

doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2014.02.012

# 矩形隧道叠落穿越超高压燃气管的安全分析

倪飞

(中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043)

**摘要:**北京地铁6号线草房-终点区间矩形隧道叠落穿越超高压燃气管线,周边环境复杂,隧道与管线净距仅为1.6 m;根据工期要求必须先施工上面的出入线,后施工下面的正线隧道.为了保证管线及隧道的安全,利用有限元软件对处理效果进行了模拟分析,并分别从方案选取、数值分析、施工工艺、地面加固、洞内支护等方面进行比选,最终确定了区间穿越超高压燃气管采用洞顶深孔注浆+中洞法分步开挖+出入线底板注浆的矿山法方案.从最终监控量测数据表明:本工程采取的设计方案、施工措施合理、经济,隧道及管线变形均未超过安全性要求,结论对城市地铁类似工程的设计和施工具有参考与指导意义.

**关键词:**矩形隧道;超高压燃气管;叠落穿越;中洞法;有限元模拟

**中图分类号:**U455 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)02-0057-05

## Safety analysis of overlapped rectangular tunnels crossing under high pressure gas pipelines

Ni Fei

(China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd. Urban Construction Institute, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The surrounding environment of tunnel is complex. The space of tunnel and pipeline is only 0.8 m. According to the construction schedule requirements, the upper release line should be constructed first, and the main track constructed latter. In order to ensure the safety of pipelines and tunnels, using the finite element software to simulate the effect of the treatment analysis, and the program, numerical analysis, construction technology, ground reinforcement, support of the cave and other aspects were selected from. At last, the interval through high pressure gas pipe mining methods are deep grouting in roof, center drift method in step and the program grouting the floor of release line. From the final monitoring data show that the chosen project design is reasonable construction measures, economic. Tunnel and pipeline deformation does not exceed safety requirements. This conclusions have reference and guiding significance for the design and construction of similar city subway projects.

**Key words:** rectangular tunnels; super high pressure gas pipe; overlap; center drift method; FEM simulation

在城市地铁施工时,由于受到地下管线、地面交通、建筑物、地质等多方面的影响,对设计施工方案及工法选择要求极高.本工程处在交通繁忙的十字路口,正线隧道与出入线隧道叠落穿越,又有沉降要求极高的超高压燃气管线,因此如何科学、安全、合理、经济地进行设计成为一个关键的问题.根据本工

程的实际情况,通过理论分析、有限元模拟计算,最终采用超前深孔注浆+中洞法分步开挖的矿山法工法.根据现场施工监测结果表明,采用的施工工法合理、沉降满足要求、经济成本合理.结论对北京及其它地区具备类似特点的工程有借鉴作用.

收稿日期:2014-04-02

基金项目:中国铁道建筑总公司科研项目(2010-45C);湖南省自然科学基金资助项目(14JJ2098)

通信作者:倪飞(1978-)男,山西朔州人,工程师,主要从事轨道交通土建隧道设计研究. E-mail: nifei1009@163.com

## 1 工程概况

北京地铁6号线草房-终点区间位于朝阳北路与航研所东路交汇处的朝阳北路下方,沿朝阳北路东西向敷设.道路红线两侧多为综合性的商业和住宅楼.

本段区间地势平坦,地面标高介于26.46~27.30 m,区间隧道结构顶埋深3.9~17.2 m.本区间地层划分为人工堆积层( $Q^m$ )、第四纪全新世冲洪积层( $Q_4^{al+pl}$ )、第四纪晚更新世冲洪积层( $Q_3^{al+pl}$ )3大层.具体各土层自上而下依次是杂填土、粉土、粉质粘土、粉细砂、圆砾卵石、中粗砂;地质复杂、土层结构不均且多种地质掺杂,局部有错乱现象,地层结构松散,自稳能力差.水位线位于地下6 m左右.

隧道沿现状朝阳北路敷设,位于朝阳北路主路车行道下,交通繁忙,该段地面管线较多.沿朝阳北路方向的管线主要有 $\Phi 500$ 中压燃气管,管顶埋深2.4 m; $\Phi 700$ 超高压燃气管,管顶埋深2.3 m; $1\ 060 \times 740$ 通信管沟,管顶埋深1.2 m; $\Phi 400$ 雨水管,管顶埋深1.3 m.沿航研所东路方向的管线主要有 $\Phi 1\ 000$ 雨水管,管顶埋深7.2 m; $1\ 000 \times 800$ 中压天然气沟,管顶埋深0.5 m; $\Phi 400$ 上水管,管顶埋深3.7 m; $800 \times 300$ 通信管沟,管顶埋深1.2 m. $\Phi 700$ 燃气管为超高压燃气管,关乎北京城1/4用气量,对沉降要求极高,必须加强对管线的保护和控制地面沉降以确保安全.

## 2 设计方案选择

本区间共设有4条线路,其中靠外侧的2条为地铁6号线正线,靠内侧的两条为五里桥车辆段的出入线,正线与出入线的线间距为6.6 m,出入线线间距为5 m.在十字路口处出入线下穿正线左线隧道.正线隧道与出入线平面关系图见图1.



图1 正线隧道与出入线平面关系图

在十字路口段正线区间左线隧道底埋深为23.5~23.6 m,右线隧道底埋深为17.1~17.4 m;出入线隧道底埋深为11.1~14.6 m.

根据本工程地面交通、管线情况及结构关系,初步确定明挖法和矿山法2个方案.2个方案技术、经济比选见表1<sup>[1-3]</sup>.

表1 方案比选表

项目	方案一(矿山法)	方案二(明挖法)
施工方案	十字路口处采用矿山法施工.正线采用单线单洞断面,出入线采用矩形双跨断面.	十字路口处采用明挖法施工.正线和出入线采用矩形框架断面.
支护形式	超前深孔注浆+小导管	钻孔灌注桩+内支撑体系
管线迁改	无	需要迁改6根管线,悬吊2根管线(燃气部门不允许改移 $\Phi 500$ 和 $\Phi 700$ 燃气管)
交通疏解	无	北侧交通疏解新增占地面积2 500 m <sup>2</sup> ,为保证南北向交通,需要明挖基坑搭设临时便桥
施工风险	施工重点主要保证地面、管线及隧道的沉降.施工风险较大	基坑平面极不规则,整个基坑开挖深度不一致,最深处达到23.6 m,最浅处为11.1 m.高低基坑处理及钢支撑布置较为困难.燃气管线悬吊风险较大
工期	8个月	6个月(不含管线迁改时间)
结论	推荐	

方案一采用矿山法施工,施工重点主要保证地面、管线及隧道的沉降,尤其要保证 $\Phi 700$ 燃气管的沉降(燃气部门提出5 mm的控制标准).

方案二采用明挖法施工,主要问题是管线迁改和交通疏解.根据已经施工管线的经验,重大管线迁改从设计-审查-施工,周期大约是3个月.本段涉及到 $\Phi 700$ 燃气管为超高压燃气管,迁改时间和费用更不确定;交通疏解新增占地征地程序繁琐,时间较长;施工工期与方案一基本一致<sup>[1-3]</sup>.

根据已经施工深孔注浆的经验,对本段隧道穿越的土层进行了多次注浆实验,通过调整参数可以保证沉降控制在5 mm以内.北京4号线工程穿越高压燃气管,采用悬吊方案<sup>[4]</sup>,效果不好,沉降较大.综合考虑,设计方案采用矿山法.

## 3 设计方案论述

为了避免后期6号线二期施工的风险,选择了

合理的正线终点,平面布置进行了优化.出入线斜向下穿正线左线隧道,穿越长度大约为70 m,出入线与左线隧道净距为2.8m~5.3 m.正线采用单线单洞马蹄形断面(宽6.2 m×高6.5 m),采用台阶法施工,初支厚度0.25 m,二衬厚度0.3 m;出入线采用矩形双跨断面(宽11.8 m×高7.58 m),采用中洞法+台阶法施工,初支厚度0.3 m,二衬厚度侧墙0.7 m,底板0.8 m,中隔墙0.4 m.为了满足工期要求,要求先施工出入线隧道,出入线结构施工完成后再施工正线隧道<sup>[5-6]</sup>.区间隧道平面和剖面布置见图2、图3.

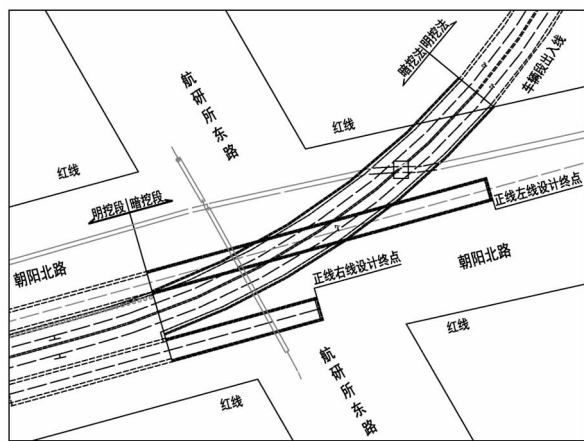


图2 隧道结构平面关系图

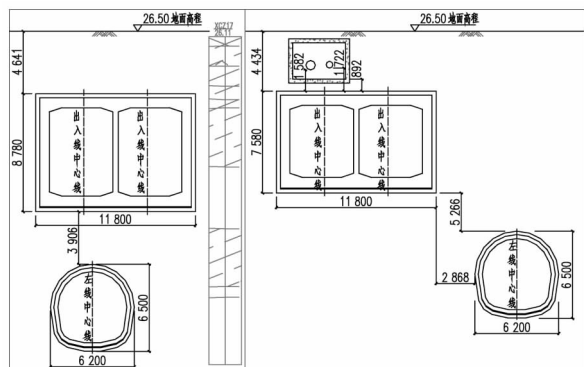


图3 隧道结构剖面关系图

本段采用矿山法施工,区间隧道与管线关系如下:

隧道垂直下穿1 000×800中压天然气管,隧道与沟底净距为4.9 m;Φ400上水管,隧道与管底净距为1.9 m;800×300通信管沟,隧道与管底净距为3.5 m.Φ1 000雨水管由于与结构相冲突,永久改移到明挖区间上方.

隧道斜向下穿Φ500中压燃气管,隧道与管底净距为1.7 m;Φ700超高压燃气管,隧道与管底净距为1.6 m,隧道与燃气阀井内底的净距为0.892;

1 060×740通信管沟,隧道与沟底净距为2.3 m;Φ400雨水管,隧道与管底净距为3.3 m.

### 4 施工阶段计算及分析

为了能更好的有效控制施工过程中的地表变形及重要管线处的地层变形,对施工的开挖步骤进行了模拟计算.

#### 4.1 计算模型

暗挖结构施工期间结构及管线沉降采用有限元程序按“地层-结构”模式进行建模计算,模型为三维模型.

计算采用Midas-GTS有限元分析软件.其基本原理、算法与离散元法相似,它运用节点位移连续条件,可对连续介质进行大变形分析,基于显式差分法求解运动方程和动力方程,由于采用混合离散技术,从而使模拟塑性破坏与塑性流动更精确.开挖断面最大开挖宽度23.4 m,最大开挖高度19.20 m,计算模型在横向x、竖向y、纵向z方向尺寸为80 m,80 m,100 m<sup>[7]</sup>,模型前后左右和下部边界均加法向约束,地表为自由边界.

隧道开挖三维计算模型如图4所示.

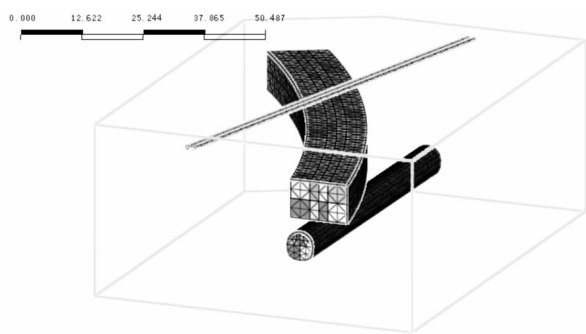


图4 隧道叠落穿越施工模拟分析计算模型

围岩视为摩尔-库仑理想弹塑性材料.围岩的物理力学参数根据地质资料确定,其物理力学参数见表2.

表2 围岩主要地层参数表

土层号	土层名称	重度 (/kN/m <sup>3</sup> )	粘聚力 (/kPa)	内摩擦 角/(°)	弹性模 量/MPa	泊松比
③	粉土	20.3	20	30	50	0.33
③ <sub>1</sub>	粉质粘土	19.6	27	10	36	0.30
④	粉质粘土	19.9	26	15	48	0.31
④ <sub>3</sub>	粉细砂	20.5	0	25	150	0.28
⑤ <sub>1</sub>	中粗砂	20.8	0	38	146	0.26
⑤ <sub>2</sub>	粉细砂	20.5	0	30	152	0.28

#### 4.2 施工步骤

十字路口段采用矿山法施工,区间左、右正线

采用台阶法施工;出入线采用中洞法施工.由于工期原因,施工过程中考虑先施工出入线,出入线按“中洞法”法施工;等出入线二衬结构施工完成后,

再施工正线隧道<sup>[8-9]</sup>.

出入线按“中洞法”法施工,施工步骤如图5所示:

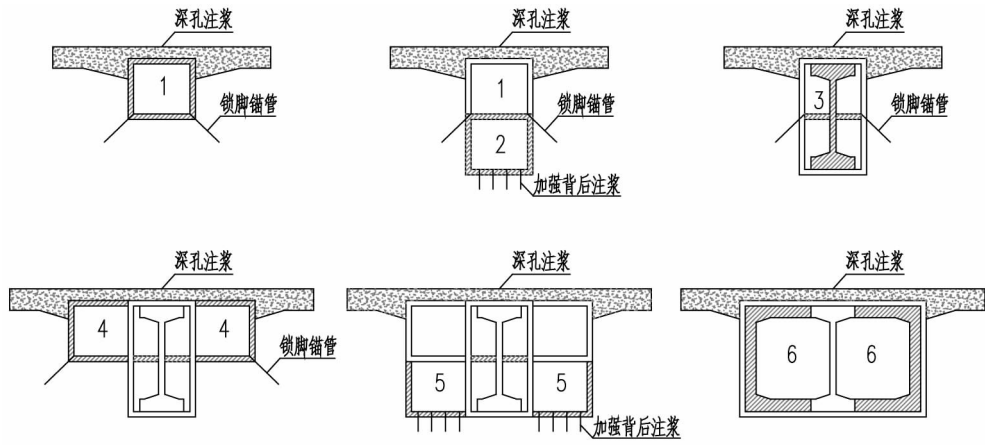


图5 出入线施工步序图

1)先对中洞结构周边土体进行加固,然后开挖中洞上层导洞并施做初期支护;

2)施做中洞下层导洞初期支护,并加强底板背后注浆;

3)施做中洞二衬结构;

4)中洞内二衬施工完成后,洞内保留水平脚手架,以保持水平的平衡.对两侧洞周边土体进行加固,对称开挖两侧洞上层导洞并施做初期支护;

5)对称开挖两侧洞下层导洞并施做初期支护;

6)施做两侧洞二衬结构,二衬结构施工完成.

#### 4.3 隧道及管线沉降等控制标准

根据《北京市轨道交通工程建设安全风险技术管理体系(试行)》的规定及工程类比经验,制定了隧道穿越风险源的变形控制标准:

1)  $\Phi 700$  超高压燃气管 允许沉降控制值 $\leq 5$  mm,倾斜率控制值 $\leq 0.002$ ,变形速率控制值 $\leq 1$  mm/d;

2) 上水、燃气管 允许沉降控制值 $\leq 10$  mm,倾斜率控制值 $\leq 0.002$ ,变形速率控制值 $\leq 2$  mm/d;

3) 雨、污水管、热力管 允许沉降控制值 $\leq 20$  mm,倾斜率控制值 $\leq 0.0025$ ,变形速率控制值 $\leq 3$  mm/d;

4) 隧道顶的沉降控制为15 mm;地表沉降为15 mm.

#### 4.4 计算结果

地表、结构及管线沉降见图6、图7.

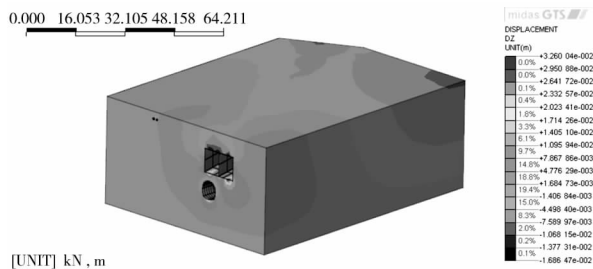


图6 地表沉降云图

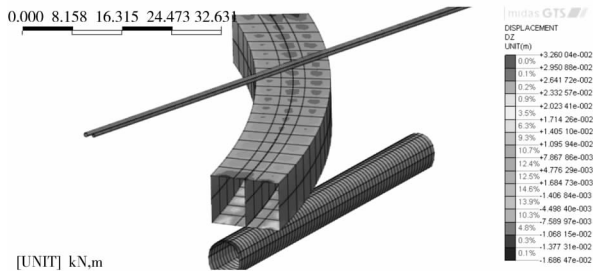


图7 结构及管线沉降图

#### 4.5 计算结果分析

根据GTS软件对地表、结构变形规律进行预测,从沉降曲线看,地表最大沉降为15.2 mm,燃气管线最大沉降为4.6 mm,出入线最大沉降为9.2 mm,正线最大沉降为7.6 mm,满足沉降控制标准<sup>[10-12]</sup>.

## 5 现场监测结果

### 5.1 监测沉降曲线

监测沉降曲线见图8.

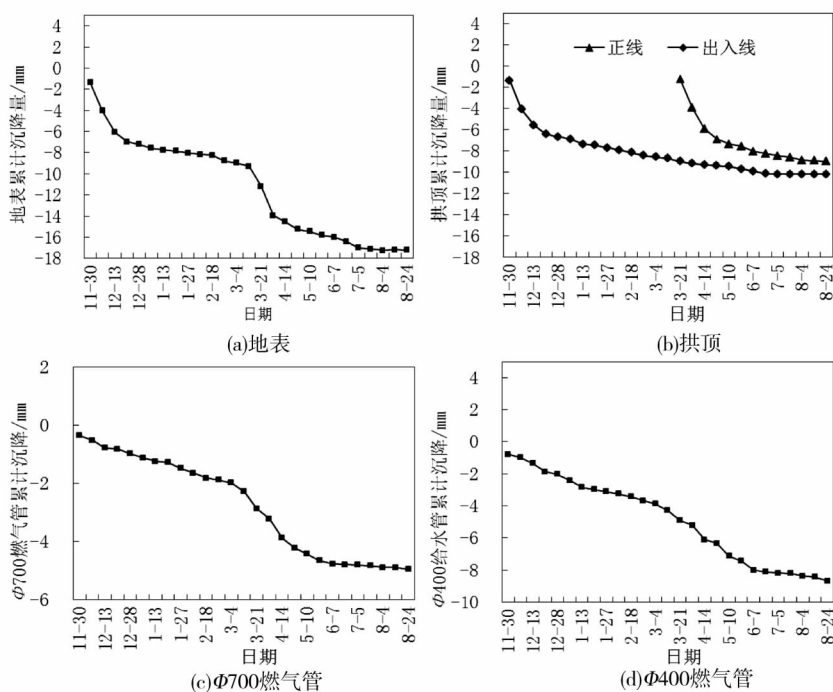


图8 地表、拱顶及管线沉降监测图

## 5.2 监测沉降分析

于2011年8月草房-终点区间暗挖段隧道主体结构全部施工完毕。

通过现场监测资料表明,地表(管线处)监测点累计最大沉降值为17.27 mm,正线拱顶沉降测点累计最大值为8.29 mm,出入线拱顶沉降测点累计最大值为10.21 mm,Φ700天然气管沉降点累计最大沉降值为4.95 mm,Φ400上水管沉降点累计最大沉降值为8.68 mm,地层中各种管线处于安全状态,洞内变形较小.对施工各阶段的监测成果进行分析,发现其变形规律与设计计算基本相符,满足了工程及周边环境的要求,确保了施工安全。

## 6 结论

1)隧道上下叠落穿越超高压燃气管线的设计方案及施工措施合理、安全可行,为后期类似工程积累了丰富的经验。

2)地下工程在受到管线、地面交通、建筑物、工期等诸多方面影响,环境较为复杂时,应进行多方案的必选,确保设计方案为最优方案。

3)超前措施深孔注浆和出入线底板注浆加固对控制沉降起到了很重要的作用,对以后超前加固提供一种新的选择.在合理选择注浆参数、注浆工艺情况下,地表及管线沉降也可以控制在5 mm内。

4)矩形隧道采用浅埋暗挖法施工时,在沉降要求较高时,建议先完成中洞的二衬结构,再开挖两侧的初衬结构。

5)为了满足工期的要求,本工程先施工上面隧道后施工下面隧道,虽然通过注浆等辅助措施,保证了燃气管线及结构的安全,但为此增加的费用

较高.一般过程建议采用常规的施工顺序,先行施工下面的隧道,再施工上面的隧道。

## 参考文献:

- [1] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2006.
- [2] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京:人民交通出版社,2010.
- [3] 徐干成. 地下工程支护结构[M]. 北京:水利水电出版社,2003.
- [4] 朱康宁. 浅埋暗挖隧道下穿次高压燃气管保护方案[J]. 现代隧道技术,2012,49(2):142-146.
- [5] 王力勇. 复杂地层中矿山法叠落隧道施工技术[J]. 山东交通科技,2012(1):23-26.
- [6] 李浩,朱向阳,徐永福,等. 断面形状对隧洞围岩位移和应力的影响分析[J]. 隧道建设,2009,29(1):38-44.
- [7] 苏晓堃. 隧道开挖数值模拟的围岩边界取值范围研究[J]. 铁道工程学报,2012(3):64-68.
- [8] 刘秀娟. 北京轻轨浅埋暗挖地下工程中框架结构的施工方法[J]. 铁道标准设计,2003(3):34-36.
- [9] 王清标,蒋金泉,路林海,等. 不同开挖方式对近距离交叠隧道影响模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(10):2079-2087.
- [10] 包德勇. 近距离交叠隧道施工影响的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(1):127-132.
- [11] 刘红平,刘生,李宁军. 浅埋大跨矩形隧道施工过程稳定性数值模拟[J]. 公路交通科技(应用技术版),2010(8):259-261.
- [12] 王天明,贾少春,倪飞,等. 复杂环境下交叠地铁站综合技术研究[R]. 西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司,2014.