

# 三轴搅拌桩技术在地铁车站施工中的应用研究

豆红尧 朱春柏 刘志贺

江苏中车城市发展有限公司

**摘要:**在软土地区地铁建设过程中常碰到淤泥质土层,深基坑开挖前需对土体进行加固,以提高其强度和稳定性。本文以软土地区实际工程为例,采用三轴搅拌桩施工技术对淤泥质土层深基坑土体加固,介绍三轴搅拌桩施工工艺及施工参数,对三轴搅拌桩施工前进行试桩,并经过检测合格后形成总结,为车站后续施工提供技术保障,也为同类工程施工提供借鉴参考。

**关键词:**深基坑;三轴搅拌桩;试桩

**【DOI】**10.12254/j.issn.2096-6539.2023.07.062

## 引言

当前,城市过道交通发展迅猛,轻轨或地铁车站深基坑施工难度大,风险高,三轴搅拌桩作为土体改良一种施工技术,在软弱土层的基坑开挖及支护施工过程中具有重要作用,因此加强三轴搅拌桩施工技术研究和应用,探索和优化合理的施工参数尤为迫切和重要<sup>[1-4]</sup>。

### 一、工程设计概况

#### (一)工程概况

体育场站采用明挖顺作法施工,基槽四周采用地下连续墙作围护,槽壁加固为单排Φ850@600搅拌桩。车站基坑内土体需进行抽条和裙边加固,采用三轴搅拌桩施工工艺,裙边宽度3.25m、抽条宽度2.65m、间距3m。抽条实桩加固范围深度为3m,裙边实桩加固范围深度为4m。车站坑外阳角处采用三轴搅拌桩加固,加固深度为地表至坑底以下3m。三轴水泥土搅拌桩采用42.5级普通硅酸盐水泥。Φ850@600三轴搅拌桩规格如图1.1-1所示。

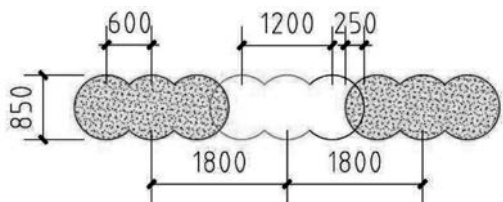


图1.1-1三轴搅拌桩规格

#### (二)地质条件

根据地勘报告,施工场地地貌为海积平原,地形平缓开阔,绝对标高在2.5~4.0m之间。地质情况如下:(1)0填土,0~1.43m杂色松散~稍密,主要由黏性土、碎砖石等组成,(2)2淤泥1.43~13.97m灰色流塑土质较均匀,具高压缩性,标贯锤击平均值1.05击,(3)1黏土13.97~16.77m黄褐色可塑偏硬具中压缩性,标贯锤击平均值13.09击,(3)2黏土16.77~20.47m灰色软塑具高压缩性,标贯锤击平

均值5.69击。体育场站场地地下水类型主要为赋存于浅部黏性土层中的孔隙潜水及下部碎砂砾石层中的孔隙微承压水。

### (三)主要技术参数

依据设计图纸,体育场站搅拌桩深度为27.23m,可利用“三喷四搅”或“四喷四搅”方法,工艺参数:钻进速度0.5m/min~1.0m/min、提升速度1m/min~2m/min、喷浆压力0.4~0.6MPa、水灰比1.5,裙边加固和抽条加固空桩搅拌水泥掺量同为8%,实桩水泥掺量分别为20%和15%;地连墙阴角和槽壁加固实桩水泥掺量为15%,强度要求28天龄期后桩身无侧向抗压强度不小于1MPa。同时,应结合机械设备性能和实际地质情况进行成桩工艺试验,数量不得少于3根,以保证搅拌桩达到设计所需要的桩长、直径及强度等要求,通过试桩调整施工参数。

## 二、施工技术方案

### (一)确定水泥用量

参照地勘报告,该基坑需加固土体为淤泥质黏土,首先应根据图纸要求的来计算每米桩身的水泥使用量,常用计算方法如下:

水泥量(t)=土的天然密度(t/m<sup>3</sup>)×需加固土体积(m<sup>3</sup>)×设计水泥掺量(1)土体容重按各土层加权容重计算,深度取最长桩长27.23m:

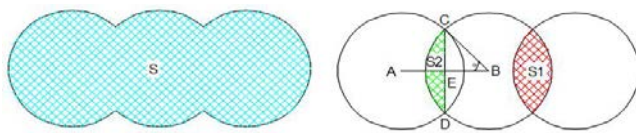
加权容重=每层土天然密度与层厚乘积之和/每层土厚度之和

$$= (1.8 \times 1.43 + 1.69 \times 12.54 + 1.92 \times 2.8 + 1.75 \times 3.7 + 1.88 \times 6.76) / 27.23$$

$$= 1.77 \text{ t/m}^3$$

试桩区域土层特性及物理参数取值如下:(1)0素填土,层厚1.43米,天然密度1.80g/cm<sup>3</sup>;(1)黏土,层厚12.54米,天然密度1.69g/cm<sup>3</sup>;(2)淤泥,层厚2.8米,天然密度1.92g/cm<sup>3</sup>;(3)1黏土,层厚3.7米,天然密度1.75g/cm<sup>3</sup>;(3)2黏土,层厚6.76米,天然密度1.88g/cm<sup>3</sup>;

### (2)计算三轴搅拌桩理论面积:



$$S = 3 * (\pi r^2) - 2 * S1$$

$$= 3 * (\pi r^2) - 2 * (2 * S2)$$

$$= 3 \pi r^2 - 4 * (2a * \pi r^2 / 360 - 0.5 * 2 * (r^2 - AB * AB / 4) - 0.5 * AB / 2)$$

$$=3\pi r^2 - 4 * (2\arccos(AB/2r) * \pi r^2 / 360 - (r^2 - AB * AB / 4) * 0.5 * AB / 2) = 1.495\text{m}^2$$

注：S为截面面积；r为单桩半径，取值425mm；S1为2个单桩重叠阴影面积；S2为2个单桩重叠阴影面积的一半；a为2个单桩重叠弧线对应圆心角的一半；AB为2个单桩之间的间距。

(3) 每幅桩截面积1.495m<sup>2</sup>，每幅桩每米体积1.495m<sup>3</sup>，每幅桩每米被加固土体质量1.495×1.77=2.646t。

每幅桩每米长所需水泥质量：

空桩（水泥掺量8%）：212.6kg；实桩1（水泥掺量15%）：396.9kg；实桩2（水泥掺量17%）：449.8kg；实桩3（水泥掺量20%）：529.2kg；实桩4（水泥掺量22%）：581.1kg。以上各桩的现场控制水泥用量不超过规定值的±5%。

(二) 水泥浆液的配制

合理地控制浆液水灰比对桩基施工质量是至关重要的，浆液过稀或过浓都会影响桩身缺浆和少浆，进而影响土体加固的强度质量。首先根据场地确定合理的制浆供浆位置，尽量减少供浆距离，避免因线路过长堵塞管道和损失压力；其次，严格安装确定后的水灰比制造浆液，不可随意更改比例，应保证制出的浆液具有较好的和易性和流动性，水泥浆得到黏稠度可以采用泥浆比重计来控制，水泥浆液一般为1.5；施工过程中，钻机操作手应注意观察桩口冒浆情况，当桩端存在冒浆情况，应适当调整水泥浆浓度，以保证三轴成桩质量。

三、施工工艺及试桩参数

(一) 工艺流程图

图3.1-1从左到右分别为三轴搅拌桩施工工艺流程图、三轴搅拌桩两喷两搅两搅钻进施工步骤图和三喷四搅钻进施工步骤。

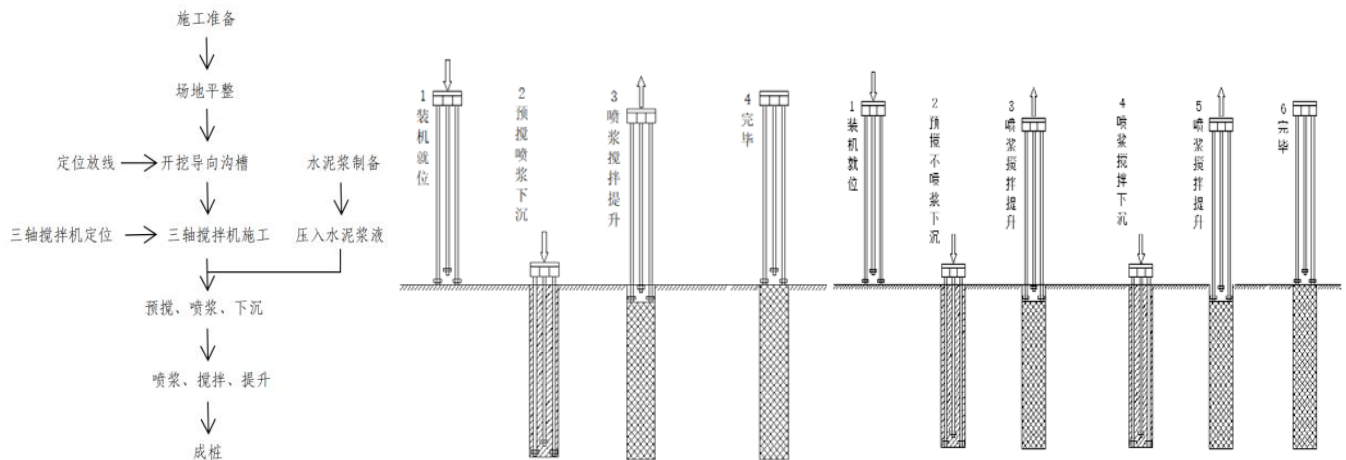


图3.1-1 工艺流程图、两喷两搅、三喷四搅步骤图

(二) 试桩施工采用参数

试桩施工工艺采用“两喷两搅及三喷四搅”，在两喷两搅过程中下沉喷浆量控制在水泥总掺量的2/3，提升喷浆量控制在水泥总掺量的1/3；在三喷四搅过程中下沉喷浆量控制在水泥总掺量的1/2。两侧提升喷浆量

控制在水泥总掺量的1/4。严格控制每桶的液面高度及水泥用量，总量控制用水量。控制三轴搅拌机钻杆下沉速度在0.5m/min~1m/min范围，提升钻杆速度为1m/min~2m/min之间，喷浆压力宜为0.4~0.6Mpa，水灰比：1.5~2.0。

表3.2-1 单幅搅拌桩水泥计算用量与实际试桩用量对比表

序号	空桩		实桩		水灰比	搅拌转速 (r/min)	泥浆流速 (L/min)	泥浆比重	搅拌方式	备注
	空桩长 (m)	水泥掺量 (%)	长度 (m)	水泥掺量 (%)						
SZ1	/	/	26.83	15	1.5	70	145*2	1.37	两喷两搅	为保证桩顶质量，实桩增加50cm，空桩减少50cm
SZ2					1.5	70	145*2	1.37	三喷四搅	
SZ3	/	/	26.83	17	1.5	70	145*2	1.37	两喷两搅	
SZ4					1.5	70	145*2	1.37	三喷四搅	
SZ5	23.23	8	4	20	1.5	70	145+250	1.37	两喷两搅	
SZ6					1.5	70	145+90	1.37	三喷四搅	
SZ7	23.23	8	4	22	1.5	70	145+250	1.37	两喷两搅	
SZ8					1.5	70	145+90	1.37	三喷四搅	

表3.2-2 三轴水泥搅拌桩试桩钻进速度参照表

分组	SZ1	SZ2	SZ3	SZ4	SZ5	SZ6	SZ7	SZ8
两喷两搅实桩下沉速度 (m/min)	0.60	/	0.53		0.61		0.56	
两喷两搅实桩提升速度 (m/min)	1.20	/	1.06		1.23		1.12	
两喷两搅空桩下沉速度 (m/min)	/	/	/		2.0		2.0	
两喷两搅空桩提升速度 (m/min)	/	/	/		2.0		2.0	
三喷四搅实桩下沉速度 (m/min)	/	0.80	/	0.71	/	0.82	/	0.74
三喷四搅实桩提升速度 (m/min)	/	1.60	/	1.41	/	1.64	/	1.49
三喷四搅空桩下沉速度 (m/min)	/	/	/		/	2.0	/	2.0
三喷四搅空桩提升速度 (m/min)	/	/	/		/	2.0	/	2.0

(三) 施工记录

试桩过程中应严格做好施工记录，以确定达到试验目标。三轴搅拌桩施过程应按有关标准详细记载①施工桩号、日期和天气情况；②喷浆深度、停浆标高；③工

作泵和管道压力；④钻机转动、钻进和提升速度；⑤浆液流量；⑥每米喷浆量和外掺剂用量；⑦复搅深度，深度、停浆标高；⑧复搅深度，同时还应记录过程中发生的异常情况。

水泥用量对比表

幅编号	水泥掺量	设计水泥用量 (t)	实际水泥用量	搅拌方式	备注
SZ1	15%	9.22	9.89	两喷两搅	水泥掺量在15%的水泥掺量基础上提高2%水泥掺量，到达17%水泥掺量，按照两喷两搅及三喷四搅工艺各做一组，共做4幅；基坑上部采用水泥掺量8%空搅，基坑下部4m范围内水泥掺量在20%的掺量基础上提高2%水泥掺量，达到到达22%水泥掺量，按照两喷两搅及三喷四搅工艺各做一组，共做4幅。
SZ2	15%	9.22	9.89	三喷四搅	
SZ3	17%	10.45	10.6	两喷两搅	
SZ4	17%	10.45	10.6	三喷四搅	
SZ5	20%	7.033	7.1	两喷两搅	
SZ6	20%	7.033	7.1	三喷四搅	
SZ7	22%	7.245	7.18	两喷两搅	
SZ8	22%	7.245	7.18	三喷四搅	
合计		67.896	69.54		

四、试桩结果检测

试桩完成28天后，对三轴搅拌桩试验桩进行钻孔取芯工作，取芯样品整体情况在地下0-25m范围内较为完整连续，25m~27.23m范围存在部分搅拌不均匀情况，但芯样无侧限抗压强度均能满足设计要求，如图4-1。



图4-1 试桩钻芯取样

结论

经过试验结果对比分析，SZ1-1至SZ1-8试验结果均满足设计要求。根据取芯状况观察，对比分析试桩检测结果，当空桩水泥掺量为8%，实桩水泥掺量为20%时，取芯样品连续性较好，成桩效果较理想，且自检和第三方检测结果一致。综上所述，三轴搅拌桩试桩处理结果有效，且成桩质量好，土体加固效果可得到保证，可用于指导施工，该试桩施工为后续施工提供了技术保障，也为同类工程基坑土地加固施工提供借鉴和参考。

参考文献

[1]于占福,李庆,乔宏政,等.深基坑水泥搅拌桩软土加固应用[J].珠江水运.2022.(07)  
 [2]刘德欣,刘志贺,过锦,等.复杂环境条件下软土地基地铁车站基坑变形特性与控制[J].地基处理.2020.(06)  
 [3]彭学军,等.五轴水泥搅拌桩施工技术在城市地铁工程中的应用[J].企业技术开发.2019.(07)  
 [4]张彦平,等.迎宾三路隧道深基坑施工关键点的监控措施[J].建筑知识:学术刊.2012.(02)