

基坑卸荷开挖对下卧地铁隧道影响的数值分析

杜 磊,王育平,明德志

(山东科技大学 矿业与安全工程学院,山东 青岛 266590)

摘 要: 基坑卸荷开挖引起围岩应力场的改变,必然对下卧运营隧道的安全性造成影响。以北京地铁 8 号线上方案基坑卸荷开挖为背景,运用 MIDAS/GTS 软件、分别针对 3 种不同工况对施工全过程进行动态模拟。结果表明:基坑按分块、小面积开挖,底部土体注浆加固可以有效控制隧道隆起变形。隧道隆起变形近似呈正态分布,最大值发生在基坑正下方的隧道断面,从基坑正下方沿隧道纵向向左右各 30 m 为开挖主影响区,左右各 60 m 范围为开挖扰动区。

关键词: 基坑卸荷;下卧隧道;数值分析

中图分类号: U456 文献标志码: A 文章编号: 1672-3767(2016)06-0062-06

Numerical Analysis of Influence of Pit Unloading on Underlying Metro Tunnel

DU Lei, WANG Yuping, MING Dezhi

(College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The excavation of pit unloading causes changes in stress field of surrounding rock, which will inevitably affect the safety of underlying metro tunnel's operation. Based on the pit unloading excavation of Beijing metro Line 8, dynamic simulation of the whole construction process in three different conditions was conducted by using the software of MIDAS/GTS. The calculation results show that block and small area excavation and the grouting reinforcement of bottom soil can effectively control the tunnel uplift deformation, which is approximately normal distribution with the maximum occurring at the tunnel section just below the pit. The range of 30 m along the longitudinal direction of both sides of the tunnel from the excavation below the pit constitutes the main affected area and the range of 60 m constitutes the excavation disturbed area.

Key words: pit unloading; underlying metro tunnel; numerical analysis

近年来,随着城市建设的快速发展,紧张的建筑用地与快速增长的基础设施用地需求极不相称,各大城市竞相发展地下空间,使得越来越多的基坑工程位于地铁隧道之上。基坑的卸荷开挖,会引起围岩应力场的改变,引起地层的移动与变形,导致隧道隆起,严重威胁地铁的安全运营。现有施工控制标准对隧道的变形要求极为严格,最大绝对位移小于 20 mm,回弹变形小于 15 mm,变形曲率半径大于 15 000 m,相对变形小于 $1/2\ 500$ ^[1]。因此,研究隧道隆起变形,评价地铁运营安全,是岩土工程中面临的现实且紧迫的问题。针对这一问题,文献[2]以二维有限元模型模拟了基坑开挖的整个过程,得到隧道的变形数据与现场实测数据具有较高的吻合度;文献[3]基于 Mindlin 经典理论推导了开挖卸荷引起隧道的附加应力,提出定量计算隧道

收稿日期: 2015-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578327)

作者简介: 杜 磊(1989—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事岩石力学与数值分析研究。

王育平(1957—),女,山东青岛人,教授,主要从事工程力学、地下安全工程、动态反馈与岩土力学数值模拟等方面的研究,本文通信作者。E-mail: baimudaxing@126.com

隆起的方法;文献[4]结合上海地铁二号线工程,通过有限元分析得出了影响隧道隆起的主要因素,并结合工程经验,得到一简单可行的隆起计算公式;文献[5]以天津地铁1号线上方的基坑工程为背景,结合现场监测数据,采用ABAQUS软件对基坑工程进行模拟,分析了土体加固、底板浇筑与抗浮桩形成“保护箍”以及堆载回压等措施对既有隧道的影响及其有效性。文献[6]运用有限元软件PLAXIS-GiD进行不同施工方法的模拟,结果表明基坑开挖将对下卧隧道产生较大影响,影响范围约为6倍基坑宽度。

基坑开挖实际上是复杂的三维问题,是基坑-围岩-结构等多场耦合的结果,而上述研究成果基于二维或三维模型,仅关注最终变形结果,忽视了施工过程中的动态变形,且缺乏施工空间效应对隧道隆起变形规律的研究。本研究利用MIDAS/GTS有限元软件,结合北京地铁8号线上方基坑开挖工程,对基坑卸荷全过程进行三维弹塑性动态模拟,重点研究注浆加固和施工空间效应对隧道隆起的影响。

1 工程概况

景山社区服务中心基坑工程位于北京市东城区美术馆后区,拟建建筑为地上1层,地下3层,基坑总面积1576 m²。基坑开挖深度16 m,基坑下方9 m处为运营地铁8号线。基坑支护方案采用地连墙+楼板,并安装直径为1000 mm的钻孔灌注桩,间距为1500 mm。基坑形状见图1所示,基坑与隧道的平面位置关系见图2。

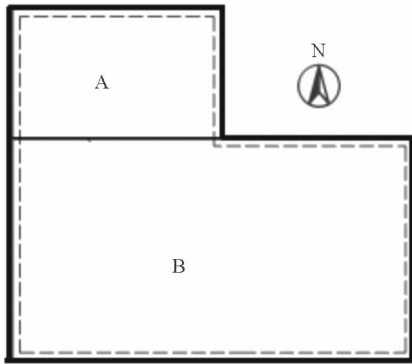


图1 基坑平面形状图
Fig.1 Pit plane shape graph

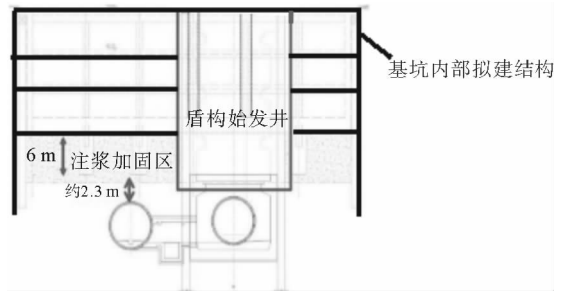


图2 基坑与隧道的位置关系
Fig.2 Positional relationship between the pit and the tunnel

工程所在地的物理力学参数如表1所示,支护结构的主要参数见表2。研究^[7]表明,施工方法及支护条件等外界条件相同的情况下,基坑不同面积、不同时间的卸荷,与隧道隆起变形是相关的。设置如下3个施工工况,对每一工况施工全过程进行动态全方位模拟,分析隧道隆起的变形规律,并对隧道的安全性做出评价。

表1 土体物理力学参数
Tab.1 Physical and mechanical parameters of the soil

| 序号 | 土层名称 | 土层厚度/ m | 密度/ (kg/m ³) | 加载模量/ MPa | 卸载模量/ MPa | 粘聚力/ kPa | 泊松比 | 内摩擦角/ (°) | 孔隙率 |
|----|------|------------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|------|--------------|------|
| 1 | 杂填土 | 3.0 | 19.5 | 2.0 | 10 | 8 | 0.25 | 10 | 0.47 |
| 2 | 粉细砂 | 10.0 | 20.5 | 25.0 | 48 | 0 | 0.45 | 30 | 0.49 |
| 3 | 粘土 | 8.7 | 22.0 | 20.0 | 26 | 44 | 0.35 | 25 | 0.59 |
| 4 | 卵石 | 11.3 | 19.6 | 65.0 | 72 | 0 | 0.35 | 45 | 0.53 |
| 5 | 中粗砂 | 7.0 | 22.0 | 40.0 | 58 | 0 | 0.30 | 40 | 0.41 |

工况 1: 基坑 A 与 B 同时开挖, 坑底不注浆加固;

工况 2: 先开挖基坑 A 部分, 再开挖 B 部分(滞后 A 部分 3 m), 坑底不注浆加固;

工况 3: 先开挖基坑 A 部分, 再开挖 B 部分(滞后 A 部分 3 m), 坑底进行注浆加固。

2 基坑施工全过程动态模拟研究

2.1 三维模型的建立

基于 MIDAS/GTS 有限元软件, 遵循连续介质假设, 运用小变形理论, 对基坑卸荷进行模拟。根据工程经验及相关文献^[8], 计算模型平面边界取开挖深度的 8 倍, 竖向边界取地表以下 40 m, 建立 120 m × 120 m × 40 m 的三维模型, 共 19 560 个单元, 如图 3 所示。模型 4 个侧面约束水平方向位移, 底面约束各个方向位移, 上表面为自由面, 施加 15 kPa 的施工荷载。为简化计算模型, 做如下假设:

- 1) 将地表设置为排水面, 施工过程中不考虑地下水位的变化;
- 2) 采用短开挖, 快封闭, 减少基坑裸露时间, 不考虑土体的流变效应;
- 3) 地连墙、注浆加固通过提高土体的物理力学参数来实现。

考虑软岩的峰后应变变化特性, 计算过程中采用基于摩尔-库伦塑性剪切破坏与拉伸破坏相耦合的应变软化模型, 具体力学理论如下:

摩尔-库伦的塑性剪切破坏准则为

$$F_s = \sigma_1 - \sigma_3 \Phi + 2c \sqrt{\Phi} \quad (1)$$

式中: c 为黏聚力, $\Phi = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$, φ 为内摩擦角。

摩尔-库伦的拉伸破坏准则

$$F_s = \sigma_3 - \sigma_t \quad (2)$$

式中 σ_t 为单轴抗拉强度。

2.2 不同工况隧道附加变形

计算结果表明, 当基坑开挖到底部时, 工况 1 隧道的最大隆起变形为 3.96 mm, 工况 2 为 3.15 mm, 工况 3 为 1.72 mm, 附加变形的对比云图见表 3 所示。不同工况下沿隧道纵向隆起变形见图 4 所示。由表 3、图 4 可以看出, 由于基坑卸荷, 隧道整体有向上方临空面移动的趋势, 底板隆起位移大于拱顶的位移, 最大隆起值位于基坑的正下方。3 种工况在隧道纵向上的隆起变形规律一致, 附加变形从中轴线向两端逐渐减小, 近似正态分布, 符合刚体变形的连续性规律。隧道变形趋于稳定, 且最终变形在可控范围内, 不会对隧道的安全使用造成威胁。基坑开挖对隧道的影响范围方面, 均显示轴线左右 30 m 范围为主影响区, 60 m 范围内为受开挖扰动区。

图 5 显示了隧道最大附加变形值随开挖步的变化规律。可以看出, 3 种工况下, 隧道最大隆起位移随施工步骤的变化规律基本一致, 变形速率在开挖瞬间开始增大, 在施工到 9~12 m 时达到峰值, 之后趋向于缓慢变形并逐渐稳定。3 种工况相比, 工况 3 隧道隆起位移最小, 最大变形是工况 2 的 54.6%, 工况 3 的 43.4%。由此可以说明, 采用分块开挖、小面积卸荷开挖可以有效控制隧道的隆起, 基坑底部注浆加固可以减少对下方土体的扰动, 从而最大程度上减小隧道的隆起位移。

表 2 结构计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of structure

| | 重量/(kN/m ³) | 弹模 E/MPa | 泊松比 |
|------|-------------------------|----------|------|
| 地连墙 | 25 | 30 000 | 0.20 |
| 桩 | 24 | 28 000 | 0.20 |
| 钢管支撑 | 78 | 200 000 | 0.25 |
| 隧道 | 25 | 34 000 | 0.25 |

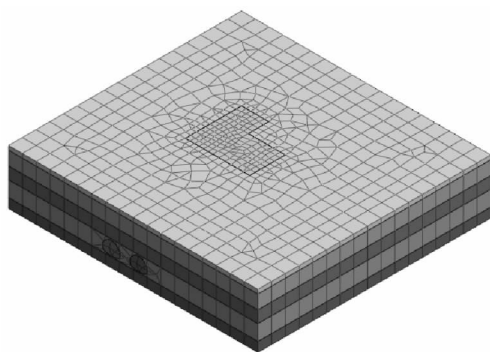


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model

表 3 不同工况下隧道的附加变形

Tab. 3 Additional deformation of tunnel in different conditions

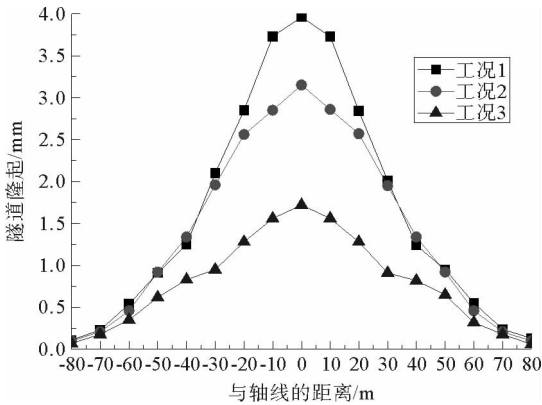
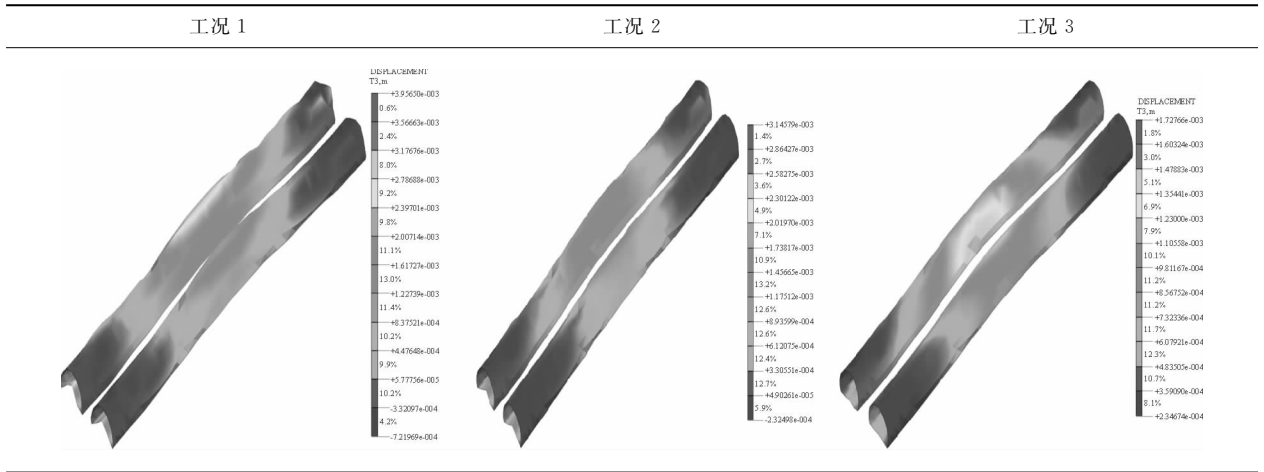


图 4 不同工况隧道纵向最大隆起图

Fig. 4 Vertical maximum uplift of tunnel in different conditions

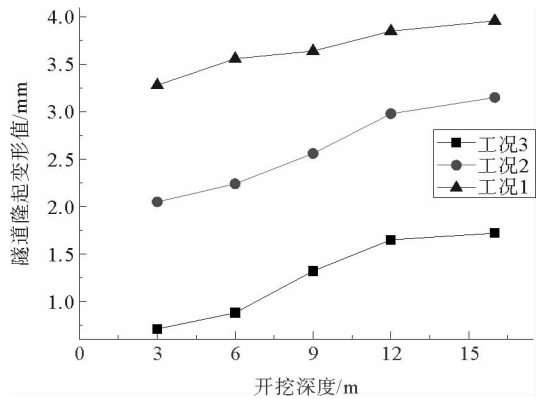


图 5 隧道最大隆起位移随开挖步的变化规律

Fig. 5 The maximum uplift tunnel excavation variation with steps

2.3 基坑开挖对隧道衬砌结构的影响

隧道周围喷射混凝土,使其与围岩密切接触,形成隧道-支护-围岩的复合承载形式,提高隧道使用的安全性与耐久性。衬砌结构的受力特点直接影响了隧道的安全,有必要对基坑卸荷后衬砌的状态进行分析。利用工况 3 的计算结果,提取作用在衬砌上的附加应力,并将此附加应力作为围岩压力增量,与原设计荷载一起作用在衬砌结构上,利用 MIDAS/GTS 对衬砌进行二维分析。基坑开挖到底隧道衬砌所受土压力见表 4 所示,对应的轴力与弯矩见图 6 所示。

表 4 基坑开挖引起隧道衬砌的附加荷载

Tab. 4 Excavation of the tunnel lining causing additional load

| 分析阶段 | 塌落拱高度/m | 顶部土压力/(kN/m ²) | 顶部侧向土压力/(kN/m ²) | 底部侧向土压力/(kN/m ²) |
|---------|---------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 初始阶段 | | 519.6 | 187.1 | 265.5 |
| 基坑卸荷完成后 | 7.16 | 537.3 | 193.5 | 272.7 |

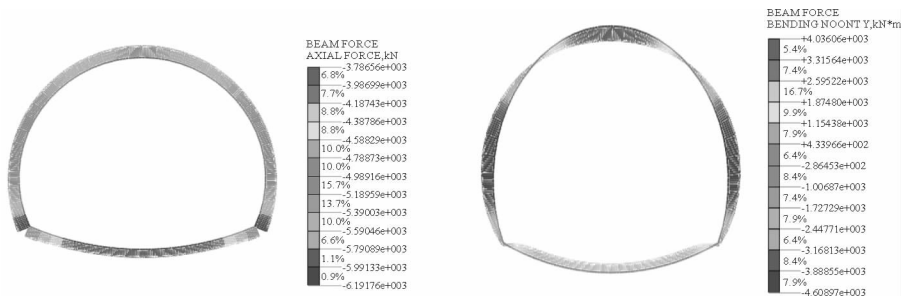


图 6 基坑开挖到底衬砌的轴力图与弯矩图

Fig. 6 The shaft sought and bending moment diagram of lining

由分析可知,衬砌四周受压,未出现拉裂破坏。两侧轴力与弯矩呈对称分布,拱顶出现最大弯矩。将轴力与弯矩数值提取,运用曙光软件对衬砌进行复核配筋计算。结果表明,衬砌能够满足强度要求,进一步验证基坑卸荷开挖不会对下卧隧道造成安全性影响。

2.4 基坑隆起变形

由以上分析可知,工况 3 对抑制隧道隆起变形的效果最佳,且此工况与实际工程较为接近。此种施工方案下,基坑开挖完毕后,读取坑底的隆起位移,运用 MATLAB 得到工况 3 施工后坑底隆起变形图(图 7)。可以清晰地看到,坑底最大隆起变形为 4.9 mm,位于坑底中间,四周隆起变形较小,约为中间隆起量的 1/2,这是由于竖直方向的卸荷效应远大于水平方向的卸荷,且地连墙与基坑四周土的摩擦作用,阻碍了水平方向上地层的移动变形。

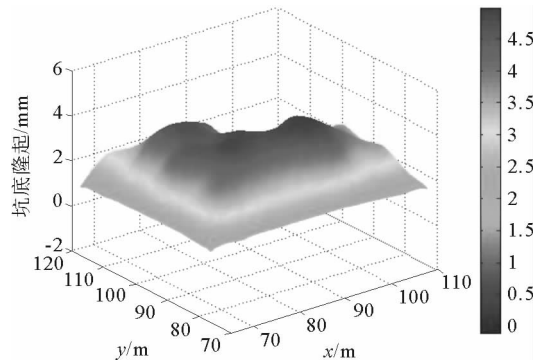


图 7 工况 3 施工后坑底隆起变形

Fig. 7 Uplift deformation in the bottom with condition 3 construction

3 结论

针对 3 种工况、通过三维有限元方法对基坑开挖全过程进行动态模拟,主要结论有:

- 1) 基坑开挖受时空效应的影响,施工过程中采取分块、小面积开挖的方式能够有效控制隧道的附加变形;基坑底部土体注浆加固可以有效控制隧道的附加变形;
- 2) 对于本次模拟的具体工程,从隧道附加位移及衬砌附加应力两方面说明基坑卸荷对下卧运营隧道造成影响在可控范围内,不会对运行安全造成威胁;
- 3) 基坑卸荷开挖,正下方的隧道断面隆起最大,沿隧道纵向向两侧逐渐减小,隆起变形近似服从正态分布,沿纵向中轴线向左右各 30 m 范围为主影响区,60 m 范围内为开挖扰动区;
- 4) 如果建模参数选取得当、边界条件设置合理,数值模拟对于解决复杂的岩土工程可以定性给出参考结果,是解决岩土问题的有效方法。

参考文献:

[1]刘国彬,黄院雄,侯学渊.基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J].岩石力学与工程学报,2001,20(2):202-207.
LIU Guobin, HUANG Yuanxiong, HOU Xueyuan. The prediction and control of rebound deformation of the existing tunnels right under excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 202-207.

[2]DOLEZALOVA M. Tunnel complex unloaded by a deep excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(6/7): 469-493.

[3]陈郁,李永盛.基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J].地下空间与工程学报,2005,1(1):91-94.

- CHEN Yu, LI Yongsheng. Calculation of tunnel heaving due to unloading of pit excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(1): 91-94.
- [4] HUANG A J, WANG D Y, WANG Z X. Rebound effects of running tunnels underneath an excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(3): 399-405.
- [5] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. 岩土力学, 2013, 5(4): 1459-1468.
ZHENG Gang, LIU Qingchen, DENG Xu. Numerical analysis of effect of excavation on underlying existing metro tunnel and deformation control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 5(4): 1459-1468.
- [6] 黄宏伟, 黄翔, SCHWEIGER F. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 182-189.
HUANG Hongwei, HUANG Xiang, SCHWEIGER F. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 182-189.
- [7] 王卫东, 徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法[J]. 岩土工程学报, 2010(增1): 32-38.
WANG Weidong, XU Zhonghua. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(S1): 32-38.
- [8] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(责任编辑: 吕海亮)

(上接第 61 页)

- [9] 邹维列, 谢鹏, 马其天, 等. 废旧轮胎橡胶颗粒改性膨胀土的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(3): 44-48.
ZOU Weilie, XIE Peng, MA Qitian, et al. Experiment on characteristics of expansive soil modified with waste tire rubber particles[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(3): 44-48.
- [10] 李朝晖, 张虎元. 废轮胎颗粒与黄土混合物压实性能研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3715-3726.
LI Chaohui, ZHANG Huyuan. Compaction properties of granulated rubber and loess mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3715-3726.
- [11] 辛凌, 刘汉龙, 沈扬, 等. 废旧轮胎橡胶颗粒轻质混合土强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 428-433.
XIN Ling, LIU Hanlong, SHEN Yang, et al. Consolidated undrained triaxial compression test on lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 428-433.
- [12] 邓安, 冯金荣. 砂-轮胎橡胶颗粒轻质土工填料试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 116-120.
DENG An, FENG Jinrong. Experimental study on sand-shredded tire lightweight fills[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1): 116-120.
- [13] 中华人民共和国建设部. GB/T50123-1999, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

(责任编辑: 吕海亮)