

水泥粉喷桩在洞庭湖区淤泥地基基础处理中的应用

贺林文 袁懂平

益阳市水利水电勘测设计研究院有限公司

摘要：本文以湖南洞庭湖区某泵站淤泥地基基础处理为例，对水泥粉喷桩加固软土地基的设计及施工问题进行了探讨，对加固效果进行了分析并总结了相关经验。

关键词：水泥粉喷桩；软土地基；地基处理；复合地基；施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.08.036

一、前言

洞庭湖区常见软弱地基包括淤泥、淤泥质土、杂填土等，在处理上述软弱地基时传统施工工艺主要有抛石挤淤和松木桩加固等方法。湖区泵站运行的实践经验表明，抛石挤淤地基由于其加固深度有限，容易因泵站长时间运行所产生的振动而出现整体沉降，甚至出现不均匀沉降，这种沉降的不利影响，在轴流泵的运行中尤为明显。松木桩加固地基，由于木材紧缺、成本偏高等原因而不被采用。

水泥粉喷桩在软土地基处理中已得到广泛应用，它具有加固见效快、成本较低、施工机具简单、对环境影响小等优点。水泥粉喷桩加固原理是利用水泥作固化剂，通过专用的粉体喷射施工机械，采用粉喷法形成水泥土桩。水泥粉喷桩是介于刚性桩与柔性桩之间的一种，具有一定压缩性。通过桩体与天然地基形成复合地基，共同承担上部荷载并协调变形。南县近几年新建的丰产泵站、东河泵站、团结泵站、南剅闸泵站等泵站均采用了水泥粉喷桩进行软土地基处理，效果较好。

本文以湖南省南县涝区治理工程中某泵站淤泥地基基础处理的实例，对水泥粉喷桩处理软土地基的设计及施工问题进行探讨，对加固效果进行分析并总结了相关

经验。

二、工程概况和地质条件

(一) 工程概况

湖南省南县涝区治理工程位于洞庭湖冲积平原腹地，工程建设内容包括泵站工程、渠道工程、涵闸工程和堤防加固工程等，涉及5个乡镇，27.51万人，耕地面积28.49万亩。

南县涝区治理工程新建泵站12座共装机26台3270kW，本文以新建某泵站为例进行分析。该泵站位于大通湖垸大通湖环湖渍堤东侧，设计装机640kW（4台155kW贯流泵机组），设计排涝流量9.44m³/s（单机流量2.36m³/s），设计扬程3.54m。

(二) 地质条件

工程区地貌单元单一，为湖相沉积平原，出露的地层为第四系松散堆积地层，地势平坦开阔。

新建某泵站的泵房及其穿堤箱涵底板均位于淤泥质粉质黏土，该土层力学性质差，不宜作为基础持力层，其上部为人工填土层，层厚1.0~4.6m，允许承载力特征值为110kpa，其下部为黏土层（顶面标高16.00m）力学性质较好，允许承载力特征值为140kpa，地质专业推荐黏土层作为基础持力层。地层性质自上而下分述如下：

- 1) 人工填土，素填土，黄褐色、灰褐色，主要由粉质黏土及砂壤土组成，可塑状，稍湿。
- 2) 淤泥质粉质黏土，灰褐色，软塑-流塑状，局部含粉细砂，饱和。
- 3) 黏土，青绿色，多呈可塑状，稍湿，颗粒细腻。

各地层物理力学指标见表1。

表1 地层物理力学指标表

| 土层名称 | 层厚 (m) | 天然 含水率 % | 天然密度 ρ | | 孔隙比 e | 压缩模量 (Mpa) | 塑性 指数 | 液性 指数 | 允许承载力特征值 (kPa) | 备注 |
|---------|---------|----------|------------------------|------------------------|-------|------------|-------|-------|----------------|-----|
| | | | 湿 (g/cm ³) | 干 (g/cm ³) | | | | | | |
| 人工填土 | 1.0~4.6 | 33.3 | 1.87 | 1.39 | 0.970 | 3.44 | 16.6 | 0.40 | 110 | |
| 淤泥质粉质黏土 | 7.3~9.4 | 46.5 | 1.79 | 1.22 | 1.300 | 3.36 | 12.5 | 1.05 | 60 | |
| 黏土 | 7.3 | 32.0 | 1.94 | 1.46 | 0.916 | 4.20 | 17.3 | 0.33 | 140 | 未揭穿 |

项目所处区域位于洞庭湖湖陷盆地南缘，区内基底无大的区域性断裂通过，挽近期以来一直以差异性下降运动为主。根据《中国地震动参数区划图》（GB18306-2015），区内地震动峰值加速度为0.05g，地震动反应谱特征周期为0.35s，相应地震基本烈度为VI度，属相对稳定地块。

三、水泥粉喷桩设计计算

泵房、穿堤箱涵设计地基承载力为120kPa，泵房设计底板高程为19.80m，穿堤箱涵设计底板高程为21.90m，下文以穿堤箱涵水泥粉喷桩设计为例进行分

析，泵房水泥粉喷桩设计过程从略，仅列其成果（详见表2）。

(一) 初拟桩长和桩径

综合地质资料、地基承载力设计要求，桩长取6.4m（以桩底进入黏土层约0.5m控制，详见图1），参考《水工建筑物地基处理设计规范》（SL/T792-2020）的要求，桩径取0.5m。

(二) 单桩竖向承载力计算

单桩承载力宜根据室内配方试验提供的桩身强度及地质报告提供的土层摩阻力按下列公式估算，取其小

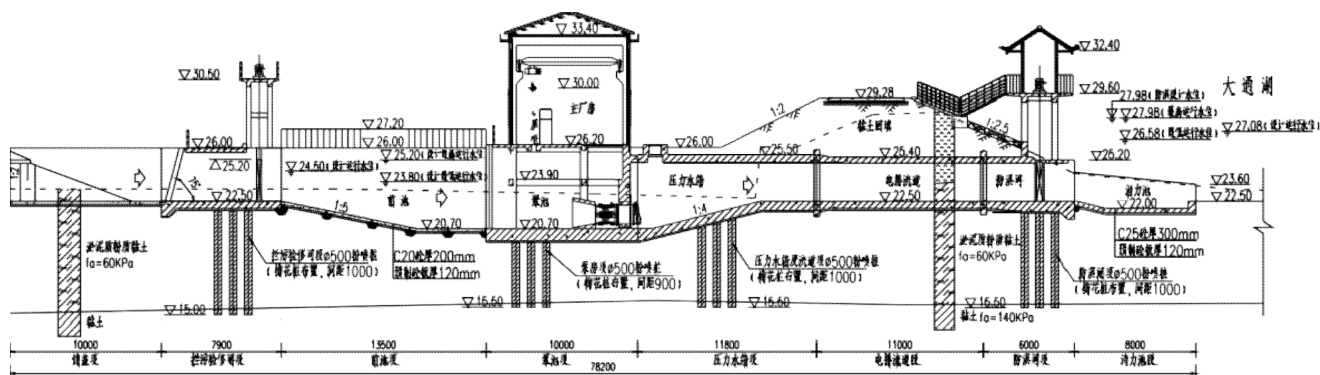


图1 泵站纵剖面图 高程单位 m, 尺寸单位 mm

值。

$$R_a = \eta \cdot f_{cu} \cdot A_p$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha A_b q_p \quad [1]$$

式中:

R_a —单桩容许承载力, KN;

f_{cu} —与粉喷桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块(边长为70.7mm或50mm的立方体)在标准养护条件下28d龄期的立方体抗压强度平均值, kPa; 设计时暂无室内试验, 设计强度初拟取 $P_f=1800\text{kPa}$ (参照同类工程, 天然含水率介于30%~70%, 采用强度等级42.5水泥, 掺入量为15%时, 桩身强度可达2.0Mpa, 考虑施工过程中可能造成的成桩差异, 本次粉喷桩水泥掺入量取15%, 桩身强度取1.8Mpa)。

η —桩身强度折减系数, 可取0.20~0.30; 取 $\eta=0.25$;

A_p —桩的面积, $A_p=0.25 \times 0.25 \times 3.14=0.196\text{m}^2$;

u_p —桩的周长, $u_p=2 \times 3.14 \times 0.25=1.571\text{m}$;

q_{si} —桩周围第*i*层土的容许摩阻力, kPa。根据地质性质, 参考《建筑地基处理技术规范》的取值^[2], 黏土层容许摩阻力取15kPa, 淤泥质粉质黏土容许摩阻力取8kPa。

l_i —桩周围第*i*层的厚度, 淤泥粉质黏土5.9m, 黏土

0.5m;

α —桩端天然地基土的承载力折减系数, 可取0.4~0.6, 取0.5;

q_p —桩端天然地基土的承载力, kPa, 本工程桩端黏土承载力为140kPa。

单桩容许承载力计算结果取两者小值, 计算结果为 $R_a=88.36\text{KN}$ 。

(三) 确定桩间距、置换率

根据上部结构对地基要求达到的复合承载力特征值 f_{spk} 和单设计承载力 R_a , 按下式即可求得所需的置换率:

$$m = \frac{f_{cpk} - \beta f_{ck}}{\frac{R_a}{A_p} - \beta f_{tk}} \quad [3]$$

m —粉喷桩面积置换率;

f_{spk} —复合地基承载力特征值(kPa);

f_{sk} —桩间天然地基承载力特征值(kPa), 本工程桩间土淤泥质粉质黏土天然地基承载力特征值为60;

β —桩间土承载力折减系数。当桩端为软弱土层时, 可取0.5~1.0, 桩端为硬土层时, 可取0.1~0.4^[1]; 本工程桩端为可塑状黏土, β 取0.5。

计算得面积置换率 $m=0.214$ 。

根据桩径0.5m, 考虑施工方便, 初拟桩距1.0m, 呈

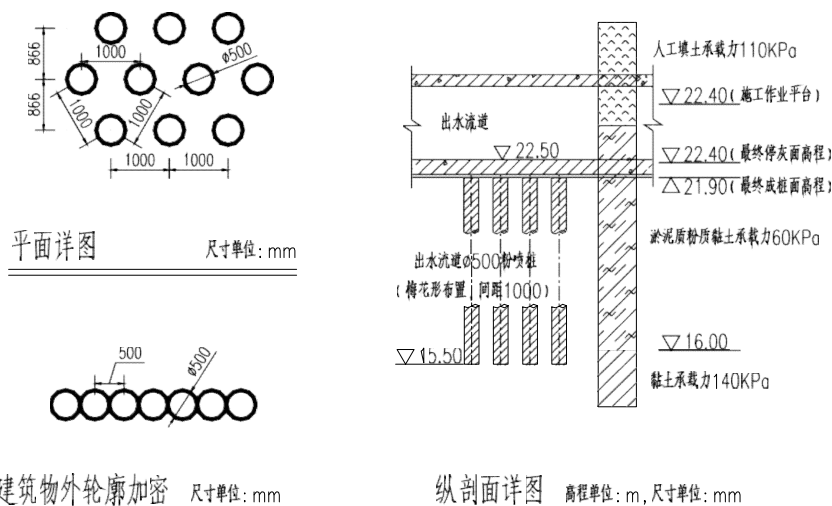


图2 水泥粉喷桩布置详图

梅花型布置（详见图2），对应面积置换率为0.227大于要求的面积置换率0.214，满足要求。

考虑到地基整体性和基坑开挖时的防渗需要，设计时对建筑物外轮廓周边的粉喷桩间距加密至0.5m。

（四）复合地基承载力计算

水泥粉喷桩复合地基承载力，应通过现场单桩或多桩复合地基静载荷试验确定，设计时可采用下式计算：

$$f_{spk} = mR_a / A_p + \beta (1-m) f_{ak} \quad [1]$$

符号意义同前文，经计算 $f_{spk}=125.23\text{kPa}$ ，满足设计承载力要求，也符合水泥粉喷桩复合地基承载力宜控制在120~150kPa，最大不宜超过200kPa的要求^[6]。

四、复合地基沉降量计算

粉喷桩复合地基的变形应包括粉喷桩复合土层的沉降和端桩未加固土层的压缩变形。本文仅对复合地基沉降量进行相关计算，公式如下：

$$S = \frac{(p_z + P_{z1})l}{2E_{sp}} \quad [1]$$

$$E_{sp} = mE_p + (1 - m)E_s$$

式中：

s—复合土层的压缩变形，m；

P_z —复合地基顶面的附加应力值，kPa；

P_{z1} —复合地基底面的附加应力值，kPa；l—桩长，

m；

E_{sp} —复合地基的压缩模量，kPa；

E_p —粉喷桩压缩模量，kPa，可取（100~120） f_{cu} ，对桩长较短或桩身强度较低者取低值，反之可取高值，本次取100 f_{cu} ；

E_s —桩间土的加权平均压缩模量，kPa，根据各土层厚度及其压缩模量计得得出 E_s 为3423.6；

计算得 $s=0.0314\text{m}$ ，即复合地基压缩变形量为31.4mm，符合《建筑地基设计规范》（GB50007-2011）^[8]对中、高压缩性地基变形允许值的要求。

五、水泥粉喷桩施工

（一）施工流程

水泥粉喷桩施工流程如下：机械及材料准备→施样→桩机就位→钻孔→喷粉提钻→下钻复搅→提钻至停灰面→钻机移位至新桩位。

（二）基本参数

表2 水泥粉喷桩加固基本参数表

| 序号 | 项目 | 单位 | 参数 |
|----|--------|---------|--------------|
| 1 | 桩径 | mm | 500 |
| 2 | 桩中心距 | mm | 1000（900） |
| 3 | 桩顶高程 | m | 21.90（19.80） |
| 4 | 桩底高程 | m | 15.50 |
| 5 | 水泥标号 | P·042.5 | 普通硅酸盐水泥 |
| 6 | 水泥掺入比 | Kg/m | 53 |
| 7 | 转速 | r/min | 28 |
| 8 | 搅拌提升速度 | m/min | 0.8 |
| 9 | 复搅次数 | 次 | 2 |
| 10 | 垂直偏差 | <1% | |

说明：表中括号内数据为泵房粉喷桩对应参数。

（三）施工要点及注意事项

1）开工前应进行成桩工艺试验，试验桩不得少于2个，掌握对场地的成桩经验及各种操作技术参数，施工参数主要包括每米喷粉量、搅拌头提升速度、压缩空气压力、叶轮转速等。

2）依据施工图严格放样，施工顺序应从周边开始向中心进行，相邻两根桩应跳跃间打。

3）送粉（气）管路不宜大于60m，水泥宜过筛后再装入灰罐，避免管路堵塞。

4）在粉喷桩施工下沉钻头开展钻进处理的过程中，要结合地质的情况及时调整至合适档位。

5）要结合喷粉搅拌的应用要求，逐步完成提升操作，宜慢档提升，维持均匀搅拌的效果。搅拌头每旋转1圈，其提升高度不得超过15mm，避免管道堵塞等问题^[6]。

6）避免粉喷的不均匀性，确保压缩空气压力、加灰量参数符合基本设计要求。

7）为了保证深层粉喷桩能和地面维持垂直关系，应确保机架和钻杆的垂直度，控制整体偏差数值小于1.0%桩长。

8）水泥粉喷桩在实际操作中要维持喷粉施工的连续性，因故停止喷粉，应将搅拌头下沉至停灰面1m以下，待恢复喷粉时再喷粉搅拌提升，以防止产生断桩，严禁在没喷粉的情况下进行钻机提升作业。为确保成桩质量，搅拌头宜提升至最终成桩面以上0.5m再停止喷粉。

六、结语

该泵站完工一年后，经沉降观测，结果表明主体建筑物最大沉降量不到30mm，与设计基本相符，实践表明采用粉喷桩对湖区淤泥地基进行加固是可行的。本工程的实施过程中总结出以下几点经验：

1）对于湖区软土地基，可充分利用其面层承载力较高的人工填土作为施工作业面，对软弱下卧层采用水泥粉喷桩进行加固，施工简便，经济合理。

2）粉喷桩施工质量控制的关键是有效桩长、桩顶底面标高、喷灰量与搅拌的均匀性，施工过程中应严格控制高程、送粉量、压力值、转速和提升速度等参数。

3）粉喷桩桩身达到设计强度需要较长的时间，施工进度安排时应充分考虑成桩对工期的影响。

参考文献

[1] SL/T792-2020 水工建筑物地基处理设计规范 [S].
 [2] JGJ79-2012 建筑地基处理技术规范 [S].
 [3] 刘松玉，钱国超，章定文. 粉喷桩复合地基理论与工程应用，中国建筑工业出版社，2006，135~138.
 [4] 杨益，水泥粉喷桩在泵站地基处理中的设计计算，安徽水利水电职业技术学院学报，2013，17~18.
 [5] GB50007-2011 建筑地基基础设计规范 [S].
 [6] 吴裕君. 水泥粉喷桩在水闸淤泥基础处理中的运用 [J]. 黑龙江水利科技. 2021，49（11180-182）.