

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.08.061

邻近明挖隧道施工及运营对高压电塔的影响分析

蒋昌锋

(广州市政府投资项目研究评审中心, 广东 广州 510500)

摘 要:以典型工程实例为依托,借助有限元软件建立隧道基坑开挖及运营过程的计算模型,揭示高压电塔对隧道施工和运营影响的力学响应特征。研究表明:基于隧道施工和运营力学扰动特征,高压电塔存在倾斜、整体失稳及局部失稳的风险;隧道基坑开挖产生的最大侧移为 8.5 mm,最大沉降为 5 mm,整体稳定系数为 1.837,符合规范要求,满足整体稳定;隧道开挖、运营诱发的电塔倾斜度为 0.011%和 0.000 7%,显著小于规范规定的 1%限值;新建隧道施工和运营阶段对电塔的影响可控,能保证电塔的安全稳定。考虑到实际施工不可预知的风险,除加强全过程实时监控外,建议在隧道与电塔间设置袖阀管跟踪注浆。

关键词:高压电塔;力学响应;风险分析;基坑开挖;运营荷载;数值分析

中图分类号: U455 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2021)08-0234-05

0 引 言

高压电塔为典型的高耸结构,具有整体刚度小、基础相互独立、对倾斜度非常敏感等特点。邻近高压电塔隧道建设时,若地层位移控制不当,易导致电塔塔基发生不均匀沉降,甚至导致电塔倒塌,危及电力线路的正常运营和生命财产安全^[1-2],因此开展邻近工程建设对高压电塔的影响研究,并制定合理可行的实施方案至关重要。现有邻近高压电塔的各类工程诱发的影响研究中,大多探索下穿隧道施工对上覆电塔的稳定性的影响^[3-5],对于侧向隧道施工及运营对高压电塔的影响却鲜见报道。

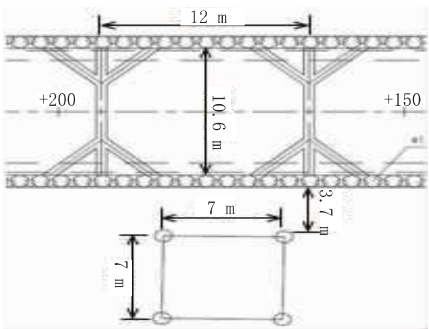
基于此,以广州某邻近 220 kV 高压电塔明挖隧道实例为依托,提出了隧道实施高压电塔可能存在的风险,借助数值法建立隧道基坑开挖和运营车辆荷载作用的静、动模型,计算分析隧道施工和运营扰动下高压电塔的力学响应特征,评价隧道实施方案的可靠性。研究取得的认识可为类似工程提供良好的借鉴。

1 工程概况及风险分析

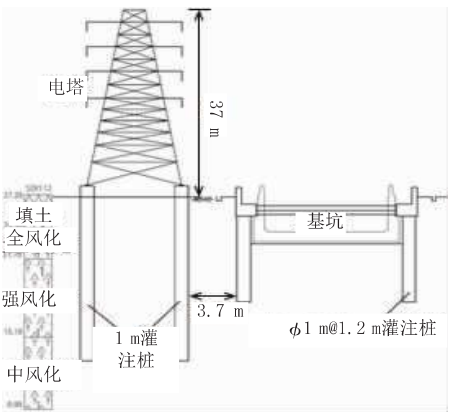
1.1 工程简介

广州某明挖单向两车道隧道,设计时速 40 km/h,在里程 K0+186~K0+193 范围,邻近隧道结构边约 4.7 m 位置有 220 kV 高 37 m 的电塔,具体位置关

系见图 1。隧道建设和运营对电塔势必造成扰动,且主要体现在隧道基坑开挖过程和运营过程。



(a)平面图



(b)剖面图

图 1 隧道基坑与电塔位置关系

基坑宽约 10.6 m,深 4 m,采用 $\phi 1\text{ m}@1.2\text{ m}$ 的支护桩和 $\phi 0.6\text{ m}$ 的桩间旋喷止水。高压电塔为铁塔,基础为 $\phi 1\text{ m}$ 的灌注桩,桩基受到的最大水平力为 220.4 kN,最大竖向压力为 1 530.9 kN、最大拔力为 1 190.4 kN。由现场勘察资料可得场地土层物理力学参数,见表 1。

收稿日期: 2021-02-10
作者简介: 蒋昌锋(1978—),男,硕士,高级工程师,从事项目管理工

表 1 土层物理力学参数

土层	压缩模量 E_s /MPa	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	割线刚度 E_{uref} /MPa	剪切刚度 G_{ref} /MPa	剪应变 $\gamma_{0.7}$	相关指数 m	直接快剪	
							黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
人工填土	3.92	1.7	20.8	83.2	2.21×10^{-4}	0.5	12.5	11.5
全风化花岗混合岩	6.66	1.85	33.3	133.2	1.82×10^{-4}	0.8	35	25
强风化花岗混合岩	15.3	1.9	74.6	298.4	1.75×10^{-4}	0.8	40	29
中风化花岗混合岩	35	1.95	141	564	1.72×10^{-4}	1.0	600	50

1.2 高压电塔风险分析

考虑到电塔对位移，尤其是不均匀位移的敏感性,隧道施工与运营可能引起的铁塔风险包括：

(1)电塔倾斜。邻近隧道基坑开挖卸载和运营车辆荷载作用,对坑外与电塔间的土层产生应力扰动,从而影响土层的位移场,促使电塔基础位移;由于隧道施工运营扰动特征为由近向四周扩散衰减，近隧道侧电塔桩基位移大于较远侧,导致电塔出现倾斜；

(2)整体失稳。基坑开挖支护过程,整体稳定性不足会引起电塔地基滑动,诱发电塔整体失稳破坏,造成极坏的社会影响和重大的经济损失；

(3)局部失稳。铁塔自身设计、施工质量等可能的缺陷,以及长期运营荷载作用,局部面临失稳破坏的风险，隧道运营循环的车辆振动荷载会增大电塔局部失稳的风险。

通过上述分析可知,隧道施工和运营过程中,邻近高压电塔存在风险。因此,准确评价隧道施工与运营过程自身稳定性及邻近电塔的力学响应特征是十分必要的。

2 隧道施工阶段高压电塔力学响应分析

借助数值法探索新建隧道对邻近高压电塔的影响,且由于新建隧道对电塔的影响通过地基土传递至电塔桩基,进而影响到电塔上部结构,电塔桩基的力学行为表征了实际电塔的响应特征,故计算重点考察电塔桩基的力学响应，以评价电塔整体应用性

2.1 计算模型与工况

模型中支护桩可等效为板桩，按下式计算板桩弹性模量^[6]。

$$E=\frac{E_p+E_s(u-d)}{u}$$

(1)

式中： E_p 为混凝土弹性模量； E_s 为土体压缩模量； u 为相邻桩之间的距离； d 为桩径。将参数代入式(1)，计算得到等效后的弹性模量为 2.0×10^7 kPa。

模型计算范围选取充分考虑了基坑开挖和桩基引起的边界效应,参考相关文献^[7-8],结合工程实践经验,计算模型几何尺寸 X 、 Y 方向分别为 27 m、22 m。模型中土层利用二维平面应变单元模拟，内支撑采用锚定杆模拟,灌注桩通过嵌入式桩模拟。模型中第一层土采用 HS 模型,下面土层用 HSS 模型,且上述相关结构则采用弹性本构模型。整体计算模型见图 2，模型侧向加水平位移和对称约束,底部加竖向约束，顶面为自由面。

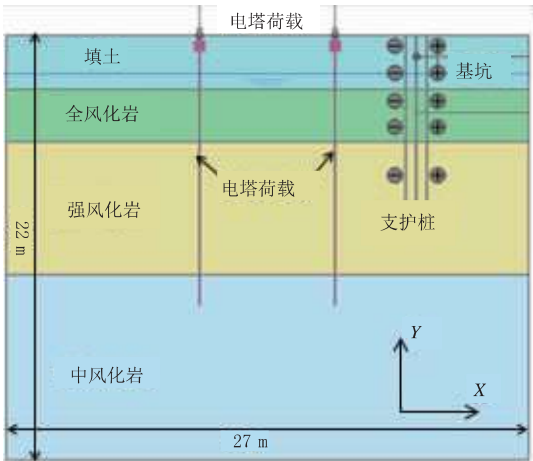


图 2 计算模型

本次计算含 6 个工况,即 6 个计算步,地面标高取 ± 0.00 m,见表 2。

表 2 计算工况

编号	工况	简述
1	初始应力场计算	得到岩土初始应力场,认为土层位移已经稳定,位移清零
2	施工既有电塔	位移清零,电塔变形稳定
3	施作基支护桩	—
4	基坑开挖 1	开挖至 -1.1m
5	内支撑 1	—
6	基坑开挖 2	开挖至 -4.0m

2.2 计算结果与分析

图 3 为基坑开挖后整体位移云图,定义位移指向坐标正轴为正,反之为负。由位移云图可知,基坑

开挖后,在不平衡压力和卸载作用下,产生的最大侧移、沉降分别为 3 mm 和 5 mm,均明显小于基坑规范位移限值,且基坑开挖后整体稳定系数为 1.825,也明显大于规范要求,说明基坑支护方案能够满足自身稳定要求。

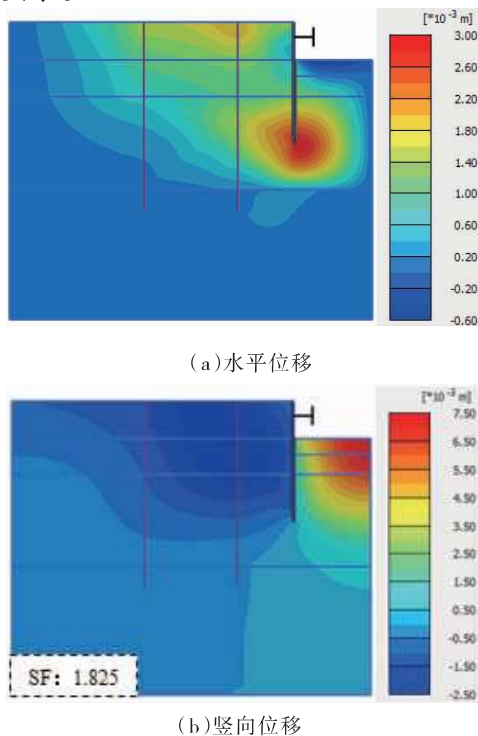


图3 基坑开挖完位移云图

图4为隧道基坑开挖诱发的电塔桩基位移,可见,靠近基坑第一排桩最大位移为 4.13 mm,第二排桩最大位移 2.51 mm,均出现在桩顶,由此产生的倾斜为 0.011%,显著小于规范^[9]规定的 1%限值。

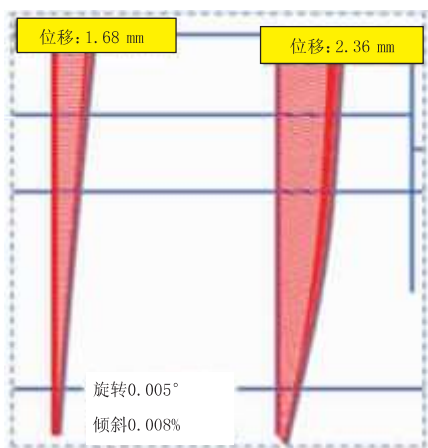


图4 基坑开挖诱发的电塔桩基位移

3 隧道运营阶段高压电塔力学响应分析

3.1 计算模型与工况

动力计算中边界施加弹簧阻尼边界,利用单位面积上的阻尼常数施加边界,使截取的有限土体与

外部无限土体之间进行能量交换,满足波透过虚拟边界辐射至无穷远处的辐射条件。阻尼采用 Rayleigh 阻尼表达式为^[10]:

$$[C]=\alpha[M]+\beta[K] \quad (2)$$

式中: $[C]$ 为阻尼矩阵; $[M]$ 为质量矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; α 质量阻尼系数; β 为刚度相关阻尼系数。由结构动力学知识可知阻尼系数 $C_s=\rho\nu_s$, $C_p=\rho\nu_p$, 式中 ν_s 、 ν_p 分别表示剪切波和纵波的波速, ρ 为介质密度。由弹性力学知识可知,介质中波的传播速度是常数,它取决于介质的弹性模量 E 、泊松比 ν 及密度 ρ ,可表示为:

$$\nu_p=\sqrt{\frac{1-\nu}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}E \quad (3)$$

$$\nu_s=\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (4)$$

通过计算得到不同土层对应的阻尼系数。对于动力计算模型中的弹性边界,借助地基弹簧实现,采用经验公式(5)计算,式中 k_0 为土层侧压力系数, E_s 为土层的压缩模量,通过计算得到不同土层 k 值。

$$k=4.25(1-k_0^2)E_s \quad (5)$$

采用描述车辆波动的谐波稳态荷载来进行车辆荷载的变化分析,具体表示如下^[12]:

$$F(t)=P+\lambda p \sin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right) \quad (6)$$

$$T=\frac{12L}{V} \quad (7)$$

式中: P 为恒定荷载,取轮压; λ 为动荷载系数; T 为荷载作用周期; V 为车辆速度; L 为轮胎接触面积半径,通过计算得到车辆荷载见图5。车辆通过时间一般为 0.01~0.1 s,取单点作用时间为 0.05 s。由前所述可知,列车移动荷载经过模型范围(X 方向长度)所需时间为 $20/36/3.6=2$ s。

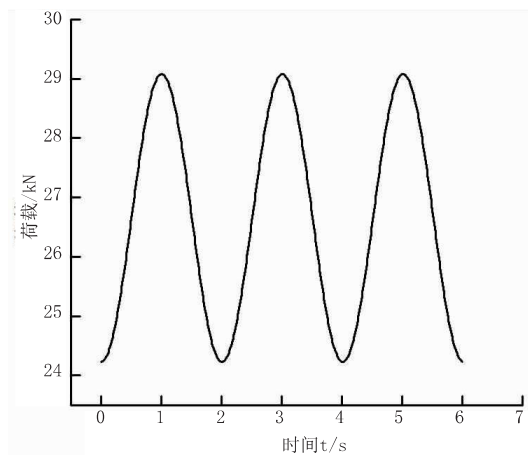


图5 车辆正弦荷载

计算模型几何尺寸 X 、 Y 、 Z 方向分别为 38 m、

20 m 及 19 m。模型中土层和结构均利用三维实体单元模拟,基坑支护桩通过刚度等效为板桩^[6],通过壳单元模拟。模型中土层采用 M-C 模型,相关结构则用弹性本构模型,三维计算模型见图 6。

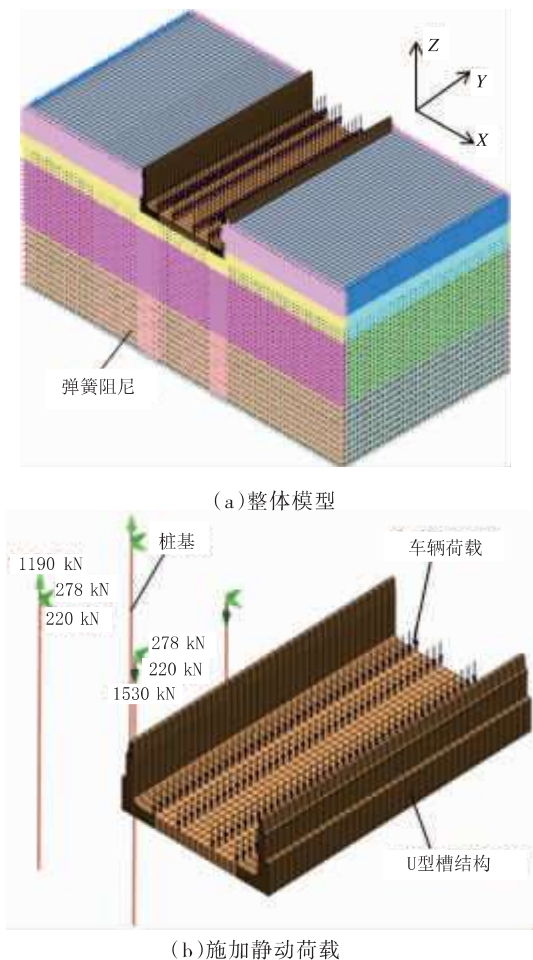


图 6 车辆荷载动力计算模型

动力计算含 2 个工况,即 2 个计算步,具体见表 3。汽车移动荷载以节点动力荷载的形式加到路面上。

表 3 计算工况

编号	工况	简述
1	特征值分析	设置点弹簧,弹性边界,获得最大两个振型的周期
2	时程分析	设置粘弹性边界,计算车辆荷载作用下的动力响应

通过计算发现,1 s 时对应的桩基受到的扰动最明显,因此取该时刻对应的位移进行分析。图 7 为工况 2,即车辆荷载引起的总体模型位移云图,水平、竖向在车辆荷载作用下最大位移为 0.41 mm、0.66 mm。图 8 为工况 2 桩基位移云图,由车辆荷载引起的桩基最大水平和竖向位移分别为 0.13 mm、0.04 mm,对应的电塔倾斜度为 0.0007%,说明隧道运营阶段车辆荷载对电塔影响细微,隧道运营能保证电塔的安全稳定。

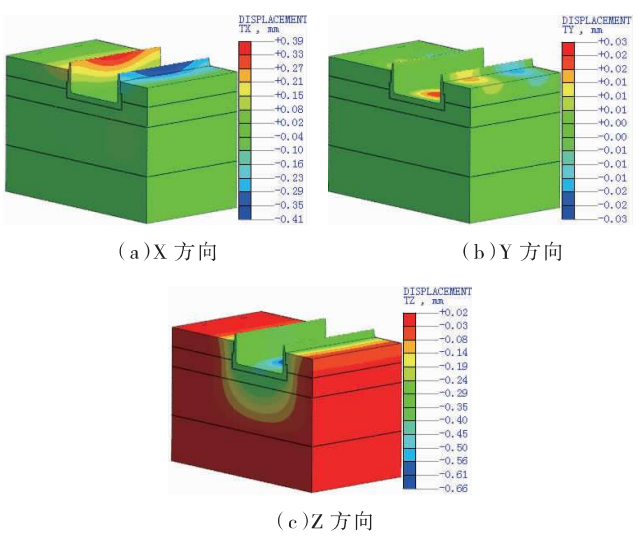


图 7 1 s 对应的整体模型位移云图

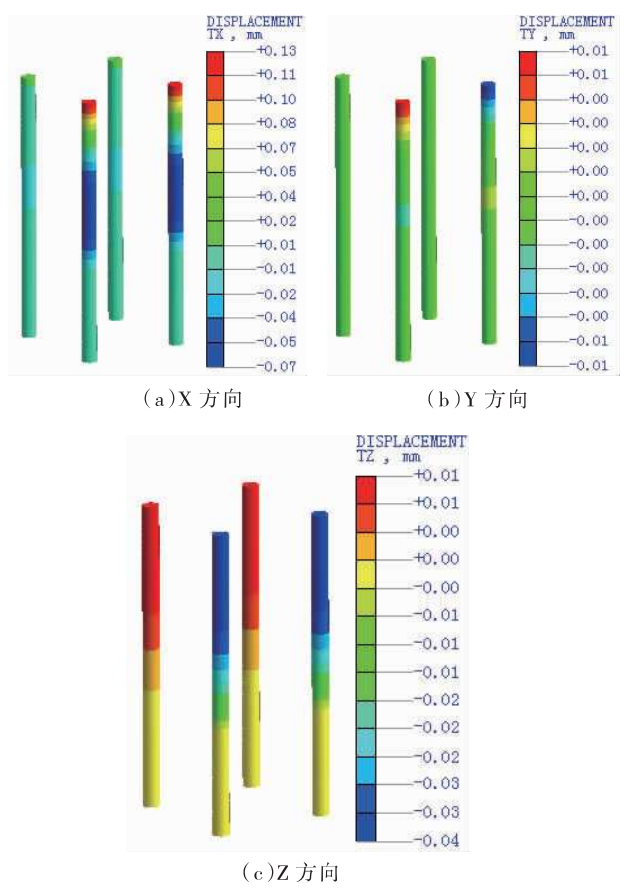


图 8 1 s 对应的电塔桩基位移云图

4 结 语

- (1)基于邻近隧道施工和运营力学扰动特征,可能诱发高压电塔倾斜、整体失稳及局部失稳风险,有必要准确评价隧道施工和运营过程邻近高压电塔的力学响应特征;
- (2)隧道基坑开挖产生的土层最大水平位移为 8.5 mm,最大沉降为 5 mm,整体安全系数为 1.837,均满足规范要求,说明基坑支护方案可行,能满足整

体稳定要求;

(3)隧道开挖时,诱发的前、后配电塔桩基最大位移为 4.13 mm、2.51 mm,均出现在桩顶,由此产生的倾斜为 0.011%,显著小于 50 m 以下高度规范规定的 1%限值;

(4)隧道运营时,车辆循环荷载引起的土层最大水平、竖向位移分别为 0.41 mm 与 0.66 mm,电塔桩基出现的最大位移为 0.13 mm,对应倾斜度为 0.000 7%,均显著小于规范允许值。通过计算分析可判断,新建隧道施工和运营阶段对电塔的影响很细微,能保证电塔的安全稳定。

尽管隧道建设方案具备可靠性,但考虑到实际实施存在不可预知的其他风险,建议加强隧道建设过程实时监控,并在隧道与电塔间设置 2 排 $\phi 42$ 袖阀管跟踪注浆,进一步确保电塔的安全稳定。

参考文献:

- [1] 陈洁金,杨元洪,阳军生,等.大断面隧道下穿高压输电铁塔现场测试与分析[J].中外公路,2015,35(2):185-189.
- [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] 刘诗杰,王永成,枚龙,等.下穿隧道施工过程中上覆高压电塔稳定性研究[J].施工技术,2019,48(17):104-107.
- [4] 谢瑾荣.下穿隧道盾构施工对高压电塔影响的安全性评价[J].土工基础,2020,34(2):89-93.
- [5] 张宁.浅埋大跨隧道下穿 110kV 高压电塔控制沉降技术[J].现代隧道技术,2020,50(6):184-188.
- [6] 陈福全,汪金卫,刘毓胤.基坑开挖时邻近桩基性状的数值分析[J].岩土力学,2008,29(7):1971-1976.
- [7] C S Yang, H H Mo, J S Chen, etc. Selection of reasonable scheme of entering into a working well in shield construction [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18R:3987-3998.
- [8] 莫海鸿,杨春山,陈俊生,等.盾构隧道先隧后井施工中工作井支护结构优化[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(4):1346-1352.
- [9] DL/T 741—2010,架空输电线路运行规程[S].
- [10] C S Yang, H H Mo, J S Chen, etc. Numerical analysis of influence caused by lining cracks on dynamic response of shield tunnel during metro operation [J]. Journal of Information and Computational Science, 2014, 11(11):3835-3846.
- [11] 刘鹏.车辆荷载作用下风积沙和砾类土低路堤工程特性研究[D].陕西西安:长安大学,2015.

(上接第 214 页)

着大直径旋喷桩成桩设备国产化,成桩施工单价将持续降低,大直径高压旋喷 RJP 工艺将得到越来越广泛的应用。

参考文献:

- [1] 黄健德.三重管高压旋喷桩在改线工程地基加固中的应用[J].河南科技,2014(6):28-29.
- [2] 夏辉阳.三重管高压旋喷技术在地基加固中的应用[J].工程设计与

建设,2004,36(2):32-34,38.

- [3] 邵晶晶,李操,余立新. MJS 工法和 RJP 工法在临近地铁车站的应用研究[J].施工技术,2016,13:81-84.
- [4] 张雁,田增林,曹海东. MJS 工法在砾石层中的应用及成桩差异性[J].煤田地质与勘探,2020,48(2):147-151.
- [5] 张子新,李佳宇. MJS 工法地基处理技术综述与应用[J].土木建筑与环境工程,2017,39(6):1-11.