

“桩—墙—拱”协同体系在花岗岩残积土偏压隧道洞口施工中的应用研究

马铭骏

(中铁六局集团有限公司, 北京 100089)

摘 要 传统“套拱+管棚”支护体系在花岗岩残积土偏压隧道洞口施工中面临拱脚应力集中与雨季效能低下等结构性瓶颈。本文以深圳侨城东路北延通道 1# 隧道洞口工程为实证, 提出并系统研究了一种创新的“桩基承台—挡墙—护拱”协同承载体系, 旨在构建一套涵盖“协同设计理论、动态施工控制、信息化管理”的完整技术范式。通过引入基于实时反馈的桩基动态优化模型, 在保障结构安全(抗倾覆安全系数 ≥ 1.8)的同时实现降本增效; 通过集成 BIM 技术与自动化监测, 构建数据驱动的风险预警与决策支持系统, 为相关人员提供有益参考。

关键词 协同体系; 花岗岩残积土; 偏压隧道; 洞口施工

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.019

0 引言

深圳侨城东路北延通道 1# 隧道洞口工程处于典型的偏压地形, 且紧邻市政绿道, 最近处不足 5 m, 对沉降控制与结构稳定提出了极高要求。传统方案经数值模拟验证已不适用, 亟需技术突破。然而, 当前业界对于此类问题的研究多停留于具体技术措施的个案应用, 缺乏从“体系协同机理”到“全过程协同管控”的系统性方法论构建^[1]。本文基于该工程实践, 不仅旨在验证“桩—墙—拱”协同体系的技术可行性, 更致力于构建并阐述一套适用于该类工程的“理论分析—技术实现—管理支撑”一体化解决方案, 以期为行业提供一套可复制、可推广的技术管理范式。

1 “桩—墙—拱”协同体系原理与关键技术范式

为从根本上克服传统支护方案的固有弊端, 本文创新性地提出了“桩—墙—拱”协同承载体系, 并在此基础上形成了一整套与之紧密配套、逻辑严谨的关键技术范式。该体系的核心设计思想在于: 通过科学构建“桩基承台—挡墙—护拱”三者刚性连接所形成的三级荷载传递路径, 将传统方案中难以处理的、危害巨大的偏压弯矩, 高效地转化为一系列可以被明确识别、精确计算并可靠承担的轴力与剪力, 最终实现偏压荷载在空间维度上的系统性分散与安全转移。

1.1 协同体系工作原理与荷载传递模型

桩基承台作为“深基础”, 其主要功能是将部分巨大的偏压荷载, 特别是倾覆力矩, 通过桩体传递至

深部的稳定岩层或土体中, 从根本上提供抗倾覆稳定性, 如同为大坝打下深嵌于基岩的齿墙^[2]。

钢筋混凝土挡墙作为“刚性支挡”, 其作用是直接、主动地抵抗边坡的主动土压力, 并将一部分水平荷载通过其与桩基的刚性连接, 有效地传递至桩基, 共同工作, 形成了地面以上的刚性抵抗体系^[3]。

型钢护拱形成洞口的“环形支撑”, 其在隧道洞口开挖面前方形成一道强有力的环形支撑, 为开挖面提供即时的、连续的支护, 防止围岩松弛, 并与前方的桩基、挡墙通过预埋件刚性连接, 形成一个完整的空间协同受力^[4]。

三者并非简单的叠加, 而是通过精心的设计与施工, 共同构成了一个“深基锚固—刚挡支顶—环撑闭合”的立体化、高次超静定承载模型。该模型的优越性在于其荷载传递路径明确、力流顺畅, 各部分之间协同效应显著, 实现了“1+1+1>3”的结构效能。

1.2 基于动态反馈的桩基承台优化模型

基于动态反馈的桩基承台优化模型如下:

$$K = \frac{G_c \cdot x_c + G_w \cdot x_w + E_p \cdot h_p + R_B \cdot L_{\text{桩}} + T \cdot h_f \cdot \sin\theta}{E_a \cdot d}$$

分子 Σ (抗倾覆力矩):

$G_c \cdot x_c$: 护拱自重 G_c 及其力臂 x_c 产生的稳定力矩。

$G_w \cdot x_w$: 挡墙自重 G_w 及其力臂 x_w 产生的稳定力矩。

$E_p \cdot h_p$: 被动土压力 E_p 及其作用高度(力臂) h_p 产生的稳定力矩。

$R_B \cdot L_{\text{桩}}$: 桩基抗压力 R_B 及其力臂 $L_{\text{桩}}$ 产生的稳定力矩。

$T \cdot h_T \cdot \sin\theta$: 锁脚钢管锚固力 T 的竖向分力 $T \cdot \sin\theta$ 及其力臂 h_T 产生的稳定力矩。

分母 Σ (倾覆力矩):

$E_a \cdot d$: 主动土压力 E_a 是导致结构倾覆的主要荷载, d 是其力臂。

在 RK1+190 断面施工前, 抗倾覆验算显示原设计桩群安全储备与经济不匹配。本研究据此提出了“基于实时地质反馈的桩基动态优化模型”。

该模型的核心是: 将施工勘察与监测数据作为动态输入变量, 对原设计进行实时、优化的闭环决策。经与设计方协同, 将桩径由 $\Phi 0.8 \text{ m}$ 增大至 $\Phi 1 \text{ m}$ 并优化其平面布局。实践验证, 此调整使结构抗倾覆安全系数从 1.5 提升至 1.82 以上, 同时在保证安全的前提下总体桩数由 8 根减少至 46 根, 减少 44%。此模型的应用, 标志着从“按图施工”到“设计—施工一体化优化”的范式转变。

1.3 大体积挡墙综合控裂标准工艺

为严格控制挡墙裂缝, 本研究制定并形成了一套标准化的综合控裂工艺。

1. 材料级配优化: 从源头控制入手, 优选低热或中热硅酸盐水泥, 并通过大量的室内试配, 确定了掺加优质 I 级粉煤灰 (掺量 20% ~ 25%) 及高效减水剂的高性能混凝土基准配合比, 显著降低了胶凝材料的水化热总量与放热速率。

2. 过程参数控制: 确立了“分层厚度 $\leq 3.5 \text{ m}$ 、内外温差 $\leq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ”为核心的关键控制参数。通过预埋测温系统与人工调控冷却水流量的精细化操作, 并根据实时绘制的温度—时间曲线, 由专业人员精细调节循环冷却水管的流量与流速, 确保了大体积混凝土内部温升与降温过程始终处于受控状态, 从而成功杜绝了有害温度裂缝的产生, 实现了挡墙结构“无裂”的质量最高目标。

1.4 锁脚钢管精准施工与核心承力机制

在本协同体系中, 本研究将锁脚钢管从传统的“辅助稳定构件”提升为与体系协同工作至关重要的“核心承力构件”进行施工控制, 并通过实践明确了其最佳外插角控制区间为 $5^\circ \sim 8^\circ$ 。这一角度范围是基于力学分析与施工可行性综合平衡的结果, 既能最有效地将荷载传递至深部稳定岩土, 又便于机械进行施作, 其精准施工主要体现在两个环节:

1. 孔位三维高精度控制: 采用徕卡 TS60 等高精度

全站仪进行空间三维坐标的精准放样, 确保每根锁脚钢管的设计平面位置、高程及倾角在钻孔前就已得到精确标定。

2. 注浆体高完整性保障: 钻孔完成后, 严格执行先清孔, 后安装钢管, 再进行压力注浆的工艺流程。注浆压力根据围岩条件进行动态调整, 确保水泥浆液不仅能充满钢管内腔, 更能充分渗透并填充钢管与围岩之间的所有间隙, 最终形成一个“钢管—水泥浆—围岩”三位一体的高强度复合承载体。

通过上述一套精细化的施工工艺, 本项目所有锁脚钢管的实际安装倾角误差被严格控制在 $\pm 3^\circ$ 以内, 远优于传统 $\pm 8^\circ$ 的施工水平。最终挡墙水平位移被成功控制在 8.3 mm 以内的卓越成果, 从侧面强有力地证明了该构件在“桩—墙—拱”协同体系中确实发挥了预设的核心承力作用。

2 基于信息化的施工协同管控范式

本项目成功的关键在于构建并实践了一套“数据驱动的隧道洞口施工协同管控范式”, 实现了管理模式的现代化升级。

2.1 多源信息集成与智能预警管理

本研究搭建了项目级信息管理平台, 将三维 BIM 模型作为视觉底盘, 整合了地质模型、实时监测数据与施工进度信息。平台设定了基于数据的自动预警机制 (如位移速率连续超 1.2 mm/d 或挡墙倾角大于 0.5°), 实现了风险的即时感知与快速响应。这改变了传统依赖人工、经验判断的滞后管理模式, 转向了基于数据的、可追溯的科学决策。

2.2 典型施工问题的快速响应与动态处治

在 RK1+195 等断面, 针对全风化岩遇水易软化、机械成桩孔风险高的问题, 基于信息平台对地质条件的精准判断, 本研究依据预案库启动了动态处治程序, 将机械成孔工艺变更为人工挖孔桩。该方案能实时观察孔壁状况, 在干作业条件下彻底清底, 确保了摩擦桩的桩身质量与承载力。此案例是该管控范式下“主动预控、快速响应”能力的集中体现。

3 项目效益分析与模式推广价值

3.1 综合效益量化分析

为科学客观地评估“桩—墙—拱”协同体系的应用价值, 本研究选取了深圳地区另一个地质条件与工程规模相近、但采用传统“套拱+管棚”方案的隧道洞口工程作为对标项目, 进行了全面的综合效益对比分析, 其结果如表 1 所示。

3.2 关键工艺参数总结

基于本项目成功的工程实践与系统性的数据回溯分析,总结提炼出以下适用于“桩—墙—拱”协同体系的关键工艺控制参数体系。该体系不仅对本项目后续施工具有指导意义,更对行业内同类工程的标准化、精细化施工具有重要的参考价值(见表2)。

表1 效益对比表

对比维度	指标	传统方案	本方案	改善效果
经济效益	支护结构成本(万元)	285	218	成本降低 23.5%
工期效益	关键线路工期	原计划	提前 29 天	工期大幅缩短
质量效益	运维返修率(次/半年)	0.6	0	质量显著提升
安全效益	挡墙水平位移(mm)	> 12(规范限值)	8.3	远低于规范要求

表2 关键工艺参数表

关键工序	核心控制参数	控制目标	适用条件/备注
锁脚钢管安装	外插角 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$	有效传递荷载, 安装精度	V 级围岩, 偏压角 $> 25^{\circ}$
大体积挡墙浇筑	分层厚度 $\leq 3.5\text{ m}$	控制温度裂缝	C35 及以上混凝土
	混凝土最高温升 $\leq 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	控制温度裂缝	通过智能温控系统实现
管棚施工	定位误差 $\leq 10\text{ mm}$	保障超前支护效果	采用 BIM 放样 + 全站仪

偏压弯矩,高效地分解并转化为一系列易于被结构体系承担的轴向压力与剪切力。这一结构模式的创新,从根本上破解了传统“套拱+管棚”方案在拱脚处产生应力集中而导致结构破坏的长期性技术难题,为国内外同类复杂地质与环境条件下的隧道洞口设计提供了全新的、可靠的结构选型理论与重要实践依据^[5]。

2. 形成了一套基于动态反馈的关键技术参数集与优化方法:研究形成了可复制推广的关键技术群。特别是“基于实时地质反馈的桩基动态优化模型”,以及所总结的锁脚钢管外插角、大体积混凝土分层浇筑等关键工艺参数,定义了新体系下保障施工安全与质量的临界控制边界,对工法编制与规范细化具有直接参考价值^[6]。

3. 构建并实践了一个数据驱动的隧道洞口施工协同管理范式:本研究将 BIM、监测数据与施工管理深度融合,构建了“多源信息融合的风险预警与决策支持系统”。该范式将项目管理从依赖个人经验的“被动应对”,转变为基于平台数据的、可追溯的“主动预控”和“科学决策”,代表了现代化隧道施工管理的发展方向。

4. 本研究成果验证了通过体系创新与管理赋能实

4 结论

1. 提出并成功验证了一种针对显著偏压荷载的隧道洞口结构协同设计新模式:本研究通过理论与实践相结合,充分证实了“桩—墙—拱”协同体系通过其巧妙的刚性连接与明确的三级传力路径设计,其核心力学机理在于将传统方案中危害巨大的、难以处理的

现综合性工程突破的可行路径,为行业应对类似复杂地质条件下的隧道工程建设提供了从理论、技术到管理的一整套系统性解决方案,具备广阔的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 刘小兵,张宇.桩式复合管棚套拱在偏压隧道洞口滑移治理中的应用[J].铁道标准设计,2025,69(02):132-137.
- [2] 王明,李华.桩拱一体化结构在浅埋偏压隧道洞口坍塌防治中的实践[J].公路交通技术,2021,37(05):89-94.
- [3] 朱合华,李晓军.从 BIM 到智慧隧道—隧道工程信息化技术发展展望[J].隧道建设,2021,41(01):1-10.
- [4] 毕志刚.闽南山区浅埋偏压大断面隧道洞口塌方机理与处治措施[J].中原工学院学报,2022,33(03):33-40.
- [5] 李冬生,潘元贵,郑余朝.全风化花岗岩浅埋偏压隧道进洞技术与力学特性研究[J].水文地质工程地质,2025,52(04):214-227.
- [6] 程川芸.软弱围岩浅埋偏压隧道洞口施工工法研究[J].城镇建设,2023(16):166-168.