

# 水泥土三维搅拌桩加固深厚淤土 堤基强度指标变化规律探讨

别 焯,王碧玉

(扬州苏水工程咨询有限公司,江苏 扬州 225127)

**摘要:**针对深厚淤土堤基中常规水泥土搅拌桩搅拌不充分、混合不均匀等问题,研发了一种三维搅拌钻头,开展三维水泥土搅拌桩成桩工艺现场试验,通过桩身芯样无侧限抗压强度及直接剪切试验得出桩体强度指标;并传统搅拌桩强度指标变化进行对比分析,研究其变化规律。结果表明:三维搅拌桩不同深度的无侧限抗压强度、直剪强度等指标优于常规水泥土搅拌。同时,根据对比分析,桩体芯样的内黏聚力随无侧限抗压强度的增加而增加,二者整体呈线性关系。

**关键词:**三维搅拌桩;水泥土搅拌桩;深厚淤土;无侧限抗压强度;直剪强度

中图分类号:TU473.1

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2024)11-0043-0005

## Discussion on variation law of strength index of cement-soil three-dimensional mixing pile in deep silt embankment foundation

BIE Ye, WANG Biyu

(Yangzhou Sushui Engineering Consulting Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of insufficient mixing and uneven mixing of conventional cement-soil mixing piles in deep silt embankment foundation, a three-dimensional mixing drill bit was developed, and the field test of three-dimensional cement-soil mixing pile forming process was carried out. The strength index of pile body was obtained by unconfined compressive strength and direct shear test of pile core sample. Compared with the change of strength index of traditional mixing pile, the change rule is studied. The results show that the unconfined compressive strength and direct shear strength of the three-dimensional mixing pile at different depths are better than those of the conventional cement-soil mixing. At the same time, according to the comparative analysis, the internal cohesion  $C$  of the pile core sample increases with the increase of the unconfined compressive strength, and the two have an overall linear relationship.

**Key words:** three-dimensional mixing pile; cement-soil mixing pile; deep silt; unconfined compressive strength; direct shear strength

### 1 研究背景

水泥土搅拌桩复合地基是一种常用的软土地基处理方法。自20世纪70年代传入我国,已得到广泛应用,并形成单轴单向、单轴双向以及SMW工法等多种形式的复合地基加固工艺,取得长足的发展<sup>[1-2]</sup>,但这些工艺技术在进行深厚淤土地基加固

时,仍然存在孔口冒浆、黏土抱钻或桩体强度偏低等现象<sup>[3-4]</sup>。基于我国处理沿海地区深厚淤土地基加固的实践需求,相关单位研发了三维搅拌桩设备,并已投入使用<sup>[5-7]</sup>。为验证工艺技术的可行性和装备的可靠性,依托某工程开展了工程性试验。

某工程区域内存在大范围厚度达30~35 m的淤土,其工程性质差,强度低,压缩性高,土层结构复

收稿日期:2024-08-18

作者简介:别焯(1996—),女,助理工程师,硕士,主要从事水利规划与设计。E-mail:2457800804@qq.com

杂。随着工程建设的开展需对该范围内的淤土地基进行加固,其中:③-1层:灰色淤泥质黏土、重黏土、粉质黏土,局部黏土、重黏土质淤泥,夹砂壤土薄,局部互夹,含腐殖质。允许承载力约60 kPa,场地广泛分布,层厚8.2~23.4 m。③-1'层:灰色淤软粉质黏土、重粉质壤土夹砂壤土薄层,局部互层,含腐殖质。允许承载力约70 kPa,层厚0.7~19.5 m。为满足堤防的抗滑稳定需求,并减少堤防沉降,拟对深厚淤土段采用搅拌桩进行加固。

为满足设计要求,通过现场试验开展成桩参数和桩体质量指标研究,本文仅就桩体强度指标即芯

样无侧限抗压强度( $f_{cu}$ )与直剪强度( $c$ )开展分析,不涉及桩体其他检测指标。

## 2 试验方案设置

为选择合适的搅拌桩成桩工艺及过程控制参数,并为设计提供技术支撑,试验采用三维搅拌进行现场成桩试验,成桩直径0.8 m,桩间距2.0 m,梅花形布设,打设桩长20 m,水泥浆水灰比为0.8,水泥掺入比分别为13%、15%、18%。另设置传统搅拌桩作为对照组。现场试桩方案见表1,现场试桩布置如图1所示。

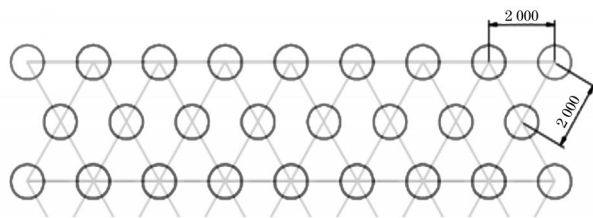


图1 现场成桩示意图(单位:mm)

表1 现场成桩方案

序号	水泥掺入比/%	水灰比	成桩工艺	方案缩写
1	13	0.8	单管供浆	三维搅单浆-0.8-13%C-2
2	15	0.8	单管供浆	三维搅单浆-0.8-15%C-2
3	18	0.8	单管供浆	三维搅单浆-0.8-18%C-2
4	13	0.8	单管供浆	三维搅单浆-0.8-13%C-1
5	15	0.8	传统搅拌桩	传统四搅四喷-0.8-15%C-0

表中每种方案成桩8根,共40根,试验桩施工完成后做好标记,待桩体龄期达到28 d后开展成桩质量检测,每根桩布设3个取芯孔,取芯孔圆心离桩圆心约20 cm,按桩长每3 m取一组,取芯深度位置分别为3、6、9、12、15、18 m,开展无侧限抗压强度和直剪强度检测。

## 3 强度指标分析

### (1)无侧限抗压强度 $f_{cu}$

各试验组桩在28 d凝期后,开展取芯强度指标检测。图2为各方案的桩体不同深度的 $f_{cu}$ 检测结果。可见:桩体不同深度的 $f_{cu}$ 总体呈现随深度的增

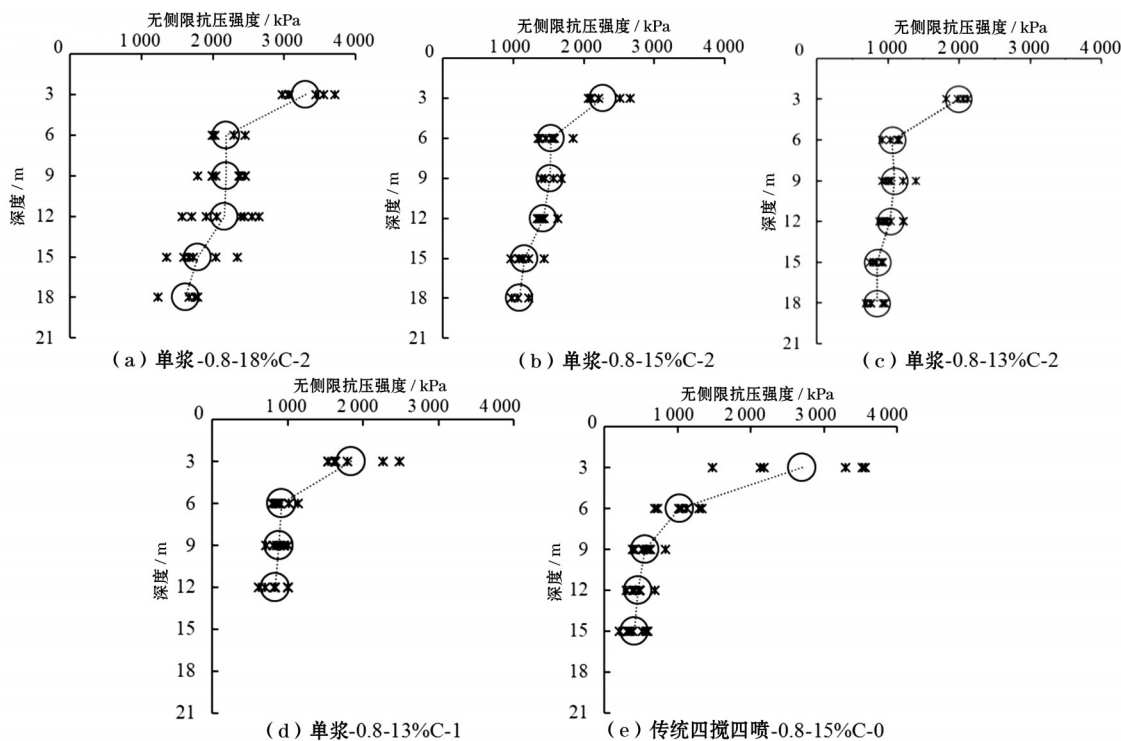


图2 不同方案下无侧限抗压强度与深度的关系

加而减小的趋势;但 $f_{cu}$ 随水泥掺量增加而提高,随着水泥掺量从13%增加至18%,桩体中下部每提高1%水泥掺量 $f_{cu}$ 提高200 kPa以上。同时可见,三维搅拌与传统搅拌桩工艺相比,三维搅拌钻头形成桩体芯样的 $f_{cu}$ 明显提高,尤其在桩体中下部达到2倍以上。

以上不同深度的 $f_{cu}$ 统计汇总详见表2。

## (2)直剪强度( $c$ )

各试验组桩在28 d凝期后,开展取芯强度指标检测,图3是5种方案的桩体不同深度芯样的直接剪切试验的检测结果。

根据图3不同深度芯样的直剪试验结果进行线性拟合,确定桩体不同深度处的直剪强度,结果见表3。按照表3成果绘制图4。

表2 不同深度的 $f_{cu}$ 统计汇总

序号	方案	0~3 m	3~12 m	12~20 m
1	单浆-0.8-18%C-2	> 2.0 MPa	2.2 MPa	1.7 MPa
2	单浆-0.8-15%C-2	> 2.0 MPa	1.5 MPa	1.1 MPa
3	单浆-0.8-13%C-2	> 2.0 MPa	1.0 MPa	0.8 MPa
4	单浆-0.8-13%C-1	> 2.0 MPa	0.9 MPa	/
5	传统四搅四喷-0.8-15%C-0	> 2.0 MPa	0.5 MPa	/

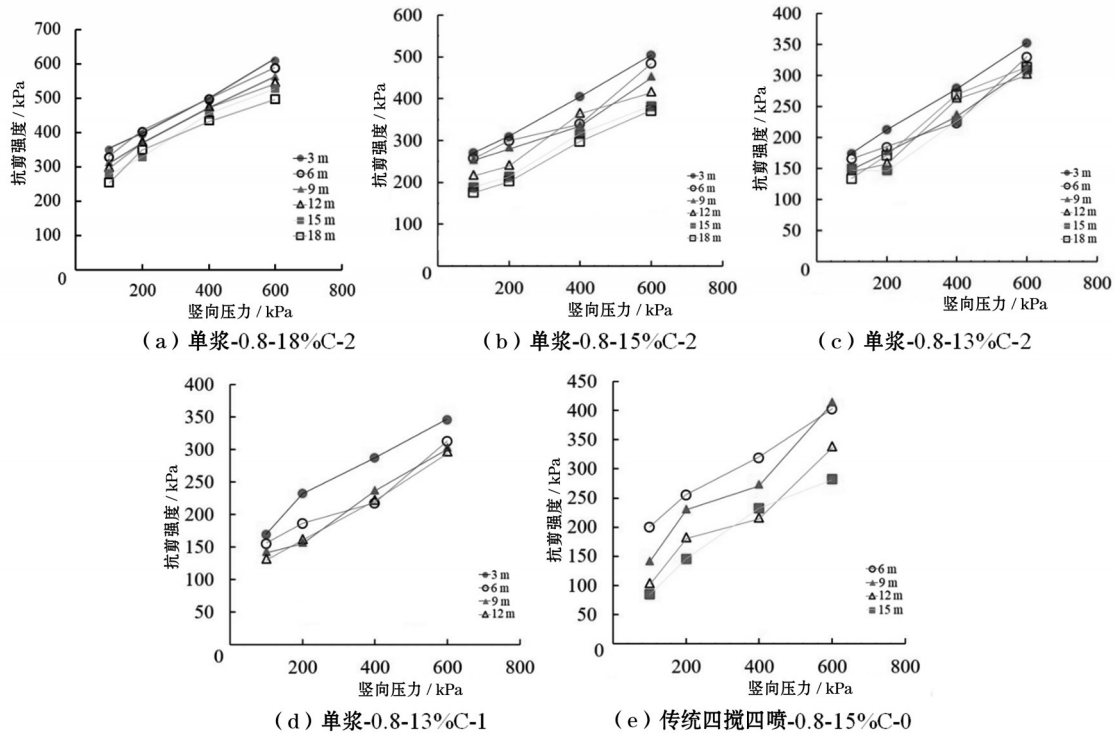


图3 不同方案下直剪强度与深度的关系

表3 各方案桩体不同深度芯样的直剪试验结果

方案	单浆-0.8-18%C-2		单浆-0.8-15%C-2		单浆-0.8-13%C-2		单浆-0.8-13%C-1		传统四搅四喷-0.8-15%C-0	
	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$
3 m	292	27	218	25	139	19	149	18	166	21
6 m	288	27	205	23	121	18	120	16	102	26
9 m	271	26	206	21	115	18	101	18	71	23
12 m	265	26	172	23	107	19	96	18	58	21
15 m	231	27	142	22	98	19	/	/		
18 m	233	25	130	22	100	20	/	/		
平均值	263	26	179	23	113	19	117	18	99	23

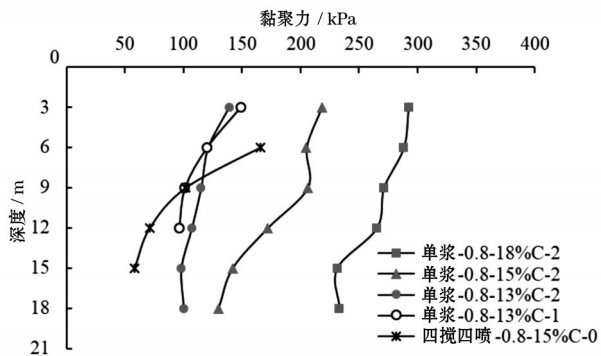


图4 各方案桩体不同深度芯样的直剪强度( $c$ )随深度变化规律

由图4可见,不同深度桩体芯样的直剪强度总体也呈现随深度的增加而减小的趋势。与传统搅拌桩工艺相比,三维搅拌工艺形成桩体芯样的直剪强度明显提高,水泥掺量15%的情况下直剪强度提高约80%。同为三维搅拌工艺时,桩体芯样直剪强度随水泥掺量增长明显提高,水泥从13%增加至18%,每提高1%水泥掺量直剪强度提高约30kPa。

## 4 无侧限强度与直剪强度关系分析

水泥土强度的形成是由于土和水泥水化物之间的物理化学反应,这种物化反应是以物理吸附和化学附着的相互作用的形式产生的,随着含水化合物结晶的长大并与土颗粒相搭接,形成空间网络结构,持续增强水泥土强度。大量试验数据表明决定水泥土搅拌桩强度的主要因素为土的物理力学性质和水泥掺量,针对特定的深厚淤土地基加固工程,桩体内实际掺入的水泥量成为决定桩体强度的关键因素。三维搅拌桩保留了传统水平搅拌叶片,还设置了竖向搅拌装置,改变了水泥浆液在土层中的运动状态,封堵了浆液上涌通道,增加了有效搅拌次数,从而显著提升桩体强度指标。通过本次试验数据表明三维搅拌桩的芯样无侧限抗压强度和直剪强度均得到显著提高,符合一般规律。

为便于分析三维搅拌桩在相同土质中的 $f_{cu}$ 和 $c$ 的关系,在剔除桩顶部分的异常数据后得到表4,根据表4的数据绘制各方案桩体 $c$ 随 $f_{cu}$ 的变化规律

表4 各方案不同深度下桩体无侧限抗压强度随直剪强度的变化规律

方案	单浆-0.8-18%C-2		单浆-0.8-15%C-2		单浆-0.8-13%C-2		单浆-0.8-13%C-1	
	$f_{cu}$ / kPa	$c$ / kPa	$f_{cu}$ / kPa	$c$ / kPa	$f_{cu}$ / kPa	$c$ / kPa	$f_{cu}$ / kPa	$c$ / kPa
6 m	2 238	288	1 618	205	1 114	121	950	120
9 m	2 150	271	1 588	206	1 040	115	900	101
12 m	2 140	265	1 488	172	987	107	707	96
15 m	1 708	231	1 237	142	800	98		
18 m	1 758	233	1 156	130	810	100		

曲线,见图5。从图5可以看到,不同方案桩体芯样的 $c$ 随 $f_{cu}$ 的增加而增加,二者整体呈线性关系,得出曲线拟合公式: $c=0.1346f_{cu}-15.663$ 。

## 5 结 论

(1)在深厚淤土工况下三维搅拌桩不同深度的无侧限抗压强度优于常规水泥土搅拌桩,验证了三维搅拌钻头有利于改善水泥浆液的渗入程度,能够显著提高桩身强度;

(2)三维搅拌桩芯样的直剪强度 $c$ 显著大于常规水泥土搅拌桩,但 $c$ 值随桩体深度不同波动明显,说明成桩质量随深度变化存在着一定的波动;

(3)三维搅拌桩桩体芯样的直剪强度随无侧限

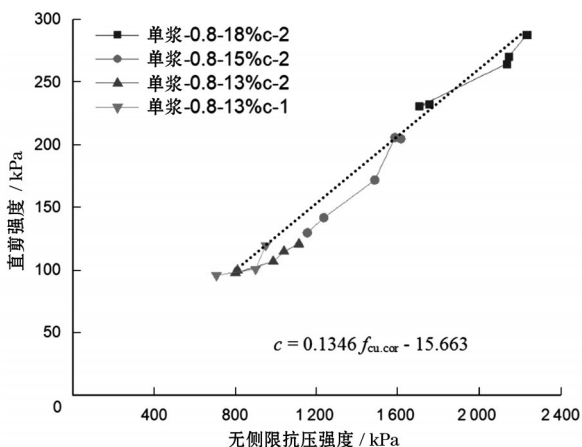


图5 各方案桩体不同深度芯样的无侧限抗压强度与直剪强度的变化规律

抗压强度的增加而增加,二者整体呈线性关系,得出强度关系公式为: $c=0.1346f_{cu}-15.663$ 。

#### 参考文献:

- [1] YI Y, LI C, LIU S. Alkali-activated ground-granulated blast furnace slag for stabilization of marine soft clay[J]. Materials in Civil Engineering, 2015, 27(4).
- [2] 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(3):560-564.
- [3] 郭万鹏,冯祯辉,曹凤旭,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.
- [4] 倪春海,李凯.水泥土搅拌桩桩身强度的分析和探讨[J].建筑安全, 2022, 37(5):12-14.
- [5] 姚达,王希晨,赵虎,等.三维水泥土搅拌桩成桩工艺现场试验[J].江苏水利, 2023(7):63-67.
- [6] 曾玲玲,王月娇,卞夏,等.“土力学”科教融合课程建设探讨[J].教育教学论坛, 2023(52):92-96.
- [7] 郭斌,彭帅,商兆涛,等.三轴搅拌桩对盾构隧道始发端变形影响三维数值模拟研究[J].安徽建筑, 2022, 29(7):125-127.

(上接第42页)

#### 参考文献:

- [1] 徐西群.基于有限元的高分子聚合物板桩结构设计与研究[D].扬州:扬州大学, 2019.
- [2] 严刘伟,王新华,岳明昊,等.生态护岸的类型及应用[J].科学技术创新, 2020(6):132-133.
- [3] 张竞,叶素飞.新型高分子仿木桩结构性能分析[J].农业装备技术, 2022, 48(3):38-40.
- [4] 王雪红,袁海霞.高分子板桩在城市河道护岸工程中的应用[J].江苏水利, 2021(8):10-14.
- [5] 张冲. PVC板桩的制备及其耐老化性能研究[D].扬州:扬州大学, 2018.
- [6] 徐光明,章为民.离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J].岩土工程学报, 1996, 18(3):80-86.
- [7] 章刘洋.地基对大直径桩的水平静力和循环抗力数值分析研究[D].杭州:浙江大学, 2018.
- [8] 韦源源,杨过,龚俊杰,等.新型高分子聚合物板桩结构分析[J].机械工程与自动化, 2020(6):66-67.
- [9] 中国建筑科学研究院.建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012[S].北京:中国建筑工业出版社, 2012.