

输水隧洞临近高压电塔群微型钢管桩协同 加固控制变形技术研究

李钰锟

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710065)

摘要:某新建输水隧洞下穿既有高压走廊带,施工风险极高。本文以风险分析为基础,构建并验证了一套协同加固变形控制方案。采用控制变量法设计多组典型工况,通过建立高压铁塔-隧洞施工相互作用的三维数值模型并与现场监测结果进行对比,系统量化了塔基袖阀管注浆、微型钢管桩隔离及钢拱架槽钢托梁等组合措施的加固效果。数值计算与现场监测结果表明:采用微型钢管桩作为隔离桩,辅以隧洞内及地表综合加固措施,可有效控制铁塔的累计沉降与不均匀沉降,确保其变形及受力状态处于安全可控范围。该方案不仅保障了高压铁塔的安全运行与隧洞施工安全,而且有效提升了施工效率,具有显著的技术经济效益。进一步分析表明,在控制敏感结构物沉降方面,微型钢管桩隔离技术的效果优于局部地袖阀管注浆加固,且其施工速度快、基础扰动小的优势尤为突出。本文研究成果可为同类工程提供参考。

关键词:输水隧洞; 高压电塔群; 沉降控制; 微型钢管桩

中图分类号:TU991

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)04-0042-09

doi:10.13402/j.gcjs.2026.04.041

Micro-pile collaborative reinforcement for deformation control in water conveyance tunnels and tower protection

LI Yukun

(CCCC First Highway Survey Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: A newly constructed water conveyance tunnel underpasses an existing high-voltage transmission corridor, posing extreme construction risks. Based on risk analysis, this study develops and validates a synergistic reinforcement system for deformation control. Innovatively adopting a controlled-variable approach, multiple scenario groups were designed to systematically quantify the effectiveness of combined measures-including sleeve-pipe grouting for tower foundation reinforcement, micro-pile for isolation protection, and steel arch supports with channel steel sill beams plus multi-angle lock-foot anchors in a two-bench excavation method-through 3D numerical modeling of tower-tunnel interaction and field monitoring. Numerical simulations and field implementation jointly demonstrate that employing micro-piles as isolation barriers, integrated with comprehensive surface and subsurface reinforcement techniques, effectively controls cumulative and differential settlements of transmission towers, maintaining deformations and stress states within safe thresholds. This solution ensures operational safety of high-voltage towers and tunnel construction while significantly enhancing efficiency and cost-effectiveness. Further analysis reveals that the isolation technique outperforms localized sleeve-pipe grouting in mitigating settlements of sensitive structures, with notable advantages in rapid installation and minimal foundation disturbance. The results can provide references for relevant projects.

Key words: hydraulic tunnel; high-voltage transmission tower; settlement control; micro-pile

收稿日期: 2025-10-31

作者简介: 李钰锟(1993—),男,工程师,从事隧道与地下结构工程方向工作。

在城市排水问题严峻的背景下,雨污分流成为关键解决方案,其中的输水隧洞作为地下动脉,高效承担着输水重任。然而,输水隧洞一般断面小,为满足引水需求,需长距离穿越城市建成区,为减少建(构)筑物的影响,有时需利用高压电力走廊带敷设。高压铁塔为高耸格构式钢结构,整体刚度大、重心高,作为电力传输网络的核心节点,其基础对不均匀沉降极为敏感:即使微小的沉降差,也可能导致铁塔倾斜、输电线路张力失衡,引发线路跳闸、铁塔倒塌等事故,直接威胁电力系统稳定与公共安全。

轩俊杰等^[1]通过风险分析、监控量测与数值模拟的综合手段,验证了“地表注浆加固+机械开挖+加强支护+沉降监测”施工方案的可靠性。实践表明,该方案能有效控制隧道拱部沉降及邻近高压电塔变形。田军生等^[2]通过风险分析与三维数值模拟比选,提出采用H型框架梁加固高压铁塔塔基,结合三台阶留核心土法开挖隧道,有效控制铁塔沉降变形。田鲁鲁等^[3]通过数值模拟比选,确定“大管棚+H型框架梁+台阶法”为最优方案,将铁塔沉降问题转化为整体基础受力,实测变形满足规范要求,验证了洞内外协同处治方案的安全性与有效性。

本文针对输水隧洞施工过程中临近高压铁塔的安全控制难题,创新构建洞内外协同加固变形控制体系。通过建立高压铁塔-隧洞施工相互作用的三维数值模型,结合现场监控量测数据,采用控制变量法系统量化微型钢管桩隔离、塔基袖阀管注浆及钢拱架槽钢托梁的组合效应,揭示多措施协同作用对铁塔沉降响应的调控机制。

1 工程案例

1.1 工程概况

某输水隧洞沿工业园南侧高压走廊带向西敷

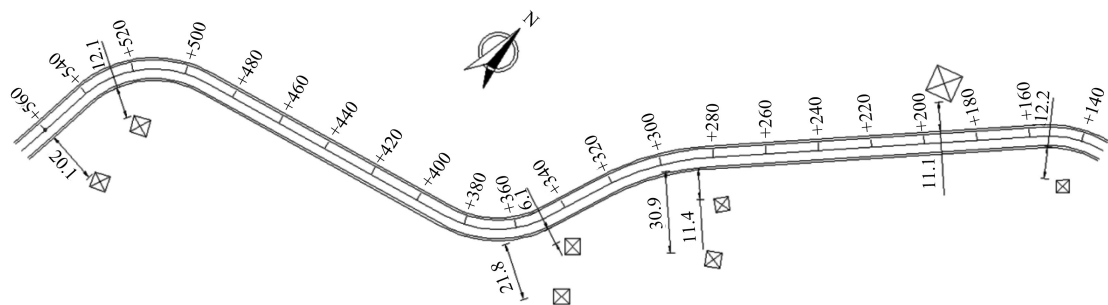


图1 隧洞与铁塔平面位置关系

设,采用浅埋暗挖法施工,隧洞全长约为 590 m,断面尺寸为 7.0 m×6.93 m,洞顶覆土厚度为 26.7 m,围岩均为 V 类,采用复合式衬砌结构。隧洞与 3 条高压输电线路平面交叉,共涉及 8 处高压铁塔,其平面位置关系如图 1 所示。其中,隧洞开挖轮廓线距离高压线塔基础最大水平净距约为 30.9 m,最小水平净距约为 6.1 m。

本文以 K6 + 520 处铁塔为例, 塔基础与隧洞开挖轮廓线水平净距为 12.1 m, 该塔采用桩基础, 基础深度较大, 桩端略高于隧洞底部, 竖向净距为 3.7 m, 剖面位置关系如图 2 所示。该塔建设于 2006 年, 采用 JTA243 塔型, 呼高为 15 m, 为耐张角钢塔。基础为框架桩基础, 根开 6.5 m, 主桩直径为 1.0 m, 露出地面高度为 1.3 m, 埋深为 18.5 m, 框架梁截面尺寸为 0.5 m × 0.8 m, 电塔基础如图 3 所示。

1.2 地质条件

拟建隧洞地处沿海低山丘陵区,属莲花山余脉延展地带,区内山体呈圆矮状,坡体坡度缓和。勘察结果显示,隧址区地层自上而下依次为第四系人工堆积层、冲洪积层、风化残坡积层,其下伏基岩为白垩系燕山四期侵入岩,各层具体特征分述如下。

(1) 第四系人工堆积层: 场地表层以黏性素土为主, 平均厚度为 4.52 m, 分布广泛; 填石呈零星状分布, 多见于道路路基区域, 回填土多具不均匀性。

(2) 第四系冲洪积层：地层组分复杂，主要包含淤泥、淤泥质土、粉质黏土、砾质黏性土、中粗砂及砾砂等，细砂仅在局部区域零星分布。

(3) 第四系风化残坡积层: 在场地内分布范围较广但连续性差, 部分地段无此层分布, 且层厚变异较大。该层由花岗岩风化残积形成, 以砾

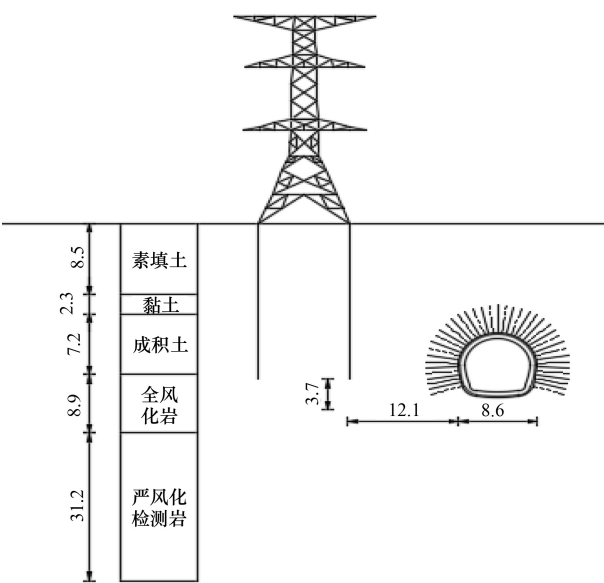


图 2 隧洞与铁塔位置关系剖面

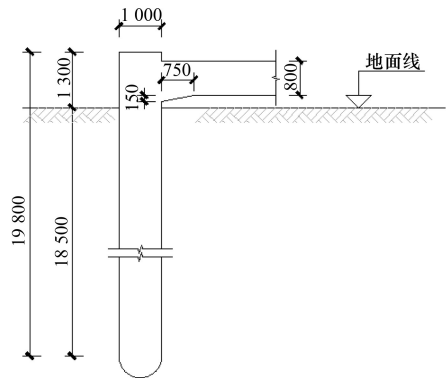


图 3 电塔基础设计

质黏性土为主要组分，土体状态介于可塑～硬塑之间，整体厚度较大。

(4) 下伏基岩(白垩系燕山四期侵入岩)：岩性为粗中粒黑云母花岗岩，受风化作用影响，基岩风化程度各异，主要呈现为全风化岩、强风化岩、弱风化岩及微风化岩 4 种状态。

勘察发现场地分布有地下水，其水位埋深约为 17 m。隧洞所在区域内影响隧洞开挖稳定性和铁塔沉降的关键岩土层物理力学参数如表 1 所示。

2 铁塔保护综合技术方案

2.1 铁塔位移控制标准

2.1.1 相关规范规定

《架空输电线路基础设计规程》(DL/T 5219—2014)对杆塔基础的最大倾斜率提出了要求。该规范 5.3.1 节指出，对于某些有特殊变形要求的杆塔基础，基础的最大倾斜率(不含基础预埋值)，应满足表 2 的要求。

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)关于建筑物的地基变形允许值应按 5.3.4 规定采用。其中对于高结构基础的沉降量,可按表 3 控制。

由于输电铁塔非单纯的高耸结构，受天气影响巨大，其受力情况复杂。对于整体均匀下沉，铁塔本身不敏感，但应避免铁塔沉降导致导线张力变化过大，影响相邻塔位使用条件变化，故按单腿位移，最大倾斜所对应的沉降差控制。

2.1.2 位移控制标准确定

结合铁塔相关规范和现状运行情况，综合确定铁塔的位移控制标准如下。

- (1) 各基础累计沉降变形不大于 200 mm。
- (2) 基础倾斜率不大于 0.006。

2.2 输水隧洞支护设计

新建输水隧洞采用复合式衬砌结构形式,断面为曲墙、圆拱,断面净宽为 7.00 m、净高为 6.93 m，隧洞结构尺寸及支护参数如图 4 所示。初期支护采用联合支护体系,由超前小导管、径向小导管、钢

表 1 场地内主要岩土层物理力学参数

地层名称	状态	密度/(g·cm ⁻³)		压缩模量/MPa	变形模量/MPa	直剪试验				承载力特征值/kPa	土的侧压力系数
		湿密度	饱和密度			快剪		固结快剪			
						内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa		
素填土	松散状	1.84	1.91	4.00	—	10	10	12	12	80	0.45
砾质黏性土	可塑	1.92	1.94	4.54	—	15	20	15	22	130	0.40
残积土	可塑~硬塑	1.81	1.87	4.25	8	20	20	22	24	160	0.38
全风化花岗岩	坚硬土状	1.85	1.90	4.30	14	22	22	24	26	300	0.35
微风化花岗岩	长柱状	2.60	—	—	—	40	1 200	—	—	3 500	—

表 2 不同杆塔总高度下地基变形允许值

$H_g \leq 50$	$50 < H_g \leq 100$	$100 < H_g \leq 150$	$150 < H_g \leq 200$	$200 < H_g \leq 250$	$250 < H_g \leq 300$
0.006 00	0.005 00	0.004 00	0.003 00	0.002 00	0.000 15

注： H_g 为杆塔总高度，m。

表 3 建筑物的地基变形允许值

变形特征		地基土类型	
		中、低压缩性土	高压缩性土
工业与民用建筑相邻柱基的沉降差	框架结构	0.002 0 <i>l</i>	0.003 <i>l</i>
	砌体墙填充的边排柱	0.000 7 <i>l</i>	0.001 <i>l</i>
	当基础不均匀沉降时	0.005 0 <i>l</i>	0.005 <i>l</i>
	不产生附加应力的结构		
多层和高层建筑的整体沉降/mm	$H_g \leq 24$	0.004 0	
	$24 < H_g \leq 60$	0.003 0	
	$60 < H_g \leq 100$	0.002 5	
	$100 < H_g$	0.002 0	
高耸结构基础的倾斜	$H_g \leq 20$	0.008 0	
	$20 < H_g \leq 50$	0.006 0	
	$250 < H_g \leq 100$	0.005 0	
	$100 < H_g \leq 150$	0.004 0	
	$150 < H_g \leq 200$	0.003 0	
	$200 < H_g \leq 250$	0.002 0	
高耸结构基础的沉降量/mm	$H_g \leq 100$	400	
	$100 < H_g \leq 200$	300	
	$200 < H_g \leq 250$	200	

注： l 为相邻柱基的中心距离，mm。

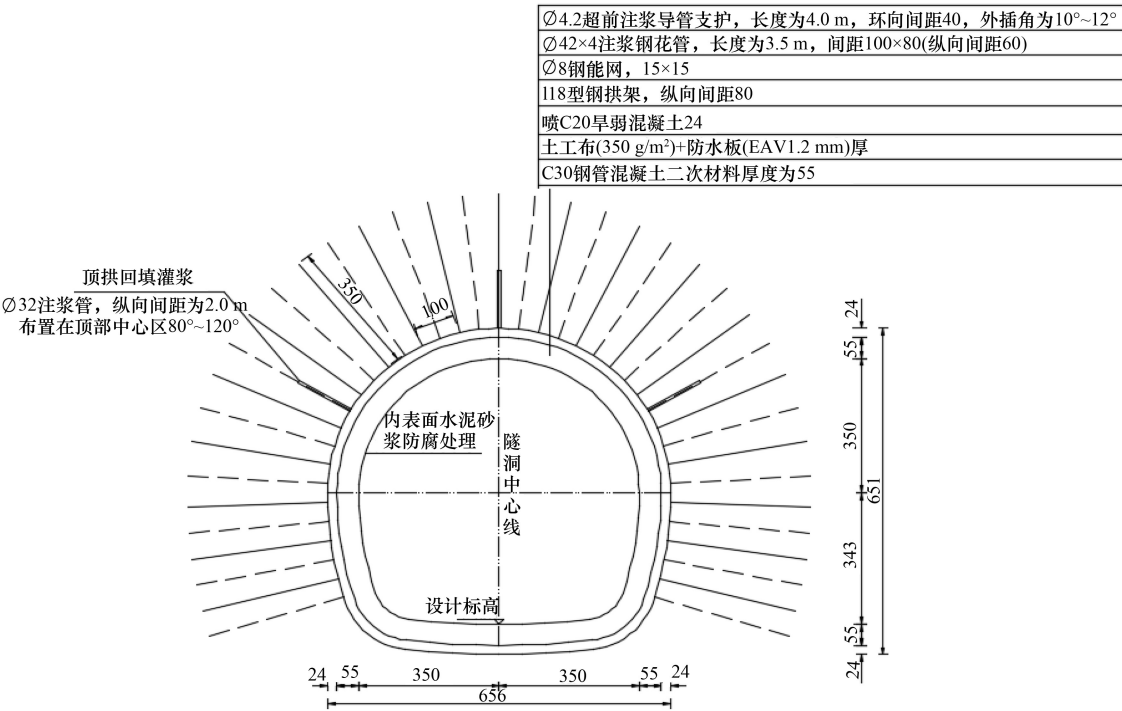


图 4 台阶分部开挖法横断面示意

cm

筋网片、型钢拱架及 C20 早强喷射混凝土组成, 支护厚度为 24 cm, 二次衬砌选用抗渗等级 P8 的 C30 钢筋混凝土, 厚度为 55 cm, 初支、二衬之间采用柔性防水层。

隧洞开挖采用上下台阶预留核心土工法, 施工时先将隧洞断面划分为上下两部分。上部施工中, 先开挖半环形导坑并保留核心土, 随即完成上部钢拱架架设与混凝土喷射作业; 待上部初期支护稳定后, 再依次开挖核心土及下部隧洞, 同步进行下部钢拱架安装与混凝土喷射, 最后开展防水板铺设及二次衬砌施工, 详细步骤如图 5 所示, 工法流程如图 6 所示。

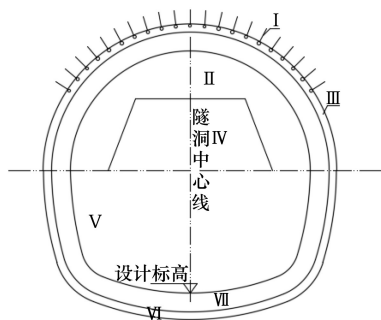


图 5 台阶分部开挖法横断面示意

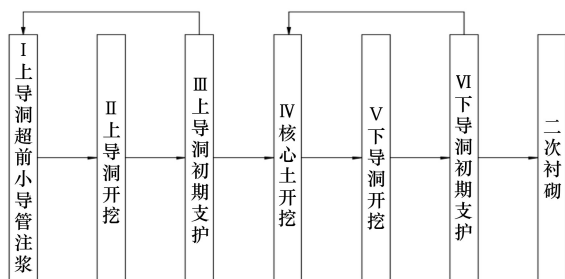


图 6 台阶分部开挖法施工工序流程

2.3 临近铁塔专项保护技术

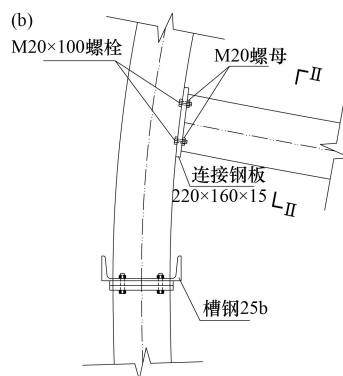
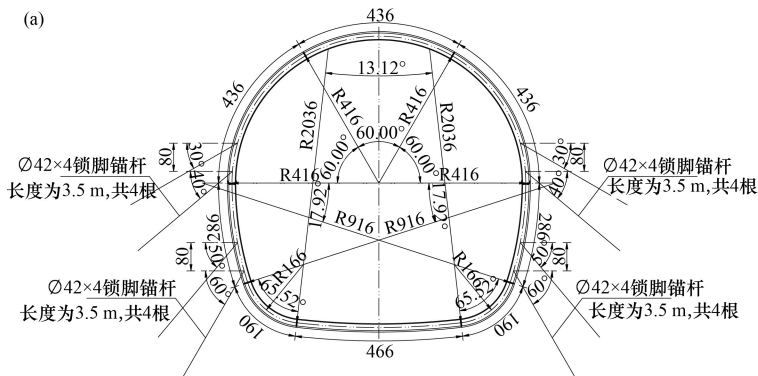
高压铁塔桩基距离输水隧洞开挖轮廓线最近

水平距离为 12.1 m, 铁塔基础底面标高在隧洞开挖轮廓线底标高以上 3.7 m, 此段输水隧洞洞顶覆土埋深 13.5 m, 铁塔基础位于隧洞开挖影响范围内, 考虑到隧洞在开挖过程中会对铁塔带来不均匀沉降, 危及铁塔的运行安全, 严重时可能造成铁塔倒塌或输电线路中断等严重后果, 在施工过程中, 提出保护技术方案如下。

(1) 方案一: 钢拱架拱脚抗沉槽钢。上台阶初期支护钢拱架在拱脚设置纵向槽钢托梁, 将钢架纵向连为整体, 减少沉降。设置 8 处 $\varnothing 42 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 锁脚锚杆, 外插角度由上至下依次为 30° 、 40° 、 50° 、 60° , 如图 7 所示。锁脚锚杆与钢拱架采用 U 型钢筋翼缘帮焊的连接方式, 如图 8 所示。锁脚锚杆采用水泥砂浆或纯水泥浆高压或劈裂式注浆, 压力不小于 $2 \sim 3 \text{ MPa}$, 具体压力根据现场试验确定。

(2) 方案二: 袖阀管注浆加固地层。隧洞开挖前期, 对沿线高压铁塔的基础资料进行收集, 明确铁塔基础结构形式。施工准备阶段, 在铁塔基础周边预先打设注浆管; 隧洞开挖前, 对塔基下方及周边地层注入水泥浆进行加固处理。开挖过程中, 实时监测铁塔基础的变形数据, 根据监测结果开展跟踪补偿注浆, 以此控制铁塔差异沉降。

地层注浆加固采用两排 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 袖阀管, 注浆范围为铁塔桩基周围, 从铁塔基础外边线 4.5 m 开始沿铁塔四周布置两排袖阀管, 排间距为 0.6 m, 孔间距为 0.6 m, 袖阀管长度为 12 m, 与竖直方向夹角 15° , 加固深度为袖阀管底部至地表。袖阀管断面布置如图 9 所示。



(a) 钢拱架立面图; (b) 钢拱架连接大样图

图 7 钢拱架组装

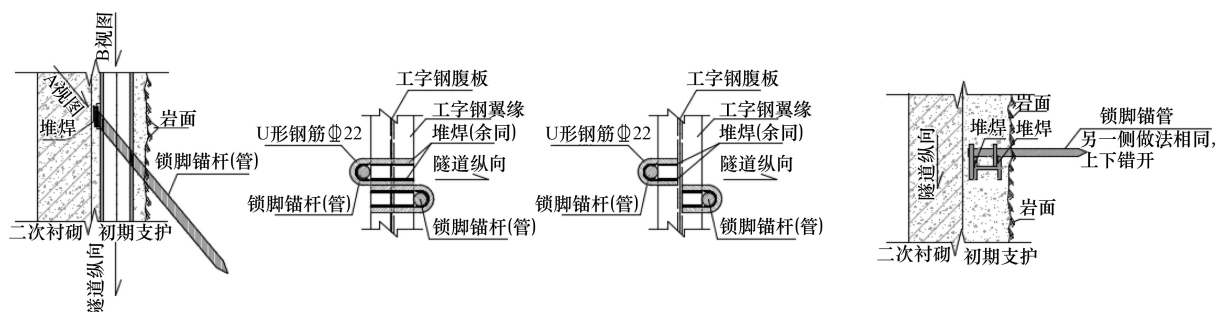


图 8 锁脚锚杆连接大样

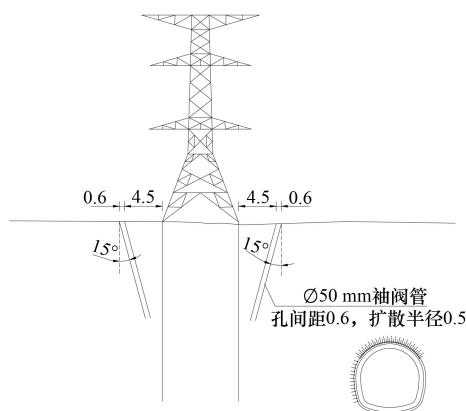


图 9 袖阀管注浆加固断面

注浆浆液扩散半径不小于 0.5 m, 浆液采用水泥—水玻璃双液浆, 填土地层孔隙较大时用水泥砂浆代替水泥浆, 水泥浆水灰比为 1:1, 水泥浆与水玻璃重量比为 1:0.05, 水玻璃浓度 35 波美度, 水玻璃模数 2.4, 水泥采用 42.5 MPa 级普通硅酸盐水泥, 建议注浆压力 1.0 ~ 1.5 MPa, 可根据实际地质情况及现场试验确定。

(3) 方案三: 隔离桩保护。在靠近隧洞侧的高压铁塔基础外边打设微型钢管桩, 对铁塔进行隔离保护, 如图 8 所示。微型钢管桩采用 $\Phi 299 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 钢管, 并在钢管内插入 32 a 工字钢增强刚度, 并以 C20 细石混凝土回填桩身, 顶部以混凝土冠梁将微型钢管桩连接成整体, 桩底深入隧洞底部 5 m, 桩长为 30 m。隔离桩平面布置如图 10 所示。

(4) 方案四: 钢拱架拱脚抗沉槽钢 + 袖阀管跟踪注浆 + 隔离桩保护综合方案。本方案为方案一至三的综合优化措施, 通过钢拱架抗沉结构、地层动态注浆补偿和刚性隔离防护的协同作用, 形成多层次、立体化的沉降控制体系。在隧洞开挖过程中, 钢拱架槽钢托梁可有效约束初期支护

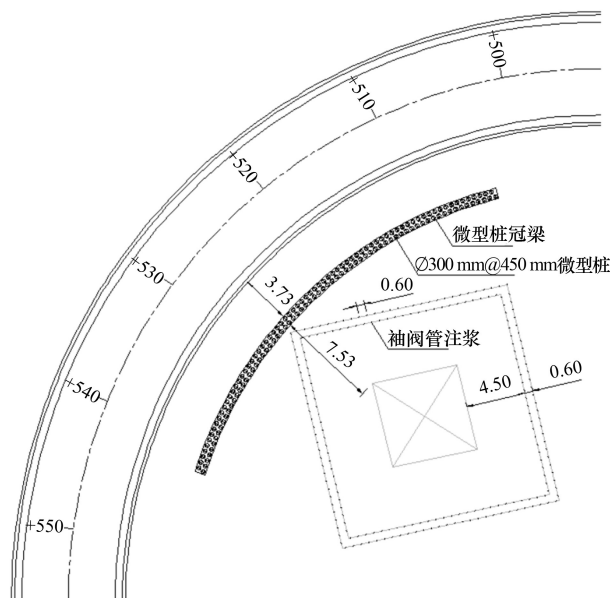


图 10 隔离桩平面布置

变形, 袖阀管跟踪注浆实时补偿地层损失并改良土体力学性能, 而微型钢管隔离桩则作为刚性屏障阻断开挖扰动向铁塔基础的传递。三者有机结合, 既可主动调控施工期变形, 又能提供长期稳定性保障, 尤其适用于对差异沉降极为敏感的高压铁塔保护场景。其综合防护效能显著优于单一措施, 可最大限度降低工程风险。

3 数值模拟与监测验证

为研究一系列保护措施的处理效果, 采用有限元软件进行数值模拟分析。模拟分析主要考虑设置抗沉槽钢、加强锁脚锚杆、隔离桩和袖阀管注浆后隧洞开挖对既有铁塔基础的变形影响。

3.1 模型及计算软件

本文采用岩土工程 MIDAS GTS NX 有限元分析软件进行施工全过程数值模拟^[4]。该软件专为岩土工程设计与分析开发, 广泛应用于隧洞、边

坡、地基、地下结构等领域，具有强大的建模功能和高效的求解能力，可精确模拟复杂地质条件与结构相互作用。在模拟土体行为时，软件提供经典的摩尔库伦模型。该模型基于摩尔 - 库伦准则，考虑土体黏聚力与内摩擦角等参数，描述土体在剪切破坏下的强度特性，是岩土工程中常用的本构模型之一，较适用于分析隧洞开挖对周围环境的影响。模型长度、宽度均为 70 m，高度为 57 m，共 185 353 个单元，从上往下划分 4 个地层，依次为素填土、砾质黏性土、残积土、微风化花岗岩，有限元分析模型如图 11 所示。

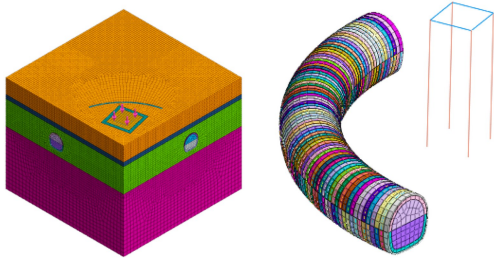


图 11 有限元模型

3.2 模型参数

隧洞和围岩采用三维实体单元模拟；注浆小导管、钢拱架、槽钢、锁脚锚杆采用植入式梁单元模拟；微型钢管桩采用梁单元模拟；袖阀管注浆对土体的改良采用提高围岩参数来模拟^[5]；将高压铁塔视作施加于塔基桩顶的竖向荷载，铁塔桩基和框架梁采用梁单元模拟。计算中采用了修正摩尔—库伦准则^[6]。结合实际的地质情况和加

固措施，建立三维模型，其具体参数如表 4 所示。

3.3 计算工况

本研究采用对比分析方法，针对隧道近接高压铁塔施工的防护措施效果，设置了 4 种典型工况进行数值模拟计算：

(1) 工况一采用钢拱架拱脚抗沉槽钢 + 袖阀管跟踪注浆 + 隔离桩保护的綜合防护方案。

(2) 工况二为袖阀管跟踪注浆 + 隔离桩保护的組合措施。

(3) 工况三实施钢拱架拱脚抗沉槽钢 + 袖阀管跟踪注浆的联合方案。

(4) 工况四则采用钢拱架拱脚抗沉槽钢 + 隔离桩保护的組合防护方式。

这 4 种工况的计算结果对比分析，可系统评估不同防护措施組合对控制地层变形和保护邻近高压铁塔的效果差异。

3.4 计算结果

经有限元模拟分析，工况一最大地表沉降 - 12 mm，最大拱顶沉降 - 9.5 mm。高压铁塔基础最大沉降 - 18.9 mm，最小沉降 - 10.6 mm，高压铁塔基础最大差异沉降为 8.3 mm，基础最大倾斜率 0.001 3，累积沉降值与基础倾斜率均在允许变形范围内，满足规范要求。有限元计算分析的地层竖向位移云图如图 12 所示。

通过模拟在施工阶段采取不同的加固措施，可评估各项措施对控制铁塔变形的作用效果差异，

表 4 计算模型参数

材料类别	压缩模量/MPa	弹性模量/MPa	容重/(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
素填土	4.00	12.00	18.40	0.30	10.0	10.0
砾质黏性土	4.54	13.62	19.20	0.30	15.0	15.0
残积土	4.25	12.75	18.10	0.30	16.0	16.0
全风化花岗岩	4.25	12.75	18.50	0.22	16.0	16.0
微风化花岗岩	667.00	2 000.00	26.00	0.20	1 200.0	40.0
袖阀管注浆(素填土)	6.00	18.00	19.32	0.27	15.0	11.0
袖阀管注浆(砾质黏性土)	6.81	20.43	20.16	0.27	22.5	16.5
袖阀管注浆(残积土)	6.38	19.13	19.01	0.27	24.0	17.6
C20 喷射混凝土	—	23 000.00	22.00	0.20	—	—
C20 细石混凝土	—	25 500.00	25.00	0.20	—	—
C30 混凝土	—	30 000.00	25.00	0.20	—	—
钢材	—	210 000.00	78.50	0.30	—	—

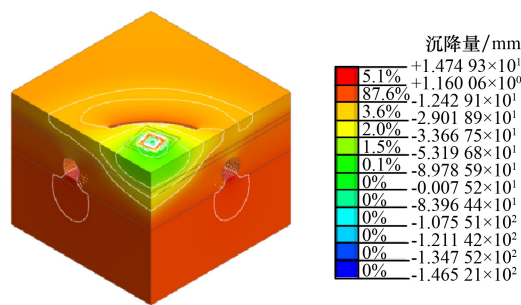


图 12 模型整体沉降云图

如表 5 所示。

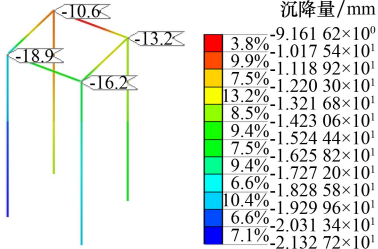
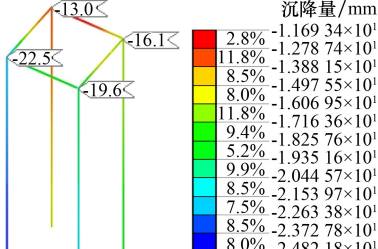
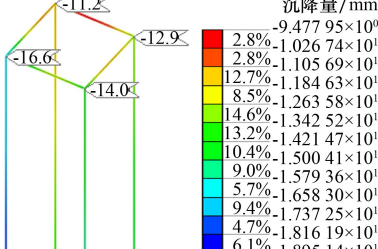
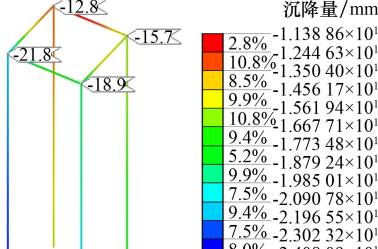
(1) 工况一：3 种措施协同覆盖了扰动传递、地层损失、支护变形三大沉降来源。隔离桩阻断了开挖扰动向塔基的传递，袖阀管补偿了地层损失，钢拱架控制了支护变形。三者的协同效应使铁塔基

础承受的附加沉降最小，平均沉降达 14.7 mm，为最优控制结果。

(2) 工况二：保留了隔离桩的扰动阻断作用与袖阀管的地层补偿作用，但缺失钢拱架对支护变形的控制，导致初期支护的拱脚下沉未被有效抑制，支护变形向地层传递的垂直沉降增加。虽此部分沉降未突破隔离桩的屏障，但仍使平均沉降升至 17.8 mm，略高于工况一。

(3) 工况三：虽通过钢拱架控制了支护变形、袖阀管补偿了地层损失，但隔离桩的缺失使隧道开挖引起的水平扰动与塑性区扩展直接传递至铁塔基础(水平距离仅 12.1 m)。此时，地层向洞内的侧向位移未受任何屏障阻隔，塔基因直接承受

表 5 不同工况下铁塔基础的沉降对比 mm

工况	位移云图	基础编号	基础沉降	平均沉降	最大差异沉降
一		DT1	-16.2	-14.7	8.3
		DT2	-13.2		
		DT3	-18.9		
		DT4	-10.6		
二		DT1	-19.6	-17.8	9.5
		DT2	-16.1		
		DT3	-22.5		
		DT4	-13.0		
三		DT1	-31.9	-37.2	9.0
		DT2	-35.8		
		DT3	-40.9		
		DT4	-40.0		
四		DT1	-18.9	-17.3	9.0
		DT2	-15.7		
		DT3	-21.8		
		DT4	-12.8		

承受开挖扰动而产生大幅沉降,平均沉降高达 37.2 mm,远大于其他工况,说明隔离桩作为“扰动传递阻断器”在控制铁塔沉降变形上发挥着决定性作用。

(4) 工况四:保留了隔离桩的扰动阻断作用与钢拱架的支护变形控制作用,但缺失袖阀管对铁塔基础周边地层的改良与强度补偿。由于塔基下方土体未经历注浆加固,其抗变形能力较低,在隧道开挖扰动下更易发生塑性变形,导致地层附加沉降增大。但因隔离桩已阻断了主要扰动传递路径,钢拱架也有效约束了支护结构变形,此部分附加沉降被限制在有限范围内,平均沉降为 17.3 mm,与工况二(17.8 mm)结果相近。

3.5 监测

根据 4 种工况的数值模拟结果,经过综合比选后,采用工况一所采取的综合保护措施对铁塔进行加固保护。自 2023 年 4 月隧洞开挖至 2023 年 8 月隧洞二衬结构施工完毕,对铁塔进行沉降监测,监测点布置在铁塔基础上,塔基沉降监测频率随着铁塔变形的稳定,由开始的 1 次/d 逐渐降频为 1 次/7 d,监测点布置如图 13 所示。

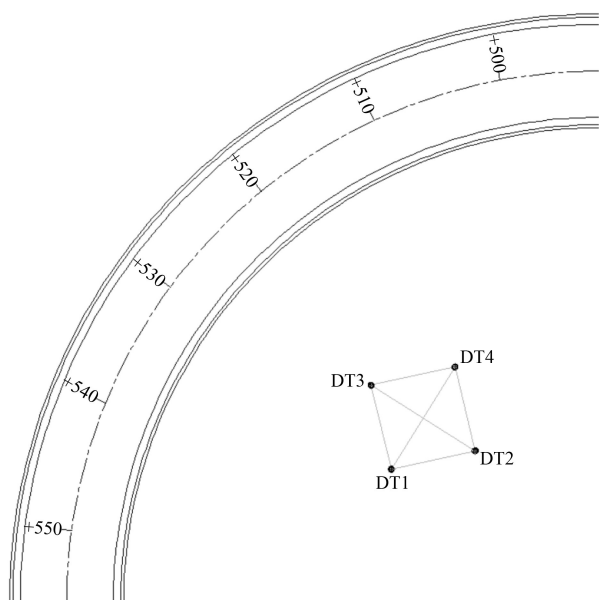
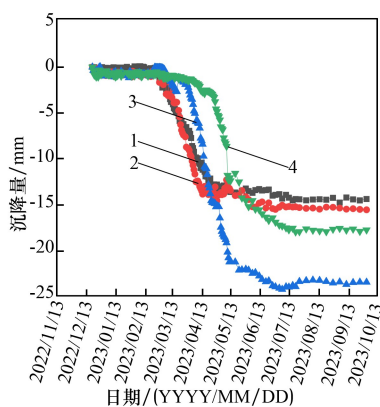


图 13 铁塔基础沉降监测点平面布置

从施工过程中的铁塔基础沉降量监测数据可知:距离隧洞最近的铁塔基础 DT3 沉降最为严重。2023 年 4 月开始,铁塔 4 个基础开始出现沉降,DT1 和 DT2 两个基础沉降最先达到稳定,DT3 和 DT4 两个基础沉降滞后约 1 个月达到稳定,如图 14 所示。



基础编号: 1—DT1; 2—DT2; 3—DT3; 4—DT4。

图 14 铁塔基础沉降时程曲线

最终监测数据显示,铁塔 4 个基础的累积沉降为 -14.37 mm、-15.54 mm、-23.42 mm 和 -17.73 mm。铁塔 4 个基础的最大差异沉降发生在 DT3 和 DT1 之间,为 9.05 mm;基础最大倾斜发生在 DT3 和 DT1 之间,为 $(23.42 - 14.37)/6\ 500 = 0.001\ 4 < 0.006$ 。基础累计沉降量和基础倾斜率均满足规范的要求。

铁塔基础的累计沉降及差异沉降均大于有限元分析的计算结果,但沉降的主导分布规律与模拟结果高度吻合,最大累计沉降均发生在距离隧道最近的 DT3 监测点(监测值 -23.42 mm、模拟值 -18.9 mm);同时,最大沉降差(监测值 9.05 mm、模拟值 8.3 mm)及基础倾斜率(监测值 0.001 4、模拟值 0.001 3)也较为接近。尽管存在上述数值偏差,但监测结果与数值模拟的整体规律基本一致,验证了数值模拟的可靠性。

4 结 论

本文以某输水隧洞开挖下穿高压铁塔工程为依托,对采取加固措施后的隧洞开挖施工过程进行数值模拟分析,结合监控量测数据,主要得到结论如下。

(1) 综合保护体系有效控制铁塔基础沉降。监测数据表明:铁塔基础沉降为 -14.37 ~ -23.42 mm,最大差异沉降为 9.05 mm,倾斜率为 0.001 4,均满足安全标准;数值模拟验证该体系通过隔离桩阻断深层变形传递、抗沉槽钢增强支护整体刚度、袖阀管注浆改良地基土密实度的协同作用,实现了对塔基沉降的有效控制。

(下转第 74 页)

深化管综设计、增设空调系统、修改管线路由等方式进行解决。

5 结 语

本文以索恩格工业园二期工程为研究对象,对复杂精密制造厂房通风空调系统设计进行了系统梳理与总结。工程采用磁悬浮离心式冷水机组、二级泵变流量水系统、转轮式热回收、高大空间分层送风、冷却塔免费供冷及智能化自动控制等技术措施,在满足车间、实验室、办公等不同功能区域使用要求的前提下,实现了节能高效、运行可靠、环境舒适的设计目标。

通过工程实践表明,工业建筑暖通空调设计应在满足工艺生产、消防安全及环保规范的基础上,统筹冷热源配置、气流组织、系统控制与管网综合,注重全生命周期节能与运维便利性。本项目的设计思路、系统选型可为同类厂房的通风空调系统设计提供参考与借鉴。

参考文献:

- [1] 钱华梅. 磁悬浮离心式冷水机组的发展及应用[J].

价值工程,2015,34(28):139-140.

- [2] 刘乃瑞,钟澍,况欣. 新能源汽车整车厂暖通专业新技术的应用[J]. 世界汽车,2015(12):44-45.
- [3] 李伟,侯川. 汽车工厂暖通空调碳减排措施潜力评估[J]. 制冷,2024,43(6):70-73.
- [4] 殷平. 磁悬浮离心式冷水机组和国家标准[J]. 暖通空调,2013,43(9):53.
- [5] 田旭东,刘华,张治平,等. 高温离心式冷水机组及其特性研究[J]. 流体机械,2009,37(10):55.
- [6] 王翔. 冷却塔供冷系统设计方法[J]. 暖通空调,2009,39(7):99.
- [7] 董宝春. 刘传聚,刘东,等. 一次泵/二次泵变流量系统能耗分析[J]. 暖通空调,2005,35(7):82-85.
- [8] 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50019—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
- [9] 汪训昌. 空调冷水系统的沿革与变流量一次泵水系统的实践[J]. 暖通空调,2006,36(7):32-40.
- [10] 范存养. 大空间建筑空调设计及工程实录[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001:22-23.
- [11] 李建,王彪,刘永姜,等. 深孔加工负压系统优化设计[J]. 机械设计与研究,2012,28(6):99.

(上接第 50 页)

(2) 隔离桩是控制基础沉降的核心措施。数值模拟显示,隔离桩缺失时,地基土侧向流动与沉降直接传递至基础,导致沉降显著增大,充分说明隔离桩对切断沉降来源的作用不可替代。

(3) 钢拱架抗沉槽钢与袖阀管注浆均能减少沉降,二者缺失时沉降增幅相近,具有等效互补性。

(4) 基于各措施的作用差异,工程设计需根据基础沉降敏感性与地基条件优化协同体系的设计:对沉降高敏感区优先强化隔离桩,切断深层变形传递;基础刚度不足处增配抗沉槽钢,增强抗变形能力;松散地层补充袖阀管注浆,改良持力层性能。这种针对性的组合措施兼顾安全性与经济性。

参考文献:

- [1] 轩俊杰,赵天明. 浅埋铁路隧道下穿高压输电铁塔的工

法研究[J]. 城市道桥与防洪,2016(11):150-153.

- [2] 阳军生,杨元洪,晏莉,等. 大断面隧道下穿既有高压输电铁塔施工方案比选及其应用[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1184-1191.
- [3] 田鲁鲁,郭永发,刘正初. 单线浅埋隧道下穿高压铁塔施工方案研究[J]. 铁道勘察,2019,45(3):47-52.
- [4] 杨元洪. 李家冲大跨度隧道施工与上覆高压输电铁塔相互影响分析[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [5] 余德强,贺思悦,侯航,等. 浅埋隧道下穿高压铁塔注浆加固效果的数值分析[J]. 公路,2018,63(3):247-252.
- [6] 张瑞金,胡奇凡. 摩尔库伦和修正摩尔库伦本构有限元模拟结果对比分析[J]. 中国房地产业,2015(8):256-258.