



重力式码头地基加固中 DCM 桩的设计方法

刘慧芳, 巴 蕾, 刘 强

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对在软弱地基上建设的重力式码头地基承载力较低及地基沉降量较大的问题, 基于广东沿海某跨海通道人工岛救援码头地基处理的设计与施工工艺, 介绍在重力式码头地基加固中 DCM 桩的设计方法, 包括 DCM 桩水泥掺量与水灰比、布置形式及置换率、外部稳定验算、加固土内部稳定验算、圆弧滑动、沉降量验算等, 并进行中国规范、日本规范关于 DCM 桩计算理论的对比。结果表明, DCM 桩处理后的地基具有较高的刚度, DCM 桩处理可有效降低地基沉降、提高地基承载力, 是解决类似重力式码头结构地基承载力及使用期沉降的一种有效方式。

关键词: DCM 桩; 软弱地基加固; 重力式码头; 拌和体抗压强度

中图分类号: U 656. 1+11; U 652. 7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0179-05

Design method of DCM pile in foundation reinforcement of gravity wharf

LIU Hui-fang, BA Lei, LIU Qiang

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Aiming at the problem that the gravity wharf built on a soft foundation has a low bearing capacity and large settlement of the foundation, we introduce the design method of DCM pile in the foundation reinforcement of gravity wharf based on the design and construction technology of the foundation treatment of the artificial island rescue wharf of a cross-sea channel in Guangdong coastal area, including the cement content and water-cement ratio of DCM pile, layout form and replacement rate, external stability checking of reinforced body, internal stability checking, circular slip, and settlement checking, etc., and compare the calculation theories of DCM pile in Chinese code and Japanese code. The results show that the treated foundation by DCM pile has high rigidity. DCM pile treatment can effectively reduce the foundation settlement and improve the foundation bearing capacity, which is an effective way to solve the foundation bearing capacity and service period settlement of similar gravity wharf structures.

Keywords: DCM pile; soft foundation reinforcement; gravity wharf; compressive strength of mixture

我国沿海地区很多地方为深厚的软弱冲积黏性土地基, 在建设防波堤、护岸等港口建筑物时, 克服软弱地基成为重要课题。近年来, 随着港口建筑物的大型化及建设工程地址进入深厚的软土层地区, 加固深度也随之日益增大。另一方面, 对于地基处理方法而言, 从环境保护角度, 弃土的处理、海砂的供应也成为工程建设的重要问题。

DCM 桩(水下深层水泥搅拌桩)是一种将水泥或水泥系硬化材料送入软弱地基中, 在原位置强

制搅拌, 通过化学固结作用形成加固土的地基处理方法。该方法具有短期内获得高强度的加固地基、减少地基沉降、产生的弃土量少、抗震效果好、对工程区环境影响小等优点。

按照加固工艺的不同, DCM 桩的布置形式可以分为块式、壁式、格子式、桩式、接圆式等^[1]。与其他地基处理方式相比, 水下 DCM 桩复合地基的相关理论和技术研究还远滞后于建筑工程实践, 仍处于一个初步的探索阶段^[2]。因此, 根据实际

的工程需求进行水下 DCM 桩的工程设计、施工技术和过程控制，对研究水下 DCM 桩的性能特征及其对复合地基的加固作用都十分必要。

1 工程概况

目前正在建设的广东沿海某跨海通道人工岛救援码头工程，其码头结构形式采用重力式沉箱结构，按 200 吨级救援船舶靠泊进行设计。该码头岸线长度为 65.0 m，前沿设计顶高程 3.5 m，前沿设计底高程 -6.1 m。此救援码头结构安全等级为一级，设计高水位 1.89 m，设计低水位 -0.73 m。场区抗震基本烈度为Ⅷ 度 ($0.15g$)，设计地震分组为第一组。工程所在区域泥面高程约 -13.0 m。地质表层分布有厚度 13~18 m 的淤泥及淤泥质粉质黏土软土层，含水率 40%~80%，孔隙比 1.2~2.2，为流塑状态。为了有效地保证码头主体结构的地基整体稳定并满足码头结构地基对整体承载能力的要求，在原设计方案中，其底部地基处理采用挤密砂桩，砂桩直径 1.6 m，间距 1.75 m，正方形布置，砂桩置换率为 65%。根据类似工程的相关实践经验，发现挤密砂桩在重力式码头结构地基处理中存在显著的工后沉降，对后期救援码头的使用存在一定程度的影响。而且工程所在区域存在砂料供应不足、价格不断升高的问题，

因此，施工时建议调整码头的地基处理方式，改用刚度更大的 DCM 桩复合地基处理方式，以减少使用期的沉降量，避免出现类似工程的问题。

2 地基加固设计方案及计算分析

2.1 地基加固设计方案

码头沉箱下方利用斜坡结构的抛石堤心石作为基床，基床厚度为 5.0 m。因沉箱基础为淤泥和淤泥质黏土，必须进行地基处理才能保证基础承载力和使用期沉降。基床下设 1 m 厚的碎石垫层，下方 4 m 采取开挖换填法处理软弱土层，即将淤泥层清除后回填中粗砂，换填中粗砂下方 13 m 采用 DCM 桩地基处理，处理范围为沉箱下方 55 m 范围。DCM 桩顶高程为 -17.0 m，桩底高程为原地基淤泥质黏土和粉质黏土底高程，约 -30.0 m。试桩结果显示：桩表层 3 m(浮泥层)范围内成桩质量差，无侧限抗压强度低，难以通过增加水泥掺量满足设计强度的要求，建议浮泥层可以采用开挖换填工艺达到设计要求。因此，将原泥面的淤泥开挖换填为中粗砂，厚度为 4 m，此方案可以保证 DCM 桩的成桩质量。同时，流失的水泥浆进入中粗砂层的孔隙，可有效减少顶部挤淤并形成硬壳层，加强桩顶约束，减小 DCM 桩桩顶的侧向变形，更能提高桩和体结构的承载力。码头结构典型断面见图 1。

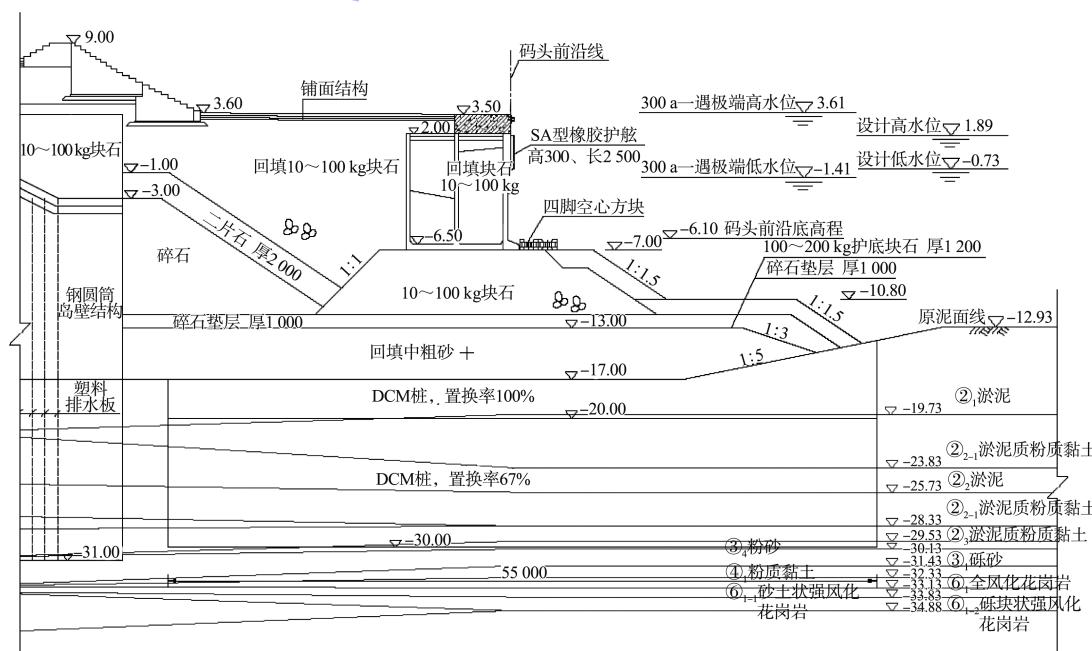


图 1 DCM 桩地基处理码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2.1.1 DCM 桩拌和体抗压强度

日本港湾协会编写的《港湾设施技术标准·解说》^[3] 中采用拌和土 28 d 的无侧限抗压强度为强度标准值, 但实际情况表明, 拌和土在 28 d 后强度仍在继续增长。因此, 我国的《水下深层水泥搅拌法加固软土地基技术规程》^[4] 取室内配合比试验 90 或 120 d 龄期的无侧限抗压强度作为拌和土的抗压强度标准值。各龄期无侧限抗压强度参考关系式为:

$$\begin{cases} q_{u90} = (1.20 \sim 1.33) q_{u28} \\ q_{u120} = 1.31 q_{u60} = (1.57 \sim 1.74) q_{u28} \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_{u28} 、 q_{u60} 、 q_{u90} 、 q_{u120} 分别为 28、60、90、120 d 无侧限抗压强度。

根据《水运工程地基设计规范》^[5], 海上水泥搅拌桩工程采用大型机械进行加固时, DCM 桩现场加固土的平均强度与室内加固土的平均强度之比多采用 1.0。根据文献[6]的工程实测数据, 现场加固体强度会低于室内加固土强度。因此, 若有试桩数据, 应以现场试桩的强度作为设计依据。

表 1 现场原位试桩施工情况及试验结果

桩编号	打桩日期	取芯日期	试验日期	水泥掺量/(kg·m ⁻³)	水灰比	无侧限抗压强度均值 q_{u28} /MPa
DCM01	7月13日	8月10日	8月13日	280	0.8	2.11
DCM02	7月13日	8月13日	8月16日	300	0.8	2.14
DCM03	7月14日	8月16日	8月20日	320	0.9	2.01

根据现场试桩结果, 建议施工参数暂定为水泥掺量为 280 kg/m³、水灰比 0.8 进行施工控制。

2.1.3 DCM 桩布置形式

DCM 桩的布置形式主要有块式、壁式、格式、接圆式、接圆搭接式及桩式等。码头沉箱下方采用 DCM 桩进行处理的主要目的是防止滑动破坏、提高地基承载力以及防止基础沉降, 可采用壁式或块式加固。考虑到本工程沉箱所需地基承载力不大、下卧层性质较好、基础条形分布等情况, 壁式加固方式具有较好的经济性, 因此推荐采用壁式加固形式。

2.1.2 水泥掺量与水灰比

为检测 DCM 桩成桩后强度及确定 DCM 成桩过程中的施工参数(搅拌次数、水泥掺量、水灰比等), 在工程现场进行原位 DCM 成桩试验并检测处理效果。现场试桩打设 3 个桩簇, 编号为 DCM01~03。DCM01 与 DCM02 间距 4.8 m 布置, DCM01 与 DCM03 间距 2.0 m 咬合布置, 咬合长度 0.3 m。其余桩簇间距 6.0 m 布置。现场试桩试验采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。

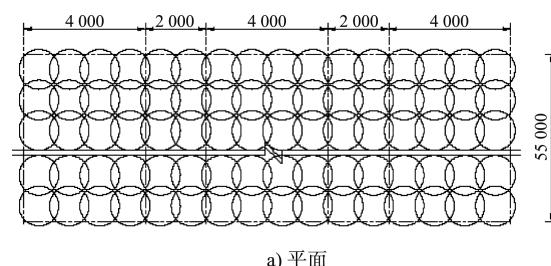
在试桩施工结束后, 达到龄期 28 d 后进行现场取芯, 按照要求进行切样, 并进行现场养护。送到实验室后进行标准养护直至进行无侧限抗压强度试验。DCM01 桩簇取芯如图 2 所示。DCM01~03 施工情况及无侧限抗压强度试验结果见表 1。



图 2 DCM01 桩簇取芯

2.1.4 DCM 桩置换率

码头下方地基处理所采用的 DCM 桩直径 1.3 m、间距 1.0 m, 桩基采用壁式布置, 考虑到已有船机设备的能力以及各项施工参数, DCM 桩壁式布置方式可采用图 3 的布置形式, 加固体顶面, 长壁宽度为 4.0 m, 短壁宽度为 2.0 m, 短壁厚度为 3.0 m, 置换率为 67%。



a) 平面

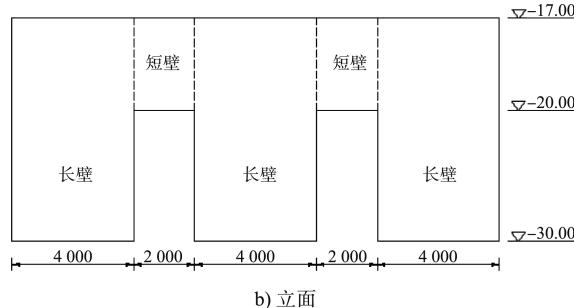


图 3 DCM 桩布置 (高程: m; 尺寸: mm)

2.2 计算分析

2.2.1 验算内容及结果

依据中国的《水下深层水泥搅拌法加固软土地基技术规程》与日本的《海上工程深层搅拌加固工

法技术指南(修订版)》进行了验算。

按照国内规范, 壁式拌和体的验算内容包括稳定性、强度、壁间土的抗挤出及地基沉降量。按照日本规范, 壁式拌和体的验算内容包括外部稳定、内部稳定、圆弧滑动及地基沉降量。

圆弧滑动验算采用中交天津港湾工程研究院有限公司研发的港口工程地基计算系统(2008 版)DJS 软件, 并采用简单条分法。沉降量计算采用 PLAXIS 2D(2015 版)有限元分析软件对码头结构中的拌和体下方可压缩土层的沉降量进行计算, 计算时拌和体结构自身的变形大小忽略不计。相关计算结果见表 2。

表 2 码头沉箱下方壁式拌和体的验算结果

规范及状态	验算内容	抵抗值 R	作用值 S	判定
中国规范, 持久组合	沿拌和体底面的抗滑力/kN	9 192	5 747	稳定
	拌和体前趾的抗倾力矩/(kN·m)	361 332	50 064	稳定
	壁间土的抗挤出力/kN	2 148	1 060	稳定
	地基承载力/kPa	49 094	14 768	稳定
	整体圆弧滑动力矩/(kN·m)	2 421 767	917 007	稳定
强度	拌和体抗压强度/kPa	691	578	稳定
	拌和体长壁抗剪强度/kPa	345	207	稳定
	拌和体短壁抗剪强度/kPa	345	144	稳定
变形	地基沉降量/mm	60	250	满足要求
	沿拌和体底面的抗滑力/kN	滑动形式 1 7 800 滑动形式 2 7 635	4 781 4 781	稳定 稳定
	拌和体的倾覆力矩/(kN·m)	448 417	43 786	稳定
日本规范, 永久状态	地基承载力/kPa	3 127	510	稳定
	端趾压力/kPa	746	454	稳定
	竖向剪切强度(长臂)/kPa	373	89	稳定
	竖向剪切强度(短臂)/kPa	373	80	稳定
	挤出力/kN	11 272	2 773	稳定
圆弧滑动	整体抗滑稳定力矩/(kN·m)	2 421 767	917 007	稳定
	地基沉降量/mm	60	250	满足要求

2.2.2 中、日规范的计算结果对比分析

中、日两规范计算方法基本一致, 但由于参数、安全系数以及分项系数等取值不同, 计算结果稍有区别。但在拌和体抗压强度验算(端趾压力验算)时, 日本规范考虑了未加固土体的侧限压力约束, 计算结果有一定差异。

中国规范抗压承载力的计算方法为:

$$\gamma_0 \gamma_\sigma \sigma_{\max} \leq \sigma_{c_{ak}} / \gamma_R \quad (2)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; γ_σ 为压应力综合分

项系数; σ_{\max} 为拌和体底面最大地基应力标准值; $\sigma_{c_{ak}}$ 为拌和体抗压强度标准值; γ_R 为抗力分项系数。

而日本规范中抗压承载力的计算方法为:

$$\gamma_a \gamma_i (\gamma_\sigma \sigma_{\max} - K \sum_{i=1}^n \rho_i g h_i) \leq \alpha \beta \gamma_{q_{uck}} q_{uck} \quad (3)$$

式中: γ_a 为结构解析系数, 结构解析上不确定性的分项系数; γ_i 为结构物系数, 考虑结构物重要性及达到临界状态时对社会和经济影响的分项系

数; γ_σ 为端趾压力分项系数; K 为土压力系数; ρ_i 为未加固土密度(水面以下为浮密度); h_i 为未加固土层厚度; α 为断面有效系数; β 为搭接部位可靠性系数; $\gamma_{q_{uck}}$ 为设计标准强度分项系数; q_{uck} 为拌和土抗压强度标准值。

由上述公式对比可以看出, $K \sum_{i=1}^n \rho_i g h_i$ 代表加固地基周围土体给予的约束侧限压力, 即日本规范考虑了未加固土体的侧限压力约束的影响, 故中国规范较日本规范对于拌和体抗压强度验算要求更为严格。

3 结语

1) 通过计算理论分析、工程现场进行原位 DCM 成桩试验及处理效果检测, 采用大型设备在重力式沉箱码头下方软土地基内进行 DCM 桩处理加固是有效可行的。

2) 经过中国规范与日本规范的计算分析对比, 中、日两规范计算理论基本一致, 但由于参数、安全系数以及分项系数等的取值不同, 计算结果稍有差异。但在拌和体抗压强度验算(端趾压力验算)时, 日本规范考虑了加固体下端未加固土给予的约束压力的影响, 计算结果有一定差异。相较日本规范, 中国规范对于拌和体抗压强度验算要求更为严格。

(上接第 178 页)

参考文献:

- [1] 韩理安.港口水工建筑物[M].2 版.北京: 人民交通出版社, 2010.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司.济宁港梁山港区寿张集作业区一、二期工程初步设计[R].北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2019.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.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) DCM 桩施打前, 将原泥面表层的浮泥置换出成中粗砂可以达到如下效果: 保证 DCM 桩的成桩质量; 流失的水泥浆进入中粗砂层的孔隙, 可以有效减少顶部挤淤并形成硬壳层; 加大对 DCM 桩桩顶的约束, 减少桩顶侧方向的位移; 提高拌和体结构的承载力, 使复合地基的受力和拌和体的刚度更加均匀。

参考文献:

- [1] 财团法人沿岸技术研究中心.海上工程深层搅拌加固工法技术指南(修订版)[R].中交第一航务工程局有限公司, 中交天津港湾工程研究院有限公司, 译.天津: 中交第一航务工程局有限公司, 2009.
- [2] 刘志军, 陈平山, 胡利文, 等.水下深层水泥搅拌法复合地基检测方法[J].水运工程, 2019(2): 155-162.
- [3] 日本港湾协会.港湾设施技术标准·解说(修订版)[M].北京: 中国工程建设标准化协会水运工程委员会, 2007.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 交通部科技教育司.深水枢纽港建设关键技术及示范工程[M].北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 王璁)

- [4] 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, 2012.
- [5] 中国建筑材料科学研究院.通用硅酸盐水泥: GB 175—2007[S].北京: 中国标准出版社, 2007.
- [6] 中交水运规划设计院有限公司.济宁港主城港区跃进沟作业区物流园区码头一期、二期工程施工图设计[R].北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2020.

(本文编辑 王璁)