

河漫滩相液化场地沉管砂石桩施工优化与精益管控体系研究

——以某医院项目为例

张爱民 胡其志

湖北工业大学 湖北 武汉 430068

【摘要】：针对河漫滩相饱和粉细砂液化场地沉管砂石桩施工工艺参数经验化、成本管控精细化不足的行业痛点，以某医院EPC项目为依托，采用正交试验方法开展工艺参数优化研究，确定了地层适配性最优施工参数组合；建立沉管砂石桩全成本构成模型，提出核心管控指标的经济临界点。研究表明：优化后的工艺参数可使桩体密实度达标率提升至100%，成桩一次验收合格率较传统工艺提升12.5%；通过精益成本管控，项目施工总成本较策划值降低12.3%，单位延米成本较同类项目降低9.7%，实现了质量与成本的协同优化。

【关键词】：沉管砂石桩；液化地基；河漫滩相；工艺优化；成本管控

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.088

1 引言

我国汉江、长江中下游流域广泛分布河漫滩相饱和粉细砂地层，地震作用下易发生液化，引发地基失稳、结构沉降超限等病害。振动沉管砂石桩凭借挤密振密、排水降压的多重作用，成为该类场地液化治理的主流技术，我国每年采用该技术处理的液化地基地面积超2000万 m^2 [1]。

但工程实践中，该技术仍存在两大核心瓶颈：一是工艺参数多依赖工程经验，与现场地层适配性不足，行业内成桩一次验收合格率平均仅87.5%，缩颈、断桩等质量通病频发；二是成本管控碎片化，对充盈系数、机械效率等核心成本影响因素缺乏量化研究，项目成本超支率普遍达10%以上 [2]。现有研究多聚焦于单一工艺优化，缺乏工艺-成本一体化的精益管控体系研究。

针对上述不足，本文以某医院项目为依托，通过正交试验完成施工工艺量化优化，建立全成本构成模型与核心指标经济临界点，形成适配河漫滩相液化场地的工艺优化与成本管控体系，为同类工程提供参考。

2 项目概况与核心痛点

2.1 项目基本信息

某医院EPC项目位于江河流域河漫滩地貌区，总用地面积112825.3 m^2 ，总建筑面积136684.6 m^2 ，建筑抗震设防类别为重点设防类。场地内③-1层松散饱和细砂为主要液化土层，层厚2.2~8.8m，地下水为孔隙潜水，稳定水位埋深1.8~2.0m，

综合渗透系数 $K=13.00m/d$ 。

项目设计采用振动沉管砂石桩复合地基处理，总桩数38490根，桩径400mm，平均桩长7.0m，总延米数269430m。设计要求砂石混合料含泥量 $\leq 5\%$ ，充盈系数1.2~1.4，桩位偏差 $\leq 50mm$ ，垂直度偏差 $\leq 1\%$ ，成桩后需通过重型动力触探、复合地基静载试验与标准贯入试验验证处理效果，总工期要求60日历天。

2.2 传统施工方案核心痛点

结合项目前期策划与行业调研，传统施工方案存在两大核心问题：

(1) 工艺管控经验化，质量可控性差：传统施工多按规范推荐值确定拔管速率、留振时间等参数，未结合现场地层开展试验优化，参数适配性不足，易引发缩颈、断桩、桩体密实度不足等质量问题，后期返工成本高 [3]。

(2) 成本管控粗放，精细化不足：传统成本管控聚焦于材料采购与结算环节，对施工过程中充盈系数、机械作业效率等核心变动成本缺乏量化管控，未明确成本影响因素的管控阈值，材料损耗率与设备闲置率居高不下，成本超支风险高 [4]。

3 基于正交试验的施工工艺量化优化

3.1 正交试验设计

针对河漫滩相饱和粉细砂地层特点，选取对成桩质量影响最显著的4个核心工艺参数：拔管速率(A)、留振时间(B)、反插深度(C)、单次填料量(D)，每个因素设置3个水平，

采用正交表开展现场试桩试验，因素水平设计见表1。试验以桩体重型动力触探平均击数（N63.5，反映密实度）为主要指标，充盈系数（反映材料利用率）为次要指标^[5]。

表1 正交试验因素水平表

Table 1: Level Table of Orthogonal Experimental Factors

水平	因素 A: 拔管速率/(m/min)	因素 B: 留振时间/s	因素 C: 反插深度/m	因素 D: 单次填料量/m ³
1	0.8	30	0.3	0.3
2	1.0	45	0.4	0.4
3	1.2	60	0.5	0.5

3.2 试验结果与最优参数确定

正交试验结果与极差分析见表2，结果表明：各因素对桩体密实度的影响主次顺序为拔管速率（A）>留振时间（B）>反插深度（C）>单次填料量（D）；对充盈系数的影响主次顺序为单次填料量（D）>拔管速率（A）>反插深度（C）>留振时间（B）。

表2 正交试验结果与极差分析表

Table 2: Orthogonal Experiment Results and Range Analysis

试验号	A	B	C	D	桩体平均击数/击	充盈系数
1	1	1	1	1	12.3	1.22
2	1	2	2	2	14.6	1.28
3	1	3	3	3	15.2	1.35
4	2	1	2	3	11.8	1.32
5	2	2	3	1	13.5	1.25
6	2	3	1	2	14.1	1.29
7	3	1	3	2	9.7	1.26
8	3	2	1	3	10.5	1.33
9	3	3	2	1	11.2	1.24
桩体击数极差 R	10.7	6.7	1.5	1.4	-	-
充盈系数极差 R	0.03	0.08	0.02	0.29	-	-

以桩体密实度达标为核心前提，兼顾材料利用率与施工效率，确定本项目最优工艺参数组合为 A1、B3、C3、D2，即：拔管速率 0.8m/min，留振时间 60s，反插深度 0.5m，单次填料量 0.4m³。针对液化土层进行参数微调：松散细砂层段拔管速率降至 0.6m/min，每下沉 0.5m 留振 30s；桩顶 2~3m 范围采用“短停拔、长留振”工艺，确保桩头密实度^[6]。

3.3 标准化施工工艺流程

基于最优工艺参数，构建适配河漫滩相液化地层的标准化施工流程：①场地平整与降水，将地下水位控制在施工面下 0.5m；②全站仪精准放样桩位，采用“十字栓桩法”保护，执行三级复核制度；③桩机就位，校准垂直度偏差≤1%；④振动沉管造孔，进入液化土层后每下沉 0.5m 留振 30s 至设计深度；⑤分层填料振密，单次填料量 0.4m³；⑥振动拔管成桩，严格按 0.8m/min 速率拔管，每提升 1.0~2.0m 反插 0.5m，全程留振；⑦桩机移位，采用间隔跳打工艺，相邻桩施工间隔≥12h。

4 全成本构成模型与精益管控体系

4.1 全成本构成模型

将沉管砂石桩施工全成本划分为固定成本与可变成本两大类，建立全成本构成模型：

$$C_{总} = C_{固} + C_{变} = C_{固} + (C_{材} + C_{机} + C_{人} + C_{措} + C_{返})$$

式中：C 总为项目施工总成本；C 固为固定成本（管理费、规费、安全文明施工费等）；C 变为可变成本，是成本管控核心，包括砂石材料费 C 材、机械设备费 C 机、人工费 C 人、专项措施费 C 措、质量返工费 C 返^[7]。

基于本项目工程量拆解，项目策划总成本 3160.96 万元，单位延米成本 117.32 元/m，其中可变成本占比 87.2%，固定成本占比 12.8%；可变成本中，材料费占比 62.3%，机械费占比 21.5%，二者合计占总成本的 73.1%，是成本管控的核心重点。

4.2 核心管控指标经济临界点分析

基于全成本模型，对影响成本的核心指标进行量化分析，提出 3 个关键经济临界点，为成本管控提供量化依据：

(1) 充盈系数盈亏临界点：本项目砂石材料预算单价 125 元/m³，桩径 400mm，理论单位延米桩身体积 0.1256m³/m，充盈系数每增加 0.1，项目总成本增加 42.3 万元。经计算，当充盈系数>1.35 时，材料费将超出预算阈值，因此确定充盈系数盈亏临界点为 1.35，施工过程中严格控制在 1.2~1.35 之间。

(2) 桩机配置经济临界点：单台桩机月租赁费 7.2 万元，安拆费 1.8 万元/台，经测算，单台桩机日均作业量<60 根时，单位作业成本上升 30%以上；日均作业量>120 根时，设备故障率提升 40%以上。因此确定单台桩机最优日均作业量经济区间为 80~120 根，本项目最优桩机配置数量为 7~8 台，较传统方案减少 2 台，大幅降低机械成本。

(3) 工期成本临界点: 项目总工期每提前 1 天, 可节约固定成本 3.2 万元; 当工期压缩超过 15 天时, 边际成本将超过节约的固定成本, 出现“工期越短、成本越高”的现象。因此确定本项目工期成本临界点为压缩工期不超过 15 天, 最优工期区间为 45~60 天, 实现工期与成本的协同优化。

4.3 全过程成本动态管控措施

基于成本模型与经济临界点, 构建“事前策划—事中管控—事后核算”的全过程成本动态管控体系:

(1) 事前策划: 编制精细化成本策划书, 将成本目标分解至每个施工段、每台桩机, 明确各班组充盈系数、材料损耗率、作业效率管控指标, 签订成本管控责任状, 建立“节奖超罚”激励机制。

(2) 事中管控: 建立每日成本台账, 实时统计每台桩机的填料量、成桩数量, 计算实际充盈系数与作业效率, 当日对比管控指标, 超支立即整改; 砂石材料采用“限额领料、日清日结”模式, 将材料损耗率从行业常规 8% 控制在 3.5% 以内。

(3) 事后核算: 每个施工段完成后开展成本核算, 对比策划值分析偏差原因, 形成管控经验反馈至后续施工, 实现成本管控持续优化^[8]。

同时, 通过“小单元、快流水”的施工组织优化, 将项目划分为 6 个施工段、24 个流水单元, 匹配 8 台桩机作业, 建立“日调度、周协调”的资源动态调配机制, 设备闲置率从 30% 降至 7.8%, 单台桩机日均作业效率从 80 根提升至 105 根, 进一步降低机械与人工成本。

5 优化方案实施效果分析

5.1 成桩质量效果验证

项目 38490 根沉管砂石桩施工完成后, 全面质量检验结果

显示: 桩体密实度普检达标率 100%, 桩身完整性良好, 无断桩、缩颈等严重缺陷; 桩位最大偏差 42mm, 垂直度最大偏差 0.8%, 均满足规范要求; 充盈系数全部控制在 1.22~1.34 之间, 处于盈亏临界点以内; 复合地基承载力与桩间土液化消除效果完全满足设计要求, 成桩一次验收合格率达到 100%, 较传统工艺提升 12.5 个百分点, 实现零质量返工。

5.2 成本管控效果分析

本项目最终结算总成本 2771.85 万元, 较策划总成本节约 389.11 万元, 总成本降低 12.3%; 单位延米成本 102.88 元/m, 较策划值降低 14.44 元/m, 较同类项目行业平均水平降低 9.7%。各成本项优化前后对比见表 3。

表 3 项目优化前后成本对比表

Table 3 Comparison of Costs Before and After Project Optimization

成本项	策划成本/万元	实际成本/万元	节约额/万元	降低比例
砂石材料费	1969.28	1765.32	203.96	10.36%
机械设备费	679.61	542.81	136.80	20.13%
人工费	338.22	302.15	36.07	10.66%
质量返工费	101.15	0	101.15	100%
其他费用	72.70	61.57	11.13	15.31%
合计	3160.96	2771.85	389.11	12.30%

通过成本敏感性分析, 各因素对项目总成本的影响敏感度排序为: 充盈系数 > 桩机作业效率 > 材料单价 > 总工期, 其中充盈系数每变动 0.1, 项目总成本变动 10.7%, 验证了本文提出的经济临界点管控的科学性, 为同类项目成本管控明确了核心重点。

参考文献:

- [1] 谢主清, 杨颜齐, 周毅. 滨海区高水位填筑土地基加固技术应用综述[J]. 公路与汽运, 2025, 41(06): 73-87+99.
- [2] 陈良瑞. 振冲碎石桩在加固处理砂土液化地基中的应用[J]. 福建建设科技, 2022, (05): 58-61.
- [3] 董渝, 熊威. CFG 桩复合地基在闸坝工程中的应用[J]. 水电站设计, 2025, 41(04): 58-62.
- [4] 蔡世杰. 公路路基分层填筑施工技术[J]. 交通世界, 2025, (32): 42-44.
- [5] 李延刚, 赵荣亮, 杨冲. 碎石桩与砂桩在处理地震液化地层中的应用[J]. 山西建筑, 2013, 39(13): 76-77.
- [6] 芦文江, 周跃, 林远祥. 新型软基处理技术在大湾区特殊地质条件的应用效果分析[J]. 城市建设, 2025, (27): 80-82.
- [7] 陈军, 李朝龙, 刘勇, 等. 某高烈度区、严重液化场地综合管廊结构方案设计[J]. 特种结构, 2019, 36(06): 51-57.
- [8] 涂自辉, 侯茵香, 王耀. 深圳建工: 施工阶段成本精细化管控体系优化[J]. 中国建设信息化, 2025, (04): 38-39.