

# 钻孔灌注桩泥浆就地固化方案研究及应用

韩振河

[上海华融工程设计(集团)有限公司,上海市 201206]

**摘要:**为响应上海市关于工程泥浆处理的规范要求,缓解末端处置压力,推动交通基础设施绿色发展,提出桥梁钻孔灌注桩泥浆就地固化方案。通过分析软土就地固化技术的原理与设备构成,将其应用于钻孔灌注桩泥浆与浜塘的协同处理,对比传统换填工艺,明确该技术在施工效率、成本控制及环保方面的优势。通过试验确定固化剂最佳掺量,制定涵盖施工准备、工艺操作、质量检测的完整流程,并结合崇明某二级公路航道桥周边浜塘处理实例验证方案可行性。结果表明,该方案可实现工程泥浆零外运,固化土体强度与沉降量满足规范要求,为公路建设绿色转型升级提供技术支撑。

**关键词:**公路工程;钻孔灌注桩泥浆处理;就地固化;施工方案;资源化利用

**中图分类号:** U416

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2026)08-0365-04

## Research and Application of In-Situ Solidification Scheme for Slurry in Bored Cast-in-place Piles

HAN Zhenhe

[Shanghai Huarong Engineering Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 201206, China]

**Abstract:** In response to the regulatory requirements of Shanghai regarding the treatment of engineering slurry, to alleviate the pressure on end-of-pipe disposal and promote the green development of transportation infrastructure, a scheme for on-site solidification of slurry in bored cast-in-place piles is proposed. By analyzing the principle and equipment composition of the in-situ solidification technology for soft soil, it is applied to the co-treatment of slurry for bored cast-in-place piles and ponds. Compared with the traditional replacement technology, the advantages of the technology in construction efficiency, cost control and environmental protection are identified. Laboratory tests are conducted to determine the optimal solidifying agent dosage. A complete process of cover construction preparation, technological operation and quality inspection is formulated. And the feasibility of the scheme is verified by an example of the treatment of ponds and creeks around a secondary highway waterway bridge in Chongming. The results show that the scheme can realize zero off-site transportation of engineering slurry, and the strength and settlement of the solidified soil meet the specification requirements, providing technical support for the green transformation and upgrading of highway construction.

**Keywords:** highway engineering; slurry treatment for bored cast-in-place piles; in-situ solidification; construction scheme; resource utilization

## 0 引言

随着上海市基础设施建设的快速推进,工程泥浆排放量逐年增加,传统泥浆外运处置模式不仅面临末端处置压力大、运输成本高的问题,还易引发环境污染风险。为规范工程泥浆管理,上海市发布《关于进一步规范本市工程泥浆处理管理的实施意见》(沪绿容[2019]219号),明确提出“具备实施干化条

件的建设项目,应鼓励配置干化设备,实施源头就地干化,逐步实现工程泥浆不出工地处置”的要求<sup>[1]</sup>。

桥梁钻孔灌注桩施工中产生的泥浆成分复杂、含水率高,若直接排放或外运,易造成土壤污染与资源浪费<sup>[2-4]</sup>。在此背景下,研究钻孔灌注桩泥浆就地固化技术,结合浜塘处理实现废弃资源综合利用,具有重要的工程价值与环保意义。工程废弃泥浆固化改良后作为路基填料具有可行性,在实现废弃泥浆资源化利用的同时可缓解填料短缺问题,具有广阔的应用前景<sup>[5-7]</sup>。目前国内外针对工程泥浆处治的研究主要集中于固化剂的种类、配比及掺量。如吴

收稿日期: 2026-03-16

作者简介: 韩振河(1987—),男,硕士,工程师,注册土木工程师(道路工程),一级建造师(市政),从事道路设计工作。

尚东等<sup>[8]</sup>提出仅采用水泥作固化剂,将水泥掺量为14%的固化泥浆作为路基填料使用;金茂祥等<sup>[9]</sup>研究泥浆固化土在4%石灰和4%水泥双掺配比及配套施工下,路用性能满足高速公路性能指标要求;阚久彦等<sup>[10]</sup>研究采用6%HAS固化剂,泥浆土无侧限抗压强度和承载比CBR试验值满足规范技术要求;张伟等<sup>[11]</sup>提出掺加4%水泥及0.02%CG-T1型固化剂处理后的泥浆土体能够有效降低固化土的孔隙率,在满足路基强度性能的同时提高路基的抗冻性能。另外,在上海地区,就地固化工艺处理浜塘路基也在逐步代替常规的换填工艺,越来越多地应用到工程实践中,且技术经济效益明显<sup>[12]</sup>。泥浆就地固化技术作为一种原位土体加固技术,通过专用设备与固化剂协同作用,可将废弃土体转化为满足工程强度要求的可用材料,为泥浆就地处置提供了技术路径。本研究旨在将就地固化技术与泥浆处治结合,利用工程现场实际条件,将钻孔灌注桩泥浆注入工程范围内浜塘并进行原位固化,满足路基性能指标,通过分析该工艺的设备组成、施工流程与质量控制方法,并结合工程实例验证方案有效性,为钻孔灌注桩泥浆就地固化工艺提供标准化技术参考。

1 软土就地固化技术原理与设备构成

1.1 技术原理

软土就地固化技术是利用专用强力搅拌头将固化剂与原位软土(含钻孔灌注桩泥浆沉淀后的土体)进行均匀拌合,通过固化剂与土体颗粒的物理化学反应(如水泥水化、离子交换等),改善土体结构,提升其强度、稳定性与抗渗性,最终使固化土体达到工程设计要求(如地基承载力、沉降控制等)的原位处理技术<sup>[13]</sup>。该技术适用于黏土、泥炭土、淤泥及钻孔灌注桩泥浆沉淀土等各类软土,可实现废弃土体就地利用,减少资源消耗与环境污染。

1.2 设备组成

软土就地固化技术的施工设备体系以“搅拌—供料—控制”为核心,确保固化剂精准计量、均匀拌合,具体组成如表1、图1所示。

2 就地固化工艺与传统换填工艺对比

2.1 工艺对比分析

桥梁钻孔灌注桩泥浆所在的浜塘处理中,传统换填工艺需经历“清淤开挖—外运弃土—外购填料—分层回填—碾压夯实”流程,而就地固化工艺直

表 1 就地固化设备功能及技术要求

| 设备名称                        | 功能作用                    | 技术要求                              |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 前部强力搅拌头<br>(ALLU PMX 强力搅拌头) | 实现固化剂与原位土的垂直搅拌与均匀混合     | 具备正向深入、反向提升功能,搅拌齿间距适配软土特性,确保无死角拌合 |
| 配套挖机                        | 提供搅拌头动力支撑,辅助完成区域平整、杂物清理 | 动力系统需与搅拌头匹配,满足垂直搅拌时的稳定性要求         |
| 后台供料系统                      | 存储并输送水泥、粉煤灰等固化剂原料       | 具备原料防潮、防结块功能,料仓容量适配施工进度           |
| 固化剂添加控制系统                   | 实时控制固化剂掺量与喷料速率          | 计量精度允许偏差≤0.5%,可根据土体含水率动态调整喷料参数    |

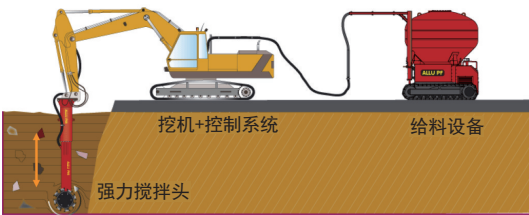


图 1 就地固化设备组成

接对原位泥浆沉淀土与浜塘淤泥进行固化处理,二者核心差异如表2、图2所示。

表 2 固化工艺对比

| 对比维度 | 就地固化工艺                       | 传统换填工艺                        |
|------|------------------------------|-------------------------------|
| 施工流程 | 抽水清杂→划分区域→固化剂调配→强力搅拌→养护平整    | 筑坝抽水→清淤开挖→弃土外运→填料采购→分层回填→碾压夯实 |
| 资源消耗 | 无需外购填料,利用原位废弃土               | 需大量外购砂石等优质填料,弃土外运消耗运输资源       |
| 施工周期 | 单区块(5 m×5 m)处理时间≤4 h,快速形成硬壳层 | 清淤、运输、回填周期长,单区块处理时间≥24 h      |
| 环保性  | 实现废弃土零外运,减少扬尘与土壤污染           | 弃土外运易引发沿途撒漏,外购填料开采破坏生态        |
| 工程造价 | 节省填料采购费、弃土运输费,成本降低20%~30%    | 填料与运输成本高,综合造价高                |

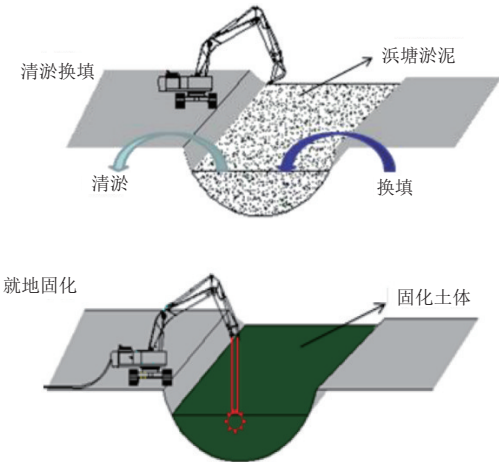


图 2 浜塘处理新旧工艺对比

2.2 技术优势总结

环保性: 避免废弃泥浆外运造成的二次污染, 实现“资源循环利用”, 符合绿色交通建设要求;

经济性: 省去清淤、外运、外购填料等环节成本, 降低工程总造价;

高效性: 施工效率高, 可快速形成满足强度要求的人工硬壳层, 缩短工期;

适应性: 适用于明浜、暗浜等不同场景。

3 桥梁钻孔灌注桩泥浆就地固化施工方案

3.1 施工准备

3.1.1 施工配合比确定

固化剂采用“水泥+粉煤灰”浆剂, 具体参数如下:

水泥: 选用 42.5 级及以上普通硅酸盐水泥, 符合《通用硅酸盐水泥》(GB175—2007) 要求, 储存超 3 个月需重新检测;

粉煤灰: 国标 II 级及以上, 烧失量  $\leq 20\%$ , 粒径 0.001~1.180 mm, 其中  $< 0.075$  mm 颗粒含量  $\geq 45\%$ ;

配合比设计: 为减少固化过程中产生的水化热, 本工程固化剂考虑掺加 2% 的粉煤灰, 并对水泥掺量按 4%、6%、8%、10% 制备试件进行无侧限抗压强度试验, 结果如表 3、图 3 所示。

表 3 不同水泥掺量条件下固化土试件无侧限抗压强度值

| 水泥掺量          | 4%   | 6%   | 8%   | 10%  |
|---------------|------|------|------|------|
| 7 d 抗压强度 /MPa | 1.75 | 2.12 | 2.28 | 2.37 |

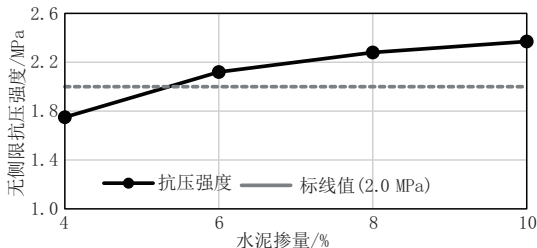


图 3 不同水泥掺量条件下固化土试件无侧限抗压强度曲线

用作中等交通二级公路底基层固化土应达到二级固化土要求, 对应 7 d 无侧限强度  $\geq 2.0$  MPa<sup>[14]</sup>, 故本工程固化剂掺量确定为 6% 水泥+2% 粉煤灰。

3.1.2 设备调试

设备组装完成后, 按以下步骤进行调试, 确保满足施工要求:

(1) 检查螺栓固定、齿轮箱安装、密封油加注情况, 确认排水管安装正确且管内压力  $\leq 3$  bar;

(2) 连接搅拌头与挖机电缆, 启动载体机械, 调整搅拌头倾斜角度, 检查液压管移动灵活性;

(3) 启动搅拌转筒, 无负荷运转 5 min, 以排除液

压系统气体, 验证转筒转向正确性;

(4) 停止设备后, 检查液压系统泄漏情况与机械结合处密封性;

(5) 测试自动定量供料系统: 启动绞龙电机, 确认供料种类与控制系统匹配, 调整喷料流量, 确保搅拌下沉与上升时供料速率满足要求。

3.2 核心施工工艺

3.2.1 前期处理

对工程范围内明浜先筑坝抽水, 清除有机物、生活垃圾等杂物, 再将钻孔灌注桩产生的泥浆倒入浜内沉淀, 抽水后晾晒, 回填不含垃圾的废弃土至固化设计顶标高(取路床底标高与原地面标高两者中的较低值)。

3.2.2 区域划分与固化剂调配

按 5 m×5 m 划分处理区块, 根据区块固化深度与掺量计算固化剂用量;

按确定的配合比调配固化剂浆体, 由自动定量供料系统控制输送。

3.2.3 强力搅拌施工

采用“原位垂直上下搅拌”模式, 具体步骤如下:

(1) 搅拌设备垂直插入原位土, 正向运行逐渐深入, 同步喷射固化剂, 直至达到设计固化底部(浜底淤泥以下 0.5 m, 放坡区域延伸至坡脚线外 1 m);

(2) 搅拌设备反向运行, 缓慢提升, 持续喷射固化剂, 控制搅拌速率 0.1 ~ 0.3 m/s, 喷料速率 80~150 kg/min<sup>[15]</sup>;

(3) 每个搅拌点上下搅拌次数  $\geq 2$  次, 若土体含水率过低, 采用辅助挖机翻松后再固化。

3.2.4 边固化边推进

按“区块控制—整体翻搅—搭接处理”流程施工。

以 5 m×5 m 为单位, 根据搅拌头截面计算所需搅拌次数, 确保均匀喷搅;

单区块搅拌完成后, 进行整体性翻搅, 消除局部拌合不均问题;

相邻区块搭接宽度  $\geq 5$  cm, 避免漏搅, 最终形成连续均匀的硬壳层。

3.2.5 整平和养护

固化搅拌完成后, 养护数天至土体达到设计强度, 采用挖机碾压整平;

若与后续工序间隔时间较长, 覆盖 30 cm 素土(或碎石)并碾压保护, 同时做好现场排水措施, 防止雨水浸泡影响固化效果。

3.3 质量检测

3.3.1 原材料检测

固化剂(水泥、粉煤灰)进场时,由总包、监理共同抽样送检第三方机构,确保符合规范要求;  
施工前通过室内配比试验确定最终配合比,施工中由自动定量控制系统控制掺量,允许偏差 $\leq 0.5\%$ 。

3.3.2 固化层性能检测

厚度检测:采用静力触探试验,要求实际厚度与设计厚度偏差 $\leq 20\text{ cm}$ ,每  $3\,000\text{ m}^2$  或每  $300\text{ m}$  测试点 $\geq 3$ 处;  
宽度检测:采用钢尺量测,实际宽度与设计宽度偏差 $\leq 10\text{ cm}$ ;  
强度与沉降检测:养护完成后,采用平板载荷试验检测地基承载力,采用分层沉降仪监测沉降量,确保满足设计要求。

4 工程应用实例

4.1 项目概况

崇明某二级公路新建工程,拟建航道桥附近存在大面积明浜(见图4),浜底淤泥厚度  $0.5\sim 0.8\text{ m}$ 。若采用传统换填工艺,需外运淤泥约  $4\,000\text{ m}^3$ ,外购砂石填料约  $6\,000\text{ m}^3$ ,同时,桥梁施工产生的钻孔灌注桩泥浆  $7\,200\text{ m}^3$  也需外运,不仅成本高,还易造成周边环境污 染。因此,本工程采用钻孔灌注桩泥浆与明浜淤泥协同就地固化方案。

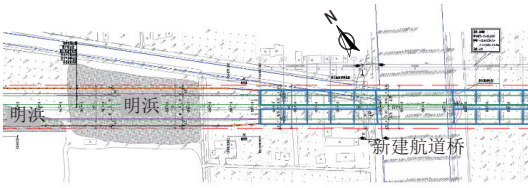


图4 崇明某二级公路泥浆处治前工程实景

4.2 施工流程

围堰抽水:在明浜周边修筑临时围堰,抽干浜内积水,将钻孔灌注桩产生的泥浆导入明浜内沉淀,再抽水晾晒;  
确认工作量:测量明浜范围、淤泥厚度(约  $1.5\text{ m}$ ),计算固化处理面积(约  $5\,000\text{ m}^2$ )与固化剂用量(水泥  $320\text{ t}$ 、粉煤灰  $107\text{ t}$ );  
划分区块:按  $5\text{ m}\times 5\text{ m}$  划分  $200$  个处理区块,标注每个区块的固化深度(浜底以下  $0.5\text{ m}$ );  
固化剂调配:按水灰比  $1.0$  调配浆剂,由自动供料系统输送至搅拌头;  
就地固化:采用垂直上下搅拌模式,每个区块搅拌  $3$  次,相邻区块搭接  $5\text{ cm}$ ;  
养护与检测:养护  $7\text{ d}$  后,检测固化层厚度(偏差 $\leq 15\text{ cm}$ )、承载力( $\geq 120\text{ kPa}$ ),均满足设计要求;  
平整交验:碾压整平后,移交下道工序施工。  
养护完成后采用十字板剪切试验检测,不同深度测试抗剪强度均 $> 120\text{ kPa}$ ,详见表4、图5。

表4 十字板剪切试验检测结果

| 测点深度/m   | 0.4   | 0.8   | 1.2   | 1.6   | 2.0   | 0.4   | 0.8   |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 抗剪强度/kPa | 186.7 | 184.1 | 173.3 | 151.3 | 135.3 | 186.7 | 184.1 |

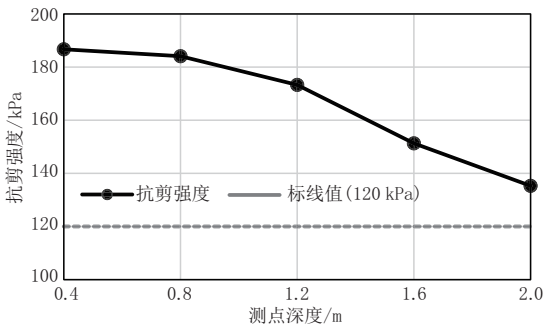


图5 十字板剪切试验检测结果曲线

采用灌砂法检测压实度,压实度均大于  $93\%$ ,详见表5。

表5 压实度检测结果

| 测点编号 | 桩号     | 湿密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 含水率/% | 干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 最大干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 压实度/% |
|------|--------|--------------------------------------|-------|--------------------------------------|----------------------------------------|-------|
| 1    | K5+720 | 1.885                                | 10.02 | 1.713                                | 1.816                                  | 94.35 |
| 2    | K5+750 | 1.897                                | 11.08 | 1.708                                | 1.816                                  | 94.04 |
| 3    | K5+790 | 1.901                                | 10.64 | 1.718                                | 1.816                                  | 94.61 |
| 4    | K5+820 | 1.889                                | 10.85 | 1.704                                | 1.816                                  | 93.84 |

4.3 应用效果

环保效益:实现淤泥与钻孔灌注桩泥浆零外运,减少碳排放;  
经济效益:相比传统换填工艺,节省成本约  $160$  万元(含填料采购费、运输费);  
工期效益:仅用  $20\text{ d}$  完成全部固化施工,较传统

工艺缩短工期  $25\text{ d}$ ;  
质量效益:固化土体后期沉降量 $\leq 30\text{ mm}$ ,满足公路路基沉降控制要求,通车后未出现路基变形问题。

5 结 语

结合工程现场实际条件,提出了桥梁钻孔灌注(下转第 368 页)