

# 车辆段地基处理方案的经济性与环境效益对比研究

陈 武

(广州地铁工程咨询有限公司, 广东 广州 510000)

**摘 要** 车辆段地基处理是车辆段建设的关键环节, 不同的地基处理方案在经济性和环境效益方面存在差异。本研究通过对比分析常见的地基处理方案, 如换填法、强夯法、CFG 桩复合地基及预制管桩等, 包括各方案在经济性(成本构成、造价对比)与环境效益(污染排放、生态影响)方面的核心结论, 旨在为车辆段建设提供可参考的决策依据, 进而实现经济与环境效益的最大化。

**关键词** 地基处理方案; 换填法; CFG 桩复合地基; 预制管桩; 环境效益

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.023

## 0 引言

随着我国城市轨道交通建设的快速推进, 车辆段作为轨道交通系统中的关键枢纽, 其地基处理水平直接关系到后续结构施工安全及运营阶段的稳定性与耐久性。在实际工程中, 车辆段往往位于软土或填土地层, 存在承载力不足、沉降控制要求严格等问题, 因此选取合理的地基处理方案成为工程设计与施工的核心内容之一。近年来, 随着工程成本管控和绿色建造理念的同步提升, 地基处理方案的选择不再仅局限于技术可行性与承载能力满足, 更强调经济成本、施工周期、环境影响和资源节约等多目标综合优化<sup>[1]</sup>。如何在满足结构安全性的前提下, 实现投资效率最大化和污染排放最小化, 已成为轨道交通车辆段地基处理方案研究的重要方向。基于此, 本文对换填法、CFG 桩复合地基和预制管桩等典型方案的经济性与环境效益开展对比评估, 以为工程实践提供量化依据和方案优化参考。

## 1 车辆段地基处理方案概述

### 1.1 换填法

换填法是浅层软弱地基处理中常用的简易技术, 其核心原理是将基础底面以下一定范围内的软弱土层(如淤泥、泥炭杂填土等)挖除, 置换为强度较高、稳定性好、透水性适宜的材料(如砂石、灰土、碎石、素土或工业废渣等), 再通过分层摊铺、压实或夯实, 使置换后的地基满足上部结构对承载力、变形及稳定性的要求。

### 1.2 CFG 桩复合地基

CFG 桩(水泥粉煤灰碎石桩)复合地基是一种常用的地基处理技术, 通过在软弱地基中设置由水泥、粉煤灰、碎石、砂等材料按一定比例拌合形成的刚性桩体, 与桩间土、褥垫层共同作用, 形成复合地基, 以提高地基承载力、减少沉降, 适用于处理黏性土、粉土、砂土、素填土及淤泥质土等多种地基类型。

### 1.3 预制管桩

预制管桩是一种在工厂预先制作成型的混凝土管状桩体, 通过机械沉桩(如锤击、静压等)将其植入地基, 利用桩体的高强度和刚度承担上部荷载, 并将荷载传递至深层坚实土层, 从而提高地基承载力、控制沉降, 是工程中常用的深基础或复合地基处理技术。

## 2 车辆段地基处理方案的经济性分析

### 2.1 换填法地基处理经济性分析

#### 2.1.1 成本构成及特点

(1) 材料成本: 占比最高(50%~60%), 取决于材料类型与运输距离。若采用就地取材的砂石、场地内开挖的合格素土或建筑垃圾再生料, 成本可降低 30%~50%; 外购级配砂石时, 运输半径每增加 10 km, 成本上升 10%~15% (如 1 km 内砂石成本约 30~50 元/m<sup>3</sup>, 10 km 外可达 80~120 元/m<sup>3</sup>)。 (2) 开挖与压实成本: 与处理深度(通常≤3 m)正相关。浅层(≤1 m)处理时, 挖掘机+振动压路机的台班费(约 1 500~2 000 元/台班)可覆盖 500~800 m<sup>2</sup>/天, 单位成本约

10 ~ 20 元 / m<sup>2</sup>；深度超过 2 m 后，开挖难度增加，成本上升 20% ~ 30%。(3) 弃土成本：软弱土层外运需支付弃土费 (20 ~ 50 元 / m<sup>3</sup>)，若为污染土，处理成本更高 (可达 100 ~ 200 元 / m<sup>3</sup>)。(4) 工期成本：施工周期短 (日均处理 1 000 ~ 2 000 m<sup>2</sup>)，对总工期影响小，可减少管理费用 (如人员工资、设备闲置费)，尤其适合赶工项目。(5) 辅助成本：包括场地排水 (排水沟 + 集水井约 5 ~ 10 元 / m<sup>2</sup>)、压实度检测 (环刀法 / 灌砂法约 2 ~ 5 元 / m<sup>2</sup>) 等，占比相对较低。

### 2.1.2 经济性优势与局限

(1) 浅层软弱土 (≤ 3 m)：单位成本通常为 50 ~ 150 元 / m<sup>2</sup>，远低于深层处理技术 (如 CFG 桩 200 ~ 500 元 / m<sup>2</sup>、预制管桩 300 ~ 800 元 / m<sup>2</sup>)，性价比突出。

(2) 大面积处理 (如车辆段、广场)：规模效应显著，材料采购和机械使用效率提升，单位成本可再降 10% ~ 20%。(3) 处理深度 > 3 m：挖填量激增，成本急剧上升 (每增加 1 m 深度，成本增加 50% 以上)，经济性劣于桩基础或排水固结法。(4) 材料稀缺区域：需远距离运输时，材料成本可能超过总造价的 70%，抵消技术优势。

## 2.2 CFG 桩复合地基处理经济性分析

### 2.2.1 成本构成及特点

(1) 材料成本：占比约 40% ~ 50%，主要包括水泥 (300 ~ 400 元 / 吨)、粉煤灰 (80 ~ 150 元 / 吨)、碎石 (50 ~ 100 元 / m<sup>3</sup>) 及砂。粉煤灰的掺入可替代 30% ~ 50% 水泥，每吨桩体材料成本降低 15% ~ 20%，且减少水泥生产的碳排放 (间接提升经济性)。(2) 施工成本：占比 30% ~ 40%，取决于成桩工艺 (长螺旋钻孔灌注法约 80 ~ 120 元 / 延米，振动沉管法约 60 ~ 100 元 / 延米)。桩长 5 ~ 15 m 时，单位面积成本 (含褥垫层) 通常为 200 ~ 400 元 / m<sup>2</sup>，桩长增加 1 m，成本上升 5% ~ 8%。(3) 设备与人工成本：机械化施工为主 (人工占比 ≤ 10%)，长螺旋钻机台班费约 2 000 ~ 3 000 元，日均成桩 50 ~ 80 延米，效率随桩距 (通常 1.2 ~ 2.0 m) 增大而提升。(4) 检测成本：低应变检测 (约 50 ~ 100 元 / 根)、静载试验 (约 5 000 ~ 10 000 元 / 点)，占总造价 5% ~ 10%。(5) 工期成本：施工周期短 (日均处理 800 ~ 1 500 m<sup>2</sup>)，比预制管桩缩短 10% ~ 20%，减少管理费用及设备闲置成本<sup>[2]</sup>。

### 2.2.2 经济性优势与局限

(1) 中深层软弱土 (5 ~ 15 m)：单位承载力成本 (每 kN 承载力造价) 比预制管桩低 20% ~ 40%，比钻

孔灌注桩低 30% ~ 50%，尤其适合大面积处理 (如车辆段、工业园区)。(2) 对沉降敏感项目：通过调整桩长、桩距可精准控制变形，减少后期修复成本 (如建筑物开裂修复费)。(3) 浅层地基 (≤ 3 m)：成本高于换填法 (50 ~ 150 元 / m<sup>2</sup>)，经济性不足。(4) 复杂地质 (如孤石、厚砂层)：成桩难度增加，易出现断桩、缩颈，返工成本可能增加 10% ~ 30%。

## 2.3 预制管桩地基处理经济性分析

### 2.3.1 直接成本 (占比 80% ~ 90%)

(1) 桩体采购成本：占比最高 (50% ~ 60%)，PHC 桩 (C80 混凝土) 单价约 180 ~ 250 元 / 延米，PC 桩 (C60 混凝土) 约 120 ~ 180 元 / 延米，随桩径 (300 ~ 600 mm) 增大而增加。单桩长度通常 6 ~ 15 m，拼接成本 (焊接或机械连接) 约 50 ~ 100 元 / 接头。(2) 沉桩施工成本：占比 20% ~ 30%，取决于沉桩工艺——静压法 (设备台班费 3 000 ~ 5 000 元 / 天) 适合软土，锤击法 (2 000 ~ 3 000 元 / 天) 效率更高但噪声大。日均沉桩 30 ~ 50 根 (约 200 ~ 400 延米)，单位延米施工费约 50 ~ 80 元。(3) 辅助成本：桩帽浇筑 (约 500 ~ 1 000 元 / 个)、截桩 (机械切割约 100 ~ 200 元 / 根) 等，占比 5% ~ 10%。

### 2.3.2 间接成本 (占比 10% ~ 20%)

(1) 检测成本：低应变检测 (80 ~ 150 元 / 根)、静载试验 (1 ~ 2 万元 / 点)，确保桩体完整性和承载力，占总造价 5% ~ 8%。(2) 工期与协调成本：施工速度快 (日均处理 1 ~ 2 万延米)，但需协调周边环境 (如振动影响赔偿)，敏感区域可能增加 3% ~ 5% 的额外费用。

## 3 车辆段地基处理方案的环境效益分析

不同地基处理方案在施工扰动、污染排放及资源利用效率方面存在显著差异，对车辆段工程周边环境与城市功能具有直接影响<sup>[3]</sup>。换填法在施工过程中需进行大规模土方开挖与运输，极易造成扬尘与噪声污染，同时若软弱土层需外运，则会带来一定的渣土处置压力，对生态扰动较大；但若采用本地材料或再生骨料，可显著提升资源循环利用水平。CFG 桩复合地基能够减少地面翻挖，实现“深层加固、浅层扰动”，在地基改善过程中同步利用粉煤灰等工业固废材料，有助于降低水泥生产带来的碳排放，体现较高的环境友好性<sup>[4]</sup>。预制管桩虽然成桩速度快，对地表扰动较小，但在沉桩过程中易引发振动与噪声扩散，特别是在靠近居民区、管线密集区域，需采取降噪措施方能达标<sup>[5]</sup>。

综合来看, 在环境敏感区域与生态约束较强的地段, CFG 桩因其施工扰动小、废弃物极少, 环境效益表现最优; 而换填法与预制管桩的环保优势更多依赖于施工组织优化与污染防控策略的实施。

#### 4 车辆段地基处理方案的综合评估与优化建议

##### 4.1 换填法地基处理

###### 4.1.1 适用场景

换填法在浅层 ( $\leq 3\text{ m}$ )、材料易获取、周边环境敏感的项目中 (如城市车辆段、市政广场), 可同时兼顾经济性与环境效益: 成本低于深层处理技术, 且污染可控、资源利用高效。

###### 4.1.2 优化方向经济性优化

优先选用本地材料或再生料, 合理规划运输路线; 控制处理深度 ( $\leq 3\text{ m}$ ) 以降低挖填成本。环境效益提升: 采用封闭运输车辆、雾炮机降尘; 对软弱土分类处理, 可利用土优先回用; 避免夜间施工以减少噪声扰民。

##### 4.2 CGF 桩复合地基处理

###### 4.2.1 适用场景

CFG 桩复合地基在中深层 ( $5 \sim 15\text{ m}$ ) 软弱土、大面积工程 (如车辆段、住宅小区) 中, 经济性与环境效益平衡最优: 成本低于传统桩基, 且污染可控、资源利用高效。

###### 4.2.2 优化方向经济性优化

采用长螺旋钻孔法减少施工损耗; 合理掺加粉煤灰 (根据地质调整比例) 降低材料成本; 批量采购材料获取价格优惠。环境效益提升: 优先选用低噪声设备; 桩头废料破碎后回用为褥垫层材料; 施工区域设置围挡降尘, 减少扬尘扩散。

##### 4.3 预制管桩地基处理

###### 4.3.1 适用场景

预制管桩在高荷载、中深层硬土层、大规模工程中优势明显: 虽初期成本较高, 但承载力可靠、工期短, 适合对结构安全要求严格的项目 (如车辆段咽喉区、高层建筑)。

###### 4.3.2 优化方向经济性优化

就近选择预制厂 (运输半径  $\leq 30\text{ km}$ ) 降低运费; 根据地质选择桩型 (软土用静压 PHC 桩, 砂层用锤击 PC 桩) 减少返工。环境效益提升: 敏感区域强制采用静压法, 配套声屏障和减振措施; 桩体余料回收用于路基填筑, 减少废弃物<sup>[6]</sup>。

## 5 结论

通过经济、环境及可靠性多方面对比分析, 可以获得下列结论:

1. 换填法在合理应用范围内 (浅层、材料本地化), 通过材料优化和施工管控, 既能以较低成本满足地基承载力要求, 又能减少资源消耗和污染排放, 是“经济—环境”双赢的浅层地基处理优选方案, 在需要尽快开始上部结构施工时, 换填法是兼顾可靠性与速度的最经济选择。

2. CFG 桩复合地基通过“工业废料利用+高效施工”模式, 在中深层地基处理中实现了经济性与环境效益的协同: 成本低于传统桩基技术, 同时减少资源消耗和污染排放, 是兼顾安全、经济与环保的优选方案。

3. 预制管桩凭借“质量可靠、承载力强”的特点, 在特定场景 (高荷载、中深层地基) 中具备不可替代性。虽初期成本较高且施工期环境影响需严格控制, 但通过工艺优化和规模效应, 可实现经济性与环境效益的平衡, 是大型工程地基处理的重要选择。

4. 本项目地基处理方法经综合考量地质条件、项目要求与三大对比维度后为最优选择方案。(1) 经济性: 在浅层, 选换填法; 在中等深度, 选 CFG 桩应对复杂挑战与保证工期, 在深厚软土或高荷载情况下, 预制管桩的高可靠性和速度使其周期成本反而更具优势。(2) 环境友好性: CFG 桩因其利废特性和对土体扰动小, 通常环境表现更优; 而换填法的弃土和预制管桩的噪声振动, 都需要严格的环保措施。(3) 可靠性: 可靠性源于“匹配”与“控制”。方案的可靠性不仅来自其自身特性, 更来自它与地质条件的匹配度。

## 参考文献:

- [1] 彭伟. 强夯施工技术在山地城市地区轨道车辆段的应用研究[J]. 科技创新, 2024(09):208-212.
- [2] 张卫国, 郑中朋, 李春宇, 等. 地铁车辆段软弱地层 PHC 管桩现场试验[J]. 路基工程, 2023(02):216-220.
- [3] 吴珩, 吕文甫, 齐小亮, 等. PHC 管桩在地铁车辆段中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2023(01):246-249, 28.
- [4] 许长建, 戴亚洲. 上盖车辆段地基基础及群桩基础施工处理技术研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(23):161-163.
- [5] 余炎挺. PHC 桩在软弱土层地铁车辆段地基加固中的应用[J]. 建筑安全, 2022, 37(08):13-16.
- [6] 汤梅芳, 杨庆刚. 预应力管桩在地铁车辆段软基处理中的应用[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(01):163-164.