

# 水泥搅拌桩在软基处理施工中的应用与研究

许繁 郭昌燮 蔡志鹏 雷连发 齐果永

中建四局建设发展有限公司 福建厦门 361000

**摘要:**本工程属于沿海市政道路工程,距离海边直线距离980米,地质条件复杂,地表水终端与海水相连,地表水和地下水均受海水潮汐影响。本文首先从技术可行性和经济合理性方面对水泥搅拌桩施工进行分析,明确采用水泥搅拌桩的优势,继而在水泥搅拌桩施工过程的质量控制进行研究,保障桩基施工一次验收合格率。

**关键词:**水泥搅拌桩;沿海;软基处理;质量

## 引言

水泥搅拌桩于20世纪70年代由日本开始推广使用,我们国家于20世纪80年代正式应用于实践。处理正常固结淤泥和淤泥质土、素填土、黏性土(软塑和可塑)、粉土(稍密和中密)、粉细砂(松散和中密)、中粗砂(松散和稍密)以及饱和黄土<sup>[1]</sup>。经过40多年的发展,水泥搅拌桩在全国范围内得到了广泛应用,特别是沿海地区软基处理,更体现出水泥搅拌桩在缩短工期、降低造价、环境影响小具有明显优势。本文依托古雷乡村振兴精细化工富民示范产业园一期-石化四路(一期)工程对水泥搅拌桩在沿海地区软基处理施工中的应用和质量控制进行研究,系统阐述水泥搅拌桩的优势以及施工质量控制,为后续同类型水泥搅拌桩施工提供借鉴。

## 1. 工程概况

古雷乡村振兴精细化工富民示范产业园一期-石化四路(一期)工程位于漳州古雷港经济开发区,实施长度为1.596千米,道路宽度40米,按照城市主干路标准进行设计,设计的行车速度为每小时60公里。六车道双向通行,车行道为沥青路面,人行道、非机动车道共用,铺设地砖。由于本项目线路所在地均为软基地基,因此在进行路基填筑前需要对软基进行相应处理。

## 2. 软基处理方案比选

### 2.1 技术可行性比选

#### 2.1.1 常用软基处理办法

目前我国市政道路中常用的软基处理方法及其分析比较详见下表。

表1 常用软基处理方法优缺点及适用范围

处理方法	优点	缺点	适用范围
水泥搅拌桩	能够最大限度的利用原状土的承载力,工艺简单,施工速度快,适用范围广,环境影响小。	成本相对较高,处理深度不宜大于20m,质量不易控制。	处理正常固结淤泥和淤泥质土、素填土、黏性土(软塑和可塑)、粉土(稍密和中密)、粉细砂(松散和中密)、中粗砂(松散和稍密)以及饱和黄土 <sup>[1]</sup> 。
高压旋喷桩	施工占地小,振动小,噪音低。	成本较高(比水泥搅拌桩高得多),易污染环境。	处理淤泥、淤泥质土、黏性土(流塑、软塑和可塑)、粉土、砂土、黄土、素填土和碎石土等地质 <sup>[1]</sup> 。
换填法	施工简单,易于操作和检测。	处理深度有限。	淤泥、淤泥质土、湿陷性黄土、素填土、杂填土地基及暗沟(塘)等的浅层处理。处理深度不大于3m,同时也不宜小于0.5m <sup>[1]</sup> 。
强夯法	造价低,施工机具简单,施工速度快。	施工噪音大,深层难于达到密实要求。	砂土、碎石土、湿陷性黄土、杂填土、素填土、低饱和度的粉土和粘性土 <sup>[1]</sup> 。
堆载预压法	工序简单,质量易于控制,成本较低	工期较长。	处理淤泥质土、淤泥、冲填土等饱和黏性土地基 <sup>[1]</sup> 。

### 2.1.2 石化四路(一期)工程地形地貌、地质情况

拟建场地地貌单元属海相沉积地貌单元,本场地现状大部分区域为盐田,局部为排洪渠、土路及虾池,现状地面标高1.46~3.23m。

场地在钻孔揭露深度范围内所分布的地层主要为第四

系人工填土层(Q4ml)(素填土①1、杂填土①2、耕植土①3)、冲海积层(Q4al+m)(淤泥质土②1、粉质粘土②2、淤泥质土②3、中砂②4、粗砂②5)以及主要形成于中更新统的残积层Qel(残积砂质粘性土③)及下伏燕山早期花岗岩基岩风化层γ52(3)c(全风化花岗岩④1、砂砾

状强风化花岗岩④2、碎块状强风化花岗岩④3、中风化花岗岩④4)等组成。

### 2.1.3 技术可行比选

本工程软弱土层深度 5.5-15.5m, 且工期要求严格, 根据表 1, 符合要求的软基处理方法有水泥搅拌桩、高压旋喷桩。

### 2.2 经济合理性比选

水泥搅拌桩每米水泥掺入量远小于高压旋喷桩, 造价一般比高压旋喷桩少一半以上; 且高压旋喷桩喷浆提升速度远慢于水泥搅拌桩, 同样工程量的软基处理, 水泥搅拌桩能节省一半的工期, 从而节约人工费、机械使用费等。

### 2.3 最终软基处理方案确定

表 2 软基处理方案确定

常用软基处理方法	技术可行性	经济合理性	最终方案
水泥搅拌桩	<input checked="" type="checkbox"/> 可行	<input checked="" type="checkbox"/> 可行	
高压旋喷桩	<input checked="" type="checkbox"/> 可行	<input type="checkbox"/> 成本远高于水泥搅拌桩	
换填法	<input type="checkbox"/> 处理厚度不满足要求	/	水泥搅拌桩
强夯法	<input type="checkbox"/> 地质情况不满足要求	/	
堆载预压法	<input type="checkbox"/> 工期、地质情况不满足要求	/	

### 3. 水泥搅拌桩在本工程中的运用

单根实桩长 6.5m-10.5m 不等, 空桩长 0.5m, 桩根数达 46800 根。按梅花状、正三角形式布置, 直径均为 0.5m, 间距均为 1.2m, 固化剂水泥采用 R42.5 级普通硅酸盐水泥; 经过室内配合比试验, 确定水泥掺量为被加固湿土质量的 19%、水泥浆液水灰比宜采用 0.55; 单桩承载力特征值  $\geq 100\text{KN}$ , 复合地基承载力特征值  $\geq 100\text{Kpa}$ , 桩体 28d 侧限抗压强度  $\geq 1.2\text{Mpa}$ , 90d 无侧限抗压强度  $\geq 1.8\text{Mpa}$ 。

正式桩基施工前通过 3 根试桩获取了满足石化四路(一期)工程要求的有关施工参数, 并在成桩 28 天后进行试验检测, 主要包括钻孔取芯、单桩竖向静载试验、复合地基承载力试验等。根据第三方出具的相关报告, 水泥搅拌桩各项检测达标, 因此在本工程地质情况下, 使用水泥搅拌桩进行软基处理可以满足需要。

### 4. 水泥搅拌桩施工质量控制研究

水泥搅拌桩施工的质量不易控制, 因此对质量控制研究具有重要的意义, 通过研究, 找到容易产生质量问题的点, 继而针对性解决问题, 提升施工质量。

#### 4.1 前期调查

在前期施工调查中, 就水泥搅拌桩质量问题, 共进行 50 次检测, 其中合格次数 38 次, 不合格次数 12 次, 一次验收合格率 76%。具体不合格次数分布如下表所示:

表 3 水泥搅拌桩施工质量缺陷调查统计表

序号	缺陷类型	频数(点)	频率(%)	累计评率
1	强度不足	5	41.67%	41.67%
2	桩体不均匀	4	33.33%	75.00%
3	垂直度差	1	8.33%	83.33%
4	桩径不足	1	8.33%	91.67%
5	桩长不够	1	8.33%	100%
合计		12		

强度不足和桩体不均匀占到总因素的 75%, 如果能够解决这两个关键问题, 则可提高水泥搅拌桩施工质量一次合格率至:  $(38+9) / 50=94\%$ 。

#### 4.2 原因分析

针对水泥搅拌桩施工质量一次合格率偏低的主要症结强度不足和桩体不均匀, 编制关联图进行原因分析, 共找到 11 个末端影响因素: (1) 人员培训不足; (2) 叶片和喷嘴设置不合理; (3) 设备性能不足; (4) 钻头磨损过大; (5) 水泥受潮结块, 强度不足; (6) 喷浆量不足; (7) 输浆管堵塞; (8) 复搅不到位; (9) 喷浆频率与搅拌提升不匹配; (10) 转速与提升速度不匹配; (11) 钻进、搅拌速度控制不当。

#### 4.3 确定主要原因

通过找到的末端因素, 制定相关验证方法和标准, 见下表。

表 4 要因验证方法和标准

序号	因素	验证方法	验证标准
1	人员培训不足	调查、分析	应按要求对作业人员进行技术交底培训合格才能上岗
2	叶片和喷嘴设置不合理	调查、分析	应能保证土体内任意一点搅拌 20 次以上，并保证出浆均匀
3	设备性能不足	调查、分析	应能满足压力、转速、钻进速度、提升速度等要求
4	钻头磨损过大	现场测量	钻头直径磨损量不得大于 1cm
5	水泥受潮结块，强度不足	调查、验证	水泥进场应检验合格，受潮结块后的水泥不得使用
6	喷浆量不足	调查、验证	每米水泥用量不少于 66.7kg
7	输浆管堵塞	现场调查	输浆管长度不大于 60m，防止因长度过长而堵塞，并应经常检查不得堵塞
8	复搅不到位	调查、分析	应在设计范围内全桩复搅
9	喷浆频率与搅拌提升不匹配	调查、分析	边提升边喷射边搅拌，尽可能搅拌均匀，使软土与固化料充分混合，喷射量与提升速度相匹配，如一次喷浆不能达到设计要求，应采用两次喷浆
10	转速与提升速度不匹配	调查、分析	每提升 20mm，钻头搅拌不少于 1 圈
11	钻进、搅拌速度控制不当	调查、分析	搅拌速度 30 转 /min，钻进速度 1.0m/min

最终找到主要原因为：①叶片和喷嘴设置不合理；②喷浆频率与搅拌、提升不匹配。

#### 4.4 制定对策与实施

##### 4.4.1 针对叶片和喷嘴设置不合理

(1) 原使用叶片为 2 层 4 片，现改造成 4 层 8 片。将下面 2 层叶片沿旋转时的切土方向适当倾斜，使土体内单点搅拌次数均达到 20 次，并保证切土搅拌均匀。

(2) 原来桩机出浆口在搅拌轴底，先经过改造，将其移至搅拌叶片的中部位置，确保搅拌均匀出浆。

(3) 对策目标验证：对策实施后，切土搅拌均匀，且未出现水泥浆在桩轴出浆口附近集中而叶片边缘缺失的情况，出浆均匀。目标实现。

##### 4.4.2 针对喷浆频率与搅拌、提升不匹配

(1) 每次搅拌机下沉和上升过程的时间指定人员进行记录，误差控制在 5 秒以内，钻杆提升前需等待浆料送达桩底，以免发生提升时浆料未喷射的问题，具体的时间根据机械的型号和输浆管道的长度进行调整。

(2) 检查、检定喷浆压力罐及压力表、电子秤，确保喷浆压力稳定，喷浆量稳定。配置自动流量计，电脑控制喷浆频率达到要求，借鉴试桩各阶段记录的施工技术参数，确定转速、提升速度参数，严格按参数值控制施工，保证搅拌、提升速度与喷浆频率的匹配。

(3) 按要求停浆后及时安排专人处理桩头，复拌回填夯实。

(4) 对策目标检查：对策实施后开始搅拌提升的时间与走浆时间匹配，未出现钻头已提升而浆未到的情况，喷浆压力、流量、搅拌提升速度稳定，喷浆频率与搅拌提升速度匹配，停浆后桩头处理及时合理。目标实现。

##### 4.5 效果检查

对策实施后对本工程后续水泥土搅拌桩施工质量的一次合格率进行统计，共检测 80 项次，强度不足与桩体不均匀的缺陷均未出现，而其他缺陷累计出现 6 次，一次验收合格率提升至 93%。

##### 结语

从本项目的桩基质量检验结果来看，经过水泥搅拌桩的加固作用，软土地基的强度得到了提升，地基的稳定性也有所增强，复合地基的承载能力达到了设计标准，实现了控制沉降和加固地基的目标。水泥搅拌桩作为软基处理的一种技术，相较于其他方法，具备如施工周期短、简约工艺、加固成效明显等优点。在施工过程中，该方法不会产生振动、噪音，也不会引起地面隆起和环境污染。随着我国道路建设工程的持续推进，水泥搅拌桩技术预计将在软基处理领域得到更广泛的运用。

##### 参考文献：

[1] 吕圣华. 软土地基处理中的水泥搅拌桩施工质量控制分析[J]. 珠江水运, 2023, (17).  
[2] 吴剑. 市政道路水泥搅拌桩的施工技术分析[J]. 城市建筑, 2014, (06).

[3]JGJ79-2012. 建筑地基处理技术规范 [S].

[5]JGJ/T3610-2019. 公路路基施工技术规范 [S].

[4]GB 50202-2018. 建筑地基基础工程施工质量验收标准 [S].

[6] 龚晓南主编. 地基处理手册 (第三版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.