

隧道施工对既有高压电塔的影响研究

林权威

(国网浙江省电力有限公司平阳县供电公司, 浙江 温州 325401)

摘要: 为了研究隧道施工对既有高压电塔的影响, 本文结合宁波市小松山1号隧道施工对既有高压电塔影响的工程实例, 初步拟定了4种电塔改造方案。文章运用有限元软件对各方案隧道施工中动力影响源(隧道爆破)进行安全距离敏感性分析和安全评估, 以电塔安全振速为指标, 判断各方案电塔是否安全, 或对方案的爆破距离及炸药量提出要求。结果表明: 隧道爆破对电塔基础的影响比上部电塔大的多; 电塔基础振动速度与电塔基础外边缘至隧道中心的水平距离(安全距离)有关, 安全距离越短振速越大, 反之越小; 此外, 通过控制安全距离或削减炸药量, 方案也可以满足隧道爆破对电塔基础安全振速的要求。通过隧道施工对既有电塔影响的实例研究, 可为隧道爆破对既有高压电塔影响的相关工程提供参考。

关键词: 山岭隧道; 隧道施工; 爆破振动; 数值模拟; 既有高压电塔; 安全评估

中图分类号: TU74

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)01-0048-10

Influence of tunnel construction on existing high-voltage power transmission tower

LIN Quan-wei

(Pingyang County Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Wenzhou 325401, Zhejiang, China)

Abstract: To study the influence of tunnel construction on the existing high-voltage power transmission tower, this paper investigates the influence of tunnel construction on an existing high-voltage power transmission tower in Xiaosong Mountain 1, Ningbo, and preliminarily considers four renovation schemes. The finite element software is used to carry out a safety distance sensitivity analysis and safety assessment of the powerful influence source (tunnel blasting) in each option of tunnel construction. The safe vibration speed of the high-voltage power transmission tower is used as an indicator to determine the safety of the high-voltage power transmission tower for each scheme and the requirements for the blasting distance and explosive quantity. The results show that tunnel blasting has much greater influence on the tower foundations than the upper towers. The vibration velocity of the tower foundations is related to the horizontal distance from the outer edge of the tower foundations to the centre of the tunnel (safety distance), and the shorter the safety distance the greater the vibration velocity and vice versa. In addition, by controlling the safety distance or reducing the number of explosives, the program can also meet the requirements of the safe vibration velocity of the tower foundations caused by tunnel blasting. The study of the effect of tunnel construction on existing high-voltage power transmission towers can provide a reference for the related works on the effect of tunnel blasting.

Key words: mountain tunnel; tunnel construction; blasting vibration; numerical simulation; existing high-voltage power transmission tower; safety assessment

0 引言

在山岭隧道修建过程中, 受路线规划的限制, 时常会遇到隧道邻近高压输电电塔的情况, 然而电力铁塔刚度小、对振动荷载敏感, 对基础不均匀沉降控制要求极高^[1]。当铁塔处在隧道附近时, 受隧道

爆破施工的影响极易发生土体扰动, 从而造成铁塔周围土体不均匀沉降^[2-3], 同时爆破振动也会危及铁塔的运行安全^[4], 因此有必要研究近接隧道爆破对电塔的影响。

数值模拟方法已被广泛应用于隧道爆破对既有高压铁塔的影响研究^[5-10]。肖欣欣等^[11]通过

FLAC 3D 对隧道施工及爆破对高压铁塔的影响进行了数值分析, 提出了高压铁塔改造的相关建议。谢瑾荣^[12] 对下穿隧道盾构施工影响电塔基础安全性的风险因素进行分析, 并采用三维有限元软件建立连续介质模型对盾构下穿施工全过程进行数值模拟。谷任国等^[13] 结合广州市某隧道施工对既有高压电塔影响的工程实例, 研究隧道开挖对既有高耸建筑物安全影响, 以及开挖面有无平衡压力情况下对既有高耸建筑物的影响程度。

隧道施工时, 采用合理的施工方案对确保高压电力铁塔的安全具有重要的工程意义。该隧道洞门段采用明挖法, 暗洞段采用台阶临时仰拱法。本文结合宁波小松山 1 号隧道施工对既有高压电塔影响的工程实例, 运用有限元模拟的方法, 主要研究隧道暗洞段爆破施工对既有高压电塔的影响, 并根据影响的程度选择合适的隧道施工及电塔改造方案, 为类似工程建设提供参考。

1 工程概况

宁波穿山港铁路站前工程 I 标段小松山 1 号隧道工程, 位于宁波市北仑区柴桥镇钟灵村, 进口有多处 220 kV 高压铁塔, 进、出口邻近穿山疏港高速公路, 周围环境复杂。隧道起止里程为 DIK9+090~DIK9+205, 共 115 m, 隧道高 10.75 m, 宽 8.22 m, 围岩主要为熔结凝灰岩, 为 V 级围岩。隧道范围内表层土多为粉质黏土层, 下伏基岩为熔结凝灰岩, 全-弱风化层, 隧道暗洞开挖断面位于熔结凝灰岩弱风化层。小松山 1 号隧道路径与 220 kV 春芦、晓芦线相交, 220 kV 春芦、晓芦线原电 8 (塔型为 SJ42B-24) 位于穿山港铁路小松山 1 号隧道进口端上方, 塔位处地面高于隧道拱顶约 1.2 m。

1.1 拟定电塔迁移方案

作为浙江 220 kV 网架的主要线路, 220 kV 春芦、晓芦线的地位相当重要, 如遇突发事件, 将直接对浙江电网产生影响, 尤其在迎峰渡夏时期, 如遇自然灾害和外力破坏等发生倒塔事故, 极有可能导致系统发生大面积停电事故。为确保隧道施工时 220 kV 春芦、晓芦线的安全, 需要对线路进行改造, 改造方案为: 在原线路右侧 30 m 处, 新建改电 8, 使改电 8 位于规划铁路隧道上方, 电塔基础到隧道顶的距离约 10 m, 改电 8 采用窄基塔, 基础采用联合板式, 迁改后窄基塔基础外边缘与隧道中心保持 5 m 左右的水平距离, 减小了铁路隧道开挖时, 对该窄基塔的影响, 从而降低了线路的安全运行风

险。如图 1~3 所示, 分别为小松山 1 号隧道工程平面图、改移后电塔基础与隧道相对位置图以及隧道断面图。

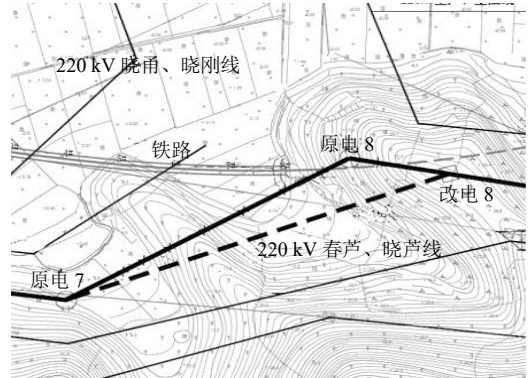


图 1 工程平面图

Fig. 1 Plan view of the project

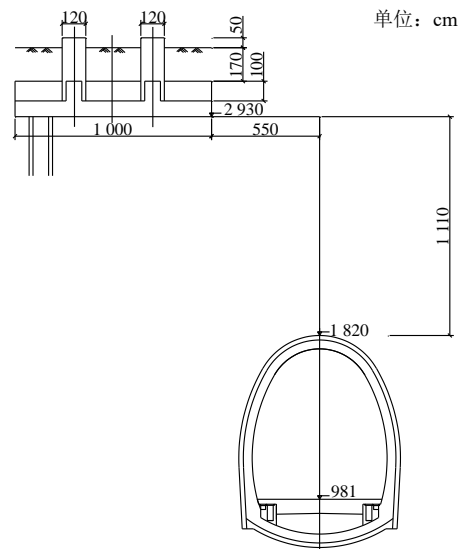


图 2 迁移后电塔基础与隧道相对位置图

Fig. 2 Relative location of high-voltage power transmission tower foundation and the tunnel

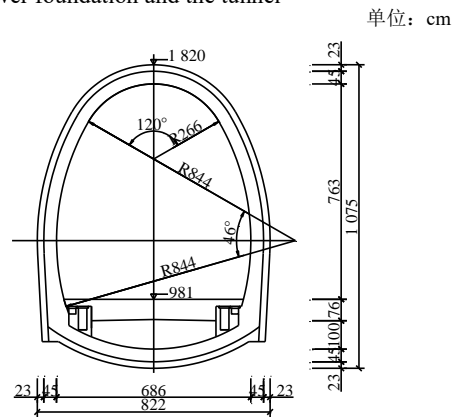


图 3 隧道断面图

Fig. 3 Cross section of the tunnel

1.2 隧道施工方案

隧道洞门段采用明挖法, 暗洞段采用台阶临时仰拱法。从出口向进口方向单头掘进, 根据围岩条

件、施工机械配备情况,在有利于保持围岩稳定的前提下尽量综合考虑便于机械作业以及钢架加工尺寸等因素,采用上台阶高度为5.5 m,台阶长度控制在10 m。每循环进尺不超过2榀钢架距离(V级围岩每次开挖为1榀钢架,约0.75 m),锁脚锚杆采用单根长3.5 m的 $\Phi 50 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 钢管,每榀设置4组,每组2根,与钢架可靠连接。仰拱、二衬及时跟进,二衬距离掌子面距离不大于70 m。表1为隧道支护及衬砌统计表,图4为台阶临时仰拱法工序示意图。具体工序如下:

(1)开挖I部,施作I部洞身部位的超前支护、初期支护。

(2)上台阶施工到适当距离后,开挖II部台阶,施作洞身部位初期支护。

(3)浇筑该段内III部底板(或仰拱)。

(4)利用衬砌模板台车一次性浇筑IV部二次衬砌(拱墙衬砌一次施作)。

根据隧道设计地质情况,采用光面控制爆破施工,爆破方案设计严格遵循《爆破安全规程》^[4](GB 6722—2014)进行设计。隧道爆破过程中,通过超欠挖保证措施,例如超欠挖检查、爆破进尺是否达到爆破设计要求、试爆并调整爆破参数等方式控制爆破效果。

由于隧道施工采用爆破施工,而改造后线路铁塔距隧道仍非常接近,在隧道施工期间,施工过程可能对高压输电铁塔及其基础产生影响,考虑到一旦高压铁塔出现较大损坏会影响到该区域的输配电安全,严重影响民生,产生较为恶劣的社会影响,

故对该线路隧道施工对铁塔的影响进行安全评估。

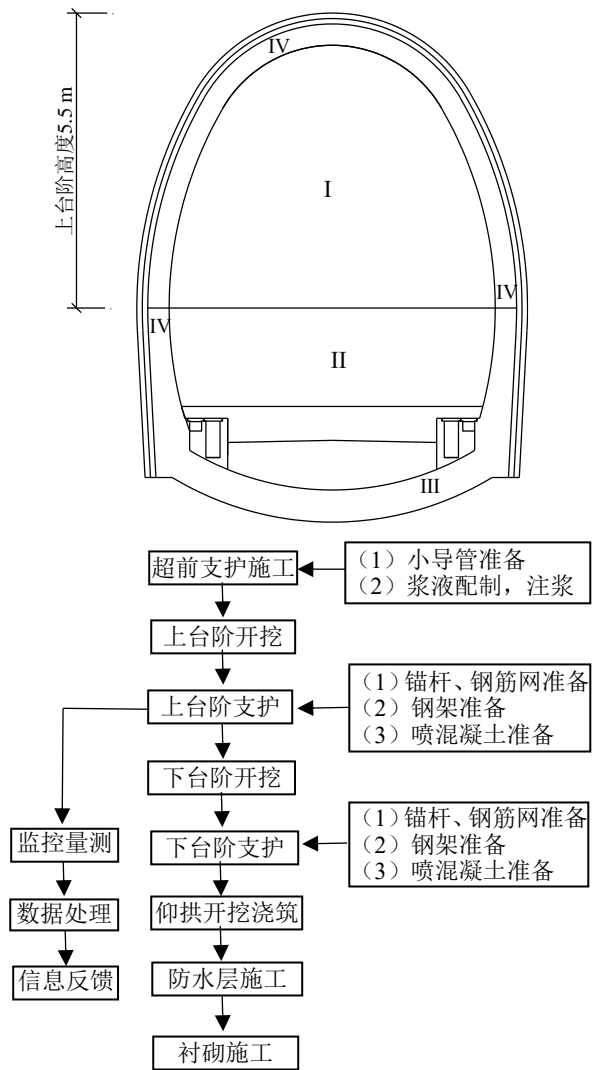


图4 台阶临时仰拱法工序示意图

Fig. 4 Temporary process of stepped inverted arching

表1 隧道支护及衬砌统计表

Table 1 Tunnel support and lining types

序号	起始里程	终止里程	长度/m	围岩级别	衬砌类型	超前支护措施	施工方法	备注
1	DIK9+090.0	DIK9+106.5	16.5	V	斜切式	—	明挖法	洞门段
2	DIK9+106.5	DIK9+136.5	30.0	V	Vby型	$\Phi 89$ 长管棚	台阶临时仰拱法	洞口浅埋段
3	DIK9+136.5	DIK9+158.5	22.0	V	Vby型	$\Phi 50$ 小导管	台阶临时仰拱法	—
4	DIK9+158.5	DIK9+188.5	30.0	V	Vby型	$\Phi 89$ 长管棚	台阶临时仰拱法	洞口浅埋段
5	DIK9+188.5	DIK9+205.0	16.5	V	斜切式	—	明挖法	洞门段

2 技术路线与电塔改造方案

2.1 技术路线

(1)采用工程类比法分析小松山隧道施工对电力铁塔的影响是否可控,方案是否可行。

(2)采用三维数值计算分析确定隧道爆破引起的电力铁塔的振动速度。

(3)综合对比经验公式与数值计算所得的结果,判断当前方案电力铁塔是否安全,或对爆破距离提出要求。

技术路线详见图5。

2.2 电塔改造方案

本工程采用4种电塔改造方案进行对比,改造方案见表2。电塔和电塔基础示意图见图6~10。

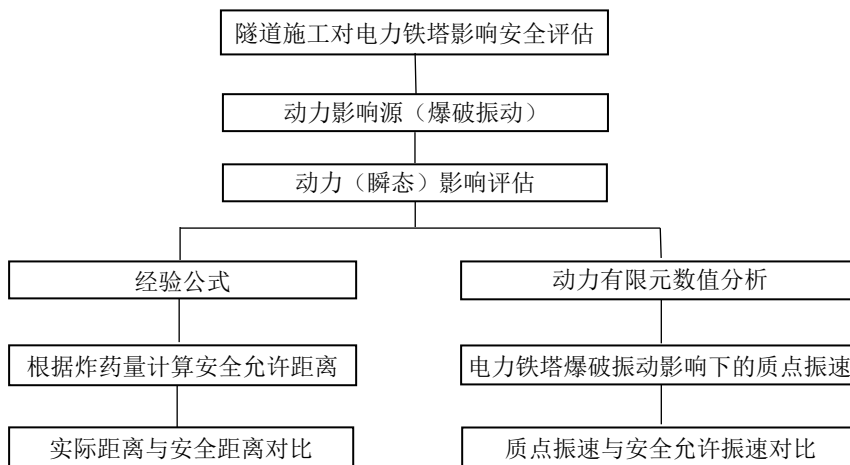


图 5 技术路线

Fig. 5 Technology line

表 2 电塔改造方案

Table 2 Renovation scheme of high-voltage power transmission tower

方案编号	方案说明	铁塔类型
1	联合板式基础	226EC-SJZ2 型窄基塔
2	连梁+独立混凝土桩基	2F14-SDJC 型常规电塔
3	2F14-SDJC24-MG1030 岩石锚杆基础	2F14-SDJC 型常规电塔
4	连梁+2F14-SDJC24-MG1030 岩石锚杆基础	2F14-SDJC 型常规电塔

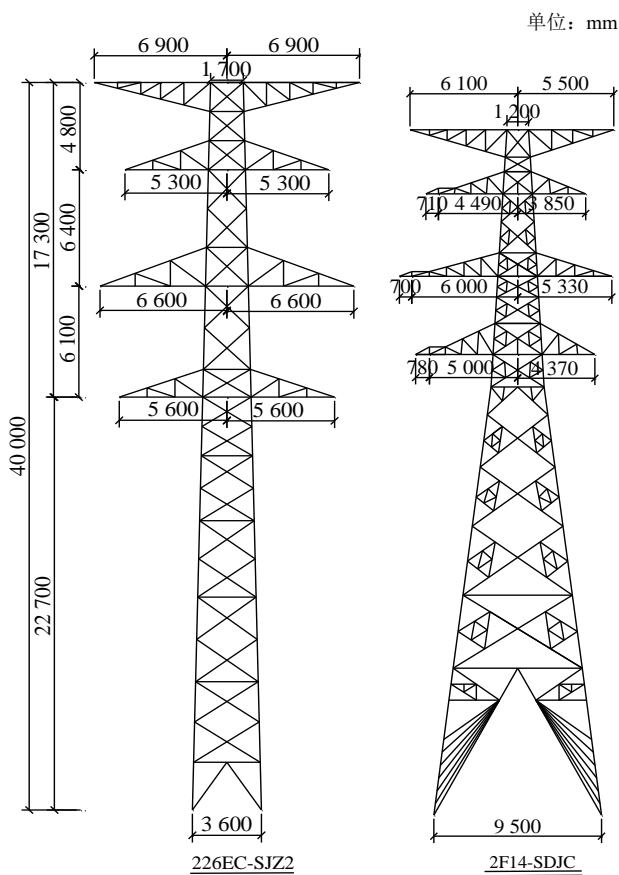


图 6 电塔示意图——方案 1 (左), 方案 2、3、4 (右)
Fig. 6 High-voltage power transmission tower-scheme 1(left), scheme 2, 3, 4 (right)

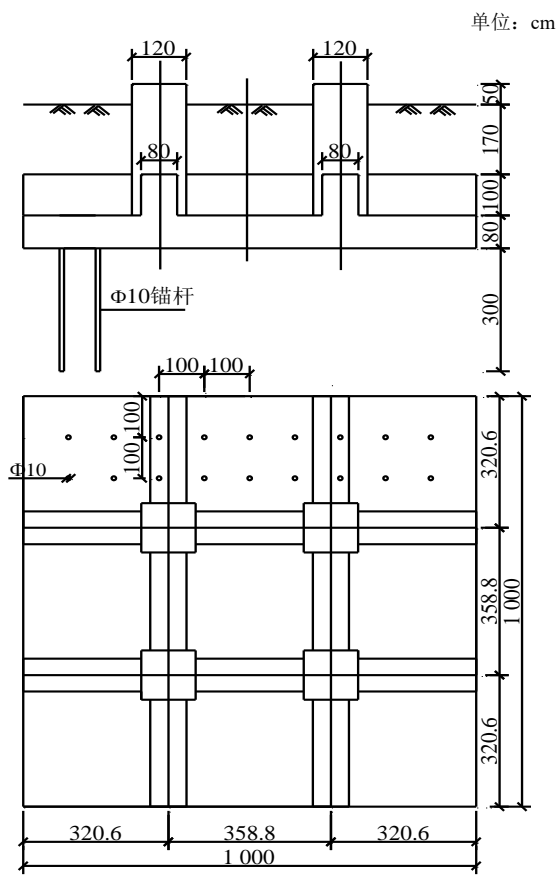


图 7 方案 1 电塔基础示意图
Fig. 7 High-voltage power transmission tower foundation of scheme 1

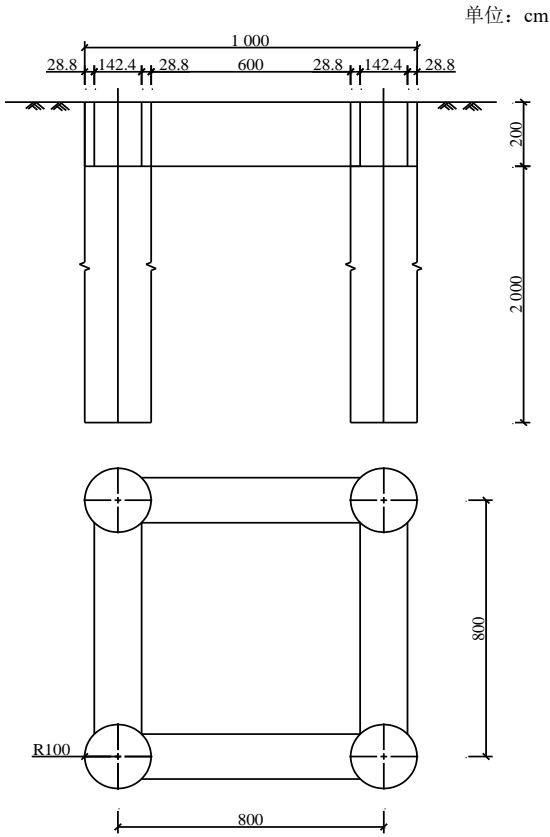


图8 方案2电塔基础示意图

Fig. 8 High-voltage power transmission tower foundation of scheme 2

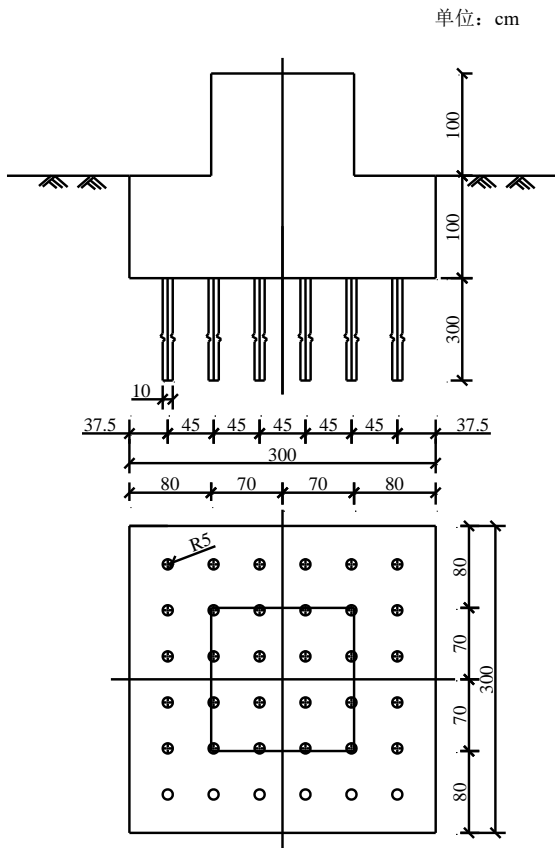


图9 方案3电塔基础示意图

Fig. 9 High-voltage power transmission tower foundation of scheme 3

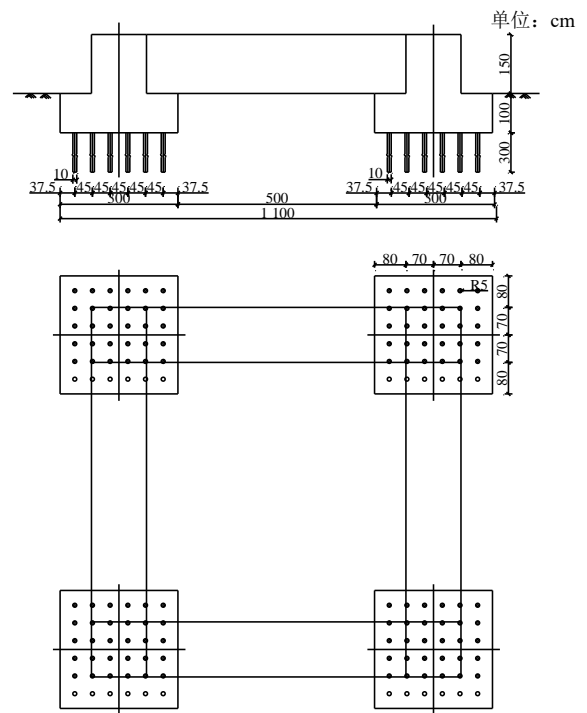


图10 方案4电塔基础示意图

Fig. 10 High-voltage power transmission tower foundation of scheme 4

3 数值模拟分析

3.1 材料本构关系、计算模型及相关参数

本文针对不同土体采用了 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型和扩展 Drucker-Prager 理想弹塑性模型，采用 ABAQUS 有限元软件进行建模分析，整个有限元模型由上部电塔和下部岩土体组成。为了抵消边界条件对模型的影响，下部岩土体长度 100 m，宽度为 50 m，高度为 100 m，以方案 1 为例，模型三维示意图，如图 11 所示。其中，绿色部分为电塔基础，棕色部分为上部电塔，电塔总高度约 40 m，电塔杆件截面采用 Q420 角钢，米色部分为第一层粉质黏土，厚度 2 m，深蓝色部分为第二层全风化砂砾岩，厚度 3 m，绿色部分为第三层强风化砂砾岩，厚度为 4.5 m，土黄色部分为最后一层弱风化熔结凝灰岩。

上部电塔采用杆单元，力学性能参数见表 3，围岩第一、二、三层采用 Mohr-Coulomb (M-C) 模型，最下层采用 Drucker-Prager (D-P) 模型，地层相关参数见表 4。

3.2 边界条件及网格划分

模型下部岩土体四周约束条件为限制水平方向位移，垂直方向位移自由，模型岩土体底部约束条件限制水平、垂直方向位移，地表面无约束条件（即自由）。上部电塔与电塔基础、电塔基础与下部

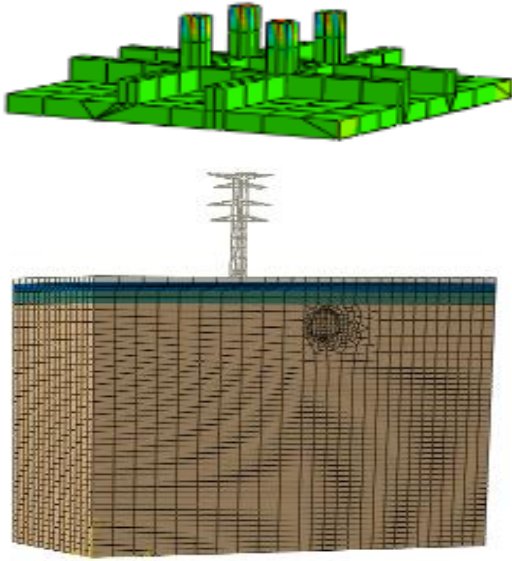


图 11 Abaqus 有限元计算模型

Fig. 11 Abaqus finite element calculation model

表 3 电塔杆件的力学性能参数

Table 3 Mechanical properties of high-voltage power transmission tower poles

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
Q420 角钢	206	0.28	7 850

岩土体、岩土体与衬砌之间接触方式均采用刚接绑定形式，并对整个模型施加重力。在考虑隧道爆破对上部电塔的影响时，对模型添加动力分析步，在隧道掌子面施加瞬时均布力。

爆炸瞬时均布力计算采用下式：

$$P_m = \frac{1}{8} \rho_c D^2 k_d^6 \eta \quad (1)$$

式中： ρ_c 为装药密度，通过控制本数值模拟炸药量； D 为炸药爆炸速度； k_d 为炮孔装药不耦合系数，不耦合系数指炮孔直径与药卷直径的比值，当炸药为不耦合空气间隔装药时，按体积等效原则来计算转换的药卷直径； $k_d = d_b/d_c$ ， d_b 、 d_c 分别为炮孔直径和等效药卷直径； η 为爆轰气体碰撞孔壁时，压力增大的倍数， $\eta = 8 \sim 11$ 。

参数列表如表 5。

计算所得取值为 929 175 Pa，取 1 000 000 Pa 进行计算。

有限元模型中岩土体、电塔基础和隧道均采用 C3D8R 实体单元，上部电塔采用杆单元。电塔基础网格尺寸为 1 m，在划分网格时，隧道、上部电塔和电塔基础附近局部加密。模型单元总数为 54 950，节点总数为 59 488。

3.3 计算工况

通过类比分析相似工程^[15-16]，可知在隧道爆破中，电塔基础外边缘至隧道中心的水平距离（即后文中的安全距离）与爆破的影响关系密切，如果通过一定的爆破方案优化和预加固措施，那么隧道爆破的影响可以控制。因此，在有限元模拟时，可考虑以下几类工况。

采用方案 1~4 共考虑 8 个工况，分别考虑不同安全距离对上部电塔及电塔基础的影响，即计算安全距离为 5、10、15、20、25、30、35、40 m 时隧道爆破对上部电塔及电塔基础的影响。有限元计算分析工况见表 6。

表 4 地层参数表

Table 4 Physical and mechanical parameters of different layer

材料名称	厚度/m	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN/m ³)	流塑应力比	膨胀角/(°)
粉质黏土	2.0	15	12	0.018	0.30	17	—	—
全风化砂砾岩	3.0	30	24	0.050	0.30	20	—	—
强风化砂砾岩	4.5	50	26	0.100	0.14	22	—	—
弱风化熔结凝灰岩	—	—	40	0.200	0.22	2 400	0.9	20

表 5 爆炸瞬时荷载计算参数

Table 5 Calculation parameters of the explosion load

参数类别	装药密度/(kg/m ³)	炸药爆速/(km/s)	炮孔直径/cm	等效药卷直径/cm	η
参数取值	0.76	2.5	4.2	3.2	8

表 6 隧道爆破对上部电塔及电塔基础影响的不同工况

Table 6 Different working conditions of the influence of tunnel blasting on upper high-voltage power transmission tower and its foundations

项目	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七	工况八
安全距离	5	10	15	20	25	30	35	40

根据《爆破安全规程》中的爆破振动安全允许标准^[14],采用经验公式计算爆破振动安全允许距离为24.94 m,另外,根据相关规范要求^[17-20],提出塔基最大振速预警值为2.0 cm/s,控制值为2.5 cm/s,其他项目控制量见表7。

3.4 计算结果及分析

由于计算工况过多,仅展示各类工况的计算结果,未展示各类工况计算结果云图。隧道爆破针对电塔改造的4种方案,对上部电塔的影响根据不同的安全距离(电塔基础外边缘至隧道中心的距离)主要分成8种工况,分别计算不同方案 and 不同工况下上部电塔及电塔基础振动速度,其中上部电塔取塔顶处的振动速度,电塔基础取基础边缘靠近隧道一侧的振动速度,并计算部分工况(根据工程需求选取)的电塔倾斜度(电塔总位移和电塔高度相差较大,取正切值为电塔倾斜度,如电塔倾斜度计

算示例一所示,计算是方案1中工况一的电塔倾斜度,数据来源于图12的上部电塔位移云图)及塔基沉降。

电塔基础安全振动速度界限值为2 cm/s。如表8~11所示,隧道爆破对上部电塔产生的影响比对电塔基础产生的影响要小的多,且所有方案中工况一基础产生的振动速度最大,工况八电塔基础产生的振动速度最小。

方案1:工况一至四不满足安全振动速度要求,工况五至八满足安全振动速度要求。

方案2:工况一至五不满足安全振动速度要求,工况六至八满足安全振动速度要求。

方案3:工况一至七不满足安全振动速度要求,工况八满足安全振动速度要求。

方案4:工况一至六不满足安全振动速度要求,工况七、八满足安全振动速度要求。

表7 本项目控制量
Table 7 Controlling items

控制量	塔基最大振速/(cm/s)	塔基振动安全距离/m	电塔倾斜度/‰	塔基沉降/mm
预警值	2.0	24.94	1.2	10
控制值	2.5	—	1.5	15

表8 电塔改造方案1在不同工况下上部电塔及电塔基础振动速度

Table 8 Vibration speed of the scheme 1 for the upper high-voltage power transmission tower and its foundation at different working conditions cm/s

方案1	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七	工况八
上部电塔	4.00	1.77	1.10	0.71	0.54	0.46	0.44	0.29
电塔基础	13.10	10.96	7.26	4.14	1.40	0.96	0.79	0.55

表9 电塔改造方案2在不同工况下上部电塔及电塔基础振动速度

Table 9 Vibration speed of the scheme 2 for the upper high-voltage power transmission tower and its foundation at different working conditions cm/s

方案2	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七	工况八
上部电塔	4.62	3.74	2.70	2.09	1.70	1.30	1.09	0.77
电塔基础	14.81	9.42	6.74	4.89	2.12	1.80	1.32	0.82

表10 电塔改造方案3在不同工况下上部电塔及电塔基础振动速度

Table 10 Vibration speed of the scheme 3 for the upper high-voltage power transmission tower and its foundation at different working conditions cm/s

方案3	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七	工况八
上部电塔	9.38	8.78	6.74	3.60	2.22	1.59	1.50	1.03
电塔基础	21.27	13.87	9.10	6.36	4.14	3.09	2.28	1.62

表11 电塔改造方案4在不同工况下上部电塔及电塔基础振动速度

Table 11 Vibration speed of the scheme 4 for the upper high-voltage power transmission tower and its foundation at different working conditions cm/s

方案4	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七	工况八
上部电塔	9.66	7.45	4.50	2.25	1.22	1.05	0.76	0.73
电塔基础	16.51	11.66	7.62	4.48	2.36	2.02	1.70	1.34

针对上述各方案中安全振动速度不满足安全要求的工况，采取以下措施：对不同工况的爆破参数进行调整，减少炸药用量，确保施工振动满足安全要求，计算结果见表 12。

使用方案 1 时，安全距离极限值取 25 m（工况五），产生总的振动速度为 1.42 cm/s。

使用方案 2 时，安全距离极限值取 30 m（工况六），产生总的振动速度为 1.8 cm/s，若削减 20%炸药量，方案 2 安全距离极限值取 25 m（工况五），产生总的振动速度为 1.84 cm/s。

使用方案 3 时，安全距离极限值取 40 m（工况八），产生总的振动速度为 1.62 cm/s，若削减 30%

炸药量，方案 3 安全距离极限值取 25 m（工况五），产生总的振动速度为 1.82 cm/s；若削减 20%炸药量，方案 3 极限值取 30 m（工况六），产生总的振动速度为 1.82 cm/s；若削减 10%炸药量，方案 3 安全距离极限值取 35 m（工况七），产生总的振动速度为 1.81 cm/s。

使用方案 4 时，安全距离极限值取 35 m（工况七），产生总的振动速度为 1.70 cm/s，若削减 15%炸药量，方案 4 安全距离极限值取 25 m（工况五），产生总的振动速度为 1.96 cm/s；若削减 10%炸药量，方案 4 安全距离极限值取 30 m（工况六），产生总的振动速度为 1.73 cm/s。

表 12 4 种方案电塔改造在不同工况下电塔基础振动速度结果
Table 12 Comparison of the vibration speed of 4 schemes at different working conditions

方案	方案说明	铁塔类型	基础边缘到隧道中心距离/m	振动速度/(cm/s)	炸药量/%
1	联合板式基础	226EC-SJZ2 型窄基塔	25	1.40	100
2	连梁+独立混凝土桩基	2F14-SDJC 型常规电塔	30	1.80	100
			25	1.84	80
3	2F14-SDJC24-MG1030 岩石锚杆基础	2F14-SDJC 型常规电塔	40	1.62	100
			25	1.82	70
			30	1.82	80
			35	1.81	90
4	连梁+2F14-SDJC24-MG1030 岩石锚杆基础	2F14-SDJC 型常规电塔	35	1.70	100
			25	1.96	85
			30	1.73	90

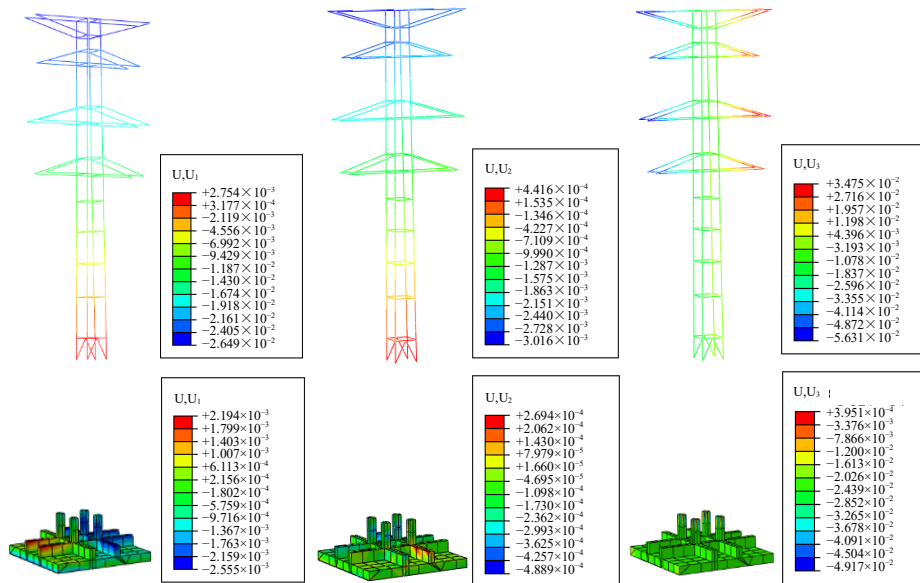


图 12 方案 1 中工况一上部电塔及电塔基础隧道横向位移 (U,U₁)、纵向位移 (U,U₂)、竖向 (U,U₃) 位移云图
Fig. 12 Transversal longitudinal and vertical displacement clouds of the upper electric tower and tower foundation for scheme 1

比较以上各方案,可以粗略得到方案1优于其他方案,因此选取方案1并计算各个工况的电塔倾斜度和塔基沉降是否满足要求。本文以方案1的工

况一为例计算两种安全指标,其上部电塔及电塔基础隧道横向、纵向、竖向位移云图,见图12。同理,可得其他工况的计算结果,见表13。

表13 方案1各种工况电塔倾斜度及塔基沉降结果

Table 13 Calculation results of tower tilt and tower foundation settlement at various working conditions of scheme 1

方案1	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七	工况八
电塔倾斜度/%	2.40	1.40	1.10	0.90	0.70	0.70	0.60	0.50
塔基沉降/mm	49.17	23.21	13.95	8.94	7.61	6.06	4.98	3.67

示例一:电塔倾斜度=

$$\frac{\sqrt{(\text{电塔上部隧道横向位移}-\text{电塔下部隧道横向位移})^2 + (\text{电塔上部隧道纵向位移}-\text{电塔下部隧道纵向位移})^2 + (\text{电塔上部隧道竖向位移}-\text{电塔下部隧道竖向位移})^2}}{\text{电塔高度}}$$

$$\frac{\sqrt{(2.754-(-26.49))^2+(0.4416-(-3.016))^2+(34.75-(-56.31))^2}}{40\ 000}$$

2.4‰>1.2‰,不满足要求;塔基沉降=49.17 mm>10 mm,不满足要求。将表13中的计算结果与表7的项目控制量对比,可知,方案1中同时满足两种要求的为工况四至八。由于工况四不满足安全振动速度的要求,电塔迁移时将不予以考虑该工况。因此,上述方案1中的工况五至八,既满足塔基不均匀沉降及电塔倾斜度的要求,也满足爆破安全振动速度的要求。

4 结 论

根据地质勘察报告提供的资料确定了岩土体物理力学性参数,根据设计院提供的电塔基础及荷载资料和设计资料,建立了包含隧道和上部电塔的空间三维有限元分析模型,对机械开挖和隧道爆破在不同的安全距离下进行安全距离敏感性分析。通过计算分析可得出:

(1)上部电塔基础到隧道中心距离是隧道爆破对上部电塔及电塔基础产生影响的一个重要因素,总的趋势随着安全距离的增大对上部电塔和电塔基础的影响逐渐减小。

(2)隧道爆破时,对上部电塔产生的影响比对电塔基础产生的影响要小的多,且随着安全距离的增加影响减小。控制安全距离或者削减炸药量等方式,还可以满足隧道爆破对电塔基础安全振动速度的要求。

(3)电塔改造方案中,方案1的效果最佳,方案2次之。其中,对比方案2与4可知,使用独立桩基的效果强于锚杆基础的效果,对比方案3与4可

知,使用连梁的效果强于仅使用锚杆基础的效果。

(4)本工程拟定的电塔迁移及改造方案(即对应电塔改造方案1中的工况一)不满足安全振动速度要求,应及时更改工程方案。

参考文献

- [1] 袁广林,杨庚宇,张云飞.地表变形对输电铁塔内力和变形的影响规律[J].煤炭学报,2009,34(8):1043-1047. YUAN Guang-lin, YANG Geng-yu, ZHANG Yun-fei. Influence of ground deformation on the internal force and deformation of power transmission towers[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2009, 34(8): 1043-1047.
- [2] XU Y S, SHEN S L, DU Y J. Geological and hydrogeological environment in Shanghai with geohazards to construction and maintenance of infrastructures[J]. Engineering Geology, 2009, 109(3/4): 241-254.
- [3] MENG F Y, CHEN R P, KANG X. Effects of tunneling-induced soil disturbance on the post-construction settlement in structured soft soils[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2018, 80: 53-63.
- [4] 衡朝阳,滕延京,孙曦源,等.地铁隧道下穿单体多层建筑物评价方法[J].岩土工程学报,2015,37(S2):148-152. HENG Chao-yang, TENG Yan-jing, Sun Xi-yuan, et al. Evaluation method for subway tunnel underpassing single multi-story buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 148-152.
- [5] 张海波.地铁隧道盾构法施工对周围环境影响的数值模拟[D].南京:河海大学,2005. ZHANG Hai-bo. Numerical simulation of the influence of shield construction of subway tunnel on the surrounding environment[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [6] 赵冬冬.城市地铁地下结构地震反应的试验研究与数值模拟[D].北京:清华大学,2013. ZHAO Dong-dong. Experimental study and numerical simulation of seismic response of urban subway

- underground structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [7] 林义. 隧道地震超前预报技术的数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
LIN Yi. Numerical simulation study of tunnel seismic over-prediction technology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [8] 侯公羽, 刘宏伟, 李晶晶, 等. 基于开挖卸荷效应的地铁隧道施工过程数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2915-2924.
HOU Gong-yu, LIU Hong-wei, LI Jing-jing, et al. Numerical analysis of subway tunnel construction process based on excavation and unloading effect[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 32(S1): 2915-2924.
- [9] 吉小明, 王宇会, 阳志元. 隧道开挖问题中的流固耦合模型及数值模拟[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 379-384.
JI Xiao-ming, WANG Yu-hui, YANG Zhi-yuan. Flow-solid coupling model and numerical simulation in tunnel excavation problem[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 379-384.
- [10] 冯仲仁, 文曦. 新建隧道爆破震动对既有隧道影响的数值分析[J]. 爆破, 2008, 25(4): 20-23.
FENG Zhong-ren, WEN Xi. Numerical analysis of the effect of blasting vibration on existing tunnels in new tunnels[J]. Blasting, 2008, 25(4): 20-23.
- [11] 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FLAC~(3D)分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(6): 1401-1405.
XIAO Xin-xin, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang. FLAC-(3D) analysis of the effect of tunnel excavation and blasting on surface high-voltage pylons[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(6): 1401-1405.
- [12] 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.
XIE Jin-rong. Safety evaluation of the influence of underpass tunnel shield construction on high-voltage electrical towers[J]. Soil Engineering and Foundation, 2020, 34(2): 89-93.
- [13] 谷任国, 朱奕曜, 房莹光. 隧道施工对既有高压电塔的影响分析及数值模拟研究[J/OL]. 应用科技: 1-7[2021-09-01].
GU Ren-guo, ZHU Yi-yao, FANG Ying-guang. Analysis and numerical simulation of the influence of tunnel construction on existing high-voltage electric towers [J/OL]. Applied Science and Technology: 1-7[2021-09-01].
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Ministry of housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Safety Specifications of Blasting: GB 6722—2014[S]. Beijing: Standard Press of China, 2014.
- [15] 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.
YANG Yuan-hong. Analysis of the interaction between the construction of Li Jiachong large-span tunnel and the overlying high-voltage transmission tower [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [16] 陈先国, 康海波, 范仁玉. 重庆双碑隧道出口端下穿建筑物爆破方案[G]. 2012年全国公路隧道建设技术研讨会资料汇编. 中国公路学会, 2012: 10.
CHEN Xian-Guo, KANG Hai-Bo, Fan Ren-Yu. Blasting scheme for the exit end of Chongqing Shuangbei Tunnel under the building[G]. 2012 National Symposium on Highway Tunnel Construction Technology. China Highway and Transportation Society, 2012: 10.
- [17] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National railway administration of the People's Republic of China. Code for Design of Railway Tunnel: TB 10003—2016[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.
- [18] 国家能源局. 架空输电线路运行规程: DL/T 741—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
National energy administration. Operation Code for Overhead Transmission Line: DL/T 741—2019[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Ministry of housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Code for Design of 110 kV-750 kV Overhead Transmission Line: GB 50545—2010[S]. Beijing: Standard Press of China, 2010.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高耸结构设计规范: GB 50135—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Ministry of housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Code for Design of High-rising Structures: GB 50135—2019[S]. Beijing: Standard Press of China, 2019.