

非对称基坑开挖对浅埋下卧地铁隧道的影响*

张玉伟^{1,2}, 翁效林², 谢永利²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2. 长安大学 公路学院, 西安 710064)

摘 要: 地铁隧道里程数越来越长, 近接地面工程建设对其安全影响不可忽视。为了研究地面工程建设对下卧地铁隧道的影响, 采用数值分析方法建立三维模型, 以基坑未开挖作为初始状态, 分析了基坑降水、非对称基坑开挖和桩基荷载施加等过程的地铁隧道空间位移特征及结构受力特征。结果表明: 基坑降水过程对下卧地铁隧道位移影响不明显, 非对称基坑开挖会导致下卧地铁隧道结构整体产生上浮及偏移, 桩基荷载施加后隧道会产生相应的下沉现象, 但仍有残余位移; 隧道受力结果表明, 基坑降水对隧道受力影响也不明显, 基坑开挖过程隧道受力逐渐增大且整体受力均匀, 桩基荷载施加后隧道顶部和底部受力进一步增大, 两边墙受力变化相对较小, 受力整体呈椭圆形。研究结果可为确保类似工程施工安全提供借鉴。

关键词: 地面广场建设; 非对称基坑开挖; 地铁隧道; 位移; 数值分析

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)03-0770-09

Influence of Asymmetric Foundation Pit Excavation on Shallow-buried Subway Tunnel Structure

Zhang Yuwei^{1,2}, Weng Xiaolin², Xie Yongli²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P.R. China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P.R. China)

Abstract: The mileage of subway tunnel is getting longer and longer, the influence of close-spaced ground square construction can't be ignored. In order to study the influence of ground square construction on subway tunnel, numerical analysis method was used to establish a 3D model. the unexcavated condition of foundation pit is taken as original state, the space displacement and stress of subway tunnel are analyzed in progress of dewatering, foundation pit excavation and load application. The results show that the progress of dewatering had little influence on displacement, the foundation pit excavation could lead the subway tunnel to floating or excursion, the subway way may sink after foundation load application; the results of stress show that dewatering had little influence on stress of subway tunnel, the stress may increase with the progress of foundation pit excavation, the stress of the top and bottom increased further after the foundation load application, but the stress of both side changed little, the shape of global stress was oval. The results can provide references for construction safety of similar project.

Keywords: ground square construction; asymmetric foundation pit excavation; subway tunnel; displacement; numerical analysis

* 收稿日期: 2017-12-08(修改稿)

作者简介: 张玉伟(1989-), 男, 山东淄博人, 博士后, 主要从事岩土与隧道工程方面的研究工作。

E-mail: 1032659676@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(51378004); 中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2012JC001)

0 引言

随着立体化交通战略格局的提出,修建地铁已成为解决城市交通拥挤的重要途径,目前已建地铁隧道里程数逾 2 000 km,并且将越来越长。尽管地铁沿线的工程建设有先期规划,但就远期发展而言,仍具有不可预见性,往往会出现地面工程上跨运营地铁隧道或地铁隧道下穿已建工程的情况^[1]。对于地铁隧道下穿既有建筑(如已建地铁、古文物建筑等),已有大量研究成果,为控制地面沉降,保障地铁隧道施工安全提供了依据^[2-5]。而地面工程建设对已建地铁的影响研究相对较少^[6-7],地面建设常常需要进行基坑降水、基坑开挖等工序,这都会对下卧地铁隧道结构的位移和受力产生影响,如基坑开挖卸荷减小了隧道上方土体的附加荷载,可能导致地铁结构产生上浮或偏移,威胁地铁运营安全^[8-11]。人们已逐渐意识到地面工程建设对已建地铁隧道的影响不可忽视,但目前仍未建立起完善的控制标准^[12-13],且地面工程建设全过程对下卧地铁隧道的影响分析相对较少。如何正确评价和预测地面工程建设对地铁隧道的影响,成为一个急需解决的问题^[14-15]。

本文以西安地铁 1 号线长乐坡站—浐河站区间的东环广场建设项目为依托,首先分析了非对称基坑开挖对下卧地铁隧道结构的影响机制,进而建立三维数值分析模型,系统分析了东环广场建设过程中基坑开挖、桩基施工以及建筑物荷载下,地铁隧道结构的整体受力和空间位移变化特征,结果可为类似工程的位移控制和施工安全提供借鉴。

1 非对称基坑开挖对隧道影响机制

地铁隧道修建完毕后在地层结构中处于平衡状态,如图 1(a)所示。此时为初始状态,双线地铁隧道周围均受力均匀。以左线隧道为例,满足条件 $F_1=F_2=F_3=F_4$,地铁隧道的位置与形状均不会发生改变。当地铁上方进行建筑物施工时,将会采取降水、基坑开挖、桩基施工等措施,这不可避免地会对下卧地铁隧道产生影响。如非对称基坑开挖时(如图 1(b)所示),相当于地铁隧道上方附加荷载减小。对于左线隧道会造成 F_2 减小,在 F_4 不变的情况下,地铁隧道可能发生上浮现象,在 F_1 和 F_3 不变的情况下,地铁隧道结构受力也可能发生变化;对于右线隧道, F_5 和 F_6 均会有所减小,隧道整

体可能会发生偏移,而隧道结构也可能会发生整体受力改变。基坑开挖完毕后进行桩基施工,随后施加建筑物荷载,如图 1(c)所示,一般建筑物荷载要大于原有基坑荷载,对于左线隧道, F_2 会变大,会造成隧道整体重新下沉,同时,隧道结构受力也会发生改变;对于右线隧道, F_5 和 F_6 均会受到影响,地铁隧道整体也会受到影响。

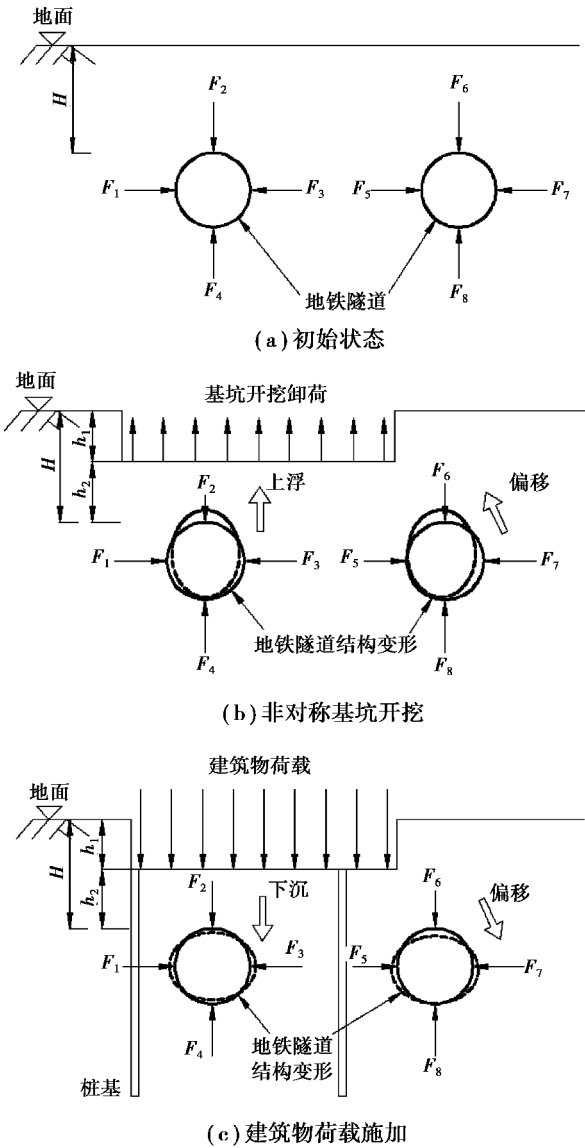


图 1 非对称基坑开挖影响机制

Fig. 1 Mechanism of asymmetric foundation pit excavation

另外,地铁隧道受影响程度与隧道顶部距地面的距离 H 、基坑开挖深度 h_1 、隧道顶部距基坑底部的高度 h_2 密切相关,但同时还与地铁周围地质条件和水文条件密切相关。因此,地面工程建设对下卧地铁隧道影响因素复杂,如用经验公式中 h_2 来预测隧道上浮或偏移值,将会产生很大的误差^[16]。通过数值模拟手段,在尽可能全面考虑多因素影响

的条件下,分析东环广场建设全过程对下卧地铁隧道的位移和受力影响。

2 数值模型的建立

2.1 工程概况

西安地铁 1 号线一期工程(后围寨—纺织城)长乐坡站—浐河站区间位于西安市长乐东路长乐坡村—浐河东岸之间,区间线路总长 1 163.65 m,线路底板埋深约 15.50~23.0 m。区间下穿浐河段采用盾构法施工,其他段落采用浅埋暗挖法施工。东环广场位于浐河西岸,距地铁 1 号线长乐坡站与浐河东站分别为 600 m 和 300 m,地上由塔楼和裙房组成,其中塔楼 41 层(局部 43 层),主屋面高度 179.8 m,裙房 7 层(局部 8 层),主屋面高度为 38.20 m。拟建项目裙房位于地铁隧道上方,如图 2 所示。地基基础设计方案及地铁隧道的位置关系

如图 3 所示。

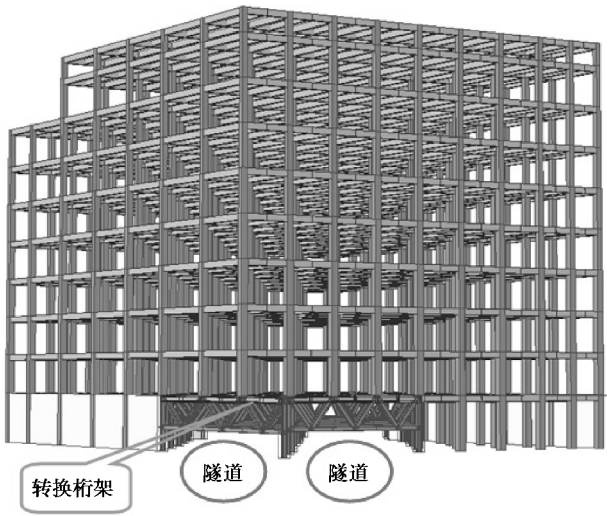


图 2 裙房与地铁隧道的关系

Fig. 2 Relation between podium and subway tunnel

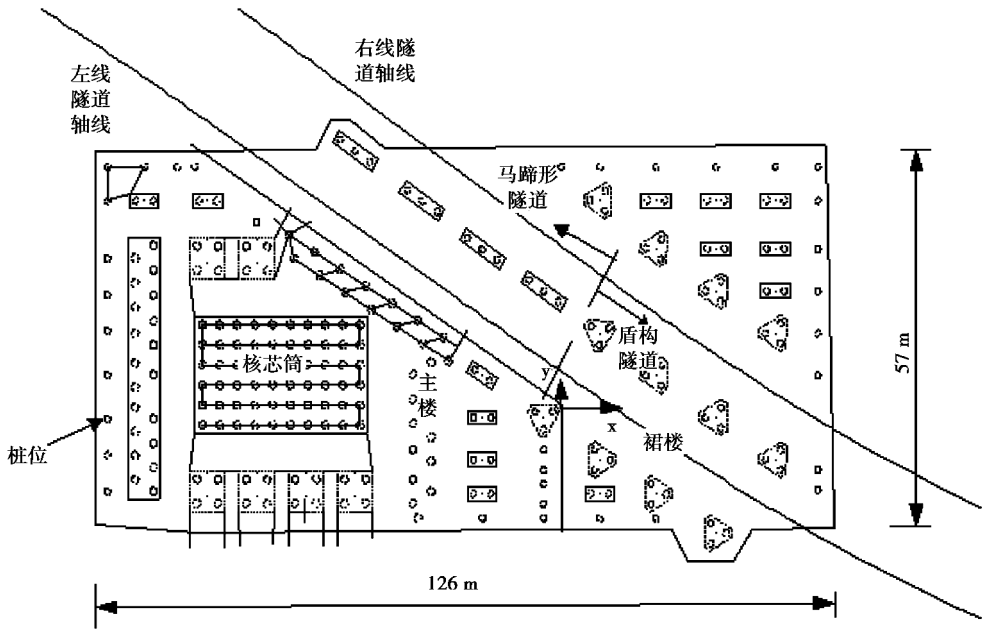


图 3 基础与地铁隧道关系

Fig. 3 Relation between foundation and subway tunnel

2.2 地质条件

依据《西安城市工程地质图集》及现场钻探结果,勘察场地地貌单元属于浐河西岸一级阶地,场区地层在 60.0 m 深度范围内主要包括:①杂填土(Q4ml),黄褐色,土质不均匀,层厚 3.6~5.1 m;②黄土状粉质黏土(Q4al+pl),褐黄色,孔隙较发育,层厚 0.2~0.9 m;③卵石(Q4al+pl),黄褐色,以花岗岩为主,最大粒径 10~15 cm,层厚 12.1~14.0 m;④粉质黏土(Q3al+pl),黄褐色或灰色,土质均匀,夹少量钙质结核,层厚 13.6~18.0 m;⑤卵

石(Q2al+pl),灰白色,以石英岩、花岗岩为主,最大粒径 8~13 cm,级配良好,层厚 2.9~5.1 m;⑥粉质黏土(Q2al+pl),黄褐色,土质均匀,致密,中压缩性,层厚 2.8~6.9 m;⑦卵石(Q2al+pl),灰白色,最大粒径 8~11 cm,该层未穿透,最大揭露厚度 19.8 m,相应孔深 60.0 m,相应孔底标高 443.42 m。

地质勘察钻孔均揭露了地下水属潜水类型,其稳定水位埋深为 8.90~10.60 m,相应标高为 394.55~394.66 m。场地地下水主要以大气降水和地表水渗入等补给为主,排泄方式以径流、人工开采和蒸

发为主。该地区潜水位年变化幅度介于1~2 m,本场地的潜水位年变化幅度按 2.0 m 考虑,基坑最大开挖深度达 13.4 m,因此考虑基坑降水影响。

2.3 模型建立及参数取值

计算模型的土体采用 SOLID45 三维实体单元,具体模型范围为沿轨道交通线路中心线纵向取 133.56 m,垂直于线路方向取 160.79 m。计算模型底面约束竖直 Y 方向的自由度,侧面约束 X、Z 方向的自由度,地表为自由面,具体模型如图 4 所示。数值计算过程中各层土体参数均按照现场土样进行取值(见表 1),隧道管片采用 C50 混凝土。

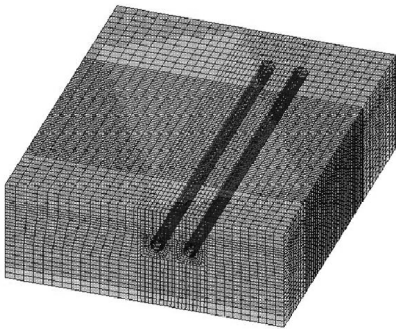


图 4 数值计算模型
Fig. 4 Numerical calculation model

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

地层	干重度	天然重度	固结快剪		压缩	弹模	泊松比
	$\gamma_d/$	$\gamma/$	(CU)		系数		
	($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c/$	φ	$E_{s0.1-0.2}/$	$E_0/$	v
			kPa	($^{\circ}$)	MPa	MPa	
①	15.9	17.3	25	17	7	18	0.3
②	15.0	14.8	29	21	8	18	0.3
③	14.0	20.0	—	30	30	30	0.2
④	15.3	19.3	29	21	8	30	0.3
⑤	14.0	20.0	—	30	45	60	0.2
⑥	14.8	19.1	37	20	10	24	0.3
⑦	14.0	20.0	—	30	60	100	0.2

当基坑下方有地铁隧道通过时,基坑开挖卸荷必然会引起隧道围岩应力场和变形场的改变,地层损失会向地铁隧道周围的土体和结构传递,从而引起地铁隧道顶部土压力的变化,使得隧道结构的应力和位移发生改变^[17]。数值计算分析中,基坑开挖范围不仅对临近地铁隧道的应力场和位移场有

影响,而且对卸荷模量参数取值也有一定影响^[18]。参照文献[18]的方法,土体卸荷模量可由非线性邓肯-张模型确定,加载模量和卸载模量分别由式(1)和式(2)表示为:

$$E_t = k p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2$$

(1)

$$E_{ur} = k_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n$$

(2)

式中: k 和 k_{ur} 分别为加载和卸载模量数,满足 $k_{ur}/k=0.899+535k^{-1}$; p_a 为大气压; R_f 为破坏比; n 为试验常数。

2.4 数值计算过程

为研究东环广场建设过程中基坑开挖、桩基施工及建筑物荷载等对地铁隧道结构的影响,以地铁隧道的平衡状态作为初始状态,选取基坑降水、基坑开挖卸荷、桩基施工并加荷等特定工况,分析地铁隧道结构的扰动状态。主要步骤为:①基坑降水过程(如图 5):地应力平衡,隧道开挖,渗流场稳定,基坑降水;②非对称基坑开挖过程(如图 6):基坑开挖至 3.5 m,开挖至 4.5 m,开挖至 8.2 m,开挖至 12.6 m,开挖至 13.4 m;③桩基施工及筏板施加荷载(如图 7):施做筏板,施加上部建筑荷载。

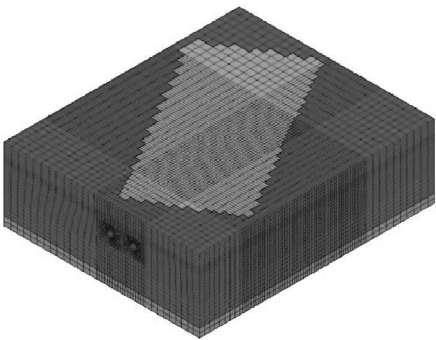


图 5 基坑降水
Fig. 5 Precipitation of foundation pit

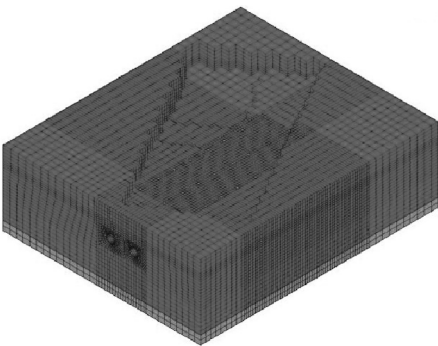


图 6 非对称基坑开挖
Fig. 6 Excavation of asymmetric foundation pit

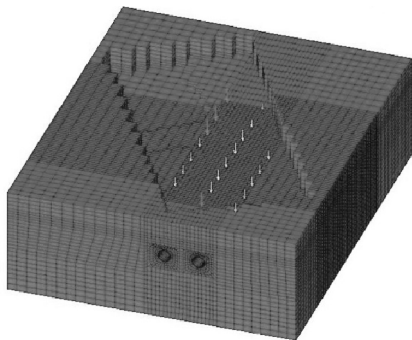
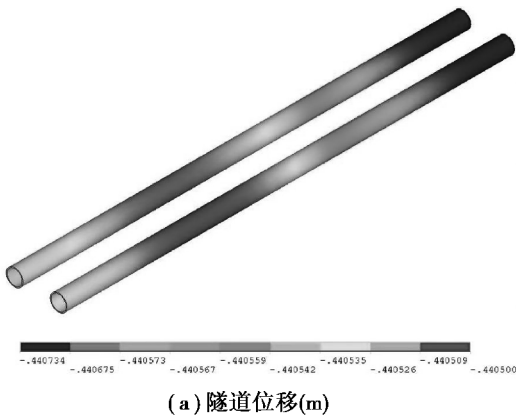
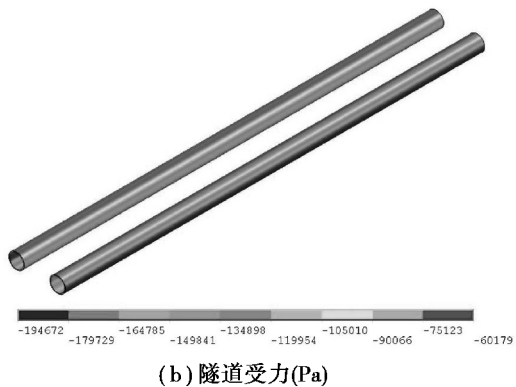


图 7 桩基荷载施加过程
Fig. 7 Pile loading process



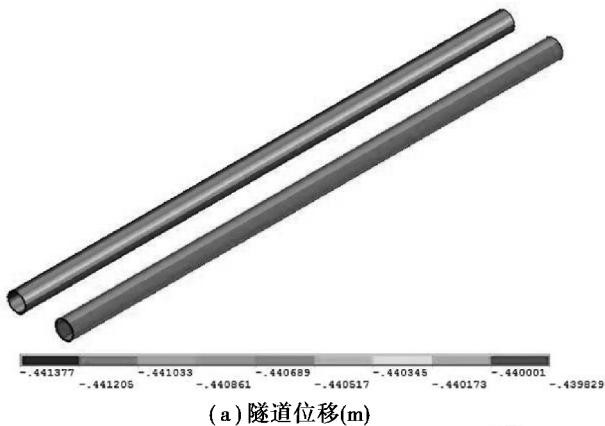
(a) 隧道位移(m)



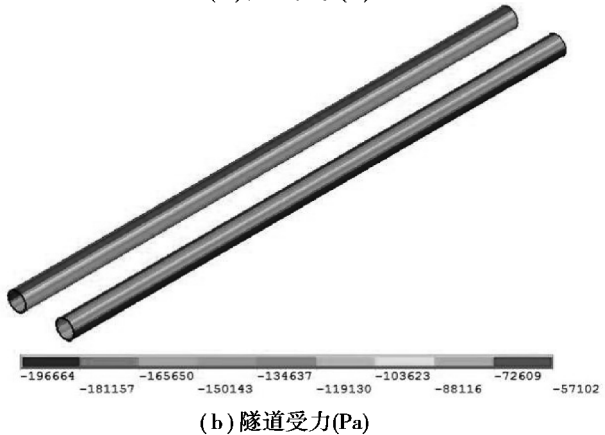
(b) 隧道受力(Pa)

图 9 基坑降水

Fig. 9 Precipitation of foundation pit



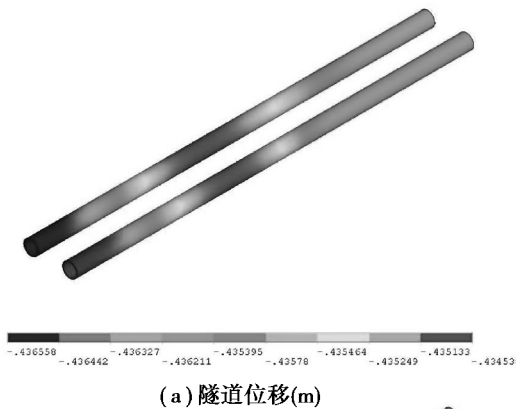
(a) 隧道位移(m)



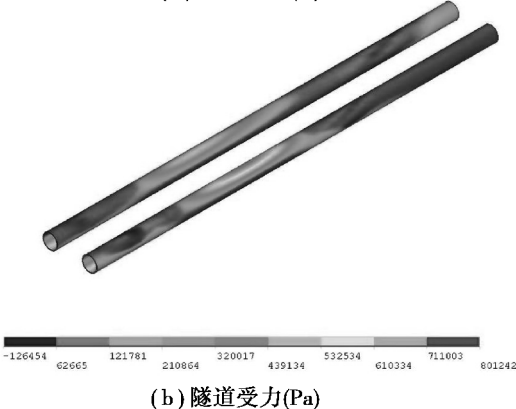
(b) 隧道受力(Pa)

图 8 基坑未开挖前初始状态

Fig. 8 The original state before foundation pit excavation



(a) 隧道位移(m)



(b) 隧道受力(Pa)

图 10 基坑开挖

Fig. 10 Foundation pit excavation

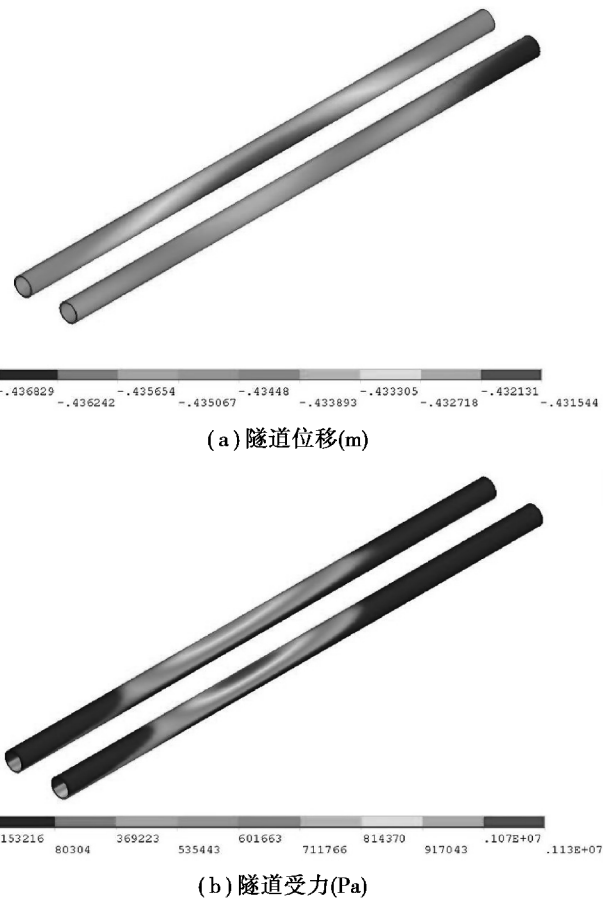


图 11 桩基荷载施加

Fig. 11 Load application of foundation

3.2 地铁隧道位移统计分析

为明确各工况下地铁隧道整体位移情况(以左线隧道为例),在基坑下方沿地铁隧道布设了7个断面(图 12),并以隧道拱顶作为监测点,以基坑未开挖的初始状态作为对比,分别监测了各施工过程中地铁隧道竖向位移和水平位移(其中竖向位移向上为正,水平位移向左为正),结果如图 13 和图 14。

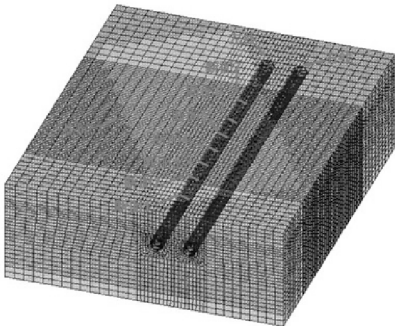


图 12 位移测点布置

Fig. 12 Measuring points of displacement

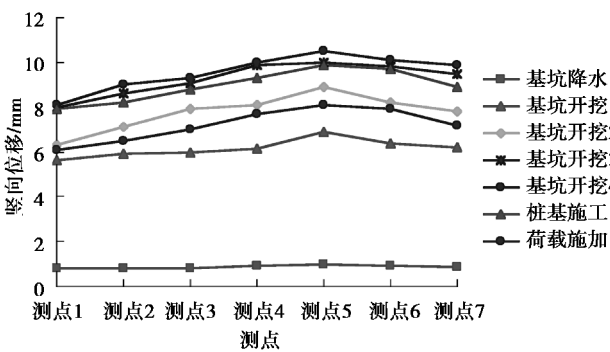


图 13 不同测点拱顶竖向位移

Fig. 13 Vertical displacement of different points

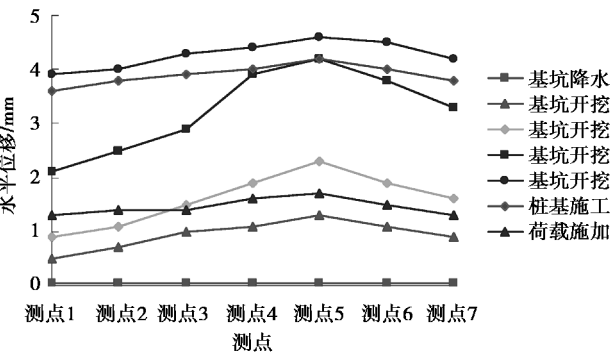


图 14 不同测点拱顶水平位移

Fig. 14 Horizontal displacement of different points

由图 13 可知:基坑降水后,隧道竖向位移最大值为 0.88 mm;基坑第 1 次开挖后,竖向位移最大值为 6.8 mm,基坑第 2 次开挖,竖向位移最大值达 8.82 mm,基坑第 3 次开挖,竖向位移最大值为 10.14 mm,基坑第 4 次开挖,竖向位移最大值达 11.01 mm;桩基施工完成后,隧道竖向位移最大值达到 9.83 mm,由于桩基扰动,隧道有 1.18 mm 沉降回落;建筑荷载施加后,隧道竖向位移最大值达到 8.5 mm,地铁隧道结构有进一步下沉的趋势。基坑开挖引起的隧道竖向位移最大,随着施工过程的进行,尽管基坑范围内隧道隆起变形的趋势不变,但是变形速率却逐步降低,说明地层(隧道)的变形对地层受到的初始扰动比较敏感,土体结构破坏以前,在一定变形范围内,地层(隧道)对二次或多次扰动的敏感性逐步降低,土体颗粒之间的相对位移趋势逐步减弱。由图 14 可知:基坑降水后,隧道的水平位移最大值为 0.1 mm;基坑第 1 次开挖后,隧道的水平位移最大值为 1.2 mm;基坑第 2 次开挖后,隧道的水平位移最大值为 2.3 mm;基坑第 3 次开挖后,隧道的水平最大位移值为 4.2 mm;基坑第 4 次开挖后,隧道的水平最大位移为 4.6 mm;

桩基施工后,隧道的水平最大位移为 4.2 mm;建筑荷载施加后,隧道的水平最大位移值为 1.7 mm,基坑开挖导致向左的水平位移最大,桩基施工及荷载施加会导致向右的水平位移恢复。从数据统计分析,位移最大值都是出现在更靠近基坑中心的左隧道,表明隧道上方基坑开挖引起的地层卸荷及基坑内外的土压力差,导致了基坑范围内隧道出现了相对明显的空间位移。

基坑开挖后,隧道拱顶的竖向变形集中在基坑中部位置,基坑降水、基坑第 1 次开挖、基坑第 2 次开挖、基坑第 3 次开挖、基坑第 4 次开挖、桩基施工以及建筑荷载作用引起基坑中部左线隧道拱顶的最大隆起变形分别为 0.88 mm、6.84 mm、8.82 mm、10.14 mm、11.01 mm、9.83 mm、8.5 mm,隧道最大水平位移为 1.2 mm、2.3 mm、4.2 mm、4.6 mm、4.2 mm、1.7 mm。在各个计算步中,地铁结构竖向位移及水平位移均小于 20 mm,初步判定施工对地铁影响在安全范围内。

3.3 地铁隧道结构受力分析

以左线隧道为例,选取典型断面 1 和断面 4 (图 12)沿隧道周边布置测点。将基坑未开挖状态作为基准,分别监测基坑降水、基坑开挖、建筑荷载施加隧道周围的受力情况,如图 15 和图 16 所示(图中压为正,拉为负)。

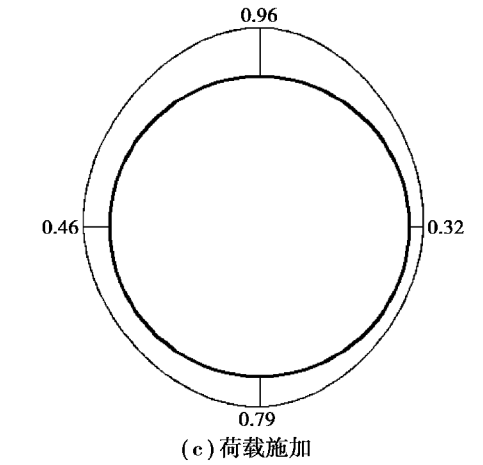
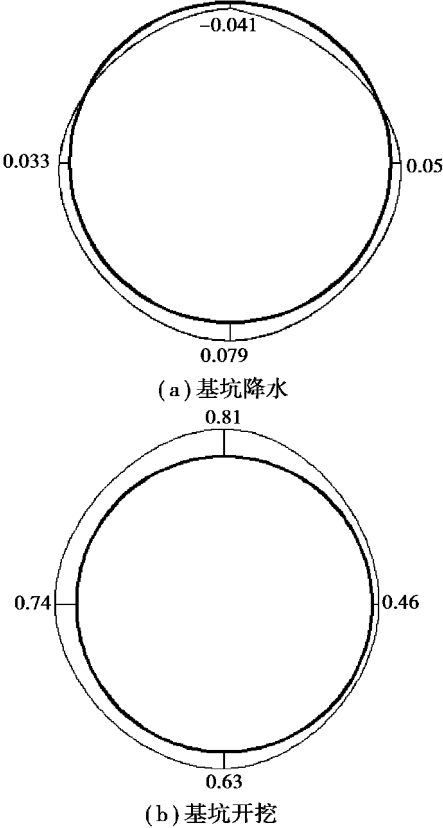


图 15 断面 1 隧道结构受力(单位:MPa)
Fig. 15 Stress of tunnel on section 1(unit:MPa)

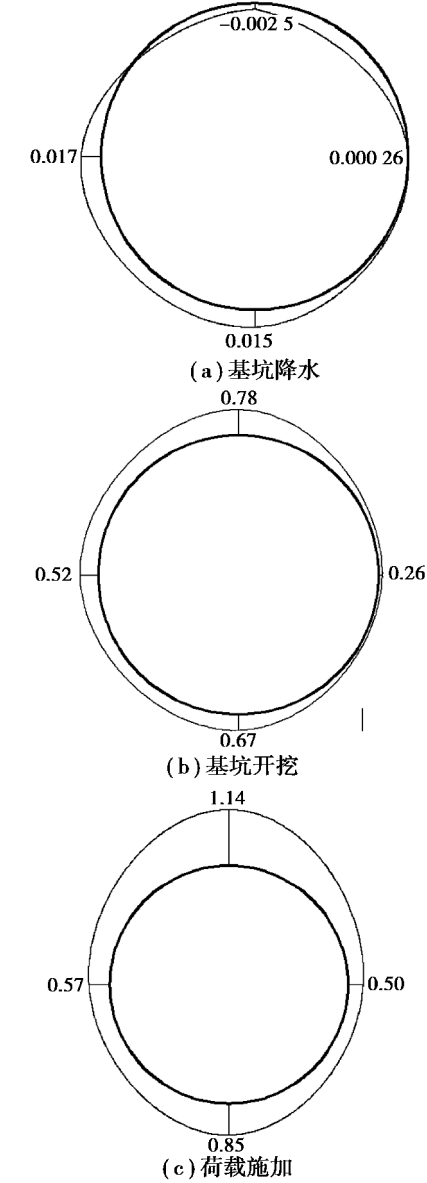


图 16 断面 4 隧道结构受力(单位:MPa)
Fig. 16 Stress of tunnel on section 4(unit:MPa)

由图 15 可看出,基坑降水对隧道结构整体受力影响不大,拱顶出现拉应力,其余部位为压应力。基坑开挖完毕后,隧道整体呈受压状态,且拱顶受压明显,这可能是基坑开挖卸荷拱顶压力减小,而侧压力不变,使得拱顶呈受压状态,桩基施工及荷载施加后,隧道也呈受压状态,且受力较基坑开挖完成时有所增大,拱部和底部受力比侧墙受力大。结合图 16 分析知,越靠近基坑中心,隧道结构整体受力越大,这是因为基坑开挖时中心卸荷作用最明显,建筑物荷载施加时,基坑中心附加荷载也最大,因此对下卧隧道结构作用更明显。整体来看,隧道结构受到的应力情况均满足隧道结构强度要求。

4 现场位移测试分析

为与数值计算结果进行对比分析,在基坑正下方的左线隧道断面 1 和靠近基坑边缘断面 4 处布置测点(图 12),且测点布置于隧道拱顶处,分别监测了隧道结构竖向位移和水平位移。竖向位移采用静力水准仪监测,水平位移采用全站仪监测,测试紧跟基坑开挖工序进行,测试频率为 3 天/次。对测试结果进行整理,规定竖向位移向上为正,水平位移向左为正,如图 17。

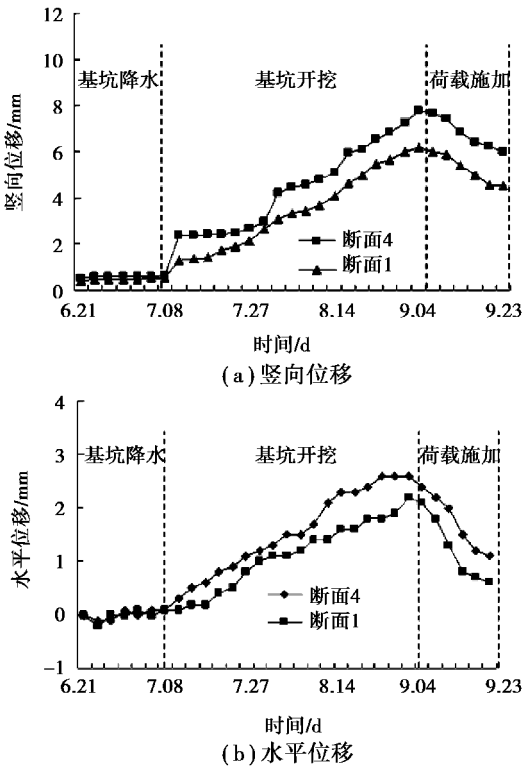


图 17 隧道位移监测

Fig. 17 Displacement measurement of the tunnel

由图 17(a) 可以看出,基坑降水过程中,隧道竖向位移和水平位移均不明显,随着基坑开挖进

行,竖向位移逐渐增大,且断面 4 大于断面 1。这是因为断面 4 位于基坑正下方,基坑开挖卸荷效应更明显,越靠近基坑边缘,卸荷作用越不明显,竖向位移越小。桩基施工及建筑荷载施加后,竖向位移有一定回落,但不会恢复到原来状态。由图 17(b) 可以看出,基坑降水对水平位移基本无影响,随着基坑开挖,隧道整体向左偏移。这是因为基坑位置位于隧道上方偏左,随着基坑开挖卸荷,隧道上方和左边附加应力减小,造成了整体向左偏移,且断面 4 大于断面 1,说明基坑中心下方隧道水平位移更大。随着桩基荷载的施加,隧道水平位移迅速减小,基本回复到原来水平,这是因为随着桩基荷载增加,作用于隧道的附加荷载也增加,最终隧道基本回落到初始位置。与数值结果对比知,断面 4 最大竖向位移和水平位移分别为 11.01 mm 和 4.6 mm,现场实测最大竖向位移和水平位移分别为 7.78 mm 和 2.6 mm,均小于数值结果,说明以数值分析结果作为施工控制标准是偏安全的。

5 结论

- (1) 基坑降水对隧道位移影响不明显,非对称基坑开挖卸荷会造成隧道结构整体上浮和偏移,越靠近基坑中心,影响越明显。桩基施工及荷载施加后,隧道结构整体有一定回落。
- (2) 受力结果表明,基坑降水对结构受力基本无影响,基坑开挖后隧道整体受力明显增大,呈均匀受压。荷载施加后,隧道顶部和底部受力进一步增大,两侧边墙变化不大,隧道整体受力呈椭圆形。
- (3) 数值结果和实测结果均表明,地铁隧道竖向位移和水平位移均满足小于 20 mm 要求,符合地铁隧道运营安全标准。

参考文献 (References)

[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):1109-1117. (Zheng Gang, Liu Qingchen, Deng Xiu, 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):1109-1117. (in Chinese))

[2] 赵晓勇.TBM 法隧道施工下穿涵洞的数值模拟研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(3):513-517. (Zhao Xiaoyong. Study on the TBM tunnel beneath existing culvert by numerical simulation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2011,7(3):513-517. (in Chinese))

[3] 王剑晨,张顶立,张成平,等.北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有隧道变形特点及预测[J].岩石力学与工程

- 学报, 2014, 33(5): 947-956. (Wang Jianchen, Zhang Dingli, Zhang Chengping. Deformation characteristics of existing tunnels induced by excavation of new shallow tunnel in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 947-956. (in Chinese))
- [4] 陈孟乔, 杨广武. 新建地铁车站近距离穿越既有地铁隧道的变形控制[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4): 53-59. (Chen Mengqiao, Yang Guangwu. Deformation control of a newly-built subway station crossing the adjacent existing subway tunnel [J]. China Railway Science, 2011, 32(4): 53-59. (in Chinese))
- [5] 徐前卫, 尤春安, 李大勇. 盾构近距离穿越已建隧道的施工影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增1): 95-98. (Xu Qianwei, You Chunan, Li Dayong. Analysis of construction influence of shield tunnel machine passing over old nearby tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.1): 95-98. (in Chinese))
- [6] 孔祥鹏, 刘国彬, 廖少明. 明珠线二期上海体育馆地铁站穿越施工对地铁一号线车站的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 821-824. (Kong Xiangpeng, Liu Guobin, Liao Shaoming. Influence of construction of Shanghai stadium transverse station of pearl line phase II on station of metro line NO.1 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 821-824. (in Chinese))
- [7] 杜金龙, 杨敏. 深基坑开挖对邻近埋管影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3016-3020. (Du Jinlong, Yang Min. Influence analysis of excavation of deep pit on adjacent buried pipe lines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 3016-3020. (in Chinese))
- [8] 魏纲, 魏新江, 裴新谷, 等. 过街隧道施工对地下管线影响的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 2853-2859. (Wei Gang, Wei Xinjiang, Qiu Xingu, et al. 3D Numerical simulation of effect of underground urban street-passage tunnel construction on adjacent pipe line [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 2853-2859. (in Chinese))
- [9] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭, 等. 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, 34(5): 1459-1468. (Zheng Gang, Liu Qingchen, Deng Xiu. Numerical analysis of effect of excavation on underlying existing metro tunnel and deformation control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1459-1468. (in Chinese))
- [10] 李志高, 刘浩, 刘国彬, 等. 基坑开挖引起下卧隧道位移的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 619-623. (Li Zhigao, Liu Hao, Liu Guobin, et al. Influence analysis of deep-dip excavation on down tunnel based on the measured displacement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 619-623. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 左殿军, 史林, 李铭铭, 等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 391-395. (Zuo Dianjun, Shi Lin, Li Mingming, et al. Numerical analysis of influence of deep excavations on adjacent subway tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Supp.2): 391-395. (in Chinese))
- [13] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092. (Zhang Zhiguo, Zhang Mengxi, Wang Weidong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2085-2092. (in Chinese))
- [14] 张玉成, 杨光华, 姚捷, 等. 基坑开挖卸荷对下方既有地铁隧道影响的数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增1): 109-115. (Zhang Yucheng, Yang Guanghua, Yao Jie, et al. Numerical simulation and analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Supp.1): 109-115. (in Chinese))
- [15] 徐凌, 黄宏伟. 基坑开挖对下卧地铁隧道的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增1): 164-165. (Xu Ling, Huang Hongwei. Effect of foundation pit excavation on underlying metro tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(Supp.1): 164-165. (in Chinese))
- [16] 魏刚. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1421-1428. (Wei Gang. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1421-1428. (in Chinese))
- [17] 侯公羽, 刘宏伟, 李晶晶, 等. 基于开挖卸荷效应的地铁隧道施工过程数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增1): 2915-2924. (Hou Gongyu, Liu Hongwei, Li Jingjing. Numerical analysis of subway tunnel construction process based on excavation unloading effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.1): 2915-2924. (in Chinese))
- [18] 胡海英, 张玉成, 杨光华, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 431-439. (Hu Haiying, Zhang Yucheng, Yang Guanghua. Measurement and numerical analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Supp.2): 431-439. (in Chinese))