

浅埋大跨隧道穿高压铁塔的注浆效果研究

胡焕校, 吴高权, 沈增辉

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 李家冲隧道为浅埋大跨隧道, 其周围介质为V级软弱围岩, 隧道经过区域左洞侧上方有一高压电线塔。为保证高压电线塔的安全, 防止由于隧道开挖引起的塔基不均匀沉降, 需对围岩进行注浆预加固。通过应用FLAC^{3D}, 研究注浆前后隧道拱顶沉降和塔基沉降情况。数值分析表明: 围岩在注浆后, 拱顶沉降量和塔基沉降量有明显的减小, 而且能有效控制塔基的不均匀沉降。与实际监测结果对比发现, 围岩注浆效果较好, 且模拟的计算值和实测值相近, 说明应用FLAC^{3D}进行注浆效果的事前分析是可行的。

关键词: 浅埋隧道; 数值模拟; 注浆; 塔基沉降; 不均匀沉降

中图分类号: TV223.34

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)05-0085-04

Study on grouting effect of shallow-buried large – span tunnel through tower of high electric pressure

HU Huanxiao, WU Gaoquan, SHEN Zenghui

(School of Geosciences and Info – Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Lijiachong tunnel is a shallow-buried large-span tunnel and its surrounding medium is V weak surrounding rock. There is a tower of high electric pressure through the left hole side of the tunnel area. In order to ensure the safety of the tower, and avoid the uneren settlement of tower foundation before the tunnel excavation, the surrounding rock should be carried out pre – grouting reinforcement. Tower foundation and vault settlement before and after grouting were numerically studied with FLAC^{3D}, simulation results indicated that tower foundation and vault settlement were significantly reduced after grouting to surrounding rock, and it could effectively control the uneven settlement of tower foundation. Compared with the actual monitoring results, the surrounding rock grouting effect was better, and the measured values accord well with values of simulation. It is feasible to forecast the grouting reinforcement effect by FLAC^{3D} simulation.

Key words: shallow-buried tunnel; numerical simulation; grouting; tower foundation settlement; uneven settlement

高速公路隧道常因一些地质地形原因要穿越破碎浅埋区, 由于围岩松散, 自承能力差^[1], 隧道在开挖过程中往往会引起较大的地表沉降。当开挖区周边存在重要建筑物时, 如果没有采取必要的措施, 会导致建筑物的破损, 倾斜甚至倒塌^[2]。通过采取注浆预加固技术, 能够控制地表沉降, 保证周边建筑和施工的安全。罗平等^[3]通过建立空间岩体裂隙模型, 并利用数值模拟程序分析研究了裂隙网络的注浆情况。陈利杰等^[4]总结了围岩预注浆后, 地表沉降的影响范围和下沉规律。张顶立^[5]分析研究了在海底隧道施工时, 通过超前帷幕和全断面注浆的加固方式, 能实现对地层稳定性的控制。由于注

浆的效果直接关系到工程的成功与否, 本文通过FLAC^{3D}数值模拟, 结合监测结果, 对注浆前后地表沉降和隧道围岩的稳定性进行了分析。

1 工程概况

1.1 工程地质

京珠复线长湘高速高路李家冲隧道采用双向六车道, 隧道区出露的地层上部为第四系粉质粘土, 厚约40 cm, 整座隧道围岩为板溪群五强溪组变质砂岩夹砂岩板岩, 岩体破碎, 围岩类别为V级围岩。

李家冲隧道全线均为浅埋, 左线最大埋深18 m, 右线最大埋深25 m, 隧道经过区域左洞侧上方有一

收稿日期: 2012-06-13

作者简介: 胡焕校(1968-), 男, 浙江慈溪人, 副教授, 博士后, 从事地质工程、土木工程等方面教学科研工作。

通讯作者: 吴高权(1987-), 男, 湖南怀化人, 硕士, 从事岩土工程、地质勘测方面的研究工作。

500 kV 高压电线塔,属于艾鹤 II 号线,塔号 014,塔高 27 m,塔基中心线位于隧道 ZK147+103 左 13 m。

隧道按照新奥法原理进行设计,采用复合式衬砌,三台阶七步流水法施工。隧道剖面图见图 1。

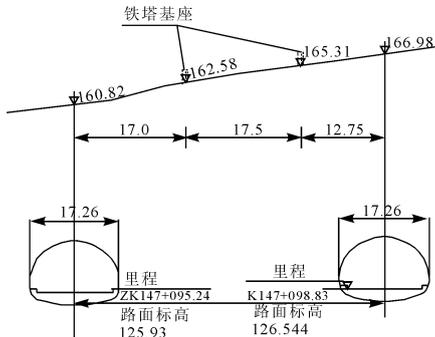


图 1 隧道剖面图

1.2 注浆方案

以高压铁塔四个塔基为主要加固点,塔基矩形区域为灌浆区域,灌浆分左右洞 2 个区进行,左洞横向宽度 19 m,右洞横向宽度 19 m,左右洞纵向长度均为 33 m,注浆孔深 25 m,孔深可根据隧道围岩覆盖层厚可相应调整,以控制注浆总量及注浆管不深入隧道开挖轮廓为准。注浆孔间距 2.0×2.0 m 梅花形布置,共设置注浆孔 240 个,注浆面积 $1\ 024\ \text{m}^2$ 。

通过现场注浆试验,塔基注浆采用水泥-水玻璃双液注浆,水玻璃浓度为 35 波美度,模数 2.4,水泥采用 42.5 级普通硅酸盐袋装水泥,水泥浆水灰比按 1:1 \rightarrow 0.8:1 \rightarrow 0.6:1 先稀后浓逐渐变化,速凝剂的用量为水泥用量的 5%,灌浆压力 0.5~1.0 MPa,终压为 1.5~2.0 MPa,设计注入率为 10%,单孔注浆量 $Q = 0.38\ \text{m}^3/\text{m}$ 。

注浆时采用自上而下,压入式分段注浆,按先外圈后内圈,分序注浆的原则进行施工。

2 数值模拟分析

FLAC^{3D} 是一种基于三维显式有限差分法的数值分析软件,它能够模拟计算三维岩土体和其它介质中工程结构的受力和与变形形态^[6]。

2.1 计算模型

结合京珠复线长湘高速公路李家冲隧道的实际情况,选取输电线路铁塔中心所在的隧道横断面建立数值计算模型。为了尽量减少边界对计算结果的影响,模型两侧的边界取距离左、右隧道均大于三倍洞跨的距离,底部边界线也取距离隧道底部仰拱大于 3 倍洞径的距离^[7]。

模型的侧面为位移边界,限制水平移动;底面为

固定边界,限制水平移动和垂直移动;模型上表面为地表,取为自由边界^[8]。

隧道及周边围岩选用六面体隧道外围渐变放射网格,地表岩层为楔形体网格,其它则为六面体网格。整个模型长 176 m,左边高度和右边高度分别为 87 和 95 m,宽度为 1 m,整个模型共有 1 912 个单元,其相应的计算模型网络划分如图 2 所示。

2.2 本构模型

FLAC^{3D} 提供了 10 种本构模型^[9],在模拟计算中,围岩采用莫尔-库仑模型;隧道的初次衬砌和二次衬砌采用弹性本构模型^[10];注浆后的地层采用莫尔-库仑模型通过提高岩土体的弹性模量及 c 、 φ 值来模拟^[11]。

塔基采用桩单元模拟,计算分析铁塔的稳定性时,需要考虑其上部荷载的最不利组合情况。因此,基础上除开承受的铁塔自重荷载外,尚需加入设计荷载与履冰荷载的下压作用力,结合工程设计资料可得单桩最大下压力为 $P = 360\ \text{kN}$ 。

2.3 力学参数

根据岩土工程勘察报告,现场注浆试验和设计资料,模型中各材料的力学参数如表 1 所示。

表 1 材料的力学参数 GPa, kg/m^3 , kPa, ($^\circ$)

材料名称	弹性模量	密度	泊松比	粘聚力	摩擦角
围岩	0.8	2000	0.3	160	30
注浆后围岩	1.2	2100	0.4	500	40
初衬混凝土	28	2200	0.2		
二衬混凝土	18	2500	0.2		
铁塔桩基础	30	2500	0.2		

2.4 计算分析

数值计算分两个部分:先使岩层在自重应力下达到稳定状态,然后对隧道进行开挖支护,当达到平衡是对位移进行分析;预先对围岩进行加固,再对隧道进行开挖支护,待平衡是再分析围岩位移变化。

隧道在施工时,由于下部岩体的开挖将导致地表产生沉降,从而使上部的铁塔也产生相应的位移,这将影响到铁塔的稳定性。数值模拟主要研究分析岩体注浆前与岩体预注浆后两种情况下塔基沉降与隧道拱顶位移变化。隧道开挖后所引起的围岩位移变化见图 3 和图 4 所示。

从图中可以看出,由于李家冲隧道埋深较浅,隧道开挖后,其周围岩体的沉降量主要集中在隧道拱顶至地表这一区域内。而且,右洞的拱顶沉降位移要大于左洞,这是由于右洞的岩土覆盖层相对左洞

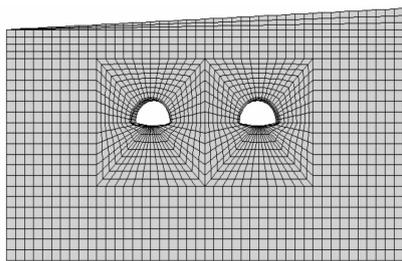


图 2 数值分析模型图

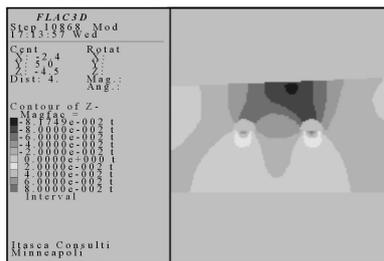


图 3 围岩未注浆时沉降云图

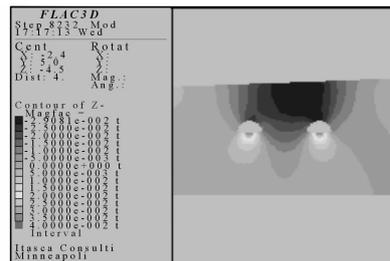


图 4 围岩预注浆后沉降云图

要厚,且铁塔的塔基基座靠近右洞,导致右洞所受到的下压力更大。对比图 3 和图 4,可以看出,围岩预注浆后,地表沉降和拱顶位移有都有一定程度的减小,说明注浆对控制围岩位移是有效果的。隧道的底部出现了一定量的隆起,围岩注浆隆起量在注浆前为 8.64 cm,注浆后为 4.03 cm,要小于注浆前,这表明:注浆加固能减小隧道底部的隆起量。

在塔基基座和拱顶设置监测点,监测节点位置为

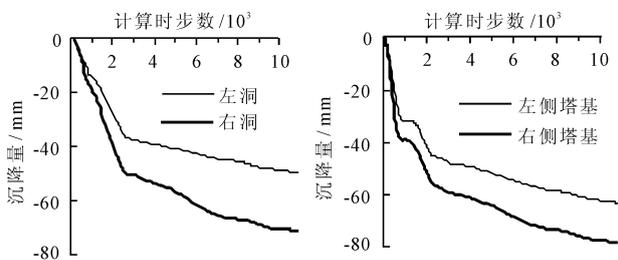


图 5 未注浆时塔基和拱顶沉降时程曲线图

对比塔基沉降量,围岩未注浆时,在隧道开挖后,刚开始塔基是均匀沉降的。但随着时间推移,右侧塔基的沉降速率开始大于左侧塔基,塔基出现不均匀沉降,等到位移稳定时,右侧塔基的最终沉降量达到了 78.31 mm,而左侧的沉降量为 63.01 mm,不均匀沉降量达到了 15.30 mm。这对铁塔的安全是非常不利的,考虑到隧道施工爆破影响等其它不利因素,铁塔很有可能会发生倒塌。

围岩预注浆后,左右侧塔基的沉降量分别为 25.24 mm 和 28.17 mm,不均匀沉降量为 2.93 mm,相比未注浆时左右侧塔基的沉降量分别减小了减少了 59.9% 和 64%,不均匀沉降量减少了 80.8%,说明围岩注浆能够控制铁塔的不均匀沉降,且效果显著。考虑到尚未能完全消除不均匀沉降的影响,尚应采取其它技术措施,例如设置 H 型框架梁对塔基进行整体固定。

3 实际工程监测

隧道监控量测的目的是掌握围岩动态,对围岩稳定性作出评价,以指导工程设计和施工。隧道在

塔基地表出露处和隧道两洞洞顶正上方。每一百步记录一次数据,计算终止采用 FLAC^{3D} 的默认收敛标准,进行位移监测,经数值计算后,位移随计算时步数的变化曲线见图 5 和图 6。从图 5 可以看出,围岩未注浆时,隧道的左右洞的累计沉降量分别达到了 49.82 mm 和 71.56 mm;而围岩注浆后,累计沉降量分别为 21.53 mm 和 28.65 mm,相比未注浆时,沉降量有明显减小,说明围岩注浆能够控制拱顶位移。

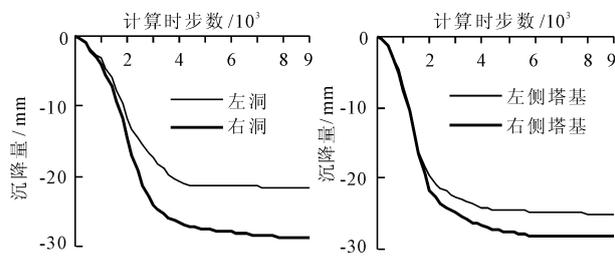


图 6 预注浆后塔基和拱顶沉降时程曲线图

开挖后,对拱顶沉降和隧道上方塔基沉降值进行观测。隧道两洞拱顶沉降观测结果如图 7 和图 8 显示,本次监测围岩稳定的判定标准为:当速率小于 0.2 mm/d 时,表面围岩基本处于稳定状态。

由图中可看出,断面 ZK147-110 的累计位移值为 17.79 mm,断面 YK147-140 的累计位移值为 21.06 mm,要大于断面 ZK147-110 的位移值。监测结果显示,隧道左洞拱顶沉降在前 10 天内沉降速率较大,最大速率 1.5 mm/d,平均速率 1.24 mm/d 此时围岩处于急剧变形状态;再接下来的一周内速率减慢,平均速率为 0.57 mm/d 需加强对围岩的监测,当速率骤增时,需加强围岩支护;第 18 d 开始至观测结束,平均速率仅为 0.12 mm/d,小于 0.2 mm/d,表面围岩处于稳定状态。隧道右洞拱顶沉降曲线与左洞类似,不再做具体分析。数值模拟计算结果显示,围岩注浆后,隧道左洞和右洞拱顶的累计沉降值分别为 21.53 mm 和 28.65 mm,与实际观测结果对比发现,模拟值要比实际值略大。造成这一现象的原因是拱顶下沉的初始量测要在隧道开挖至监测断面并对围岩进行初期支护后,而此时围岩已经发生了一定程度

的沉降量。塔基的沉降观测值见图9。

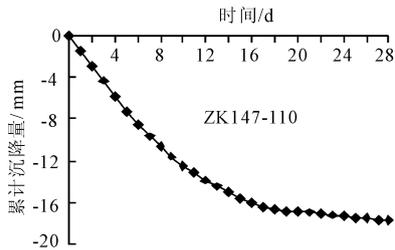


图7 隧道左洞拱顶沉降时程曲线图

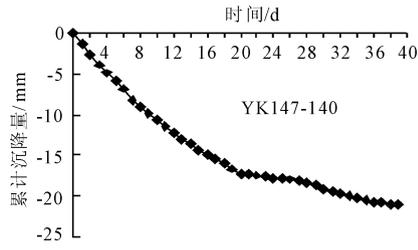


图8 隧道右洞拱顶沉降时程曲线图

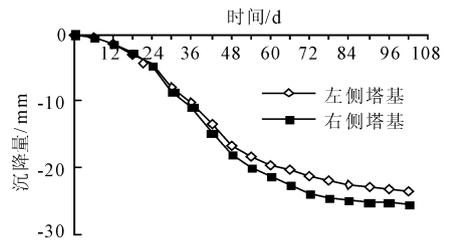


图9 塔基沉降时程曲线图

在前24 d内,左侧塔基和右侧塔基沉降量基本相等,属于均匀沉降。塔基沉降速度缓慢,至第24 d时塔基的累积沉降量为4.49 mm,平均沉降速率仅为0.19 mm/d,这是因为隧道施工还未开挖至高压铁塔正下方,塔基沉降受隧道开挖的影响较小。第24 d至第72 d,塔基沉降速度骤增,隧道开挖对塔基的影响增大,同时受地表地势左低右高的影响,右侧塔基的沉降速度开始大于左洞,塔基出现不均匀沉降。左侧塔基平均沉降速率为0.35 mm/d,右侧则达到0.40 mm/d,沉降差被逐步拉大。第72天至观测结束,塔基沉降速率变小,曲线趋于变缓,塔基沉降趋于稳定。左侧塔基最终累积沉降量为23.40 mm,右侧为25.38 mm,不均匀沉降量为1.98 mm。

数值模拟计算结果显示,围岩注浆后,塔基左侧累积沉降量25.24 mm,塔基右侧的累积沉降量为28.17 mm,不均匀沉降量为2.93 mm,模拟值和实际检测结果接近,模拟值比实际值略大。说明采用数值模拟方法对围岩预注浆的效果进行预测,其结果和实际情况相差不大,是可行的。

4 结 语

(1)在隧道开挖前对围岩进行预注浆,能有效控制塔基和隧道拱顶的沉降量。

(2)由于隧道上方存在偏压,右洞的拱顶位移要大于左洞,故在隧道施工时,应更加关注右洞其顶部的围岩稳定性,在设计施工时应加强右洞的支护。

(3)围岩预注浆未能完全消除塔基的不均匀沉降,可以通过设置H型框架梁对塔基进行整体固定等措施进一步减少不均匀沉降。

(4)采用FLAC^{3D}软件对注浆效果进行预测分

析,其结果和实际接近,对注浆和隧道的设计施工具有指导意义。

参考文献:

- [1] 余健,何川. 软弱围岩段隧工过程中围岩位移的三维弹塑性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):623-629.
- [2] 王绍君,刘宗仁,陶夏新. 浅埋暗挖隧道施工性态的数值模拟与分析[J]. 土木工程学报,2007,40(6):75-79.
- [3] 罗平平,朱岳明,赵咏梅. 岩体灌浆的数值模拟[J]. 岩土工程学报,2005,27(8):918-921.
- [4] 陈利杰,张晓平,刘华斌. 城市浅埋软岩隧道施工沉降分析及对策[J]. 工程地质学报,2010,18(2):281-288.
- [5] 张顶立. 海底隧道不良地质体及结构界面的变形控制技术[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(11):2161-2169.
- [6] Itasca Consulting Group, Inc. FLAc (Fast Lagrangian Analysis of Continua) UserS Manuals, Version5.0[M]. Minneapolis:Itasca Consulting Group, Inc. 2001.
- [7] 闫春岭,丁德馨,崔振东,等. FLAC在铁山坪隧道围岩稳定性分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(3):499-503.
- [8] 李凤霞,赵红玲,肖红渠. 帷幕注浆控制建筑物沉降的数值模拟分析[J]. 四川建筑科学研究,2011,37(3):124-131.
- [9] 刘波,韩彦辉. FLAC原理、实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005:5-25.
- [10] Pierre Yves H, Ching S C, Christophe D. Multi scale modeling of grouted sand behavior[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008,45:4362-4374.
- [11] 覃卫民,赵荣生,王浩,等. 浅埋大跨隧道下穿建筑物的安全影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增2):3762-3768.