文章编号：1006-6616（2012）04-0451-06

人防隧道双侧扩挖对地表的影响

苏仲杰，赵　松，杨　逾，周小科，刘晶晶
（辽宁工程技术大学土木与交通学院，辽宁 阜新 123000）

摘　要：在监测数据的基础上，运用 Matlab 等软件，结合矿业开采沉陷理论，针对隧道双侧扩挖对地表的影响进行了初步研究，得到了隧道双侧扩挖对地表的影响范围。提出了沉降曲线拐点的概念及其特征，区分了沉降变化的低速区和高速区，为今后既有隧道扩挖的施工和监测设计提供了依据。

关键词：既有隧道；双侧扩挖；Matlab 软件；开采沉陷；拐点
中图分类号：U452　　　　**文献标识码**：A

0　引言

城市交通压力不断增加，地铁已经成为给城市减负的重要措施，而各地复杂的地质和施工环境无疑是地铁施工的严峻挑战。国内外学者对此做了大量的研究，包括工程建设对既有隧道的影响、不同工况对围岩及地表变形的影响以及隧道变形的监测技术等[1~4]。但是对人防隧道改造为地铁隧道的分析较少，杨峥[5]基于数值模拟进行了单边扩挖支护结构的应力分析，但缺少对围岩和地表实际变形的系统分析。

人防隧道改造为地铁隧道工程分为单侧扩挖法（CD 工法）和双侧扩挖法（CRD 工法）。本文基于哈尔滨 7381 人防隧道改造为地铁隧道的双侧扩挖段工程实例，通过对地表变形的系统监测，利用 Matlab 等软件，结合矿业开采沉陷理论，得到了相应的变形规律，为隧道支护、施工组织、位移监测和周围建筑物的保护积累了经验。

1　工程概况

哈尔滨地铁一期土建工程七标位于该市南岗区，从铁路局站至工程大学站，共 3 站 4 区间。其中大部分为 7381 人防隧道改造段，包括单侧扩挖段和双侧扩挖段。

烟厂站至工程大学站区间双侧扩挖段最长，扩挖里程为 SK12 + 688. 979 至 SK12 + 890. 542，共 201. 563 m。隧道主要穿过粉质黏土层、粉砂层、粉土层等。围岩级别均为Ⅵ级，土石可挖等级均为Ⅱ级。结构顶板附近为粉质粘土层，侧墙附近为粉砂层、粉质粘土层等。地下水位于结构底板附近，水位低于结构底板。为了充分利用既有 7381 结构，设计方

收稿日期：2012-05-12
基金项目：国家自然科学青年基金（50804020）
作者简介：苏仲杰（1960-），男，辽宁阜新人，教授，博士后，主要从事测量工程、岩土工程等领域研究。E-mail：suzhong_ jie@ 163. com
联系作者：赵松（1985-），男，河北晋州人，硕士研究生，岩土工程新技术专业。E-mail：zhaosong2010@ yeah. net

案将既有 7381 结构线位横向偏移 400～600 mm，轨顶面下移 300～400 mm。新隧道高 7.4 m，宽 9.5 m。

2 隧道扩挖方案

隧道扩挖施工严格遵循“强支护、快封闭、勤量测”的技术要求。施工工序：①破除既有支护仰拱部分砼并及时施作初衬；②完成仰拱初衬 8 m 后，模筑 6 m 二衬仰拱砼；③凿除单侧顶拱砼，施作初衬，及时架设临时支撑及斜撑；④凿除另一侧顶拱砼，及时施作初衬，架设横向临时支撑，拆除斜撑；⑤破除一侧边墙砼并及时施作初衬；⑥破除另一侧边墙砼并及时施作初衬封闭成环；⑦拆除支撑，浇筑仰拱回填砼，模筑二衬拱墙钢筋砼（采用 9 m 模版台车立模）。部分工序如图 1。

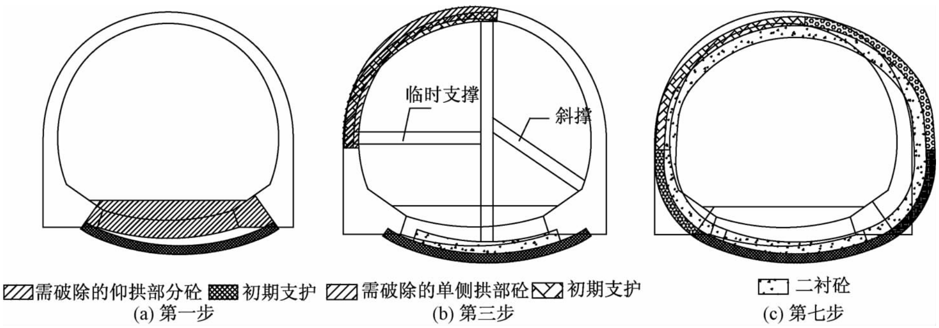

图 1 部分施工工序

Fig. 1 Parts of construction operational procedures

原有隧道扩挖作业采用跳槽法，每槽段长 1 m，间距 15 m。结构破除及土方开挖过程中，超前预报和监控测量同时进行，实时分析反馈，从而确保安全施工。

3 隧道扩挖的监测方案

由于目前隧道扩挖经验较少，隧道扩挖过程中的监测至关重要。该工程重点监测地表变形及其对建（构）筑物的影响、围岩与支护结构的稳定性等，内容主要包括地表沉降、建筑物沉降、围岩压力、隧道拱顶下沉、隧道两侧水平收敛等，本文重点分析地表沉降。高程控制网属精密水准网，其精度在二、三等水准测量之间，平差后精度满足相应规范要求。监测频率：初期支护施作完成前每天 1 次，初衬完成后每 2 天 1 次。每一工序沉降累计从该工序开始时刻至下一工序开始时刻。

4 监测数据分析

地质雷达探测发现，里程 SK12＋800 至 SK12＋880 间的隧道周围土体无明显异常。本文结合跳槽法的施工方法，取 SK12＋830 至 SK12＋880 间的 50 m 为分析对象，扩挖面位于 SK12＋855，相邻槽段尚未扩挖。监测点布置如图 2，为使地表变形更明显，各监测点间距加密为 5 m。

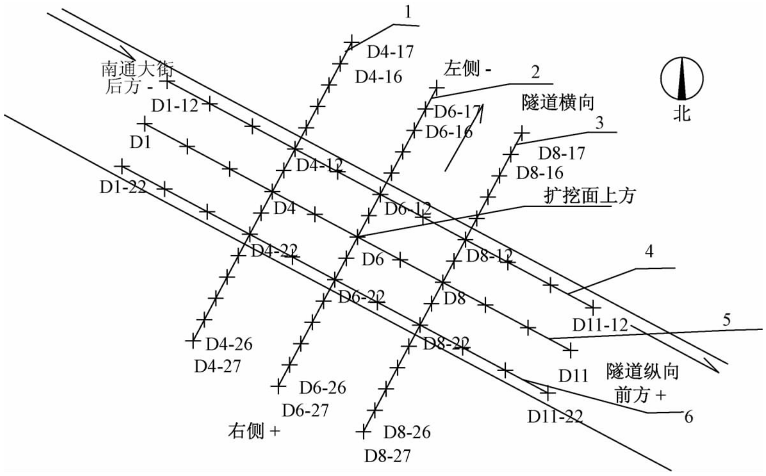

图2　监测点布置

Fig. 2　Arrangement of the monitoring points

从断面2和断面5的沉降曲线图（见图3、图4）中可以看出，总沉降最大值发生在扩挖面上部地表。此外，断面1、3、4、6沉降曲线（见图5—图8）显示，在总沉降中，破除仰拱产生的沉降最大，破除边墙和拆除支撑产生的沉降居中，且两者大小相当，破除顶拱加

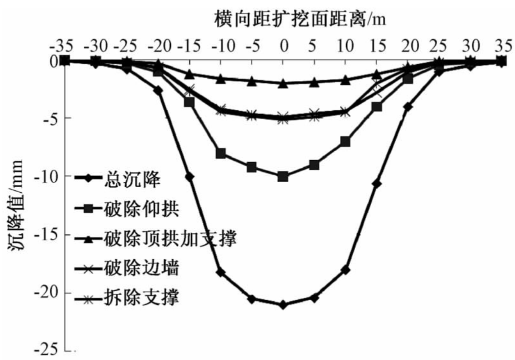

图3　断面2沉降曲线

Fig. 3　Settlement curves of the Transverse Section 2

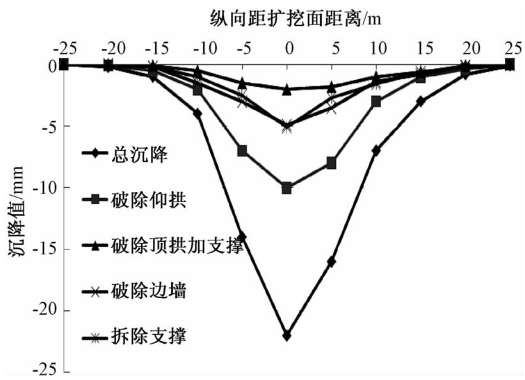

图4　断面5沉降曲线横向

Fig. 4　Settlement curves of the Lengthwise Section 5

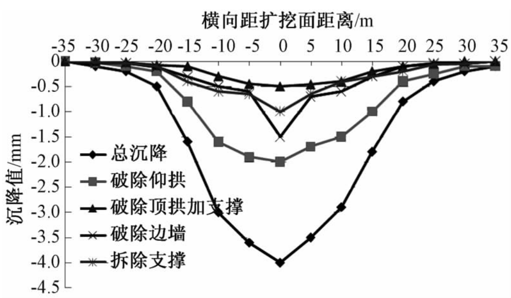

图5　断面1沉降曲线

Fig. 5　Settlement curves of the Transverse Section 1

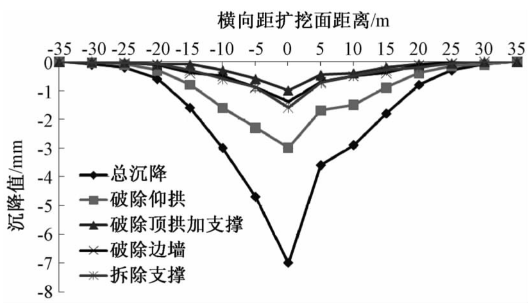

图6　断面3沉降曲线

Fig. 6　Settlement curves of the Transverse Section 3

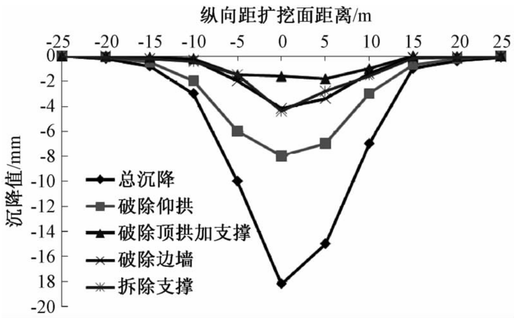

图7 断面4沉降曲线

Fig. 7 Settlement curves of the Lengthwise Section 4

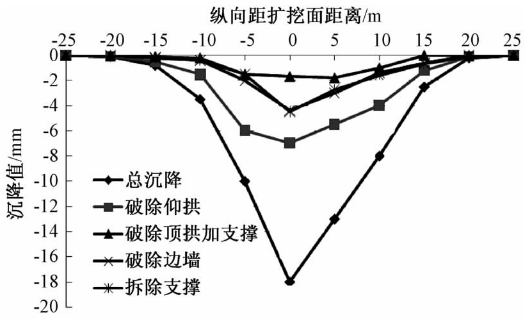

图8 断面6沉降曲线

Fig. 8 Settlement curves of the Lengthwise Section 6

支撑后沉降最小。由于双侧扩挖，断面2沉降曲线（见图3）的中部较断面5（见图4）的平坦，而扩挖面两侧的断面1、3沉降曲线（见图5、图6）平坦区域缩小，甚至消失。与盾构施工[6~7]不同，跳槽法施工的沉降曲线都以扩挖面为中心呈近似对称分布。

利用Matlab软件对监测数据进行处理得到断面2和断面5总沉降的三次样条插值曲线（见图9、图10）和倾斜曲线（见图11、图12），从中可以看出，横向影响范围为扩挖面左侧25~30 m，右侧28~32 m，纵向影响范围为扩挖面后方16~18 m，前方19~21 m。

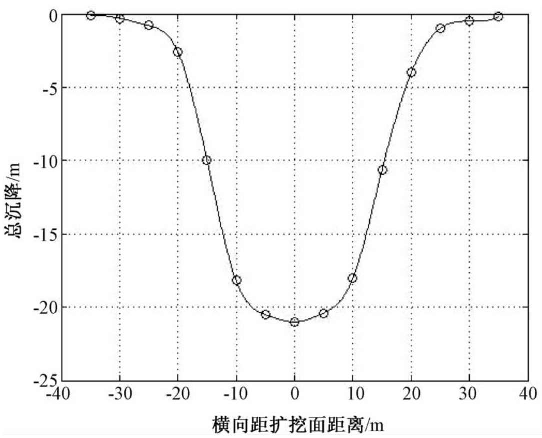

图9 断面2沉降插值曲线

Fig. 9 Settlement interpolation curves of the Section 2

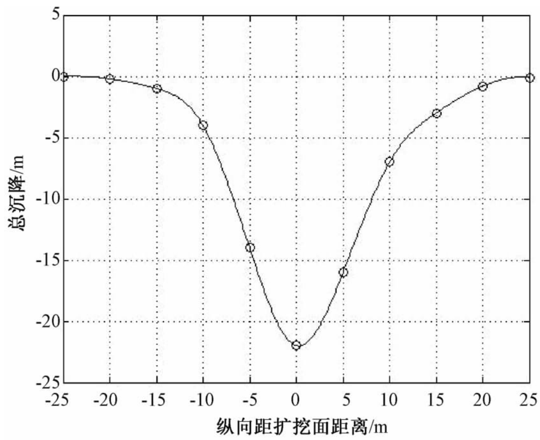

图10 断面5沉降插值曲线

Fig. 10 Settlement interpolation curves of the Section 5

结合矿业开采沉陷理论[8~12]，由断面2和断面5倾斜曲线得，断面2倾斜极大值在左侧−14 m处，右侧在13 m处，断面5倾斜极大值在后方−6 m处，前方6 m处。倾斜极大值处即总沉降拐点处，拐点处倾斜最大，对地下埋藏设施影响较大，拐点内侧为压缩变形，拐点外侧为拉伸变形，易出现裂缝。断面2和断面5倾斜曲线在拐点两侧变化较快，拐点过后一段距离都有明显的减速。断面2倾斜中部变化较慢，是两侧扩挖使中部沉降较平坦所致。对于断面2右侧末端的加速，检查发现属于外界扰动，不予考虑。

5 监测结果讨论

隧道扩挖不同于新隧道的开挖，双侧扩挖也不同于单侧扩挖，其对地表的影响有以下特

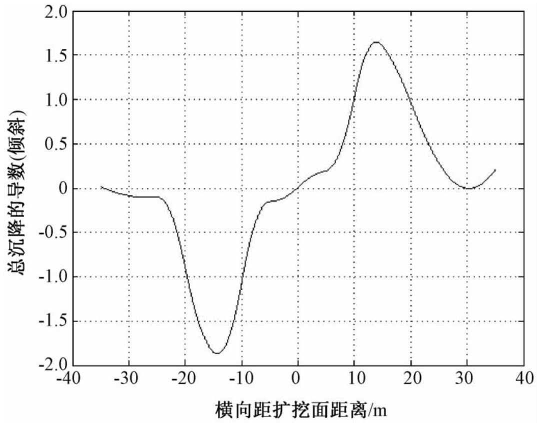

图11　断面2倾斜曲线

Fig. 11　Settlement slope curves of the Section 2

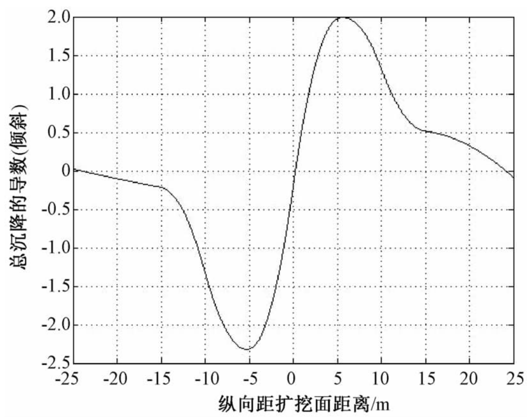

图12　断面5倾斜曲线

Fig. 12　Settlement slope curves of the Section 5

点（本工程竣工隧道高7.4 m，宽9.5 m）：

①以扩挖面为中心，隧道双侧扩挖影响范围横向单侧约为隧道宽度的3倍，纵向单侧约为隧道高度的2.5倍。地表监测范围应大于等于此范围，且在沉降变化快的区域（1.5倍高度或宽度）应重点监测。

②总沉降曲线的拐点横向出现在约1.5倍宽度处，纵向出现在约1倍高度处。拐点处倾斜最大，其外侧土层易产生拉应力，故拐点及其外侧1倍宽度（由倾斜曲线得）范围内，若存在埋藏设施则应有相应防护措施且重点监测，对跨越拐点的建筑物也要重点监测。由此可见，拐点位置的确定有重要意义。

③扩挖过程中，破除仰拱对地表影响最大，其次为破除边墙和拆除支撑，且二者影响程度相当，破除顶拱且加支撑影响最小。拆除支撑时地表沉降较大，故支撑的架设要及时，拆除要谨慎。破除仰拱和拆除支撑后有必要提高监测频率。

④双侧扩挖使横向总沉降曲线中部较纵向平坦，平坦区域与隧道宽度相当，该区域内建筑不易被破坏。

⑤横向断面沉降（断面2）在中部存在低速区（范围与隧道宽度相当），而纵向断面沉降（断面5）则无，横向断面和纵向断面沉降变化在两端均存在低速区。低速区监测点间距可放宽。

参　考　文　献

[1]　郑刚，刘庆晨，邓旭，等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析［J］. 岩土力学，2012，33（4）：1109～1116，1140.

ZHENG Gang, LIUQing-chen, DENG Xu, et al. Field measurement and analysis of effect of excavation on existing tunnel boxes of underlying metro tunnel in operating［J］. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (4): 1109～1116, 1140.

[2]　明祖涛，游振兴，张届，等. 高速铁路桥隧沉降预测模型的研究［J］. 测绘通报，2011，(8)：17～19，41.

MING Zu-tao, YOU Zhen-xing, ZHANG Jie, et al. The research of settlement prediction model for the bridge and tunnel on high-speed railway［J］. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011, (8): 17～19, 41.

[3]　Qiu D W, Zhou K Q, Ding Y H, et al. 3D deformation monitoring of subway tunnel［C］//ISSMGE. Proceedings of the 6^{th} International Symposium of Underground Construction in Soft Ground.

[4]　张海波，殷宗泽，朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟［J］. 岩石力学与工程学报，

2005，24（5）：755～760.

ZHANG Hai-bo，YIN Zong-ze，ZHU Jun-gao. 3D finite element simulation on deformation of soil mass during shield tunneling［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24（5）：755～760.

［5］ 杨峥. 既有人防隧道改造为地铁区间的施工力学行为研究［J］. 铁道标准设计，2012，（3）：69～72.

YANG Zheng. Study on mechanical behavior of construction in transforming the existing air defense tunnel into metro tunnel［J］. Railway Standard Design，2012，（3）：69～72.

［6］ 张向东，王群，盛超. 黑龙江哈尔滨地铁盾构法施工地面变形规律分析［J］. 中国地质灾害与防治学报，2011，22（3）：113～118.

ZHANG Xiang-dong，WANG Qun，SHENG Chao. Ground deformation due to tunnel construction with shield in Harbin City，Heilongjiang Province［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，2011，22（3）：113～118.

［7］ 王占生，王梦恕，张弥. 盾构隧道施工引起地表下土体变位的分析评估［J］. 岩土力学，2009，30（6）：1699～1704.

WANG Zhan-sheng，WANG Meng-shu，ZHANG Mi. Methods for estimating subsurface ground movements induced by shield tunneling［J］. Rock and Soil Mechanics，2009，30（6）：1699～1704.

［8］ 何国清，杨伦，凌庚娣，等. 矿山开采沉陷学［M］. 徐州：中国矿业大学出版社，1991：79～104.

HE Guo-qing，YANG Lun，LING Geng-di，et al.

［9］ 王建秀，唐益群，朱合华，等. 连拱隧道边坡变形的三维监测分析［J］. 岩石力学与工程学报，2006，25（11）：2226～2232.

WANG Jian-xiu，TANG Yi-qun，ZHU He-hua，et al. 3D Monitoring and analysis of landslide deformation caused by twin-arch tunnel［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2006，25（11）：2226～2232.

［10］ 段宝福，李洪春. 哈尔滨人防改造工程监控测量技术研究［J］. 现代隧道技术，2011，48（5）：148～153.

DUAN Bao-fu，LI Hong-chun. Study of monitoring technology in the Harbin civil air-defense reconstruction［J］. Modern Tunneling Technology，2011，48（5）：148～153.

［11］ 胡斌，刘永林，唐辉明，等. 武汉地铁虎泉—名都区间隧道开挖引起的地表沉降研究［J］. 岩石力学与工程学报，2012，31（5）：908～913.

HU Bin，LIU Yong-lin，TANG Hui-ming，et al. Research on ground subsidence due to tunnel excavation in Huquan-Mingdu section of Wuhan subway［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2012，31（5）：908～913.

［12］ 余佳力，徐礼华，艾心荧. 隧道 CRD 法施工对地表不同结构形式建筑物影响的对比分析［J］. 土木工程学报，2011，44（增刊）：192～200.

YU Jia-li，XU Li-hua，AI Xin-ying. Comparison of surface effects of CRD tunnel construction method on buildings of different structural types［J］. China Civil Engineering Journal，2011，44（Supp.）：192～200.

THE EFFECT OF CRD METHOD OF CIVIL AIR DEFENSE TUNNEL ON THE SURFACE

SU Zhong-jie，ZHAO Song，YANG Yu，ZHOU Xiao-ke，LIU Jing-jing

（*Institute of Civil Engineering and Transportation*，*Liaoning Technology University*，*Fuxin* 123000，*China*）

Abstract：This paper made a preliminary study on the effect of CRD method of civil air defense tunnel on the surface based on the monitoring data，the Matlab software and the mining subsidence theory. The impacted zone was confirmed. The settlement curve's inflection point and its characteristics were found. The lower velocity zone and higher velocity zone of settlement variation were distinguished. These achievements could be referenced for the design of relevant construction and monitoring of the old tunnels.

Key words：old tunnel；CRD method；Matlab software；mining subsidence；inflection point