, 12(10): 137-138.

[12] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145-2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[13] 吴文凤, 李家世, 刘晓帆. 枢纽下游航道整治设计最小通航流量研究[J]. 水运工程, 2020(10): 133-137.

WU W F, LI J S, LIU X F. Research on design minimum navigable discharge for channel regulation of downstream of junction[J]. Port & waterway engineering, 2020(10): 133-137.

[14] 航道工程设计规范: JTS 181—2016[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.

Design code for waterway engineering: JTS 181-2016[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016.

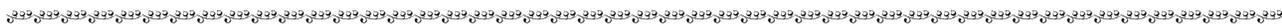
[15] 朱代臣, 解中柱, 吕晓兵. 长江干线泸州至重庆河段航道开发潜能初探[J]. 人民长江, 2011, 42(19): 7-10.

ZHU D C, XIE Z Z, LYU X B. Study on channel development potential of Luzhou - Chongqing reach of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2011, 42(19): 7-10.

[16] 长江干线通航标准: JTS 180-4—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

Navigation standard of Changjiang River mainstream: JTS 180-4-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.

(本文编辑 赵娟)



声 明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.sygcc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部