

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.029

DCM 桩在岛体斜坡式围堰地基加固中的应用

吴加武

(广东省航运规划设计院有限公司, 广东 广州 510050)

摘要: 水下深层水泥搅拌桩(DCM 桩)是一种水下软基处理先进技术,是实现围海造陆、人工岛、海底隧道等大型工程的关键技术之一,近年国内自主打造的 DCM 桩施工船机进一步推动了该技术的应用。为研究 DCM 桩的特点及其加固效果,以广东沿海某人工岛工程为例,介绍了国内 DCM 桩施工船机技术参数、DCM 桩无侧限抗压强度特点及其在斜坡式围堰地基加固中的应用。工程实践表明:DCM 桩技术先进,施工速度快,成桩质量高,其作为一种海上软土地基加固体,对提高软土地基抗剪强度及地基承载力是有效可行的。相关研究成果对 DCM 桩的工程应用具有一定指导意义。

关键词: DCM 桩;人工岛;斜坡式围堰;稳定;地基承载力

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)03—0164—04

Application of DCM Piles in Foundation Reinforcement of Slope Cofferdam of Artificial Island

WU Jiawu

(Guangdong Province Planning & Design for Water Transportation Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510050, China)

Abstract: Underwater deep cement mixing pile (DCM pile) is an advanced technology for underwater soft foundation treatment. It is one of the key technologies for large-scale projects such as land reclamation, artificial islands and submarine tunnels. In recent years, the domestic DCM pile construction ship further promoted the application of this technology. To study the characteristics and the reinforcement effects of DCM piles, by taking an artificial island project along the coast of Guangdong as an example, the technical parameters of the domestic DCM pile construction ship, the characteristics of the unconfined compressive strength of the DCM pile and its application in the foundation reinforcement of slope cofferdam are introduced. The engineering practice shows that the DCM pile has advanced technology, high-speed construction and high quality. As a kind of reinforcement body of soft soil in the sea, it is effective and feasible to improve the shear strength and bearing capacity of soft soil foundation. Research on the DCM piles can be used for reference in similar projects.

Keywords: DCM pile; artificial island; slope cofferdam; stable; bearing capacity of foundation

水下深层水泥搅拌桩(简称 DCM 桩)是通过特制的施工船机将水泥系固结材料与地基土原位强制搅拌混合的一种地基加固技术,具有适用范围广、加固深度大、质量稳定、环保等特点^[1-2]。该工法主要用于码头、护岸、防波堤、跨海大桥基础、海上人工岛等工程的软土地基加固,可提高地基强度,防止过大沉降变形、滑动及砂土液化等^[3]。日本在该技术领域处于领先地位,国内一直未能全面掌握 DCM 桩的核心技术。近年我国加快了 DCM 桩施工船机的研

制,自主打造了一批 DCM 桩施工船机,应用于香港机场第三跑道工程,香港综合废物处理设施项目、香港东涌填海项目等工程,加固效果显著^[4]。

根据加固要求的不同,DCM 桩簇有块式、壁式、格栅式、桩式等布置方式^[5]。与陆上水泥搅拌桩复合地基相比,水下 DCM 桩复合地基在工程设计、施工工艺以及周边环境等方面均存在差异,其复合地基相关理论研究滞后于工程实践,仍处于探索阶段^[4]。因此,研究水下 DCM 桩的特点及其加固效果

非常必要。

1 项目概况

广东珠三角地区某人工岛工程,采用管袋砂形成临时围堰,内部填砂筑岛的方案。临时围堰结构安全等级二级,设计高水位 1.89 m,设计低水位 -0.73 m,场地抗震设防烈度 7 度(0.15g),设计地震分组第一组。工程区域泥面在标高 -2.7 m 左右,表层连续分布有厚度不等的淤泥—淤泥质粉质黏土层,软土层厚度 12 m~20 m,含水率约 60%,孔隙比约 1.75,呈流塑状。为保证围堰整体稳定并满足地基承载力要求,采用 DCM 桩加固围堰下方软土,陆域内部采用砂桩处理。

2 DCM 桩水泥土无侧限抗压强度

根据国家“九五”重点攻关项目《深水枢纽港关键技术及示范工程》^[6]中的《海上深层水泥搅拌桩加固软基技术(海上 CDM 工法)研究》专题之一——水泥搅拌土工程特性研究(海上 CDM 工法)的研究成果。海上 CDM 工法现场某龄期强度与其对应的现场 90 d 龄期抗压强度的关系式:

$$\frac{q_{uT_i}}{q_{u90}} = \frac{T_i}{a + bT_i} \quad (1)$$

式中: $a = 24.238 \text{ d}$, $b = 0.7204$; q_{uT_i} 为现场某龄期抗压强度,MPa; q_{u90} 为现场龄期 90 d 抗压强度,MPa; T_i 为水泥土试验龄期,d。

由式(1)得到 $q_{uT_i}/q_{u90} - T_i$ 关系曲线见图 1。

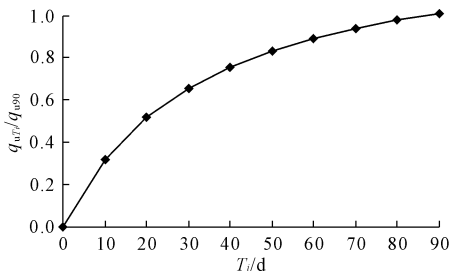


图 1 $q_{uT_i}/q_{u90} - T_i$ 关系曲线

图 1 表明,海上 DCM 桩水泥土无侧限抗压强度早期增长速度快,后期增长速度缓慢,28 d 后水泥土强度仍有较大增长,这与陆上水泥搅拌桩水泥土强度增长规律类似。

根据式(1),当已知现场某一龄期强度时,可预测现场其他龄期的强度。

根据《水运工程地基设计规范》^[7](JTS 147—2017)条文说明,水泥搅拌桩现场加固体的平均强度

和室内加固土的平均强度之比,海上工程采用大型机械加固时多采用 1.0。文献[6]工程实测数据显示,现场强度仍然呈现低于室内强度的特点。因此,有条件时,应以现场试桩强度作为设计依据。

3 设计方案及计算分析

3.1 设计方案

岛体围堰上部结构采用斜坡式抗浪砂袋,地基采用水下 DCM 桩进行软基处理。DCM 桩施打完成后,铺设一层土工格栅及一层砂肋软体排,施工斜坡式抗浪砂袋后,岛体内吹填中粗砂形成陆域。DCM 桩桩簇直径 2.3 m,间距 4.8 m,正三角形布置,置换率 23.21%,平均桩长约 20 m,桩体进入中密粗砂层顶面且穿透软土层底面不少于 2 m,设计桩顶高程 -4.70 m。根据工期要求,采用水泥土 28 d 无侧限抗压强度作为设计标准,要求不小于 1.2 MPa。DCM 桩施打前,将原泥面 2 m 厚的浮泥置换为中粗砂,一方面通过增加围压保证桩顶成桩质量,另一方面流失的水泥浆液进入中粗砂层孔隙,减少拱淤并形成硬壳层,增加对桩顶的约束,减少桩顶侧向变形,并提高桩间土承载力。DCM 桩位布置图见图 2,DCM 桩地基处理断面图见图 3。

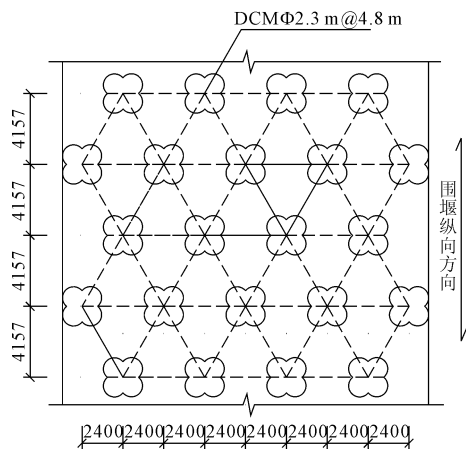


图 2 DCM 桩位布置图(单位:mm)

3.2 计算分析

(1) 水泥掺量。本工程与邻近海底隧道沉管标段土层分布情况及土层物理力学指标较为接近,沉管标段已有 50 d~60 d 的 DCM 现场试桩无侧限抗压强度数据及施工经验。本工程工期紧,不考虑进行现场水泥配合比及工艺试桩。依据海底隧道沉管标段试桩成果资料,采用式(1)推算现场 28 d 水泥土无侧限抗压强度,计算结果见表 1。根据表 1 不同水泥掺量的水泥土抗压强度指标,无侧向抗压强

度主要由下部淤泥质粉质黏土层控制,这也反映了 DCM 桩同陆上水泥搅拌桩同样具有上部加固效果较下部好的特点。当 P. O52.5 水泥掺入量为 320 kg/m³,即水泥掺入比约 18% 时,现场 28 d 无侧限抗

压强度可达到 1.2 MPa 以上,并具有足够的保证率。

(2) 水灰比。根据香港机场第三跑道工程及沉管标段试桩施工经验,水灰比可取 0.8 ~ 1.0,本工程取 0.9。

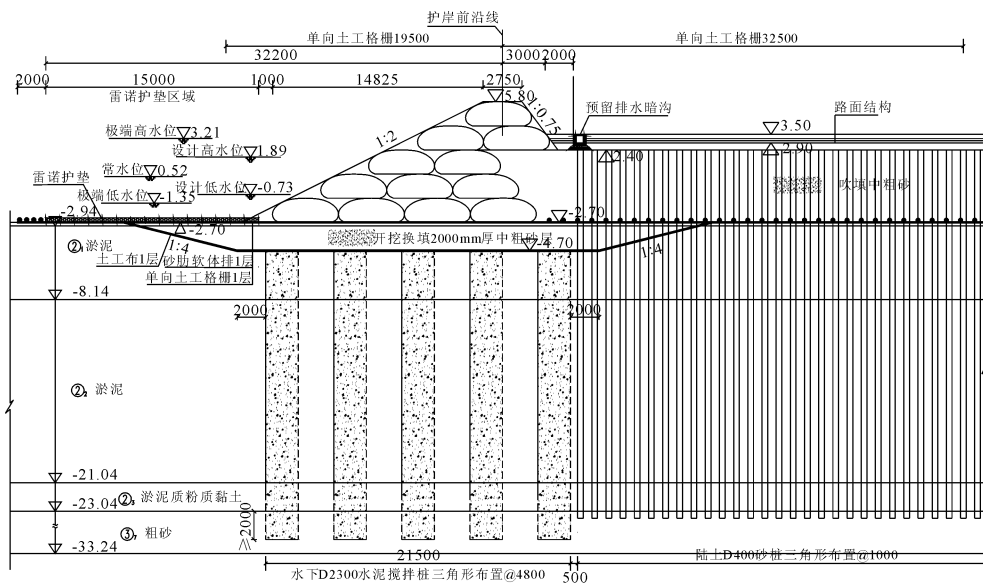


图 3 DCM 桩地基处理断面图(单位:平面尺寸为 mm,高程为 m)

表 1 推算的 28 d 现场取芯无侧限抗压强度

土层类型	水泥掺量 / (kg·m ⁻³)	掺入比 / %	取芯率 / %	样本个数	现场 28 d 无侧限抗压强度 / MPa			大于 1.2MPa 合格率 / %
					最大值	最小值	平均值	
淤泥	230	12.8	100	14	2.64	1.16	1.91	93
	320	17.8	94	15	3.50	1.70	2.37	100
	380	21.1	75	3	2.93	1.76	2.45	100
淤泥质粉质黏土	230	12.8	83	3	1.70	0.94	1.35	67
	320	17.8	84	9	3.48	1.38	2.55	100
	380	21.1	93	6	3.14	1.90	2.40	100

(3) 复合土层综合抗剪强度。根据文献[8—10],抗滑稳定性分析中水泥搅拌桩复合土层的综合抗剪强度指标可采用下式计算:

$$\tan \varphi_{sp} = m \tan \varphi_p + (1 - m) \tan \varphi_s \quad (2)$$

$$c_{sp} = (1 - m) c_s + m c_p \quad (3)$$

式中: φ_{sp} 、 c_{sp} 分别为复合土层内摩擦角和黏聚力; φ_p 、 c_p 分别为桩体内摩擦角和黏聚力; φ_s 、 c_s 分别为桩间土内摩擦角和黏聚力; m 为面积置换率。

聂文峰等^[11]采用有限元分析了水泥搅拌桩加固软土路堤的稳定性,指出水泥搅拌桩限制了地基潜在滑裂面的形成和贯通,安全系数随着桩体抗剪强度的增加而增加,但桩体抗剪强度取值不宜过大,以免高估地基稳定性。文献[8]中,建议水泥土黏聚力 c_p 与无侧限抗压强度的比值取 $c_p/q_u = 0.2 \sim$

0.3,内摩擦角 φ_p 取 20° ~ 30°。文献[10]中,建议高压旋喷桩黏聚力 c_p 与无侧限抗压强度的比值为 $c_p = q_u/6$ (q_u 为水泥土无侧限抗压强度),内摩擦角 φ_p 取 20° ~ 30°。本工程 DCM 桩桩身强度较高,为安全起见,按文献[10]取 $c_p = q_u/6$,即 DCM 桩桩体黏聚力 c_p 取 200 kPa,内摩擦角 φ_p 取 25°。由式(2)、式(3)计算得到复合土层综合抗剪强度,见表 2。

表 2 DCM 桩复合土层综合抗剪强度指标

土层名称	加固前 c_q /kPa	加固前 φ_q /(°)	加固后 $c_{复合}$ /kPa	加固后 $\varphi_{复合}$ /(°)
② ₁ 淤泥	5.3	3.1	50.49	8.52
② ₂ 淤泥	6.3	3.8	51.26	9.05
② ₃ 淤泥质粉质黏土	11.9	6.6	55.55	11.15

(4) DCM 桩复合地基稳定性。利用 Rocscience-Slide 边坡稳定分析软件,计算方法采用瑞典简单条分法。本工程施工速度快,且施工完成即投入使用,土体抗剪强度指标保守采用直接快剪指标。各工况下岸坡稳定性计算得到的最小抗力分项系数均能满足规范^[7]的要求,计算结果见表 3。

表 3 岸坡稳定计算最小抗力系数汇总表

计算工况	抗剪指标	最小抗力系数	抗力系数要求
修筑围堰至标高 2.4 m + 第一级吹填砂	直接快剪	1.322	≥1.0
修筑围堰至标高 5.8 m + 第二级吹填砂	直接快剪	1.249	≥1.0
使用期	直接快剪	1.150	≥1.1

(5) DCM 桩复合地基承载力。根据规范^[7,12-13],水泥搅拌桩复合地基承载力特征值可按式(4)计算:

$$f_{spk} = mR_a/A_p + \beta(1 - m)f_{sk} \quad (4)$$

式中: f_{spk} 为复合地基承载力特征值,kPa; R_a 为单桩竖向承载力特征值,kN; A_p 为搅拌桩截面积, m^2 ; β 为桩间土承载力发挥系数; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值,kPa; m 为面积置换率。

单桩竖向承载力特征值可按式取最小值^[10]:

$$R_a = \sum u_{pi}q_{sia}l_i + \alpha q_{pa}A_p \quad (5)$$

$$R_a = 0.5q_uA_p \quad (6)$$

式中: u_{pi} 为第*i*层土处桩周长,m; q_{sia} 为第*i*层土侧阻力特征值,kPa; l_i 为桩长范围内第*i*层土的厚度,m; α 为桩端天然地基土承载力折减系数; q_{pa} 为桩端地基土未经修正的承载力特征值,kPa; q_u 为现场取芯水泥土无侧限抗压强度,MPa。

桩端天然地基承载力折减系数 α 取值,《建筑地基处理技术规范》^[12](JGJ 79—2012)建议 α 取值0.4~0.6。《建筑地基处理技术规范》^[13](DBJ 15—38—2005)根据珠海市 306 根水泥搅拌桩抽芯报告,发现桩端扰动深度不大于 0.5 m,且到底是由于施工质量不好造成的还是钻孔取芯操作不当造成的并无定论。另外,水泥土搅拌桩是一种介于柔性桩与刚性桩之间的半柔半刚桩,其桩端持力层的承载力应介于刚性桩端阻力和天然地基承载力之间。综合上述因素,广东省标准建议 α 取值0.6~0.8。林奕禧等^[14]分析了珠海地区水泥搅拌桩承载力实测数据,建议桩端土层地基承载力发挥系数 α 取值不宜小于 1.0。DCM 桩桩簇处理机设置了桩底处理专用的喷浆口和着底智能控制系统,可保证桩端粗砂层

质量。另外,本工程 DCM 桩长约 20 m,直径 2.3 m,长径比小,刚度大,桩端土层强度亦可得到充分发挥。因此,本工程桩端天然地基承载力折减系数 α 按广东省标准取 0.8。

由式(5)~式(6)计算得到的 DCM 单桩竖向承载力特征值由桩周土及桩端土总抗力控制,且接近桩身强度控制值。由式(4)得到 DCM 桩复合地基承载力特征值 $f_{spk} = 135$ kPa。

现行规范对于复合地基承载力的修正主要适用于刚性基础,而对柔性基础下复合地基承载力修正的规定尚不多见。根据魏永幸等^[15-16]的研究成果以及《铁路工程地基处理技术规程》^[17](TB 10106—2010),在满足稳定和工后沉降要求的前提下,柔性基础下复合地基承载力修正系数可取 1.2~1.5。本工程对围堰地基变形要求较为宽松,且为临时工程,则本工程修正后的 DCM 桩复合地基承载力特征值 f'_{spk} 介于 162 kPa~202 kPa 之间。作用在复合地基顶部的应力,保守取围堰顶高程 5.8 m,水位取极端低水位,计算得到应力 $p_k = 159$ kPa < f'_{spk} 。因此,DCM 桩复合地基承载力满足要求。

4 主要施工工艺和加固效果

水下 DCM 桩采用“W”曲线型搅喷施工工艺,其主要施工步骤为:钻杆入水→钻杆入土→钻进搅拌喷水切土→坐底搅拌喷浆→桩底区段复搅喷浆→上提搅拌喷浆→桩顶区段复搅喷浆→钻杆提出水面。土中钻入和提升速度为 0.3 m/min~1.0 m/min,本工程 DCM 桩桩长约 20 m,单桩施工时间约 140 min,单船三台桩簇处理机,可同时施工 3 根 DCM 桩。

DCM 桩施工结束至少 28 d 后,选取 4 根 DCM 桩进行现场抽芯,取芯器为双管单动(双重管)与三管单动取芯器(三重管),现场根据芯样强度调整取芯器。测定芯样无侧限抗压强度,采用式(1)推算得到 28 d 现场抽芯抗压强度最小值为 1.52 MPa,满足抗压强度不小于 1.2 MPa 的设计要求。项目实施过程中,深层水平位移及表层沉降位移观测等监测项目指标正常。可见,本工程采用 DCM 桩进行海上软土地基处理是有效可行的。

5 结语

(1) 由于陆上和水上施工设备不同,其形成的搅拌桩直径和强度有很大区别,采用大型设备施工的水下 DCM 桩施工质量明显优于陆上水泥搅拌桩,其对海上工程软土地基加固是有效可行的。

(下转第 193 页)

- [13] 张新军,许江江. 超大跨度斜拉桥合理抗震结构体系研究[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(2): 230-236.
- [14] 武芳文,徐超,赵雷. 超大跨度斜拉桥随机地震响应参数敏感性分析[J]. 铁道学报, 2014(6): 107-113.
- [15] 阮怀圣,屈爱平,何友娣,等. 大跨度公铁两用钢桁梁斜拉桥结构地震响应特性研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(2): 32-38.
- [16] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D6—2004[S].
- [17] Xiong W, Xiao R, Deng L, et al. Methodology of long-term real-time condition assessment for existing cable-stayed bridges[J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(1): 111-126.
- [18] 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02—01—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(上接第 167 页)

(2) 海底表层流泥换填粗粒料并铺设土工加筋层, 具有以下作用: 增加上覆压力保证桩顶质量; 利用流失的水泥浆液充填粗粒料, 减少拱淤并形成硬壳层; 增加对桩顶的约束, 减少桩顶侧向变形, 对复合地基稳定性和承载力有利; 提高桩间土承载能力, 减少桩土应力比, 有利于复合地基受力和刚度均匀化。

(3) 水下 DCM 桩复合地基相关理论研究滞后于工程实践, 还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 岑文杰,吕黄,周红星,等. 基于悬浮颗粒物沉淀理论 DCM 桩浅表砂层成桩问题分析及应对策略[J]. 施工技术, 2018, 41(S1): 178-181.
- [2] 江立云. 海域深层水泥拌和法的可行性研究[J]. 水利水电技术, 1998(5): 35-38.
- [3] 刘亚平. 海上 CDM 施工中的几个技术问题[J]. 中国港湾建设, 2009(4): 42-45.
- [4] 刘志军,陈平山,胡立文,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.
- [5] Rashid A S A, Bunawan A R, Said K N M. The deep mixing method: bearing capacity studies[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(4): 1271-1298.
- [6] 交通部科技教育司. 深水枢纽港关键技术及示范工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程地基设计规范: JT S147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [8] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [9] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [10] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [11] 聂文峰,邱邵富,张蕊,等. 路堤荷载下水泥土搅拌桩复合地基失稳机理及其稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 47-51.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- [13] 广东省建设厅. 建筑地基处理技术规范: DBJ 15—38—2005[S]. 广州: 人民交通出版社股份有限公司, 2005.
- [14] 林奕禧,张伟丽,黄良机,等. 水泥土搅拌桩复合地基承载力折减系数 α 数和 β 的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3815-3821.
- [15] 魏永幸,薛新华,龚晓南. 柔性路堤荷载作用下的地基承载力研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(2): 22-26.
- [16] 魏永幸,薛新华. 柔性路堤地基承载力控制值探讨[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(1): 1-3, 9.
- [17] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程地基处理技术规范: TB 10106—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.