

· 地基与基础 ·



国内外深层水泥搅拌桩质量评价对比分析

滕超^{1,2,3}, 何丽平^{1,2,3}

- (1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 水泥搅拌桩(DCM)是一种常见的软基加固方法, 国内在陆上应用成熟, 并建立了完善的质量评价体系。近年来, 我国水运工程向着大型化、深水化、高质量发展, 多个重大项目成功应用水下 DCM 技术。由于 DCM 法在水下和陆上施工的装备、工艺、环境条件差异较大, 直接将陆上的评价方法应用到水下, 不一定能起到很好指导作用。结合中、日、美、欧关于 DCM 质量评价的相关规定进行对比分析, 结果表明, 水下 DCM 检测数量较多时, 符合正态分布, 可使用日本标准进行评价; 国内 JGJ 340—2015《建筑地基检测技术规范》以最小平均强度作为桩体强度代表值进行统计, 而由于水下 DCM 桩桩径大, 检测样本相对较少, 统计意义不明显, 不宜用于评价水下 DCM 复合地基质量。

关键词: 水下深层水泥搅拌桩; 质量检验; 对比分析; 国内外标准

中图分类号: U655; TU47

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0180-06

Comparative analysis of quality evaluation of deep cement mixing piles in China and abroad

TENG Chao^{1,2,3}, HE Liping^{1,2,3}

- (1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: Deep cement mixing pile is a common method for reinforcing soft foundations. It has been used on land in China and a perfect quality evaluation system has been established. In recent years, China's water transportation engineering has developed towards large-scale, deep-water and high-quality development, and the underwater DCM technology has been successfully applied to multiple major projects. Due to the significant differences in equipment, technology, and environmental conditions between underwater and land construction using DCM methods, directly applying land-based evaluation methods to underwater operations may not be effective. This paper compares and analyzes the relevant regulations on DCM quality evaluation in China, Japan, the United States and Europe, the results show that when the detection quantity of underwater DCM is large, the data follows a normal distribution, Japanese standards can be used for evaluation. The minimum average strength is used as the representative value of pile strength in the domestic JGJ 340—2015 *Technical Code for Testing of Building Foundation*. However, due to the large diameter of underwater DCM piles, the testing samples are relatively small and the statistical significance is not obvious, so it is not suitable for evaluating the quality of underwater DCM composite foundation.

Keywords: underwater DCM; quality inspection; comparative analysis; domestic and foreign standards

收稿日期: 2023-05-23

作者简介: 滕超 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事岩土工程相关研究工作。

我国水运工程向着深水化、大型化、绿色、高质量发展的趋势明显,对软土加固深度及加固质量要求越来越高,水下软基处理工法的选择需综合考虑其适用性、环保性、材料、工期、成本、设备、质量控制等。传统水下软基处理技术的不足愈发凸显,比如:水下爆炸挤淤石料需求量大、需处理挤出淤泥包、影响航道;水下开挖换填工程量大、效率低、环境不友好、弃泥处置及回填料的开采困难,易回淤等问题;水下挤密或振冲砂桩需要大量的砂石料、加固布置形式不灵活、适用的土层范围较窄等。水泥搅拌桩(deep cement mixing, DCM)是将水泥与原位软土进行强制搅拌形成一定强度的水泥石,以满足软基处理要求。加固形式多样,具有沉降小、抗震强、无液化问题、布置形式灵活等优势,能有效克服几种常用工法的大部分缺陷。

日本在20世纪60年代开始研发DCM法,70年代初在重力式港工建筑中应用,1984年已在水下加固500余万 m^3 ^[1]。在国内的水运工程行业,DCM技术最初被应用于1987年开始建设、1989年加固完成的天津港东突堤北侧码头工程^[2]。随着越来越多沿海城市展开围海造陆工程,环保要求越来越高,工期控制越来越严格,DCM施工技术凭借其环境友好、沉降小、耗材少以及工期短等优势,受到越来越多的关注。

宁华宇^[3]以香港机场扩建工程为例,介绍水下DCM施工工艺及其试验检测方法。滕超等^[4]结合实际施工数据,分析勘察-施工-检测关联数据,得到影响不同土层施工质量的主要工艺参数及其适宜的控制范围。吴加武^[5]结合应用大型水下DCM专业施工设备加固深中通道项目沉管地基的效果,发现其施工质量明显优于陆上水泥搅拌桩,利用该技术加固水下软土地基可行性强。刘志军等^[6]系统分析多种复合地基检测方法在水下DCM基础应用的优缺点,并结合项目特征给出检测方法的选择建议。

国内采用DCM加固水下软基的工程项目相对较少,相关标准也并未对其施工质量提出针对性

的评价方法,本文主要对国内外相关的质量评价标准进行对比分析,研究其不同及适宜性。

1 水下DCM与陆上DCM的差异

水下DCM相对于陆上DCM,首先需要解决水上施工装备的稳定性问题,通常通过搭建水上平台或使用大型专业船舶进行施工。如图1所示,在国内多个大型项目建设中,主要采用大型专业水下DCM船舶进行施工,对比典型陆上装备,其具有桩径大(4个桩为1簇,单桩1.3 m,1簇截面积达 4.63 m^2)、处理机自重力大(单个处理机达100 t)、搅拌头分上下2个喷浆口(下贯时用下喷浆口,提升时用上喷浆口)且集粉料存储、水泥浆制备、处理机于一体,自动化程度较高。



a) 水下装备



b) 陆上装备

图1 国内典型DCM施工装备

在施工工艺方面,陆上水泥搅拌桩通常采用多搅多喷(“四搅两喷”、“四搅四喷”)的施工工艺,但水下水泥搅拌桩施工通常采用下贯喷浆(下贯阶

段喷浆)或提升喷浆(底部下贯喷浆、其余部分提升喷浆)工艺。

在加固环境方面,陆上施工通常浅表层无水,且有一定的强度以确保施工装备能顺利入场。而水下 DCM 施工的浅表层含水率极高,无承载能力,加固该土层时水泥浆容易流失。

水下 DCM 与陆上 DCM 的差异见表 1。

表 1 水下 DCM 与陆上 DCM 的差异

类别	施工装备	施工工艺	环境
陆上 DCM	桩径小,处理机自重力小,通常仅底部有喷浆口,自动化程度相对较低,粉料存储、水泥浆制备、处理机分开	四搅两喷、四搅四喷	浅表层通常无水,且有一定强度
水下 DCM	桩径大、处理机自重力大,搅拌头有上下 2 个喷浆口,自动化程度相对较高,粉料存储、水泥浆制备、处理机一体化	除底部处理需反复提升、下贯外,其他桩段仅下贯、提升各 1 次	浅表层含水率极高,水泥浆易流失

2 国内外相关规范的检验标准

国内外有 5 项规范/标准/手册对深层水泥搅拌桩施工质量评价做出规定,国内的 JTS 257—2008

《水运工程质量检验标准》^[7]与 JTS 206—2017《水运工程地基基础施工规范》^[8]的质量评价标准一致,要求芯样试件的无侧限抗压强度平均值应满足设计要求,变异系数宜小于 0.35,最大值不得大于 0.5。JGJ 340—2015《建筑地基检测技术规范》^[9]则按 1 组 3 块试件强度值的平均值确定抗压强度代表值,以单桩的最小值作为单桩的代表值,再以单桩代表值进行统计,计算桩身强度标准值。由此可见,建筑地基对水泥搅拌桩的检验标准要显著高于水运工程行业的标准,这与不同行业对变形控制要求及建设规模密切相关。

日本根据规模大小分为 2 种评价方法^[10],规模较小时采用平均值进行评价;规模大且检测数量多、强度值呈正态分布时,结合项目特征采用不同置信度进行评价。美国则规定单桩 80%超过规定强度,全部 90%超过规定强度^[11],且 5 个连续样本允许 1 个不合格,3 m 范围内不超过 2 个不合格,同时明确指出,不应规定最低强度要求。欧盟则仅规定检测方法,未对具体标准作出规定^[12]。各国评价标准对比见表 2。

表 2 国内外各规范/标准/手册对深层水泥搅拌桩的评价标准

国家	标准名称	评价标准
中国	JTS 257—2008《水运工程质量检验标准》	芯样试件的无侧限抗压强度平均值应满足设计要求,变异系数宜小于 0.35,最大值不得大于 0.5
	JTS 206—2017《水运工程地基基础施工规范》	芯样试件的无侧限抗压强度平均值应满足设计要求,变异系数不得大于 0.5 且宜不小于 0.35
	JGJ 340—2015《建筑地基检测技术规范》	桩身芯样试件抗压强度代表值应按 1 组 3 块试件强度值的平均值确定;取各段水泥土芯样试件抗压强度代表值中的最小值作为桩体代表值;取桩身强度代表值进行统计,计算桩身强度标准值
日本	《港湾、机场施工深层混合处理工艺技术手册》(沿海技术系列丛书 No. 48;2018)	小规模改良工程的情况下,用平均强度评估改良体的强度;大规模改良工程的情况下,强度分布接近正态分布,数据至少要在数十个以上,通过统计对强度进行评估
美国	FHWA-HRT-13-046;2013 <i>Deep Mixing For Embankment and Foundation Support</i>	每根桩 80%强度应超过规定强度,5 个连续芯样测试,允许 1 个不合格;3 m 范围内临近钻孔不能超过 2 个不合格;现场所有测试结果的 90%应等于或超过规定强度;不应规定最低强度要求
欧盟	BSEN 14679;2005 <i>Execution of special geotechnical works — Deep mixing</i>	仅规定通过钻芯、湿抓、原位测试进行评价,未对具体标准作出规定

JGJ 340—2015《建筑地基检测技术规范》中强度代表值计算通过式(1)、(2)确定。

$$\Phi_k = \gamma_s \Phi_m \quad (1)$$

$$\gamma_s = 1 - \left(\frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right) \delta \quad (2)$$

式中: Φ_k 为原位试验数据的标准值, γ_s 为统计修正系数, Φ_m 为原位试验数据的平均值, n 为参与统计的个数, δ 为原位试验数据的变异系数。

《港湾、机场施工深层混合处理工艺技术手册》(沿海技术系列丛书 No. 48; 2018)要求设计基准强度特征值满足式(3)的要求。

$$q_{\text{uck}} \leq \overline{q_{\text{uf}}} - K\sigma \quad (3)$$

式中: q_{uck} 为设计标准强度; $\overline{q_{\text{uf}}}$ 为单轴抗压强度的平均值; K 为偏差系数, 海上工程通常取 $K=1.0$, 评估协商后可取 0.5、1.0、1.645、2.0、3.0; σ 为单轴抗压强度的标准偏差。

3 对比分析

本文利用2个项目的检测结果进行对比分析, 由于项目的检验合格标准要求单桩 90% 超过规定强度, 因此其满足国内水运行业的2项检验标准和美国的检验标准。但如何对总体检验质量进行评价, 还需要结合国内 JGJ 340—2015《建筑地基检测技术规范》、日本《港湾、机场施工深层混合处理工艺技术手册》(沿海技术系列丛书 No. 48; 2018) 2项标准进行对比分析。

统计学中应用最广泛的非参数检验法主要有卡方检验和 $K-S$ (Kolmogorov-Smirnov) 检验。 $K-S$ 检验法不需要区间划分, 相比于卡方检验更适合于小样本数据。为验证研究对象是否服从正态分布, 采用 $K-S$ 检验数据样本。

$K-S$ 检验基于累计分布函数, 用以检验一个经验分布是否符合某种理论分布或比较2个经验分布是否有显著性差异的方法。其基本思路为通过将样本观测值的累积频率 $F_n(x)$ 与不同假设理论的概率分布 $F_X(x)$ 进行比对分析, 从而确定累积频率的概率分布类型。

设样本容量为 n , 建立经验分布函数, 分段累

积频率通过式(1)确定:

$$F_n(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq x_i) \\ \frac{i}{n} & (x_i \leq x \leq x_{i+1}) \\ 1 & (x \geq x_{i+1}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n 为排列后的样本数据, $F_n(x)$ 为阶梯形曲线。

在随机变量 X 范围内, $F_n(x)$ 与 $F_X(x)$ 的最大差异值可由式(2)得出:

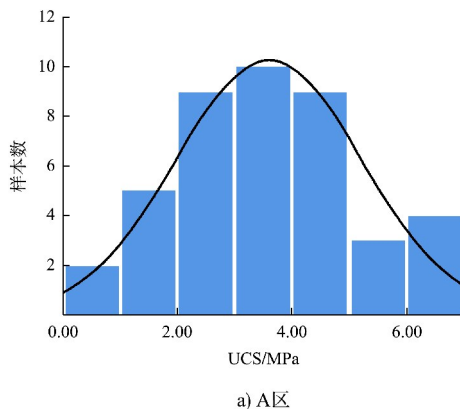
$$D_n = \max_{-\infty < x < +\infty} |F_X(x) - F_n(x)| < D_n^\alpha \quad (2)$$

式中: α 为显著水平; D_n 为一个分布依赖于 n 的随机变量; D_n^α 为显著水平 α 上的临界值。认为符合显著水平 α 的 $F_n(x)$ 即可用假设的理论分布 $F_X(x)$ 表示, 反之则不能。

项目1各区域的 $K-S$ 检验结果如表3所示。由检验结果可知, 各区域渐进显著性(双尾)均大于0.05, 因此接受原假设, 各区域的单轴抗压强度值(UCS)服从正态分布, 典型区域的分布见图2。

表3 项目1各区域 $K-S$ 检验结果

区域	样本数	UCS/MPa		渐进显著性 (双尾)
		平均值	标准偏差	
A	42	3.595	1.634	0.200
B	26	4.399	1.543	0.200
C	17	3.063	1.578	0.145
D	120	2.825	1.124	0.200
E	166	2.909	1.110	0.098
F	320	2.158	0.978	0.200
G	72	3.452	1.169	0.053
H	43	3.070	1.067	0.200
I	37	3.648	1.543	0.200



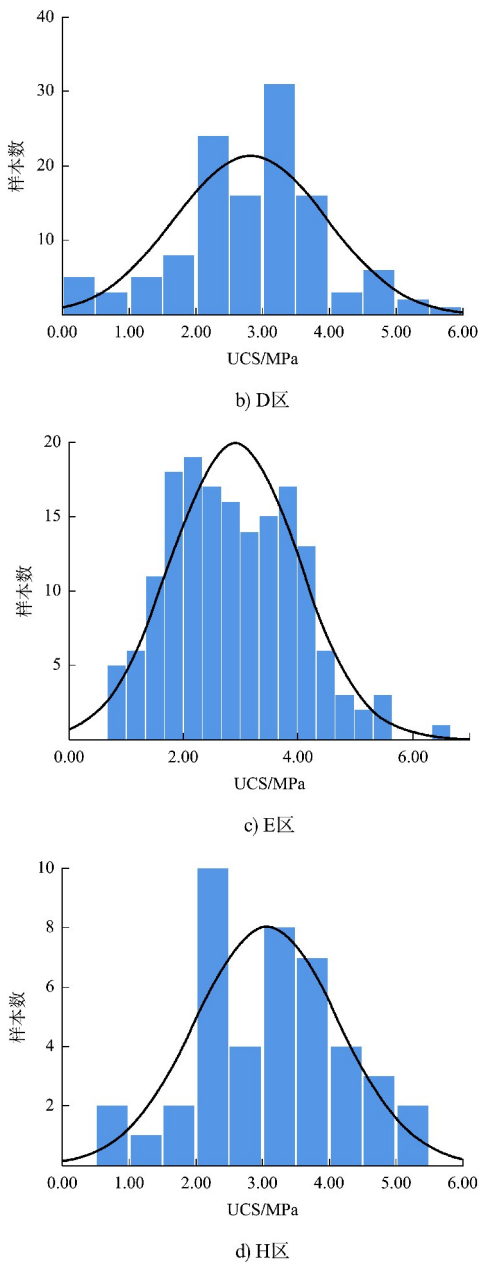


图 2 典型区域 UCS 频率分布及拟合曲线

结合日本《港湾、机场施工深层混合处理工艺技术手册》(沿海技术系列丛书 No. 48: 2018)的综合评价方法对项目 1、2 的检测结果进行综合评价,各区评价结果见表 4。由表可知,按日本技术手册的规定,项目 1 各区施工质量均满足 $K=1.0$ 即置信度大于 84.1%时,大于设计强度特征值 1.2 MPa 的要求;部分区域满足 $K=1.645$ 即置信度大于 95%时,大于设计强度特征值;仅 1 个区域满足 $K=3.0$ 即置信度大于 99%时,大于设计强度特征值。即按海上工程通常 $K=1.0$ 为准,所有区域均合格。

表 4 日本技术手册评价结果

项目	施工区域	UCS 样本数	不同置信度水平对应强度值/MPa			
			84.1%	90.0%	95.0%	97.7%
1	A	42	1.96	1.50	0.91	0.33
	B	26	2.86	2.43	1.87	1.32
	C	17	1.48	1.04	0.46	—
	D	120	1.70	1.39	0.98	0.58
	E	166	1.80	1.49	1.08	0.69
	F	320	1.28	1.01	0.65	0.30
	G	72	2.28	1.95	1.53	1.11
	H	43	1.99	1.69	1.29	0.91
	I	37	2.11	1.68	1.12	0.57
2	M	86	1.85	1.33	1.05	0.25
	N	189	2.30	1.76	1.46	0.62
	A	78	2.19	1.73	1.48	0.77

注:“—”代表计算结果为负数。

若采用《建筑地基检测技术规范》的规定对两项目的不同区域进行评价,各区评价结果见表 5。由表可知,采用日本标准进行综合评价,两项目各区域均合格,与实际情况相同。而采用国内建筑标准进行综合评价,项目 1 有 3 个区域(D、F、S)综合评价不合格。分析其主要原因是水下 DCM 浅表层含水率高,土体几乎无强度,水泥浆易流失,因此采用《建筑地基检测技术规范》进行评价时,单桩强度代表值全为浅表层的强度平均值,普遍偏低;且由于水下 DCM 的桩径较大,区域内桩数较少,按不同区域进行评价时,样本数太少,统计意义不明显。

表 5 建筑地基检测技术规范评价结果

项目	施工区域	检测桩数	Φ_m /MPa	δ	γ_s	Φ_l /MPa
1	A	3	2.61	0.35	0.68	1.77
	B	3	3.33	0.33	0.70	2.33
	C	2	2.12	0.07	0.94	1.96
	D	4	1.57	0.72	0.40	0.63
	E	5	1.49	0.14	0.90	1.33
	F	7	1.41	0.63	0.60	0.84
	G	7	2.74	0.24	0.84	2.31
	H	4	2.19	0.35	0.71	1.55
	I	4	2.21	0.22	0.82	1.82
2	M	7	2.24	0.14	0.91	2.04
	N	7	2.47	0.20	0.87	2.16
	O	6	2.25	0.18	0.88	1.97

4 结论

1) 取芯检测数据较多时,水下 DCM 施工桩体成桩质量概率分布情况,经 K-S 检验后,符合正态分布,可采用日本《港湾、机场施工深层混合处理工艺技术手册》的相关规定进行整体评价。

2) 结合两项目的检测结果,采用日本《港湾、机场施工深层混合处理工艺技术手册》进行评价时,取 $K=1.0$ 作为推荐值合理。

3) 国内《建筑地基检测技术规范》不适合评价大直径的水下深层水泥搅拌桩的施工质量,原因是区域内的桩数较少且水下 DCM 浅表层含水率高,不宜用于评价水下 DCM 复合地基质量。

参考文献:

- [1] 张瑞. 日本 MDM 技术在天津港东突堤码头工程中的应用[J]. 港口工程, 1987(5): 1-13.
- [2] 范期锦, 柴长清. 海上深层水泥拌和法加固软土地基技术的开发与应用[J]. 港口工程, 1994(2): 3-15.
- [3] 宁华宇. 香港国际机场扩建工程水下深层水泥搅拌桩的试验检测[J]. 工程建设, 2019, 51(2): 60-65.
- [4] 滕超, 刘志军, 王雪刚. 基于施工数据的水下深层水

泥搅拌桩成桩质量影响因素分析[J]. 水运工程, 2020(7): 217-222.

- [5] 吴加武. DCM 桩在岛体斜坡式围堰地基加固中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 164-167, 193.
- [6] 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.
- [7] 中交第一航务工程局有限公司. 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [8] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程地基基础施工规范: JTS 206—2017[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2017.
- [9] 福建省建筑科学研究院. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015. [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [10] 沿海技术研究中心. 港湾、机场施工深层混合处理工艺技术手册: 沿海技术系列丛书 No. 48[M]. 东京: 大光社印刷株式会社, 2018.
- [11] Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center. Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing For Embankment and Foundation Support[M]. Washington: [s. n.], 2013.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 179 页)

参考文献:

- [1] 陆拥军. 码头集装箱锁销自动化拆装技术研究[J]. 港口装卸, 2019(2): 16-19.
- [2] 刘洋, 张卫, 庄鑫传. 一种集装箱固定旋锁自动拆卸装置的设计[J]. 港口科技, 2012(10): 27-28, 49.
- [3] 吴邵强, 刘汉东, 梁浩. 自动化集装箱码头拆装扭锁工艺设计[J]. 水运工程, 2022(10): 73-78.
- [4] 杨荣, 易应强. 自动化集装箱码头新型转锁拆装工艺设计[J]. 集装箱化, 2014, 25(12): 33-36.
- [5] 赵永新, 张建. 单起升岸边集装箱起重机的锁销自动拆装工艺[J]. 港口科技, 2019(6): 5-7, 11.
- [6] 张清波, 匡家喜, 张雨婷. 传统集装箱码头向自动化码

头改造仿真分析[J]. 水运工程, 2017(5): 138-142, 156.

- [7] 刘春泽, 林奎, 唐颖. 基于 Flexterm 软件的集装箱码头自动化堆场箱位分配策略对比[J]. 水运工程, 2021(10): 328-333, 340.
- [8] 王坚, 冯雪平, 吴磊. 自动化集装箱码头道路交通组织仿真技术[J]. 港口装卸, 2022(2): 35-38, 60.
- [9] 陶辉, 陈宁. 自动化集装箱码头 AGV 配置仿真分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(4): 694-698.
- [10] 武彬, 张凯, 张煜, 等. 考虑前后缓冲区的地面锁站动态布置仿真分析[J]. 水运工程, 2022(6): 178-183.

(本文编辑 赵娟)