

双基坑开挖对邻近隧道结构变形影响分析

张治国, 费思异, 邢 李

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 通过建立三维有限元数值模型, 分析了双基坑开挖不同施工阶段对已有隧道变形的影响. 结果表明: 双基坑与邻近隧道平行布置时, 隧道会发生较大变形, 其水平最大位移比垂直布置时的大10%, 且后开挖基坑造成的隧道位移较先开挖基坑变形大7%左右; 双基坑与隧道垂直布置时, 远隧道基坑开挖对隧道影响极小, 隧道变形主要由近隧道基坑开挖决定. 针对上述水平布置和垂直布置工况均发现, 隧道一侧双基坑开挖施工对隧道的水平位移影响较大, 竖向位移约为水平位移的1/10. 隧道本身在竖直方向变形为上下向中心挤压, 隧道在水平方向上有指向基坑的侧移, 同时隧道本身的变形为中心向两侧拉伸, 且在开挖基坑中心位置对应处隧道的位移与变形最为明显.

关键词: 双基坑开挖; 隧道; 水平变形; 竖向变形

中图分类号: TU 430

文献标志码: A

Analysis on the Influence of Adjacent Double Foundation Pit Excavation on Tunnel Deformations

ZHANG Zhiguo, FEI Siyi, XING Li

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The deformations of an existing tunnel induced by the adjacent double foundation pit excavation at different construction stages were analyzed by establishing a 3D finite element model. The results show that the deformation of the tunnel is great when the double foundation pit is parallel to the adjacent tunnel, and the maximum horizontal displacement is approximately 10% larger than the displacement when the double foundation pit is perpendicular to the tunnel. The later pit excavated later will cause larger deformation of the tunnel than that excavated earlier by about 7%. The excavation of the pit far from the tunnel has few influences on the deformation of the tunnel when the double foundation pit is perpendicular to the adjacent tunnel. The tunnel deformation is mainly determined by the excavation of the foundation pit near the tunnel. No matter which kind of layout, it is found that the excavation of double foundation pit on one side of the tunnel causes superior influence on the horizontal displacement and little influence on the vertical direction of the tunnel. The vertical displacement is about 1/10 of the horizontal displacement. The vertical deformation of the tunnel is an extrusion from two sides to the center of the tunnel. The horizontal displacement of the tunnel is pointed to the side of pit and the horizontal deformation of

收稿日期: 2016-11-21

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(15ZR1429400)

第一作者: 张治国(1978-), 男, 副教授. 研究方向: 地下工程施工对周边环境影响控制. E-mail: zgzhang@usst.edu.cn

the tunnel is a tension from center to the edge sides of the tunnel. The most obvious displacement and deformation of the tunnel appear at the place corresponding to the center of the excavated pit.

Keywords: double foundation pit excavation; tunnel; horizontal deformation; vertical deformation

随着城市地下空间的不断开发,不可避免地出现了大量邻近既有地铁隧道的工程施工.在既有隧道周围开挖基坑,必然引起基坑周围土体位移场和应力场的改变,从而导致隧道的变形,威胁隧道运行安全.

近年来,众多学者^[1-12]针对隧道受邻近基坑开挖影响进行了研究.其中,Xing等^[3]结合上海地铁4号线、海伦路站周围10号线的施工案例,采用解析与数值模拟的方法对该案例进行了分析,提出了地铁车站地下水处理的措施和保护方案.Zhang等^[4]提出了一种预测由于上部基坑开挖引起的隧道变形的计算方法,讨论了其变形机制,通过深圳市车公庙综合交通枢纽工程对该理论进行了验证.陈锦剑等^[5]基于上海陆家嘴金融区一实际工程,采用有限元模拟软件模拟分析了两侧深基坑开挖对穿越其间的浅埋运营隧道的影响.郑刚等^[8]以天津地铁1号线既有隧道箱体上方的西青道下沉隧道基坑工程为背景,采用ABAQUS模拟基坑施工对隧道的影响,并提供了多种保护措施及其效果分析.郭力群等^[9]采用Z-soil模拟了内支撑基坑群之间的相互作用,分析了地下连续墙的变形和受力,讨论了基坑间距的影响.林杭等^[11]采用FLAC3D有限差分软件,模拟了不同基坑长度、宽度、隧道、基坑相对位置对隧道变形的影响.郑刚等^[12]以天津市某邻近既有隧道深基坑实测资料为基础,划分了不同围护结构变形模式和最大水平位移条件下坑外既有隧道变形影响区.

本文采用三维有限元软件建立了双基坑和隧道协同作用的有限元模型,分析了在既有隧道和双基坑不同位置布置情况下隧道受施工开挖而造成的水平位移和竖向位移,以及隧道整体变形和立面变形.

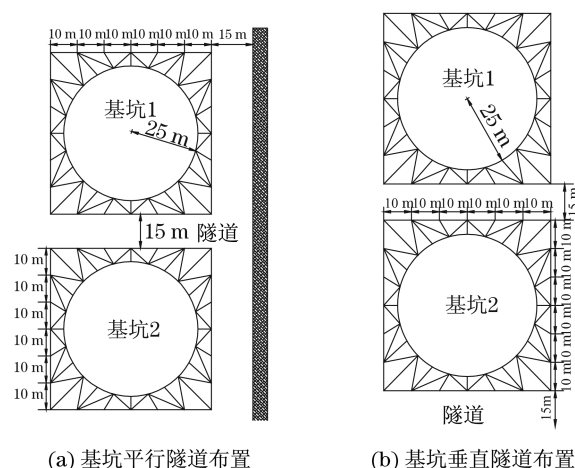
1 工程背景

1.1 结构布置

图1为隧道与双基坑平面图.图2为基坑、隧道和土体的立面图.基坑尺寸为60 m×60 m,开挖深度为14 m,两基坑间距为15 m.基坑支护结构包括地下连续墙、立柱、环形支撑、圈梁和底板这5部分.隧道埋深13.1 m,基坑与隧道边水平距离为15 m,

隧道内直径为5.5 m,外直径为6.2 m.土体采用各项同性的摩尔-库伦模型,土层分布如图2所示.根据勘察报告以及工程经验确定如下土体参数:土体重度 γ 、弹性模量 E 、泊松比、粘聚力 c 、摩擦角 φ .各土层参数如表1所示(见下页).

地下连续墙高24 m,埋入地下24 m;立柱长22 m,埋入地下24 m;环形支撑共设置2道,分别位于地下2 m与地下8 m处,环形支撑布置如图1所示.



(a) 基坑平行隧道布置 (b) 基坑垂直隧道布置

图1 隧道与基坑平面布置图

Fig.1 Plan of the tunnel and foundation pit

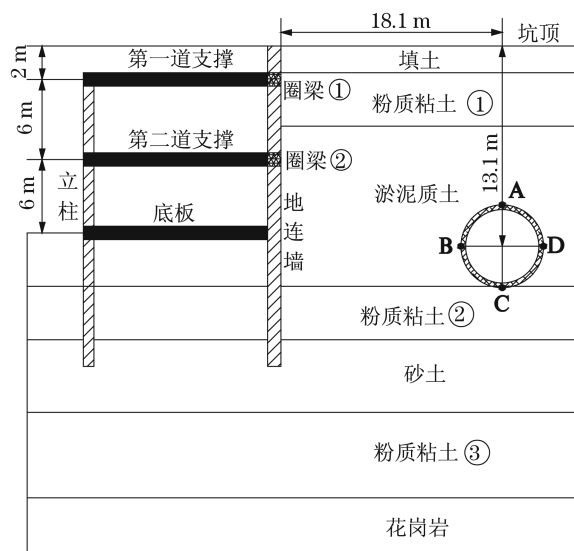


图2 基坑、隧道与土体立面布置图

Fig.2 Isometric plan of the foundation pit, tunnel and soil

表 1 土层分布及物理力学参数
Tab.1 Soil layers distribution and their
physic-mechanical parameters

层号	土层	层厚/m	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/MPa	泊松比	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
1	填土	2	17.0	22.5	0.33	10	15.0
2	粉质粘土 1	4	18.5	32.0	0.32	22	18.5
3	淤泥质土	12	16.9	17.9	0.33	14	13.5
4	粉质粘土 2	4	19.5	48.5	0.32	25	21.5
5	砂土	6	18.8	96.4	0.24	1	33.0
6	粉质粘土 3	8	19.2	56.0	0.29	26	21.5
7	花岗岩	4	20.0	120.0	0.21	30	30.0

圈梁位于支撑外边缘与地下连续墙交界处,圈梁布置如图 2 所示;底板位于地下 14 m 处.各结构参数如表 2 所示,包括材料重度 γ 、弹性模量 E 及结构尺寸.

表 2 结构尺寸及材料信息

Tab.2 Structure size and material information

材料	单元类型	本构类型	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	截面
地下连续墙	板	弹性	26	20	厚度:1.0 m
衬砌	板	弹性	25	28	厚度:0.35 m
基坑底板	板	弹性	26	20	厚度:0.5 m
支撑	梁	弹性	25	24	矩形:0.8 m×1.0 m
圈梁	梁	弹性	25	24	矩形:1.0 m×1.0 m
立柱	梁	弹性	25	24	圆形:直径 0.6 m

1.2 工序设置

为了研究隧道受双基坑开挖的影响,建立了双基坑平行于既有隧道和双基坑垂直于既有隧道 2 个计算模型,2 个计算模型的施工工序相同,如表 3 所示.

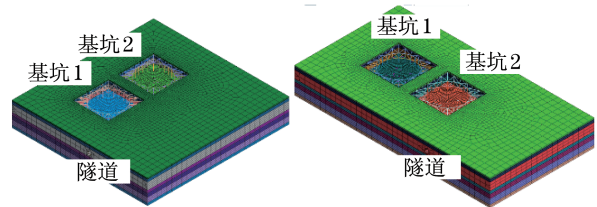
表 3 施工工序

Tab.3 Procedure of construction

工序	施工内容	工序	施工内容
工序 1	隧道施工,地应力平衡	工序 9	2 号基坑挡土墙与立柱施工
工序 2	1 号基坑挡土墙与立柱施工	工序 10	2 号基坑土体开挖至地下 2 m
工序 3	1 号基坑土体开挖至地下 2 m	工序 11	安装 2 号基坑第一道支撑与圈梁
工序 4	安装 1 号基坑第一道支撑与圈梁	工序 12	2 号基坑土体开挖至地下 14 m
工序 5	1 号基坑土体开挖至地下 8 m	工序 13	安装 2 号基坑第二道支撑与圈梁
工序 6	安装 1 号基坑第二道支撑与圈梁	工序 14	开挖 2 号基坑至地下 14 m
工序 7	开挖 1 号基坑至地下 14m	工序 15	安装 2 号基坑底板
工序 8	安装 1 号基坑底板		

1.3 数值模拟方案

结合上述工程信息,采用有限元软件建立模型,如图 3 所示.图 3(a)为隧道平行于两基坑开挖情



(a) 基坑与隧道平行布置

(b) 基坑与隧道垂直布置

图 3 双基坑开挖对既有地铁隧道影响的有限元模型

Fig.3 FEM of an existing tunnel for analysing the influence of adjacent double foundation pit excavation

况,图 3(b)为隧道垂直于两基坑开挖情况.

2 双基坑平行于既有隧道布置

通过模拟上述施工方案,研究不同施工阶段后隧道衬砌的整体变形,讨论基坑开挖对邻近隧道结构的影响.考虑隧道的上、下顶点为竖向位移改变最明显位置,选取隧道衬砌上侧顶点 A 与下侧顶点 C 研究隧道竖向位移;考虑隧道的左、右端点为水平位移改变最明显位置,选取隧道衬砌左侧顶点 B 与右侧顶点 D 研究隧道水平位移,具体位置如图 4 和图 5 所示.

2.1 双基坑平行于既有隧道布置时隧道的竖向位移

图 4(a)为隧道上侧 A 位置节点位移曲线.如图 4(a)所示,基坑施工使得对应的隧道 A 位置节点产生沉降.由工序 2 可知,在地下连续墙施工时,基坑周围土体沉降,引起隧道在该基坑影响范围内的竖向沉降.但随着基坑的开挖,隧道与基坑间土体上浮,对比工序 2,4,6,随着基坑的开挖,隧道 A 位置节点的最大沉降值不断减小.对比工序 3 和工序 4 可以发现,支撑结构与圈梁对隧道与基坑间土体上浮有一定的抑制作用.工序 3 隧道的最大位移为 -0.89 mm ,工序 4 为 -1.01 mm ,有效地减少了由于开挖对隧道造成的变形,且工序 4 的隧道变形均大于工序 3 的.对比工序 6 与工序 8 可以发现,底板浇筑后,隧道的最大位移由 -0.55 mm 增加至 -1.75 mm ,明显地增加了隧道的竖向位移.观察工序 9,11,13,15 可知,基坑 2 开挖时,在基坑 2 相应位置,隧道变形与基坑 1 开挖相似.两基坑对应位置的最大竖向变形均发生在工序 15,变形基本相同.

图 4(b)为隧道下侧 C 位置节点位移曲线,与图 4(a)对比发现,随着基坑的不断开挖,隧道的竖向变形也是不断减小的;但从工序 6 开始,隧道在基坑 1

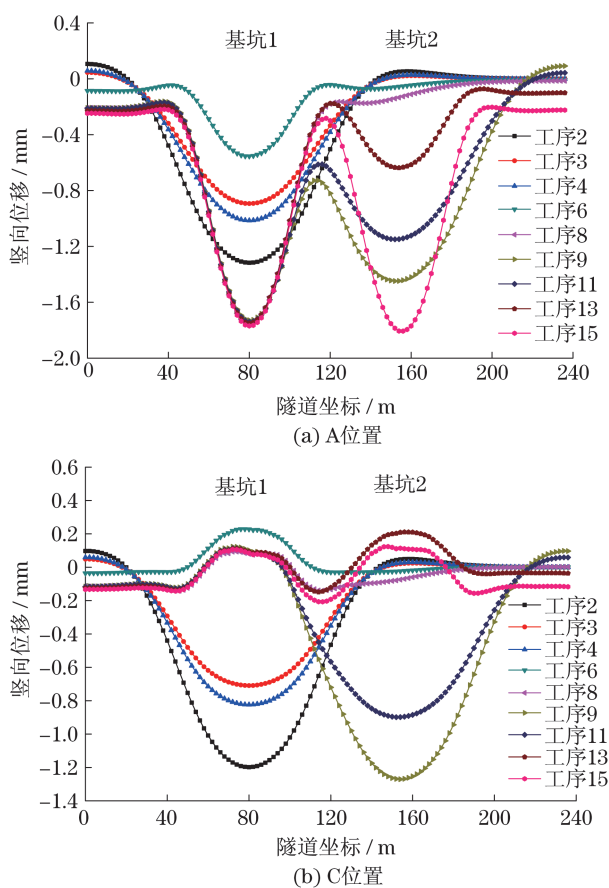


图4 双基坑平行于既有隧道的隧道竖向位移曲线

Fig.4 Vertical displacement curve of the tunnel parallel to the double foundation pit

对应位置产生明显的上拱变形.对比工序8与工序6可以发现,在底板浇筑后,对土体的上拱趋势起到了明显的抑制作用,隧道的竖向变形整体下移,但上拱趋势仍然存在.分析工序15可以发现,隧道的竖向变形基本是对称的,基坑2施工对隧道整体变形的影响与基坑1施工相似.

2.2 双基坑平行于既有隧道布置时隧道的水平位移

图5(a)为B位置节点水平位移曲线.如图所示,基坑开挖会使隧道产生向基坑方向的水平位移,且随着开挖的进行,隧道的水平位移也不断增加.对比工序3与工序4可以发现,工序3水平位移为1.26 mm,工序4水平位移为1.24 mm;支撑与圈梁的施工一定程度上减小了隧道的水平位移,但效果并不显著.对比工序2,4,6可以发现,地下连续墙施工基本不会对隧道水平位移产生影响;随着基坑的开挖,隧道的水平位移不断增加.在基坑2开挖时,隧道在基坑2开挖对应位置也有相同的变形趋势.分析所有工序可以发现,基坑1开挖在基坑2相应

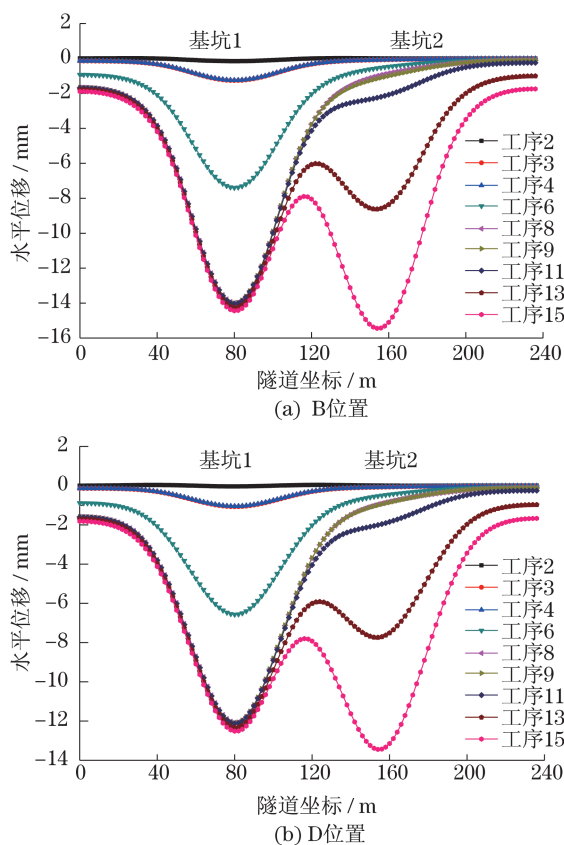


图5 双基坑平行于既有隧道的隧道水平位移曲线

Fig.5 Horizontal displacement curve of the tunnel parallel to the double foundation pit

位置隧道产生的水平位移较大,基坑2中心位置对应的隧道水平位移增加量为1.00 mm;但在基坑1开挖完成后,基坑2开挖在基坑1相应位置造成的水平位移较小,基坑1中心位置增加量仅为0.43 mm;开挖完成后,隧道在基坑2位置的水平位移大于基坑1位置的.

图5(b)为隧道右侧D位置节点水平位移曲线,与图5(a)相似,隧道左右两侧的变形趋势和变形均相同.

2.3 双基坑平行于既有隧道布置时隧道的变形

图6(见下页)为基坑2中心对应位置隧道剖面变形效果图.图中工序1为隧道零变形前位置,图中隧道各节点的变形位移均为放大100倍后的结果.结合图4可以发现,隧道竖向整体位移较小,最大变形均发生在两基坑中心对应位置;隧道上侧主要变形为沉降,隧道底部先沉降后拱起.隧道整体竖向变形为上下向中心挤压,且随着基坑的开挖,挤压效果越来越明显.结合图5可以发现,随着基坑的开挖,隧道整体发生指向基坑方向的水平位移,最大变形均发生在两基坑中心对应位置;基坑开挖对隧道近

基坑侧影响大于远基坑侧影响. 基坑水平位置整体变形为中心向两侧拉伸.

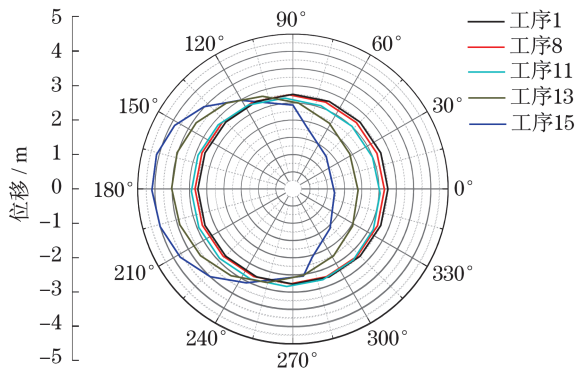


图6 双基坑平行于既有隧道的隧道变形

Fig.6 Deformation of the tunnel parallel to the double foundation pit

3 双基坑垂直于既有隧道布置

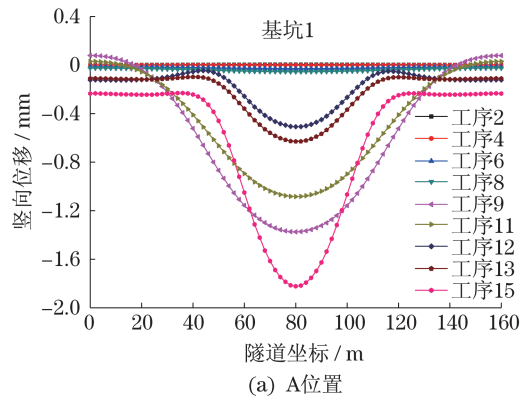
3.1 双基坑垂直于既有隧道布置时隧道的竖向位移

图7(a)为A位置节点位移曲线. 工序2,4,6,8均为较远的基坑施工,由图可知,远隧道的基坑开挖会造成土体整体沉降,随着基坑的开挖,隧道的沉降不断增加,但沉降值最大仅为 -0.05 mm,可以忽略不计. 对比工序12与工序13可以发现,支撑和圈梁的施工对基坑变形起到了很好的抑制作用,从而使隧道的竖向位移有明显的减小. 对比工序9,11,13,15可以发现,由于基坑开挖造成隧道与基坑间土体上浮,隧道竖向位移不断减小,底板的浇筑很好地抑制了隧道与基坑间土体上浮,但增加了隧道的竖向沉降. 分析工序9,11,13,15可以发现,隧道在基坑影响范围内变形较大,且随着基坑的进一步开挖,隧道的变形范围不断缩小.

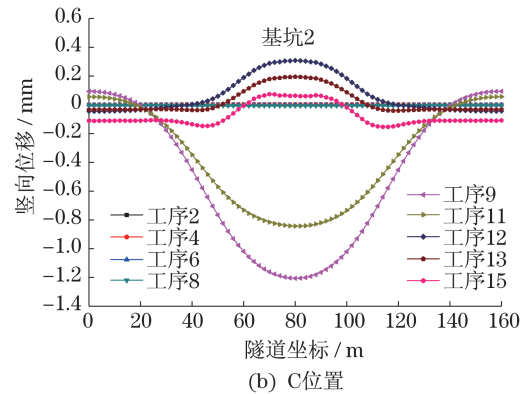
图7(b)为隧道底部C位置节点位移曲线. 对比工序9,11,13,15可以发现,随着基坑的开挖,隧道先产生下凹局势,受隧道与基坑间土体上浮作用的影响,隧道下凹趋势减弱,变形慢慢改变为上拱趋势. 随着基坑开挖深度的不断增加,隧道产生一个向上的位移,对比工序13与工序15可以发现,底板的浇筑则很好地抑制了隧道向上位移的增加,且使隧道产生了一个向下的整体沉降.

3.2 双基坑垂直于既有隧道布置时隧道的水平位移

图8(a)为隧道左侧B点位置节点水平位移曲



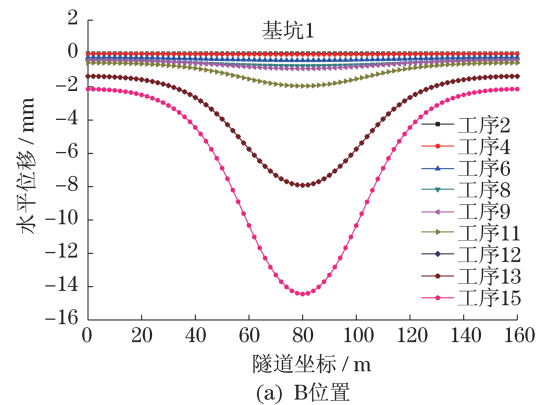
(a) A位置



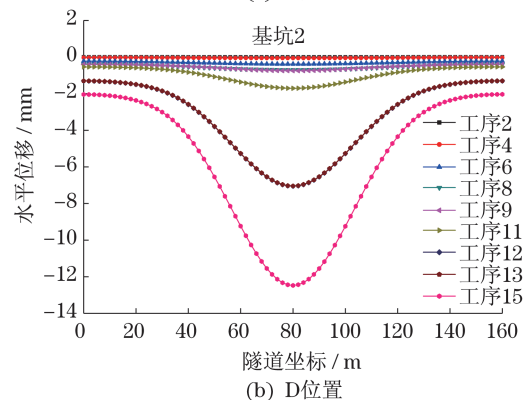
(b) C位置

图7 双基坑垂直于既有隧道的隧道竖向位移曲线

Fig.7 Vertical displacement curve of the tunnel perpendicular to the double foundation pit



(a) B位置



(b) D位置

图8 双基坑垂直于既有隧道的隧道水平位移曲线

Fig.8 Horizontal displacement curve of the tunnel perpendicular to the double foundation pit

线,图 8(b)与图 8(a)相似,隧道左右两侧的变形趋势和变形均相同。

3.3 双基坑垂直于既有隧道布置时隧道的变形

图 9 为基坑 2 中心对应位置隧道剖面变形效果图。图中工序 1 为隧道零变形前位置,图中隧道各节点的变形位移均为放大 100 倍后的结果。分析工序 1 与工序 8 可以发现,远基坑开挖对隧道位移与变形影响极小,图中工序 1 和工序 8 隧道基本重合。结合图 7 可以发现,隧道上侧发生向下的沉降;隧道底部发生上拱趋势。隧道整体的竖向变形为上下向中心挤压。结合图 8 可以发现,隧道整体向开挖基坑靠拢,基坑开挖对隧道近基坑侧影响大于远基坑侧影响。基坑整体的水平变形为中心向两侧拉伸。

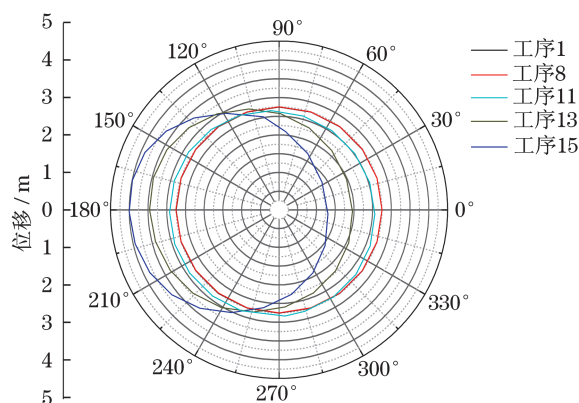


图 9 双基坑垂直于既有隧道的隧道变形

Fig.9 Deformation of the tunnel perpendicular to the double foundation pit

4 结 论

研究了双基坑开挖对邻近隧道的影响。通过三维有限元模拟软件进行了数值分析,得到以下结论:

a. 基坑开挖会使邻近隧道上部产生下凹趋势沉降,隧道底部则会产生上拱趋势的竖向变形。随着基坑开挖深度的不断增加,隧道与基坑间土体上浮会减小隧道上部沉降趋势,增加隧道底部上拱趋势,从而使隧道在竖向的位移较小。隧道本身的竖向变形为向中心挤压,且在基坑开挖处变形最为明显。

b. 基坑开挖会使邻近隧道发生指向基坑位置的水平位移,且越靠近基坑中心位置,隧道的水平位移越大。随着基坑开挖深度的不断增加,隧道的水平位移会不断增加,隧道右侧与隧道左侧变形基本相同。基坑开挖会使隧道产生中心向两侧拉伸变形,且在基坑开挖处的变形最为明显。

c. 双基坑平行或垂直既有隧道布置均会对隧

道产生较大的水平位移影响。平行布置时,两基坑均会使隧道产生较大的变形,且先开挖基坑对总体变形的影响较大,后开挖基坑对先开挖基坑变形影响较小,但在后开挖基坑变形处产生的隧道水平位移较大。垂直布置时,远隧道基坑对隧道位移与变形的影响很小,且影响均为整体的水平位移。近隧道基坑的开挖对隧道变形影响有决定性的作用。

参考文献:

- [1] TAN Y, LI X, KANG Z J, et al. Zoned excavation of an oversized pit close to an existing metro line in stiff clay: case study [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(6): 04014158.
- [2] ZHANG H B, CHEN J J, FAN F, et al. Deformation monitoring and performance analysis on the shield tunnel influenced by adjacent deep excavations [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2017, 30(2): B4015002.
- [3] XING H F, XIONG F, WU J M. Effects of pit excavation on an existing subway station and preventive measures [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(6): 04016063.
- [4] ZHANG X M, OU X F, YANG J S, et al. Deformation response of an existing tunnel to upper excavation of foundation pit and associated dewatering [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(4): 0000814.
- [5] 陈锦剑, 王建华, 杜毅, 等. 两侧深基坑开挖影响下浅埋运营隧道的位移特性 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1163 - 1167.
- [6] 高广运, 吴勇, 张先林, 等. 深基坑开挖与邻近隧道相互影响的分析 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(S1): 114 - 117.
- [7] 伍尚勇, 杨小平, 刘庭金. 双侧深基坑施工对紧邻地铁隧道变形影响的分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3452 - 3458.
- [8] 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, 34(5): 1459 - 1468.
- [9] 郭力群, 程玉果, 陈亚军, 等. 内支撑基坑群开挖相互影响的三维数值分析 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 711 - 716.
- [10] 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(S2): 391 - 395.
- [11] 林杭, 陈靖宇, 郭春, 等. 基坑开挖对邻近既有隧道变形影响范围的数值分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4240 - 4247.
- [12] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 599 - 612.

(编辑: 石 瑛)