

暗挖电缆隧道四通竖井结构稳定性研究

谢阳¹, 赵玉成¹, 武淑敏², 李占岭², 郝斌¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省电力勘测设计研究院, 河北 石家庄 050031)

摘要:研究暗挖过程中竖井的稳定性,以四通竖井工程为背景,采用 midas GTS NX 有限元软件对真实施工过程进行了数值模拟,并对超前小导管注浆措施进行论证,对比分析了土体变形规律、喷射混凝土应力变化,并得出了注浆加固措施的影响效果,认为超前注浆加固是必需的施工步骤。将实际施工过程的模拟结果与现场监测数据进行了对比分析,验证了数值模拟的可行性。结果表明:注浆与否对竖井的地表沉降范围影响不大,但对沉降值影响较大;注浆与否对坑底隆起值影响甚微,空间效应明显;水平位移的最大值出现在竖井底部,注浆与否对水平位移有明显影响;马头门附近的喷射混凝土应力变化显著,需要进行补强措施,为类似工程提供借鉴。

关键词:地下工程;四通竖井;稳定性;数值模拟

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)04-0026-06

0 引言

随着我国城市化水平的不断提高,城市电网的建设面临着两个主要问题:电力负荷高速增长和电力通道资源相对稀缺的矛盾;满足城市绿色环保生存空间与高标准景观的需求^[1]。在如今电力负荷的影响下,充分利用城市地表5 m以下的资源,电力电缆隧道呈现隧道断面越来越大,埋置深度越来越深的态势。在电缆隧道的建设过程中,圆形竖井围护结构受力合理,空间效应十分明显,从受力特点上可以看作是闭合拱圈结构,其拱效应使部分坑外土压力转化为围护结构的轴向压力,它可以将侧向位移控制在很小的范围内,显著提高了结构自身稳定性^[2-7]。运用地层结构法,采用国际通用的有限元分析软件 midas GTS NX 建立三维计算模型,对比分析竖井的稳定性及注浆措施的影响效果,重现施工过程中的真实受力状态,以此对施工状态进行分析。

1 工程应用

许常Ⅱ线π入留村、韩通变220 kV线路工程位于石家庄市高新技术开发区内,线路平均埋深30 m。拟建隧道段地层自上而下主要由黄土类土、粉土、砂土等组成;沿线地下水位埋深大于55.00 m,可不考虑地下水对本工程的影响。该线路中的F7暗挖四通结构为本文研究对象,竖井内径10 m,深度32 m,在竖井底端开4个马头门,两两相对分布且相邻夹角为90°,4条隧道与竖井轴线垂直。其中最大断面马头门的净宽为6.1 m,最大净高为5.1 m,初喷混凝土厚度为350 mm。

2 有限元模型建立

2.1 模型参数及网格划分

根据地勘报告所提供的岩土物理力学参数建议值,将覆土简化为4层,厚度分别为2.5 m,4.5 m,31 m和7 m,土层计算参数如表1所示。

收稿日期:2016-08-23 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2017.04.05

基金项目:2016年研究生创新项目(yc2016017)

作者简介:谢阳(1991-),男,硕士研究生,主要从事城市地下空间与环境控制方面研究。E-mail:366697393@qq.com

谢阳,赵玉成,武淑敏,等.暗挖电缆隧道四通竖井结构稳定性研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(4):26-30.

表 1 土层计算参数表

层号	岩土名称	厚度/m	天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	泊松比
1	黄土状粉土	2.5	1.94	8.5	33	25	0.34
2	黄土状粉土	4.5	1.90	9.0	26	26	0.32
3	细砂	31.0	1.92	18.0	2	30	0.30
4	粉土	7.0	1.95	9.8	34	24	0.32
5	粗砂	—	1.98	25.0	0	35	0.28

土层采用 Modified Mohr-Coulomb 本构模型,该模型是对 Mohr-Coulomb 的改进,由非线性弹性模型和弹塑性模型组合,适用于淤泥或砂土行为特性,能够很好地解决基坑类工程中开挖卸荷土体回弹等问题,使模拟值更趋于真实。

竖井采用复合式衬砌支护体系,初次支护采用格栅钢架+喷射混凝土+注浆锚杆。该竖井作为整个施工工程中的重要通道,在整个隧道主体完成后才施作竖井的二次衬砌,二次衬砌仅作为安全储备,故不考虑模拟,因此在设计中加大了初期支护参数,具体有限元模型如图 1、图 2 所示。

根据以往的有限元计算结果和工程经验,基坑开挖影响宽度为开挖深度的 3~4 倍,影响深度为开挖深度的 2~4 倍^[8],在半无限体假设下,模型分析土域为长×宽×高=250 m×250 m×130 m。模型的边界条件如下:整个位移边界作用于土体边界上,在 X 方向上约束 X 位移;在 Y 方向上约束 Y 位移;模型底部约束 Z 方向位移。

由于竖井底部的 4 条隧道断面形式不一样,在进行施工模拟时无法取 1/2 或 1/4 计算域进行局部分析,为提高模型的计算速度,且不失计算结果的精确度,在划分网格前,对几何体的线段进行“尺寸控制”的操作,按照竖井及隧道需开挖及附近的土体网格密集,向外逐渐稀疏的原则来合理划分模型网格。

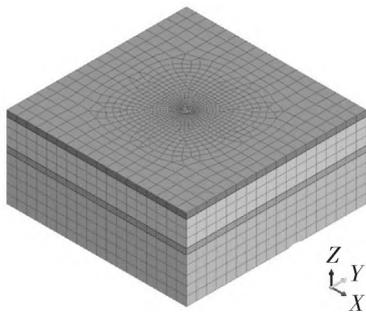


图 1 土体有限元模型

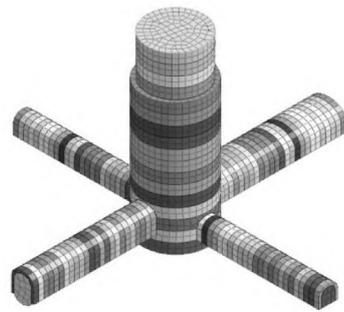


图 2 四通竖井模型

2.2 数值模拟中支护结构的处理

采用 C25 等级喷射混凝土,用板单元模拟,考虑混凝土开裂工作状态,弹性模量取标准模量值的 0.8 倍,即 $E=1.84 \times 10^4$ MPa,泊松比 $\mu=0.2$,将格栅钢筋与钢筋网的重度折算到喷射混凝土中,取 $\gamma=24$ kN/m³。

在数值模拟中,一般采用改变注浆范围的力学参数来获得加固效果,使弹性模量、内摩擦角、黏聚力提高,泊松比减小,与围岩一起承载,使围岩塑性区出现的范围减小,出现的时间得以延缓^[9]。采用实体模拟,在竖井外围及隧道拱顶及直墙形成厚度为 0.8 m 的加固圈,弹性模量 $E=60$ MPa,泊松比 $\mu=0.3$,黏聚力 $c=60$ kPa,内摩擦角 $\varphi=35^{\circ}$,容重 $\gamma=21.5$ kN/m³。

2.3 实际施工过程

本工程采用倒挂井壁法施工,施工开挖步取为 0.5 m。基本步骤是每进行一个开挖步后,在下一个施工步骤时施作该开挖步的喷混支护,当开挖到地下 7 m 后,会遇到砂层,需提前一个开挖步进行超前注浆加固,每次注浆加固距离为 3 个开挖步,当开挖 2 个开挖步后,需继续进行超前加固,在开挖土体时,保证至少有一个开挖步的土体进行了加固处理。

具体施工模拟过程如下:①地应力平衡。即“激活”所有土体单元、模型边界条件,施加重力及超载,并勾选“位移清零”,模拟土体在自重作用下的初始地应力场;②进行第 1 步开挖,即“钝化”第一部分要开挖的土体;③进行第 1 步的喷混施作,施作锁口圈梁并第 2 步开挖,即“激活”第一部分的喷射混凝土及锁口圈梁,“钝化”第二部分要开挖的土体;④进行第 2 步的喷混施作,第 3 步开挖;按照上述方法循环开挖支护至竖井底部,并保证超前注浆加固效果,封底后进行马头门及隧道开挖,其原理与竖井开挖相同。

为论证竖井的超前小导管注浆加固的影响效果,建立了参数相同的数值模型,与实际施工过程的唯一区别在于竖井阶段没有考虑注浆加固措施。

3 数值计算结果

3.1 地表沉降分析

其沉降趋势与地下连续墙等刚性支护不同,地下连续墙的沉降曲线类似于勺形,归结于其采用了“先支后挖”的支护理念,而复合式衬砌属于柔性支护,在喷射混凝土硬化过程中,依旧存在应力释放,采用的是“边抗边让”的支护理念。倒挂井壁法的传力机制是下部的初期支护依靠纵向连接筋与上部支护相互连接,最终传递至锁口圈梁;受重力的影响,整个支护结构有向下运动的趋势,与排桩、地下连续墙等支护方式区别明显。

由图 3 可分析:随着开挖深度加深,地表沉降值为增大趋势,且影响范围不断扩大;随着距竖井距离的增加,沉降值逐渐减小并趋于稳定。在竖井开挖深度小于 20 m 时,在距离竖井约 30 m 时已稳定,当开挖至 32 m 时,影响范围扩大至 60 m。是否考虑竖井超前小导管注浆加固措施,对地表沉降范围的影响不大,均在 60 m 左右,但沉降值相差较大,在竖井井壁边达到最大值,且两者相差接近 78%,未进行注浆加固时,井口沉降值已超过 30 mm,威胁施工安全,仅从位移变化的角度来说,竖井注浆加固可以很好地抑制地表沉降。

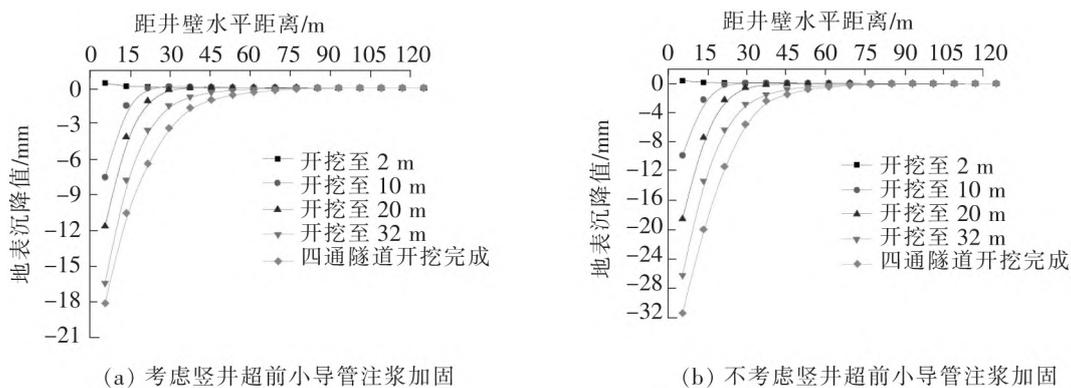


图 3 开挖过程中地表沉降值曲线

3.2 竖井底部变形分析

通过图 4 表明,竖井开挖导致底部土体卸荷回弹隆起,隆起值随着开挖深度的增大而增大,呈对称趋势。开挖到底后,两者的最大隆起值相差不大,约为 20 mm,整个坑底的隆起趋势并没有出现类似于大型深基坑中的“M”形,可见整个竖井的空间效应明显;而四通隧道开挖之前,会对竖井底部进行封底加固,在数值模拟中,其隆起值表现为 0。在井壁附近,土体呈沉降趋势,认为是倒挂井壁的受力机制引起的,支护结构受重力下沉所造成的应力扰动,采用混凝土封底后,井壁土体的沉降现象消失,可见及时对井底进行封底加固非常必要。因此,需待封底混凝土强度达到要求后,再开挖马头门。

3.3 竖井水平位移

由图 5 中曲线可以看出,竖井发生朝向临空面的位移,位移值随竖井开挖过程不断加大,整体趋势呈现“弓”形,最大位移均在开挖面附近。两者的位移趋势保持一致,但数值明显不同,当竖井下挖至 32 m 时,有最大位移值,两者相差高达 100%。

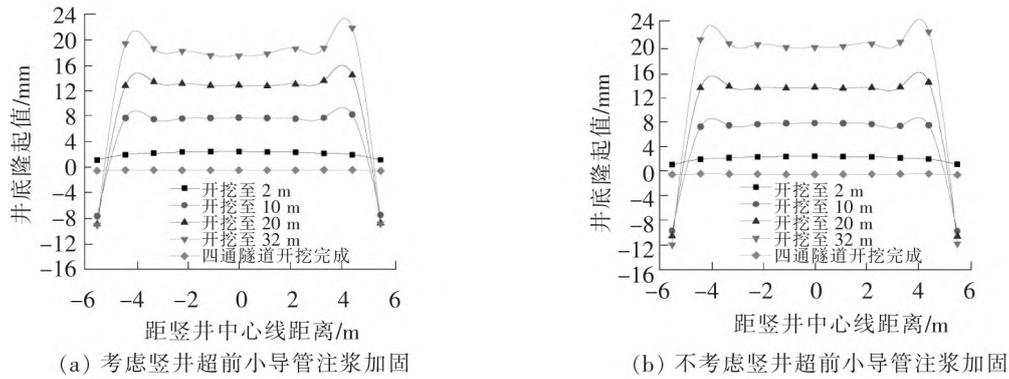


图 4 坑底隆起图

在整个开挖过程中,竖井顶部的位移值基本不变。图 5(a)和图 5(b)中,开挖至 2 m 和 10 m 两条曲线显示的水平位移几乎没有差异,均没有采用注浆加固;开挖至 20 m 和 32 m 的两条曲线的水平位移有显著差异,水平位移分别增长了 4 mm 和 10 mm,两者相差接近 250%,可见超前注浆小导管具有明显约束土体水平变位的效果。

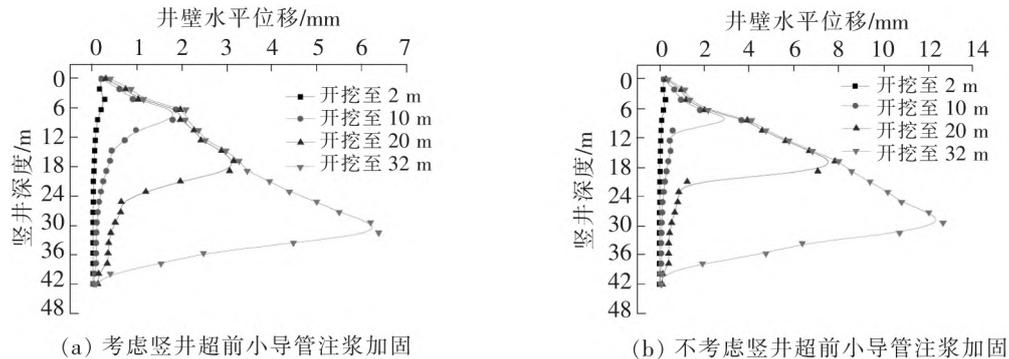


图 5 竖井水平位移图

3.4 喷射混凝土应力状态

由图 6 可知,考虑竖井注浆加固措施时,喷射混凝土的最大应力为 1.57 MPa,均分布在喷混的接茬处;不考虑竖井注浆加固时,最大应力为 1.94 MPa,分布在喷混的中下部位置,在分析竖井类空间效应明显的结构时,理应建立三维模型。两者的最大应力相差 23.5%,且考虑注浆加固措施的应力分布范围远小于不考虑注浆加固措施的应力。

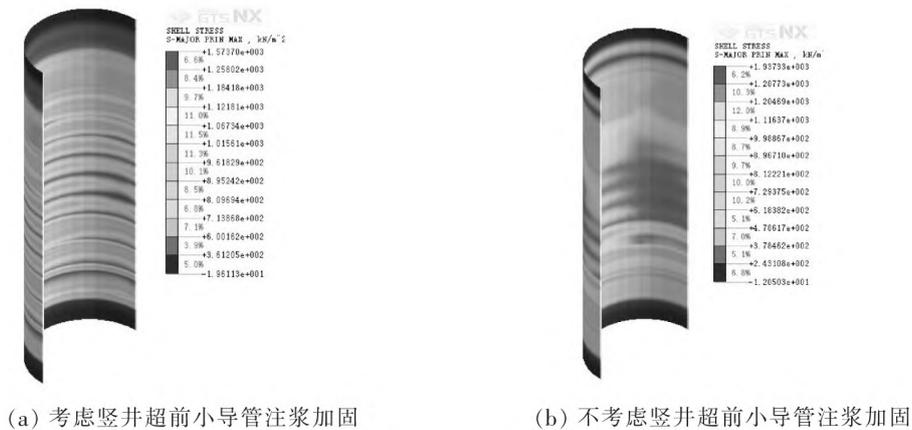


图 6 喷射混凝土最大主应力图

由图 7 可知,在竖井底部开挖马头门后进行隧道开挖,竖井喷射混凝土的应力发生了很大变化,在隧道断面的拱肩、仰拱拱脚、直墙边上都有不同程度的变化,最大应力值为 16.36 MPa,远超过了混凝土的

极限抗拉强度,在实际施工时,破除马头门之前,必须做好充分的补强措施。由云图可见,竖井底部开口处的最大拉应力发生在仰拱拱脚,说明了在实际施工中,仰拱拱脚处需要补强以预防隆起失稳,危及施工安全。

4 监测结果分析

本工程对地表沉降与水平收敛进行了监测。在竖井周围布设一定数量的沉降观测点,利用 DSZ2 精密水准仪配合钢尺进行观测,量测频率为 1 次/3 d;在竖井相对方向布设两条收敛线进行水平收敛观测,竖向间距为 3 m,采用 YD-SL-1 钢尺收敛仪进行观测,量测频率为 1 次/2 d。将收集的监测数据进行整理,列出了一些具有代表性的施工阶段的曲线,如图 8、图 9 所示。

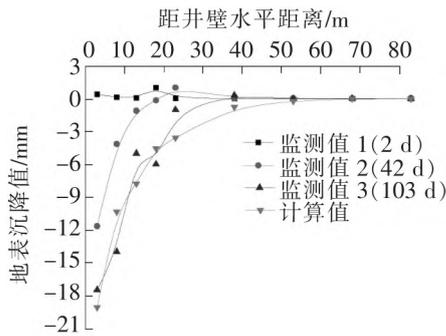


图 8 地表沉降监测与计算值对比曲线

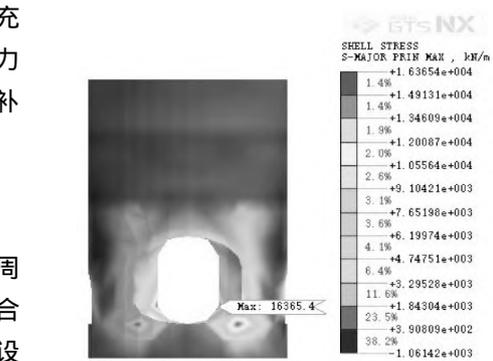


图 7 隧道开挖后喷射混凝土最大主应力图

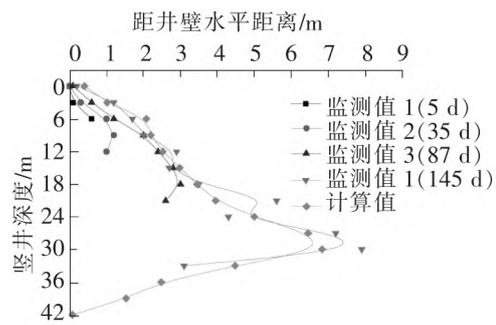


图 9 水平位移监测与计算值对比曲线

由于实际工程中竖井地表受人为、施工机械、开挖支护的时空效应等非可控因素的影响,且计算结果无法考虑这些因素,喷锚支护法的开挖、支护时间较难以保证,存在不同程度的围岩应力释放,使得监测数据与计算结果有一定偏差,但两者在数值的变化趋势上保持基本一致,验证了模型建立、参数选取及计算方法的正确性,计算结果能够明确地体现基坑变形的一般规律,说明有限元模型计算的可行性。

5 结论

(1) 竖井注浆与否对竖井的地表沉降范围影响不大,水平距离大于 60 m 时,地表沉降基本没有影响,但对沉降值影响较大,两者相差接近 78%。

(2) 土体卸荷造成竖井底部土体应力状态发生改变,向上隆起,且隆起值随着开挖深度的增大而增大,曲线形状为非“M”形,证明了空间效应明显,土体加固与否,对隆起值几乎没有影响。竖井开挖到底后及时进行封底措施,有利于保证开挖马头门的稳定性。

(3) 竖井发生朝向临空面的位移,最大位移值发生在竖井底部,注浆加固具有明显抑制土体水平变位的效果,注浆与否的水平位移相差接近 250%。

(4) 喷射混凝土层的应力处于强度范围内,注浆与否的最大应力相差 23.5%,注浆加固有利于减小最大应力分布范围及数值。施作马头门时,应力急剧变化,造成高应力聚集区,实际施工时应采用补强措施,施工时注意拱脚失稳。

参 考 文 献

- [1] 刘益平,葛海明,任亚群. 城市电缆隧道岩土勘察的几个主要问题探讨[J]. 电力勘测设计, 2011(5): 11-17.
 [2] 朱峰,陈锦剑,王建华,等. 小直径圆形深基坑的施工监测与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 351-354.

(下转第 103 页)

2. Beijing Railway Administration Beijingxi Railway Station, Beijing 100055, China)

Abstract: Railway departments spent huge sums in order to adapt to the new ticketing system better. This paper analyzes the problems of the existing ticketing system, and discusses the characteristics of railway electronic ticket based on second generation ID and ordinary IC card technology respectively, comparing the advantages and disadvantages of the two ways, and designs the third generation ID card at the conceptual level according to the current demand.

Key words: RFID; the second generation ID; IC card; railway electronic ticket; the third generation ID

(上接第 30 页)

- [3] 薛艳青. 圆形基坑的三维数值模拟[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008.
- [4] 李献忠. 圆形超深基坑开挖变形数值分析研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2015, 28(S1): 225-228.
- [5] Jin-Sun Lee. An application of three-dimensional analysis around a tunnel portal under construction [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009(24): 731-738.
- [6] 田亮, 单仁亮, 李润军, 等. 隧道竖井施工对邻近管线沉降影响的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 143-148 + 155.
- [7] 徐士良. 特长隧道通风竖井设计与施工技术[J]. 铁道建筑, 2012(1): 80-82.
- [8] 夏晋华. 深基坑桩锚支护体系位移分析[D]. 兰州: 兰州理工大学土木工程学院, 2009.
- [9] 李慎刚. 砂性地层渗透注浆试验及工程应用研究[D]. 沈阳: 东北大学资源与土木工程学院, 2010.

Study on Structural Stability of Four-way Branch Vertical Shaft in Mining Cable Tunnel

Xie Yang¹, Zhao Yucheng¹, Wu Shumin², Li Zhanling², Hao Bin¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Province Electric Power Design & Research Institute, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: In order to study the stability of vertical shaft structure in the process of mining, based on the four-way branch vertical shaft construction, the real construction process is simulated in three dimensional numerical simulation by means of midas GTS NX finite software, and the advanced small pipe grouting measure is demonstrated, the soil deformation law and the stress of shotcrete of vertical shaft are compared, obtaining the effect of the grouting reinforcement measures, considering that the advance grouting reinforcement is necessary. The feasibility of numerical simulation is verified by comparing FEM results and in-situ monitoring. The results show that: 1. Grouting or not grouting has little influence on the ground settlement scope of the shaft, but it has a great effect on the sedimentation value; 2. Grouting or not has little influence on the uplift value of the pit bottom, which means its space effect is obvious; 3. The maximum value of horizontal displacement appears at the bottom of the shaft, and grouting or not has huge influence on it; 4. The stress of shotcrete near the ingate changes significantly, and requires reinforcing measures. The research result may serve as a reference for similar engineering.

Key words: underground; four-way branch vertical shaft; stability; numerical simulation