

隔离桩对软弱地层地铁暗挖隧道侧穿电塔的影响分析

段军朝^{1,2} 徐朝阳^{2*} 何凯罡²

(1. 中建三局基础设施建设投资有限公司, 430064, 武汉;

2. 中建三局集团有限公司, 430064, 武汉//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为研究钢管隔离桩加固对软弱地层中地铁暗挖隧道侧穿电塔的影响, 以成都地铁 6 号线三期工程某矿山法区间隧道侧穿电塔为例, 采用 FLAC3D 有限差分软件动态模拟软弱地层矿山法隧道侧穿电塔施工, 从地面位移、电塔基础竖向位移与倾斜、电塔结构内力等方面分析隔离桩加固的影响, 并结合现场实测数据评价其加固效果。研究结果表明, 采用钢管隔离桩加固可显著降低地面位移、电塔基础竖向位移与电塔结构内力。

关键词 地铁; 暗挖隧道; 软弱地层; 隔离桩; 地表位移

中图分类号 U455.49

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.013

Influence of Isolation Pile on Metro Mined Tunnel Side-passing Pylon in Soft Stratum

DUAN Junchao, XU Zhaoyang, HE Kaigang

Abstract To study the influence of steel pipe isolation pile on metro underground-excavated tunnel side-passing pylon in soft stratum, Chengdu Metro Line 3 Phase III engineering of mined interval tunnel side-passing pylon is taken as example, FLAC3D finite difference software is adopted to dynamically simulate the construction of mined tunnel in soft stratum. From aspects including ground surface subsidence, pylon foundation vertical displacement and inclination, pylon structure internal force, the influence of isolation pile reinforcement is analyzed, and the reinforcement effect is evaluated with field measured data. Research results show that the steel pipe isolation pile can significantly reduce the surface subsidence, pylon foundation vertical displacement and pylon structure internal force.

Key words metro; mined tunnel; soft stratum; isolation pile; land subsidence

First-author's address China Construction Third Engineering Bureau Infrastructure Construction Investment Co., Ltd., 430064, Wuhan, China

过程中会不可避免地穿越地面既有建(构)筑物, 如输电铁塔等^[1-2]。隧道掘进过程中对围岩的扰动会造成既有电塔结构不均匀沉降与倾斜, 严重时会导致电塔结构破坏、塔身大幅度倾斜甚至倒塌等情况^[3]。为此, 众多学者对隧道穿越电塔的施工影响规律开展了相关研究。文献[4]采用 FLAC3D 软件研究隧道爆破开挖对地面高压铁塔塔基的沉降及质点振动速度的影响规律, 并结合现场实测数据进行了对比分析。文献[5]采用数值模拟与现场实测的方法, 研究了重庆轨道交通 4 号线浅埋隧道开挖对地面高压线铁塔稳定性的影响。文献[6]通过数值方法模拟了盾构隧道穿越高压电塔的施工过程, 分析了渣土改良、洞内注浆和地面注浆加固措施对盾构隧道穿越建筑物的影响规律。文献[7]以衢九铁路某隧道工程为背景, 通过二维弹塑性有限元模型分析了浅埋隧道 CD(中隔壁)法施工对既有高压铁塔的影响, 并对有无注浆加固两种方案进行了模拟分析。文献[8]采用 FLAC3D 软件模拟了某条铁路李家冲隧道侧穿高压电线塔时, 围岩注浆前后隧道拱顶沉降和塔基沉降的变化规律, 并通过现场实测验证了注浆加固方案的可行性。

已有研究大多针对大断面矿山法隧道或盾构隧道穿越电塔施工, 对于中等断面且上覆有较厚黏土地层的矿山法隧道穿越电塔的影响研究较少。鉴于此, 本文以成都地铁 6 号线三期工程某矿山法区间隧道侧穿电塔为例, 通过数值模拟的方法对比分析隔离桩加固对隧道侧穿电塔的影响规律, 并结合现场实测数据对加固效果进行评价。本文研究可为类似工程施工提供参考和借鉴。

1 工程概况

成都地铁 6 号线三期工程某隧道区间为双洞单

随着我国各城市地铁线网的不断发展, 其建设

* 通信作者

线形式,左线长 472.3 m,右线长 422.7 m,左线与右线隧道中轴线距离为 15.2 m,采用复合式衬砌结构,上下两台阶法开挖。隧道断面为马蹄形,最大开挖高度约为 7.0 m,最大宽度为 6.6 m,开挖面积约为 38.1 m²,为中等断面隧道,隧道埋深为 6.4~16.0 m。区间隧道左线侧穿一座 35 kV 输电线路电塔,电塔高 21.6 m,根开为 4.3 m,基础埋深为 3.0 m,隧道左线外缘与基础竖向净距约为 5.2 m,最小水平净距约为 3.1 m。侧穿段隧道埋深约为 8.2 m,区间隧道所处地层从上至下依次为杂填土、可塑黏土、软塑黏土、强风化泥岩和中风化泥岩地层,其中可塑黏土与软塑黏土厚度达到 5.5 m,隧道围岩综合分级为 V 级。区间隧道与电塔的位置关系如图 1 所示。

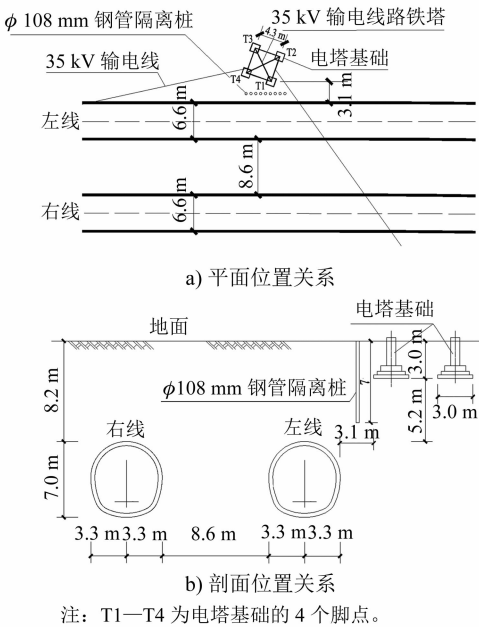


图 1 区间隧道与电塔的位置关系

Fig. 1 Relative location of interval tunnel and pylon

区间隧道在穿越 35 kV 输电线路电塔前,沿隧道线路方向在电塔基础(以下简称“塔基”)周边施作单排钢管隔离桩。隔离桩距塔基不小于 2 m,采用长为 7 m 的 ϕ 108 mm 热轧无缝钢花管,管中心间距为 0.8 m,打设长度为 10 m。钢花管上钻注浆孔,孔径为 10~16 mm,孔间距为 113 mm,注浆孔呈梅花形布置。

2 数值计算模型及计算工况

2.1 基本假定

数值模拟采用 FLAC3D 有限差分软件,岩土体

采用摩尔-库仑本构模型,隧道初期支护(以下简称“初支”)、电塔结构及基础采用弹性模型。建模时,隧道初支、岩土体及塔基均采用实体单元模拟,电塔采用梁结构单元模拟。根据刚度等效原则,隧道初支采用统一的计算参数。电塔模型忽略风荷载作用,但考虑到电线的牵引力,通过在电塔特定节点处施加集中力的方式进行模拟。计算过程中,为了简化钢管隔离桩注浆加固过程,不考虑浆液的凝固过程。

2.2 三维数值计算模型

选取沿隧道掘进方向 66 m,自隧道左、右线边缘向两侧及下部各延伸 20 m 范围内的岩土体建立三维数值计算模型(满足至少 3 倍洞径要求),模型总体边界尺寸为 60.7 m(横向)×66.0 m(纵向)×35.3 m(竖向)。模型上表面为自由面,底面施加竖向约束,前后和左右边界各施加与之垂直的水平约束。区间隧道电塔三维数值计算模型如图 2 所示。地层及建构筑物的主要物理力学参数如表 1 所示。

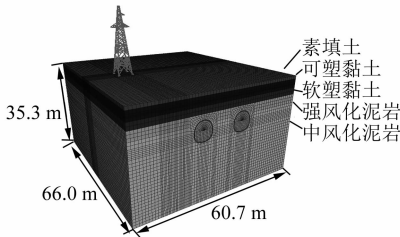


图 2 区间隧道电塔三维数值计算模型

Fig. 2 Three-dimensional numerical calculation model of interval tunnel and pylon

表 1 地层及建(构)筑物主要物理力学参数

Tab. 1 Main physical and mechanical parameters of stratum and building structure

地层及建(构)筑物名称	体积质量/(kg/m ³)	厚度/m	泊松比	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	1 800	1.0	0.4	10	0	10
可塑黏土	1 960	3.0	0.3	24	30	13
软塑黏土	1 840	2.5	0.3	13	18	9
强风化泥岩	2 200	3.0	0.2	180	75	30
中风化泥岩	2 350	26.0	0.2	400	500	34
隧道初支	2 500	—	0.2	28 000	—	—
塔基	2 500	—	0.2	28 000	—	—
电塔结构	7 800	—	0.3	206 000	—	—
隔离桩	22	—	0.3	200	—	—

2.3 施工过程模拟及计算工况

在隧道开挖前,首先考虑自重进行初始地应力平衡计算,然后将位移清零作为分析的初始状态。该区

间隧道采用上下台阶法施工,上台阶开挖步长为 1 m,台阶长度为 4 m;下台阶左右交替开挖,一次开挖步长为 2 m,且左右两侧错开 4 m。根据现场实际施工情况,在上下台阶贯通后进行仰拱开挖。通过 FISH 语言编写循环结构模拟矿山法开挖过程。开挖循环内容主要包括:① 开挖上台阶土体,施作上台阶初支;② 开挖左侧(或右侧)下台阶土体,施作左侧(或右侧)下台阶初支;③ 隧道上下台阶贯通后,逐步开挖仰拱土体,并逐步施作仰拱初支。

本次数值计算模拟采用右线在前、左线在后,两条隧道平行开挖的方式,左、右线开挖面前后错开 6 m。本文共计算了两种工况:未采取加固措施;采取钢管隔离桩注浆加固措施。

3 计算结果分析

3.1 地面位移分析

左、右线隧道开挖完成时,两种工况下电塔中心断面处(T1 与 T3 连线中点位置)地面位移变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知,未采取加固措施时,双线隧道贯通时地面沉降槽呈 W 形分布,地面位移峰值出现在左、右线隧道拱顶位置处,分别为 13.30 mm 与 13.20 mm,均在监测预警值范围内。采取加固措施后的地面沉降槽与未加固时类似,差异主要出现在加固处两侧约 6.00 m 范围内,隔离桩加固使地面沉降明显减小,且减小量的最大值出现在隔离桩位置,为 4.57 mm,相比于未加固时的 9.75 mm,降低了约 46.9%。

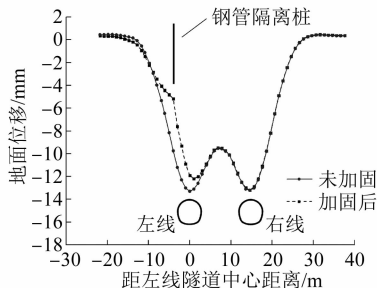


图 3 双线隧道贯通后地面位移变化曲线

Fig. 3 Curve of land subsidence change after double track tunnel completion

3.2 塔基竖向位移与倾斜分析

选取电塔 4 个脚点(其具体位置见图 1 a)),分析矿山法隧道掘进时的电塔位移变化规律。两种工况下, T1—T4 脚点随隧道开挖的塔基竖向位移变化曲线如图 4 所示。

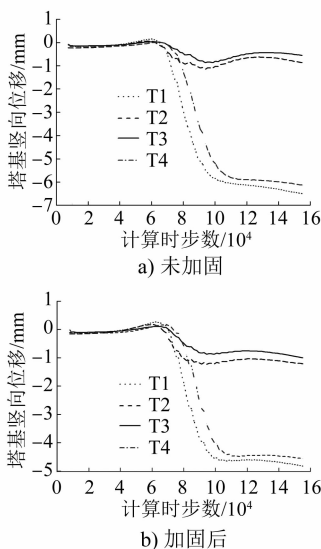


图 4 两种工况下的塔基竖向位移变化曲线

Fig. 4 Curve of pylon foundation vertical displacement change under two working conditions

由图 4 可知,随着隧道不断掘进,塔基竖向位移变化大致分为 3 个阶段:① 基本保持不变,后出现略微隆起;② 出现明显沉降,其变化速率表现出先快再稳定最后变慢的特点;③ 塔基沉降变化趋于稳定,数值变化较小。通过计算可以发现,第 1 阶段与第 2 阶段的分界点出现在右线隧道距离电塔 8 m 左右的位置,第 2 阶段与第 3 阶段的分界点大致出现在左线掌子面通过电塔处。由此可以说明,在矿山法隧道侧穿电塔时,当隧道掌子面进入电塔一侧 8 m 范围后,塔基开始出现明显沉降,直至隧道掌子面穿越电塔后开始趋于稳定。当隧道掌子面距离电塔超过 8 m 时,隧道掘进对塔基竖向位移的影响较小,可以忽略不计。

两种工况下的塔基最终竖向位移如图 5 所示。由图 5 可知,塔基沉降大小关系表现为 T1 沉降量>T4 沉降量>T2 沉降量>T3 沉降量,与 T1—T4 脚点距左线隧道距离远近关系一致,即距离隧道越近,塔基沉降越大,但两者之间并非呈线性关系。此外,从图 5 中还可以发现,采取钢管隔离桩加固对于塔基的沉降变化具有明显的影响。两种工况下,塔基的沉降变化规律基本一致,但加固后距离隧道较近一侧塔基的最终沉降明显降低,而较远一侧的塔基最终沉降略微变大。例如,采取加固措施后,相比于未加固时 T1 处的最终竖向位移(6.50 mm),加固后 T1 处的最终竖向位移为 4.82 mm,降低了 1.68 mm;相比于未加固时 T3 处的最终竖向位移(0.55

mm),加固后 T3 处的最终竖向位移为 0.99 mm,仅增加了 0.44 mm。

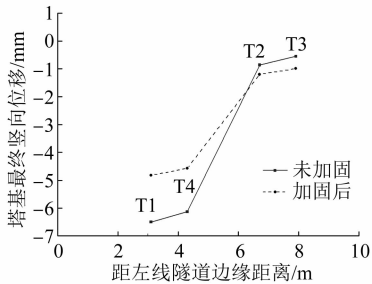


图 5 两种工况下的塔基最终竖向位移

Fig. 5 Final vertical displacement of pylon foundation under two working conditions

除电塔每个脚点处的基础沉降变化规律外,塔基的不均匀沉降也是结构安全性分析的重要指标之一。根据图 4 中各脚点处基础沉降的变化规律可以看出,T1 与 T2 脚点处的不均匀沉降差异较大,故选取这两个脚点处的基础沉降数据,绘制出两种工况下的塔基竖向位移差变化曲线,如图 6 所示。由图 6 可知,随着隧道掘进的变化,塔基竖向位移差也大致分为 3 个阶段:① 基本保持不变;② 竖向位移差明显变大,其变化速率表现出先加快然后稳定最后变慢的特点;③ 竖向位移差变化趋于稳定。采取钢管隔离桩加固对于塔基的竖向位移差影响显著,相比于未加固时的 5.63 mm,加固后的塔基最终竖向位移差为 3.62 mm,减少了约 35.7%。

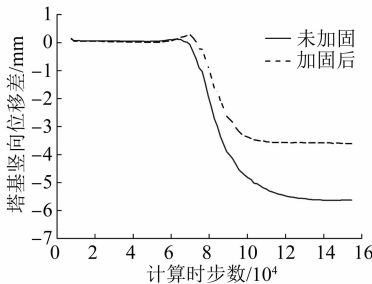


图 6 两种工况下的塔基竖向位移差变化曲线

Fig. 6 Curve of pylon foundation vertical displacement difference change under two working conditions

由于塔基的不均匀沉降,电塔发生了倾斜。DL/T 5219—2014《架空输电线路基础设计技术规定》中 5.3.1 条规定,塔基的最大倾斜率 d 应满足地基变形允许值的要求,如表 2 所示。电塔倾斜率是指基础倾斜方向两端点的沉降差与其距离的比值。本工程中,T1 与 T2 脚点处的不均匀沉降差异最大,

两者之间的距离为 4.3 m,经过计算可获得电塔的倾斜率变化曲线,如图 7 所示。由图 7 可知,采取钢管隔离桩加固对于电塔倾斜率的影响显著,相比于未加固时的 0.001 31,加固后的电塔最终倾斜率为 0.000 84,减少了约 35.8%,满足相关规范要求。

表 2 地基变形允许值	
Tab. 2 Allowable deformation value of foundation	
H_g/m	d
≤ 50	0.006 0
$>50 \sim 100$	0.005 0
$>100 \sim 150$	0.004 0
$>150 \sim 200$	0.003 0
$>200 \sim 250$	0.002 0
$>250 \sim 300$	0.001 5

注: H_g 为杆塔总高度。

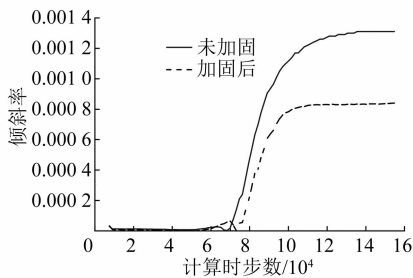


图 7 两种工况下的电塔倾斜率变化曲线

Fig. 7 Curve of pylon inclination rate change under two working conditions

3.3 电塔结构内力分析

3.3.1 电塔应力分布特点

为进一步研究矿山法隧道侧穿施工对电塔结构受力的影响,对隧道施工前和隧道贯通后两个时刻下的电塔结构内力进行分析。两种工况下,隧道开挖前与贯通后的电塔结构轴应力云图如图 8 和图 9 所示。由图 8 和图 9 可知,两种工况下,隧道开挖前与贯通后电塔主材均为受压状态,自上而下所受

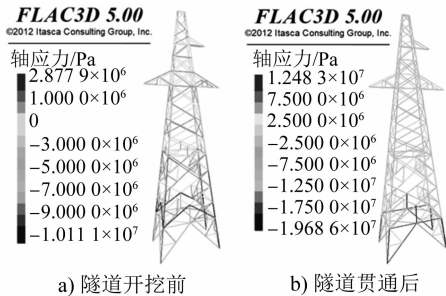


图 8 未加固时的电塔结构轴应力云图截图

Fig. 8 Screenshot of pylon structure axial stress nephogram without reinforcement

的轴应力越来越大,且左侧主材的压应力小于右侧主材的压应力。而斜材、隔材和辅材有的受拉,有的受压。电塔的最大压应力均出现在塔腿主材处,而最大拉应力则出现在塔腿附近的斜材或辅材处。

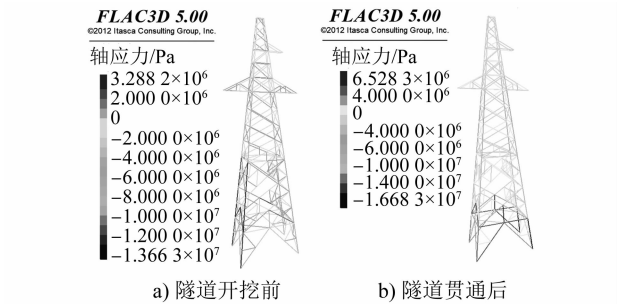


图 9 加固后的电塔结构轴应力云图截图

Fig. 9 Screenshot of pylon structure axial stress nephogram with reinforcement

隧道贯通后,两种工况下的电塔结构内力均有所增大。同一工况下,最大拉应力的增幅明显大于最大压应力。例如未加固时,两者的增幅分别为 332.0% 和 94.8%。加固后,在隧道开挖前,电塔结构的最大压应力和最大拉应力分别增长了 35.1% 和 14.0%;在隧道贯通后,电塔结构的最大压应力和最大拉应力显著降低,幅度分别为 15.3% 和 47.7%。

3.3.2 塔腿应力分析

经上述分析可知,电塔的塔头、塔身和塔腿三部分中以塔腿的应力最大,其中又以塔腿的主材和斜材受力最大,故单独分析塔腿主材与斜材的受力情况。每个脚点处共有 1 个主材和 2 个斜材,将两种工况及隧道开挖前与贯通后塔腿主材、斜材的轴应力及其变化量分别进行统计,如表 3 和表 4 所示。

表 3 塔腿主材的轴应力及其增变化量

Tab. 3 Axial stress of pylon leg main bars and its change amount

主材编号	未加固时主材轴应力/MPa			加固后主材轴应力/MPa		
	隧道开挖前	隧道贯通后	变化量	隧道开挖前	隧道贯通后	变化量
T1-1	-10.11	-19.69	-9.58	-7.27	-16.68	-9.41
T2-1	-8.17	-16.28	-8.11	-12.11	-12.84	-0.73
T3-1	-8.37	-16.39	-8.02	-12.94	-13.07	-0.13
T4-1	-10.08	-19.09	-9.01	-7.76	-16.42	-8.66

注: T1-1 表示 T1 脚点处的主材,其他同义;轴应力为负表示受压状态,轴应力为正表示受拉状态。

由表 3 可知,所有情况下,塔腿主材均为受压状态。未采取加固措施时,塔腿主材在隧道开挖前后均是靠近左线隧道一侧的压应力较大,且同一侧的主材所受的压应力相差较小。采取加固措施后,在

表 4 塔腿斜材的轴应力及其变化量

Tab. 4 Axial stress of pylon leg diagonal bars and its change amount

斜材编号	未加固时斜材轴应力/MPa			加固后斜材轴应力/MPa		
	隧道开挖前	隧道贯通后	变化量	隧道开挖前	隧道贯通后	变化量
T1-21	-0.87	0.16	1.03	-0.42	0.10	0.52
T1-22	-0.36	8.68	9.04	-2.39	4.66	7.05
T2-21	-0.35	6.10	6.45	-2.97	2.40	5.37
T2-22	-0.34	-6.39	-6.05	-4.11	-6.81	-2.70
T3-21	-0.33	-3.69	-3.36	-4.14	-4.43	-0.29
T3-22	-0.35	8.55	8.90	-3.16	4.81	7.97
T4-21	-0.36	-2.51	-2.15	-2.62	-2.25	0.37
T4-22	-0.98	5.76	6.74	-0.38	2.35	2.73

注: T1-21 表示 T1 脚点处的第 1 个斜材,T1-22 表示 T1 脚点处的第 2 个斜材,其他同义。

隧道开挖前,塔腿主材远离隧道一侧受力较大;在隧道贯通后,塔腿主材靠近隧道一侧受力较大。未采取加固措施时,每个塔腿主材的应力变化量相差不大,其数值基本为 8.0~9.5 MPa;而采取加固措施后,靠近隧道一侧的塔腿主材应力变化量变化较大,为 8.6~9.4 MPa,远离隧道一侧的塔腿主材应力变化量较小,在 1.0 MPa 以内。由此说明,采取加固措施对于远离隧道一侧的塔腿应力变化有显著影响,而对靠近隧道一侧的塔腿应力影响较小。

由表 4 可知:在隧道开挖前,无论是否采取加固措施,塔腿斜材均为受压状态;在隧道贯通后,塔腿斜材部分为受压状态,部分为受拉状态。总体而言,同一工况下,相比于隧道开挖前,隧道贯通后不同位置处的塔腿斜材轴应力变化差异较大,其变化幅值为 0.37~9.00 MPa。采取加固措施后,每个塔腿斜材的轴应力变化量均有所下降,且降幅大小不一,最大降幅能达到 91.4%,而最小降幅仅有 10.5%。

综上所述,采取加固措施对于远离隧道一侧的塔腿主材轴应力变化影响显著,也能有效降低塔腿斜材的轴应力变化幅值,最大降幅达到 91.4%。可见隔离桩加固对于电塔结构的内力变化影响显著。

4 加固实施效果评价

经上述模拟分析,现场决定采用钢管隔离桩加固方案,严格控制现场施工过程,最终顺利完成暗挖隧道侧穿电塔施工。施工中对地面位移、塔基竖向位移、洞内拱顶沉降和水平收敛等进行了系统监测,现场监测数据均在可控范围内。为了进一步验证计算结果的可靠性,绘制地面累计位移曲线,地

面竖向位移计算值与监测值对比如图 10 所示。电塔塔基累计沉降计算值与监测值对比如表 5 所示。

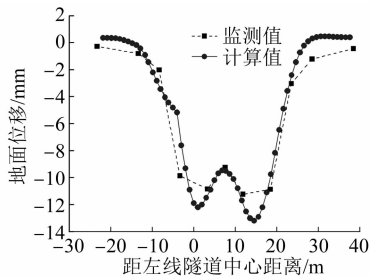


图 10 地面竖向位移计算值与监测值对比

Fig. 10 Comparison between calculated and monitored land vertical displacement values

表 5 电塔塔基累计沉降计算值与监测值对比
Tab. 5 Comparison between calculated and monitored pylon foundation accumulated subsidence values

塔基位置	累计沉降监测值/mm	累计沉降计算值/mm
T1	5.23	4.82
T2	1.65	1.20
T3	1.02	0.99
T4	4.43	4.57

由图 10 及表 5 可以看出,监测值与计算值相差较小,考虑到计算误差等因素,可以认为两者基本吻合,验证了数值计算模拟的可靠性。同时,上述分析也表明了,采用钢管隔离柱对软弱地层进行加固可以保障暗挖隧道侧穿电塔的施工安全,获得较好的加固效果。

5 结论

- 1) 隧道穿越完成后,地面沉降槽呈 W 型分布,采取钢管隔离桩加固后,加固区左右两侧 6.00 m 范围内的地面沉降显著降低,其他区域地表位移变化较小。
- 2) 隧道穿越完成后,靠近隧道一侧的塔基沉降较大,远离隧道一侧的塔基沉降较小,由此会造成塔基的不均匀沉降与倾斜。采取钢管隔离桩加固能够显著降低电塔倾斜及靠近隧道一侧的塔基竖向位移,而远离隧道一侧的塔基竖向位移略微增大。
- 3) 隧道穿越过程中,电塔塔腿附近受力较大,其中塔腿主材受到的压应力最大,塔腿附近斜材或辅材受到的拉应力最大。整体而言,钢管隔离桩加固后,电塔结构的内力变化显著降低,且隧道贯通后电塔塔腿处的内力明显下降,对保障电塔结构的安全性及稳定性起到了积极作用。

参考文献

[1] 张社荣,冯晓成,于茂,等. 盾构双线隧道下穿通信铁塔近接影响分析[J]. 铁道标准设计,2016,60(6):100.
ZHANG Sherong, FENG Xiaocheng, YU Mao, et al. Analysis of approaching influence of shield double-line tunnel passing under communication tower[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(6):100.

[2] 董志明,尹国强. 近距离下穿电塔段大跨度浅埋隧道的设计与施工[J]. 山西建筑,2013,39(8):133.
DONG Zhiming, YIN Guoqiang. The design and construction of large-span shallow buried tunnel in close underway electrical tower section[J]. Shanxi Architecture, 2013, 39(8):133.

[3] 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.
YANG Junsheng, YANG Yuanhong, YAN Li, et al. Construction scheme choice of large-span tunnels under-passing high voltage transmission tower and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6):1184.

[4] 肖欣欣,李夕兵,宫凤强. 隧道开挖及爆破对地表高压铁塔影响的 FLAC3D 分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(6):1401.
XIAO Xinxin, LI Xibing, GONG Fengqiang. Analysis of tunnel excavation and explosion influence on High-pressure tower with FLAC3D[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(6):1401.

[5] 夏昌猛,杨本钱,王长辉. 浅埋隧道施工对高压线铁塔的稳定分析[J]. 有色金属文摘,2015,30(3):93.
XIA Changmeng, YANG Benqian, WANG Changhui. Stability analysis of high-voltage transmission line tower in the shallow-buried tunnel construction [J]. Nonferrous Metals Abstract, 2015, 30(3):93.

[6] 胡长明,张延杰,袁一力,等. 盾构隧道临近河流始发及过电塔掘进技术[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(6):83.
HU Changming, ZHANG Yanjie, YUAN Yili, et al. Excavation technique of shield launching crossing adjacent river and under-passing voltage tower[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(6):83.

[7] 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.
YU Deqiang, HE Siyue, HOU Hang, et al. Numerical analysis of grouting reinforcement effect for shallow tunnel under passing high pressure steel tower[J]. Highway, 2018, 63(3):247.

[8] 胡焕校,吴高权,沈增辉. 浅埋大跨隧道穿高压铁塔的注浆效果研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(5):85.
HU Huanxiao, WU Gaoquan, SHEN Zenghui. Study on grouting effect of shallow-buried large-span tunnel through tower of high electric pressure[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(5):85.

(收稿日期:2020-09-08)