

三维水泥土搅拌桩成桩工艺现场试验

姚 达^{1,3}, 王希晨², 赵 虎⁴, 邱成春⁵, 刘振建⁵

(1. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210029;
3. 江苏鸿基水源科技股份有限公司, 江苏 扬州 225000; 4. 南水北调东线江苏水源有限责任公司徐州分公司,
江苏 徐州 221018; 5. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:针对常规水泥土搅拌桩搅拌不充分、混合不均匀等瓶颈,研发了一种四轮三维搅拌钻头,开展了三维水泥土搅拌桩(TCM桩)成桩工艺现场试验,通过桩身的标准贯入试验、芯样无侧限抗压强度及直接剪切试验,将双浆、一气一浆、单浆3种供浆方式形成的TCM桩与四搅四喷工艺形成的常规水泥土搅拌桩进行了对比分析。结果表明,TCM桩不同深度的标准贯入击数、无侧限抗压强度、直剪抗剪强度等指标优于常规水泥土搅拌桩。另外,不同工艺的成桩质量具有明显差异,单浆工艺形成的桩体平均标准贯入击数最大,一气一浆工艺形成的桩体无侧限抗压强度和直接抗剪强度最高。

关键词:TCM桩; 成桩工艺; 供浆方式; 常规水泥土搅拌桩; 现场试验

中图分类号:TV553

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)07-0063-0005

Field tests of construction technique of three-dimensional cement-soil mixing (TCM) pile

YAO Da^{1,3}, WANG Xichen², ZHAO Hu⁴, QIU Chengchun⁵, LIU Zhenjian⁴

(1. Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China;
2. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210029, China;
3. Jiangsu Hongji Water Technology Co., Ltd., Yangzhou 225000, China; 4. Xuzhou Branch of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Xuzhou 221018, China;
5. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: To overcome the insufficient and uneven mixing of conventional cement-soil mixing pile, a new four-wheel three-dimensional stirring drill was developed and field tests for three-dimensional cement-soil mixing (TCM) pile was carried out. The TCM piles formed by three slurry supply methods of double slurry, one air and one slurry, and single slurry were compared and analyzed with the conventional soil-hydraulic mixing piles formed by four churning and four spraying processes through the standard penetration test (SPT) of the piles, the unconfined compressive strength test, as well as direct shear test. The results indicate that the SPT blow count, unconfined compressive strength and shear strength of TCM piles at different depths are better than those of conventional mixing cement-soil pile. In addition, the quality of TCM pile is closely related to its construction technique, where the SPT blow count of the piles by single-pulp slurry supply method is the highest, while the unconfined compressive strength and shear strength of piles by one gas and one slurry method is the highest.

Key words: TCM pile; construction technique; slurry supply method; conventional cement-soil mixing pile; field tests

收稿日期: 2023-04-06

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020012), 江苏南水北调科技研发项目(JSNSBD202106)

作者简介: 姚 达(1990—),男,工程师,本科,主要从事岩土工程技术应用研究及岩土工程施工工作。E-mail:yumanshu@

126.com

软土广泛分布于我国沿海地带及平原低地、沼泽地区,具有含水量高、透水性差、压缩性高、流变性等特点。在水利工程建设中,软土堤基普遍存在稳定性差、沉降量大、抗剪强度弱等问题,给工程安全带来了很大隐患^[1]。目前,水泥土搅拌桩技术是一种有效的软土地基加固方法,具有施工简便、振动小、成本低等优点,已在全球范围得到了推广应用^[2-3]。

尽管水泥土搅拌桩具有诸多优点,但在水泥土搅拌桩施工中普遍存在搅拌不充分、混合不均匀等问题,导致桩身强度指标达不到设计要求^[4]。为此,国内外学者已从设计和施工两方面进行了诸多优化。在设计方面,刘松玉等^[5]研发了一种双向搅拌钻头,提高了搅拌桩施工效率和软基处理能力;在此基础上,李仁民^[6]研发了带有可伸缩叶片的钉形双向搅拌钻头,有效解决了常规水泥土搅拌桩桩身强度不均匀问题;唐昌意等^[7]研发了一种带有竖向搅拌装置的三维搅拌钻头,在海相淤泥路基加固中取得了良好效果。在施工方面,袁文俊等^[8]分析了水泥掺量、水灰比、养护龄期对成桩质量的影响;Wen^[9]提出了搅拌轴转速、搅拌下钻上提速度、复搅次数等参数的优化方法;吕国仁等^[10]对比了不同施工工艺的成桩效果,发现“四搅四喷”工艺的成桩质量显著优于“两搅两喷”和“四搅两喷”工艺。

本文依托淮河入海水道深厚软土段堤基加固工程,研发了一种新型四轮三维搅拌钻头,通过开展三维水泥土搅拌桩(TCM桩)成桩工艺现场试验,将双浆、一气一浆、单浆3种供浆方式形成的TCM桩与“四搅四喷”工艺形成的常规水泥土搅拌桩进行了对比分析,以实现成桩工艺的优化,为TCM桩的推广应用提供理论和试验依据。

1 工程背景

1.1 工程简介

本次现场试验依托深厚软土段堤基加固工程,该工程位于盐城市阜宁县境内。搅拌桩的设计桩长为20 m,桩径为0.8 m,桩间距为2 m,采用正三角形的布设方式,具体布置方案见图1。

1.2 工程地质

本次现场试验地点位于江苏沿海冲积平原,堤顶高程约13.0 m,沿线地势较平坦。工程范围地层中广泛分布第四纪松散沉积物,表层为人工填土和黄泛冲积层,以粉质黏土、重粉质砂壤土、重黏土为主,含少量云母片、铁锰质,质软,结构松散,其下分

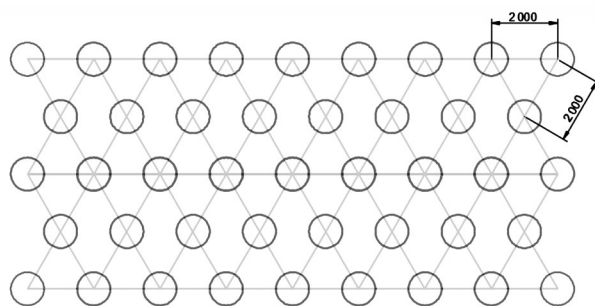


图1 水泥土搅拌桩的布置方案(单位:mm)

布灰色淤泥质黏土、重黏土、灰色细砂、灰黄色轻、重粉质砂壤土,软塑状为主,含水率较高,属高压缩性土。

2 TCM桩成桩工艺现场试验

2.1 四轮三维搅拌钻头

本次现场试验应用了一种四轮三维搅拌钻头,在常规水平搅拌叶片的基础上,增加了两组竖向搅拌叶片,两者相互配合对泥土和水泥浆液进行三维立体搅拌,见图2。前期试桩试验表明,三维搅拌钻头具有以下几方面的优势:①提高水泥浆液的渗透度,避免冒浆、搅拌头空转现象,优化加固效果;②采用单一动力同时控制主钻杆和传动杆工作,不需要额外动力,控制简单;③出浆口设计成位于顶、底水平搅拌叶片的双注浆口,可以选择不同供浆方式,易于实现成桩工艺的优化。

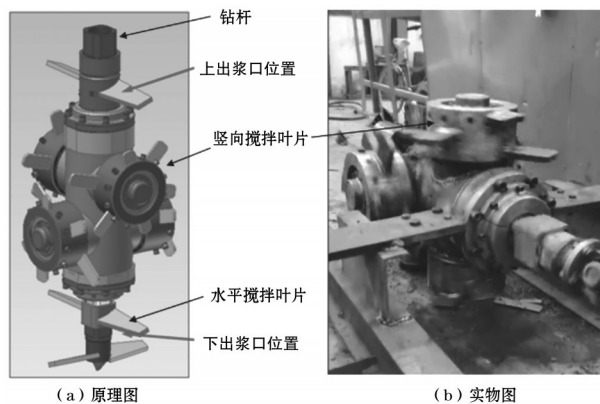


图2 四轮三维搅拌钻头结构原理

2.2 施工参数

现场试验前,通过室内试验确定水泥标号、水灰比、水泥掺量等成桩要素,通过现场试桩确定主电机类型、供浆量、下钻、上提速度等工艺参数,具体施工参数见表1。

表1 TCM桩的施工参数		
序号	指标	参数
1	水泥标号	42.5级普通硅酸盐水泥
2	水灰比	0.8
3	水泥掺量(%)	15
4	主电机	SPM-5Ⅲ25(200 kW)
5	供浆量	下钻时:65%~70%;上提时:30%~35%
6	下钻速度 (cm/min)	0~3 m为30~40 cm/min; 4 m以下为65~75 cm/min
7	上提速度 (cm/min)	55~65

2.3 成桩工艺

本次现场试验采用“两搅两喷”的成桩工艺,即下钻和提升过程中均喷浆搅拌,具体流程见图3。应用传统搅拌钻头制作3根试验桩,作为对照组,成桩工艺为“四搅四喷”。

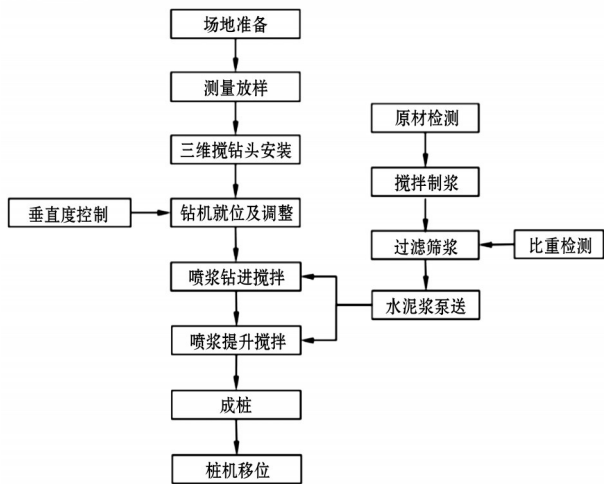


图3 TCM桩施工工艺流程

根据施工参数和成桩工艺,通过设定供浆泵的频率将水泥浆均匀供应至注浆口。同时,利用四轮三维搅拌钻头的双出浆口,根据钻进时上、下出浆口的喷浆情况,本次现场试验共设置了3种不同的供浆方式,即单浆、一气一浆和双浆。①单浆:上出浆口封闭,下钻、上提均由下出浆口供浆;②一气一浆:下钻时下出浆口供浆,上出浆口喷气,以减少钻进阻力,上提时上出浆口供浆,下出浆口喷气;③双浆:下钻、上提时上、下出浆口均供浆,供浆量各占一半。根据供浆方式的不同,本次现场试验选用的成桩工艺列于表2。

表2 TCM桩成桩工艺			
水泥掺量/%	水灰比	试桩数量/个	供浆方式
15	0.8	6	单浆
15	0.8	4	双浆
15	0.8	6	一气一浆
15	0.8	3	四搅四喷 (传统搅拌头)

3 成桩效果评价

3.1 标准贯入击数

养护龄期42 d后,按照《标准贯入试验规程》(YS/T5213—2018)开展标准贯入试验,得出不同成桩工艺形成的水泥土搅拌桩的标准贯入击数随深度变化规律,见图4,并将不同深度的标准贯入击数汇总于表3。相比而言,TCM桩不同深度的标准贯入击数大于常规水泥土搅拌桩,其中3~12 m深度提高约110%,表明三维搅拌钻头有利于改善水泥浆液的入渗程度,显著提高桩身强度。单浆形成的桩体不同深度标准贯入击数大于双浆、一气一浆,表明单浆形成的桩体质量优于其他两种供浆方式。

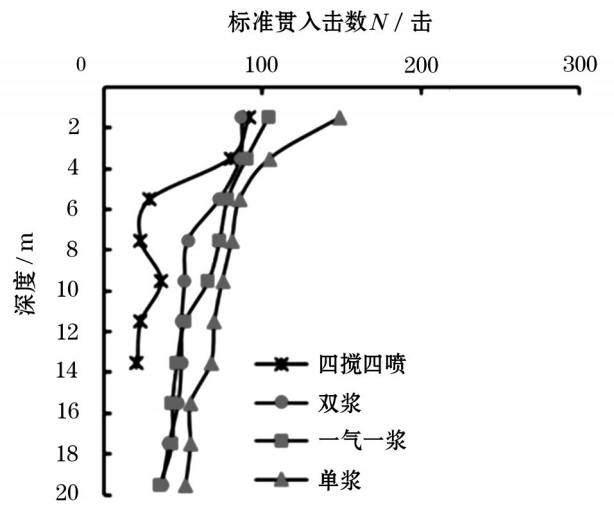


图4 标准贯入击数沿深度变化对比

表3 不同深度的标准贯入击数 (单位:击)				
序号	成桩工艺	0~3 m	3~12 m	12~20 m
1	单浆	> 90	78	54
2	双浆	80	62	48
3	一气一浆	> 90	58	48
4	四搅四喷	90	26	
5	原状土	5~10	1~3	1~3

不同工艺形成的桩体标准贯入击数沿深度方向均出现了一定的波动,其中,常规水泥土搅拌桩标准贯入击数沿深度方向的变化较明显,上部在90击左右,下部仅20击左右;TCM桩标准贯入击数沿深度方向的波动不明显,双浆工艺的波动出现在约6 m处,一气一浆工艺的波动出现在约10 m处,单浆工艺的波动出现在2~5 m处。相比而言,双浆形成的TCM桩的标准贯入击数沿深度方向变化较小,在50~80击之间。因此,TCM桩的桩身强度沿深度方向分布较均匀,常规水泥土搅拌桩由于冒浆及搅拌不均匀导致桩身上、下部强度分布不均匀,桩身质量较差。

3.2 无侧限抗压强度

采用水泥土钻芯取样机械进行钻芯取样,芯样管内径为10 cm。将桩身不同深度的芯样取出,装入密封袋中并采用透明胶带进行包裹,防止水分蒸发。待芯样运回实验室后,采用切割机将芯样制备成高约10 cm的圆柱体,用于无侧限抗压试验。

桩身芯样无侧限抗压强度分布见图5。由图5可知,不同成桩工艺芯样无侧限抗压强度具有较大的差异。其中,双浆和四搅四喷工艺形成的桩体芯样无侧限抗压强度小于500 kPa的比率超过50%,一气一浆工艺形成的桩体芯样无侧限抗压强度总体偏高,主要分布于3 000~5 000 kPa,单浆工艺形成的桩体芯样无侧限抗压强度大多分布于1 000~3 000 kPa之间。由此可见,一气一浆工艺形成的桩体质量最好,其次为单浆工艺,双浆和四搅四喷工艺的成桩质量较差。以上表明,芯样无侧限抗压强度与标准贯入试验结果类似,证实TCM桩可有效克服常规水泥土搅拌桩的缺陷,显著提高了桩体的强度和承载力。

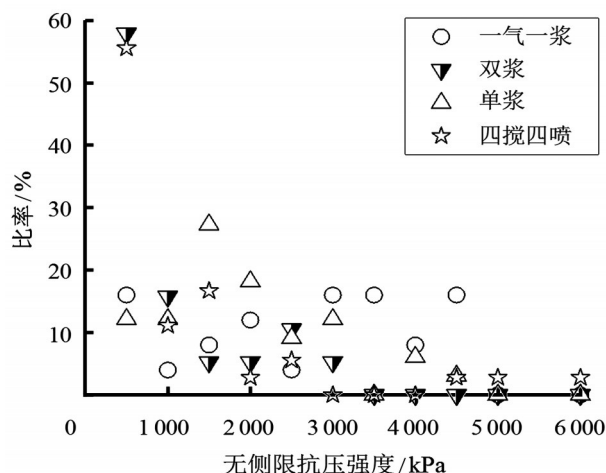


图5 不同成桩工艺的芯样无侧限强度

3.3 直剪抗剪强度

利用室内直剪试验进行水泥土搅拌桩的抗剪强度测试,直剪试验的步骤根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行,剪切速度设置为0.8 mm/min,竖向压力分别取100、200、400、600 kPa。

芯样抗剪强度随取样深度的变化规律见图6,图6中竖线从左至右分别表示芯样在不同竖向压力下所对应的抗剪强度平均值。由图6可知,芯样的抗剪强度随深度有一定的离散性,尤其是在较大的竖向压力条件下。总体而言,直剪抗剪强度随竖向压力的增加而显著增大。为了将直剪抗剪强度结果进行定量化,采用线性拟合方法得出不同深度芯样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,结果列于表4。可以看出,TCM桩的 c 值显著大于常规水泥土搅拌桩,说明TCM桩成桩质量较好,但 c 值随桩体深度波动明显,说明成桩质量随深度存在着一定的波动。单浆、四搅四喷成桩工艺下,芯样的内摩擦角 φ 有减小趋势。

4 结 语

(1)TCM桩不同深度的标准贯入击数和无侧限抗压强度优于常规水泥土搅拌桩,证实三维搅拌钻头有利于改善水泥浆液的入渗程度,显著提高桩身强度;

(2)TCM桩的芯样的黏聚力 c 显著大于常规水泥土搅拌桩,但 c 值随桩体深度波动明显,说明成桩质量随深度存在着一定的波动;

(3)不同供浆方式的成桩质量具有明显差异,单浆工艺形成的桩体不同深度标准贯入击数最大,一气一浆工艺形成的桩体芯样无侧限抗压强度最高。

参考文献:

- [1] 郭万鹏,冯祯辉,曹风旭,等. 水利工程软土地基勘察及处理技术[J]. 工程与建设,2022,36(2):375-376,433.
- [2] 刘松玉. 新型搅拌桩复合地基理论与技术[M]. 南京: 东南大学出版社,2014.
- [3] LIU S Y, DU Y J, YI Y L, et al. Field investigations on performance of T-shaped deep mixed soil cement column-supported embankments over soft ground [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(6):718-727.
- [4] 柏杨,姜晨冰,赵地,等. 水泥土搅拌桩在滨海软土地基加固中的应用[J]. 人民黄河,2022,44(增刊2):280-281.
- [5] 刘松玉,席培胜,储海岩,等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学,2007,134(3):560-564.

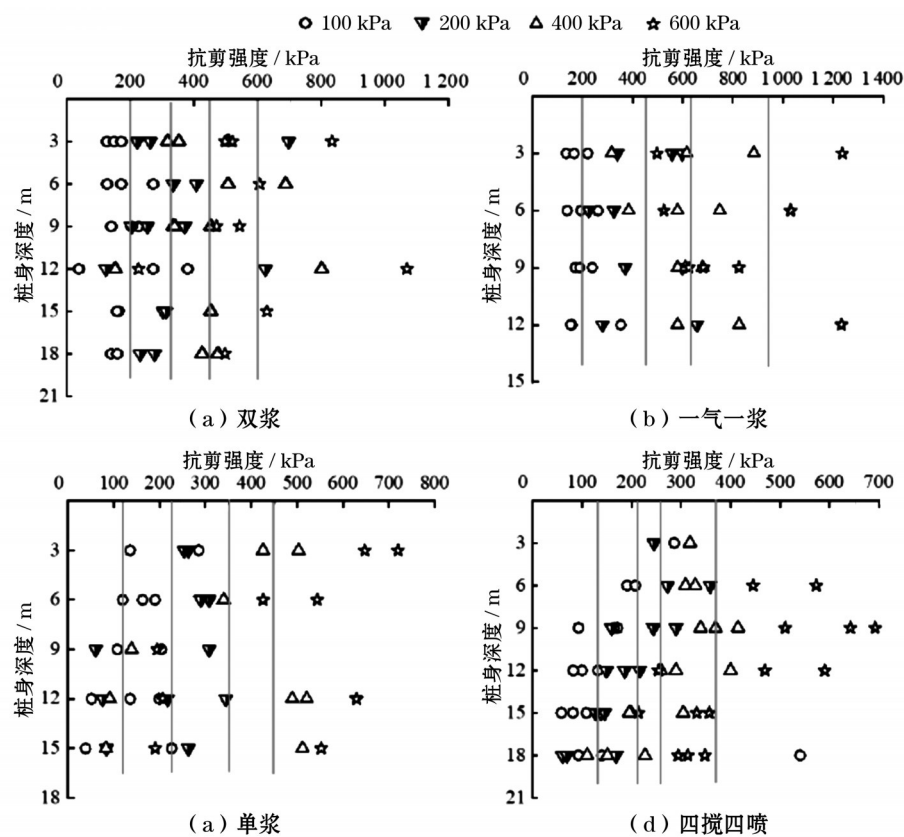


图6 芯样抗剪强度随取样深度的变化规律

表4 桩体不同深度芯样的直剪参数

序号	供浆方式	双浆		一气一浆		单浆		四搅四喷		原状土	
	直剪参数/m	c / kPa	φ / (°)	c / kPa	φ / (°)	c / kPa	φ / (°)	c / kPa	φ / (°)	c / kPa	φ / (°)
1	3	170	30	135	51	218	25				
2	6	172	40	35	54	205	23	160	28		
3	9	138	32	224	42	206	21	41	42		
4	12	178	38	33	62	172	23	46	33		
5	16	96	42			142	22	47	24		
6	18	106	35			130	22	40	22		
7	平均值	137	38	144	50	179	23	58	34	10.9	6.6

[6] 李仁民. 钉形水泥土双向搅拌桩施工技术及应用[J]. 建筑施工, 2007, 186(4): 230-232.

[7] 唐昌意, 刘文献, 吴章平, 等. 改进的海相淤泥搅拌桩成桩效果试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(6): 156-161, 70.

[8] 袁文俊, 蔡梓淇, 谢松, 等. 基于强度试验的水泥土搅拌桩施工综合参数研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(增刊1): 46-51.

[9] WEN T R. Study on construction parameter of cement deep mixing piles[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 20(31): 226-228.

[10] 吕国仁, 葛建东, 肖海涛. 水泥土搅拌桩沿海软基处理[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(3): 73-81.