

基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究

高广运¹, 高盟^{1,2}, 杨成斌³, 余志松⁴

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 山东科技大学土木建筑工程学院岩土力学研究所, 山东 青岛 266510; 3. 合肥工业大学建筑设计研究院, 安徽 合肥 230009; 4. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200082)

摘要: 以上海某邻近地铁隧道的基坑工程为背景, 运用 FLAC-3D 软件建立三维数值分析模型, 对基坑施工进行全过程动态模拟。结果表明: 计算结果与工程监测数据基本吻合, 邻近地铁隧道单侧基坑开挖可引起隧道结构的不对称变形。为保护邻近隧道, 提出并采用了坑外二次加固的施工新工艺, 首次指出地基加固体和地下结构物作为异质体对邻近基坑开挖产生的位移传递具有阻断作用。并对不同的施工方案进行数值模拟, 对比分析表明, 对紧贴基坑地下连续墙的土体进行二次加固及结构逆筑施工, 可有效控制相邻隧道变形。

关键词: 地铁隧道; 开挖; 二次加固; 变形控制; 屏障作用

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)03-0453-07

作者简介: 高广运(1961-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学、环境土工、桩基础等的教学与科研工作。

E-mail: gaogy@tongji.edu.cn。

Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures

GAO Guang-yun¹, GAO Meng^{1,2}, YANG Cheng-bin³, YU Zhi-song⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 3. Institute of Architectural Design, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: According to the practice of deep excavation adjacent to the subway tunnel in Shanghai, the software FLAC-3D is employed to establish a numerical model to simulate the whole dynamic process of the deep excavation. The calculated results show good agreement with the field measurements. The two results show that deep excavation adjacent to the operating metro tunnel at its one side induces uneven deformation. In order to protect the adjacent existing tunnel, a construction technology of the two-time reinforcement outside the deep excavation is brought forward and adopted. Underground obstacle as the barrier against the displacement transfer induced by deep excavation is presented for the first time. Different construction methods are simulated by the numerical method. The results indicate that the two-time reinforcement outside the deep excavation and the reversed construction method can effectively control the deformation of the metro tunnel.

Key words: metro tunnel; excavation; two-time reinforcement; deformation control; barrier effect

0 引言

随地下空间的大规模开发, 较多的基坑工程紧邻或位于地铁隧道上方。基坑开挖使相邻地铁隧道的原有受力平衡被打破, 必然引起地应力的重分布^[1-3], 从而引起地铁隧道产生相应的内力和变形。而已运营地铁线路对变形要求极为严格: 结构最大位移不超过 20 mm, 隧道变形曲率半径必须大于 15000 m, 相对弯曲不大于 1/2500。因此, 基坑施工过程中必须采取严格工程措施, 否则将影响地铁车站的正常使用和安全^[4]。

近年来许多学者对该问题进行研究。一方面, 结合施工监测数据, 采用半经验半解析算法分析相邻基

坑施工引起隧道的变形, 提出控制隧道变形的施工措施, 如文献[5, 6]利用软土基坑隆起变形的残余应力法和软土的时空效应理论, 研究了隧道上方基坑开挖引起的隧道上抬, 指出坑内加固和时空效应法施工可有效控制隧道上抬。文献[7]以上海地铁二号线基坑工程实际为背景, 研究了基坑与邻近隧道的相互影响, 指出地基基础加固和结构加固可有效控制隧道的变形。文献[8]研究了位于软土基坑下地铁隧道的位移变

基金项目: 上海市重点学科建设项目 (B308)

收稿日期: 2008-10-20

化,分析了基坑工程的时间、空间效应对隆起的影响,提出了时间、开挖宽度影响系数,推导出考虑基坑施工影响的隧道位移变形的实用计算方法。文献[9]基于邻近基坑的地铁隧道变形监测结果,从隧道的垂直沉降、水平移动以及隧道的横向变形角度探讨了基坑开挖对邻近地铁隧道的影响。文献[10]运用 Mindlin 经典弹性理论解推导出因开挖卸荷引起隧道结构的附加应力,进而通过弹性地基梁理论得出了计算隧道隆起的解析算法。但这些成果多是以工程经验为基础,结合实测数据,对不同施工措施进行定性分析,而少有定量计算,虽然也有一些半经验半理论公式,但不能模拟基坑的施工过程。

另一方面,随着计算技术的发展,越来越多的计算软件和程序可用于模拟基坑的施工过程,如文献[11]采用二维有限元程序分析了地铁基坑周围环境位移场的分布特点及已建车站结构的变形和内力分布。文献[12]采用二维有限元对邻近隧道的深基坑工程的不同施工方案进行数值模拟。文献[13]则利用三维有限元方法分析了穿越地铁基坑施工引起的原有车站应力和位移的重分布。基坑问题为三维问题,三维模型较二维模型显然能更好的模拟基坑的开挖过程。但有限元计算程序对于小变形问题计算较为准确,对于模拟基坑开挖等大变形问题效果不是很理想,文献[11]的计算结果与实测值的对比也证实了这一点。而基于有限元差分法的 FLAC-3D 程序不仅能很好的反映基坑开挖的三维问题和支护结构与土体的相互作用问题,而且 FLAC-3D 程序能很好的模拟土体材料受力作用下屈服、塑性流动、软化直至大变形等力学行为。文献[14]利用 FLAC-3D 程序对台北国际金融中心大楼的深开挖进行了数值模拟,研究了基坑的角隅效应和潜变行为;文献[15]则利用 FLAC-3D 程序对深开挖进行全过程模拟,研究了深开挖对邻房的保护效果。

为此,本文结合上海某邻近地铁隧道的基坑工程实例,采用 FLAC-3D 软件,建立三维弹塑性模型,模拟了施工中提出的坑外二次加固的施工新工艺、逆作法施工等方案。

1 坑外二次加固新工艺

1.1 工程概况

地铁七号线静安寺车站位于上海市中心区繁华地段,车站结构形式为地下三层(岛式)双柱三跨现浇钢筋混凝土框架结构。车站全长 198 m,平面上呈喇叭型。标准段基坑净宽为 25.96~26.75 m,基坑开挖标准段深 23.35 m,端头井深达 25.09 m,地下连续墙围护结构深 43.50 m。七号线车站北侧有运营的地铁

二号线,车站北端头井距二号线车站区间隧道仅为 15 m。二号线区间与七号线静安寺站相对位置如图 1 示。

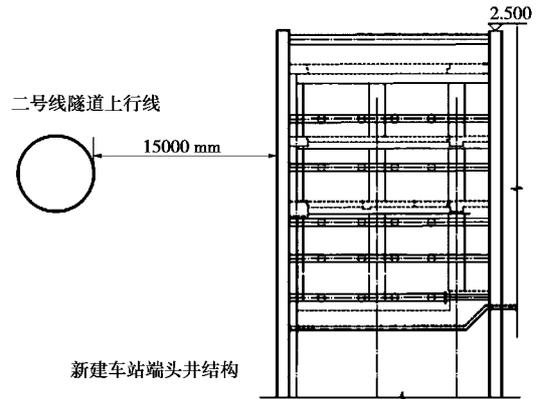


图 1 隧道与车站结构的相对位置图

Fig. 1 Relative position of metro and subway station

1.2 坑外二次加固新工艺

为保护二号线隧道,提出了坑外二次加固的新工艺,并综合采用逆作法和分块开挖的施工方案。

(1)分块施工:先在北端头井与车站主体连接处增设一道封头槽壁,使北端头井形成一个封闭空间,进行相对独立施工,待端头井施工完后,再施工车站主体。这样可利用端头井对由车站主体施工引起的位移的屏障作用,减小对隧道的影响。

(2)坑外地基二次加固施工:在北端井盾构进出洞区域进行地基加固,即地下墙施工前后,分两次在坑外进行地基加固,先外排 SMW 工法、后内排旋喷桩。两次加固宽度均为 3 m,共 6 m 范围,加固体强度达 0.8MPa。其中 SMW 工法搅拌桩长 26.5 m,旋喷桩加固至坑底 3 m 处。坑外二次加固工艺流程如下:

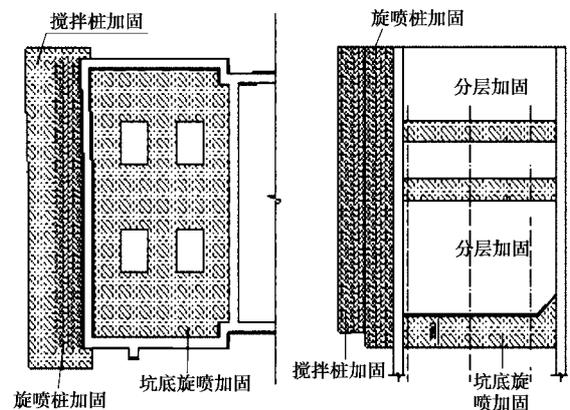


图 2 加固方式

Fig. 2 Reinforcement process

a) 地下墙施工前,外排 3 m 用 SMW 工法搅拌桩完成一次加固,达到强度后进行地下墙施工。

b) 地下墙施工后,对坑外内排 3 m 区域土体用

旋喷桩进行第二次加固。为进一步减小基坑开挖变形, 坑内也进行高压旋喷加固, 同样深达坑底 3 m 处。在下一层和下二层楼板位置增加分层加固措施, 加固布置如图 2 示。

c) 逆作法施工: 为减小超深基坑开挖而引起过量沉降变形, 对静安寺车站的端头井下一层以下结构采用混凝土框架逆作的施工技术, 同时第一道设置为混凝土支撑, 以增加支撑体系刚度。

2 基坑开挖的数值计算与分析

车站北端头井为两柱三跨结构, 净尺寸为 23.71 m × 13.05 m (长度 × 宽度)。顶板厚 800 mm, 下一层板厚 450 mm, 下二层板厚 450 mm, 底板厚 1300 mm, 地下一层至地下三层的内衬墙厚度 600 mm。顶板(顶板梁)、下一层板和下二层板(楼板梁)、底板(底板梁)、内衬墙混凝土等级为 C30, 车站内部结构柱混凝土等级为 C40, 垫层采用 C20 混凝土。主体结构的顶板、下一层板、下二层板及底板与围护结构(地下墙)的连接均采用钢筋连接方式。该基坑采用七道支撑, 其中第一道为混凝土支撑, 其余六道为钢管支撑。支撑平面图和剖面图如图 3, 4 示。

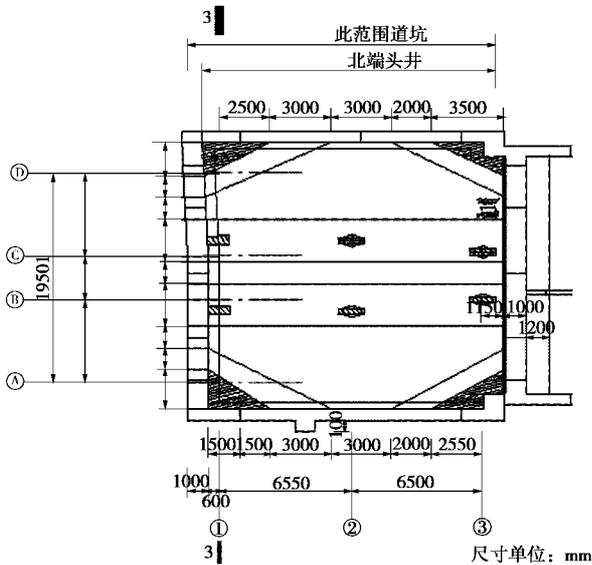


图 3 支撑平面图

Fig. 3 Plan of bracing

根据基坑实际开挖过程, 逆作法施工步骤如下:

- ①地基加固施工和地下连续墙施工;
- ②开挖至 -1.5 m;
- ③施工第一道支撑, 并开挖至 -5.5 m;
- ④施工第二道支撑, 开挖至 -9.0 m;
- ⑤施工第三道支撑, 开挖至 -10.0 m;
- ⑥施工下一层板;
- ⑦开挖至 -13.0 m;
- ⑧施工第四道支撑, 开挖至 -15.5 m;
- ⑨施工下二层板;
- ⑩拆除第四道支撑, 开挖至 -17.5 m;
- ⑪施工第五道支撑, 开挖至 -20.0 m;
- ⑫施工第六道支撑, 开挖至 -23.0 m;

- ⑬施工第七道支撑, 开挖至 -25.0 m;
- ⑭施工底板和下三层内衬;
- ⑮拆除第五、六、七道支撑, 浇筑下二层内衬;
- ⑯施工顶板;
- ⑰拆除第一、二、三道支撑, 浇筑下一层内衬。支撑和板的位置及尺寸见表 1。

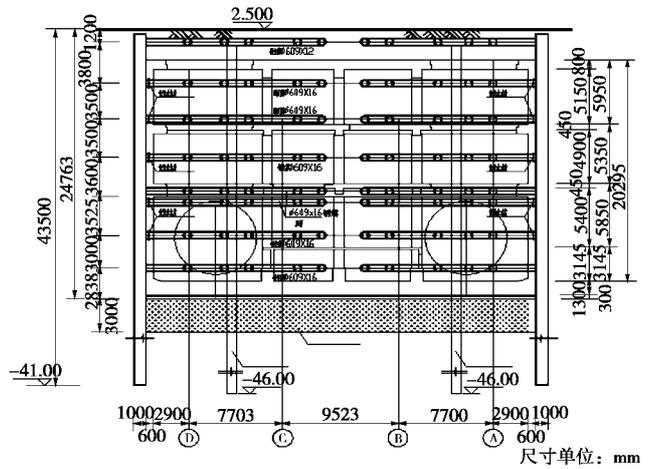


图 4 支撑剖面图

Fig. 4 Profile of bracing

表 1 基坑支撑及板数据

Table 1 Braces and plates in deep excavation

支撑道数及板的层数	中心标高	尺寸/mm
第一道(钢混)	1.600	800×800
顶板	-1.120	800
第二道(钢)	-2.420	Φ609
第三道(钢)	-5.920	Φ609
地下一层板	-6.8950	450
第四道(钢)	-10.220	Φ609
地下二层板	-12.245	450
第五道(钢)	-14.320	Φ609
第六道(钢)	-16.020	Φ609
第七道(钢)	-18.820	Φ609
底板	-21.640	1300

2.1 数值计算模型

为简化计算, 模型尺寸取为规则的六面体。由于车站北端头井结构关于 y 方向近似对称, 故取其一半, 经试算取计算区域为 160 m × 80 m × 90 m。单元网格采用不均匀网格, 共 61556 个单元, 66010 个节点, 见图 5。

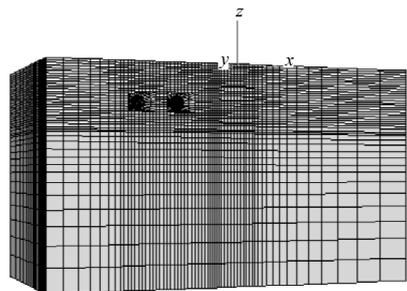


图 5 FLAC-3D 模型

Fig. 5 FLAC-3D model

土体、地下墙及梁、板、柱采用实体单元, 土体

共分4层；支撑和桩分别采用FLAC-3D提供的beam单元和pile单元。其中土体的本构模型采用Mohr-Coulomb弹性-完全塑性模型；地下墙及梁、板、柱、地基加固体采用线弹性模型。计算参数均为室内试验和施工中提供的参数，地下墙、梁、板、柱及混凝土支撑的弹性模量为28 GPa，泊松比为0.20，重度为25 kN/m³；钢支撑弹性模量为200 GPa，泊松比为0.3，重度为78 kN/m³；内排旋喷桩地基加固体弹性模量为15 GPa，泊松比为0.20，重度为20 kN/m³；外排SMW工法地基加固体弹性模量为28 GPa，泊松比为0.20，重度为21 kN/m³。加固体与天然土体及地下墙界面设接触单元。土体计算参数见表2。

表2 土体计算参数

Table 2 Soil parameters for computation

层号	厚度 /m	g /($kN \cdot m^{-3}$)	ν	c /kPa	j /($^{\circ}$)	E /MPa
①	28	18.0	0.35	15	16	20.0
②	4	19.6	0.40	45	17	35.5
③	12	18.7	0.33	4	33	64.0
④	56	18.5	0.33	8	25	70.0

2.2 计算结果分析

为保证地铁二号线的安全和运营，基坑施工过程中对隧道上行线竖向位移及水平位移进行监测。监测点布置见图6。图7、图8为车站端头井施工完成后的监测结果与计算结果对比。图9、图10分别为模型的水平位移和竖向位移云图，图11、图12分别为隧道的水平位移和竖向位移云图。

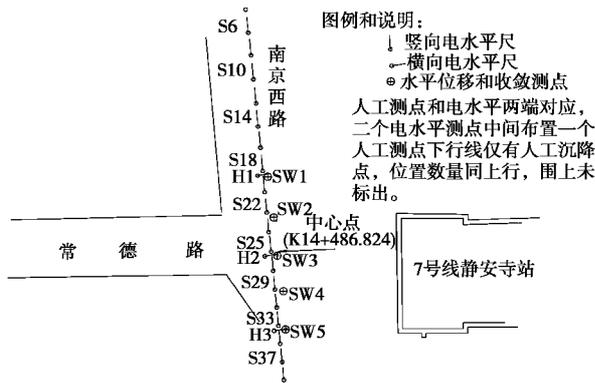


图6 监测点布置图

Fig. 6 Layout of monitoring site

通过计算值与实测值的对比，可以看出计算值与实测值基本一致，说明FLAC-3D模型是基本准确的，所选计算参数是合理的。同时，由图9和图10可知，加固侧的位移明显小于非加固侧，说明在靠近隧道一侧紧贴基坑地下墙进行地基加固可有效的减小隧道的位移，起到保护隧道的作用。加固体相对周边天然土体为刚度较大的“异质体”，具有减小位移的屏障作用。图11和图12表明在隧道一侧进行基坑施工可引起隧

道的不对称变形，近基坑侧隧道位移大于远基坑侧。

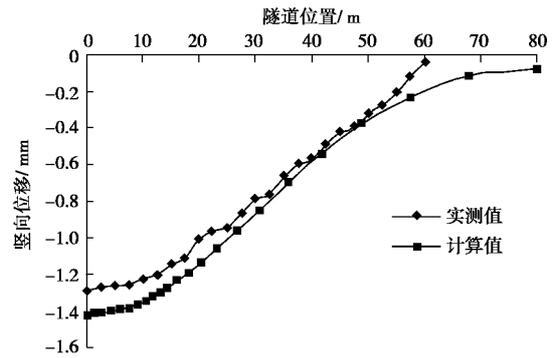


图7 隧道上行线z向位移实测值与计算值对比

Fig. 7 Comparison between measured and computed displacements in z direction for up-going line

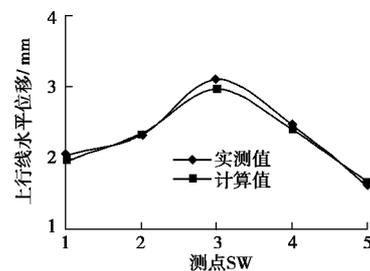


图8 隧道上行线x向位移实测值与计算值对比

Fig. 8 Comparison between measured and computed displacements in x direction for up-going line

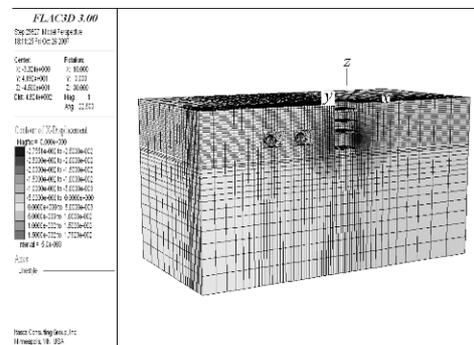


图9 模型的x向位移云图

Fig. 9 Contours of x-displacement of the model

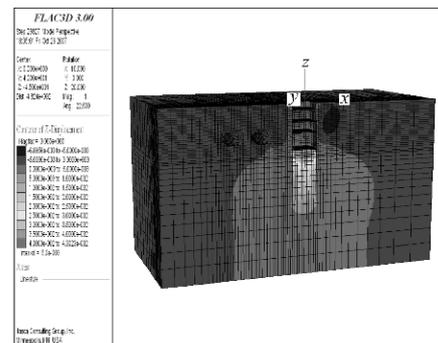


图10 模型的z向位移云图

Fig. 10 Contours of z-displacement of the model

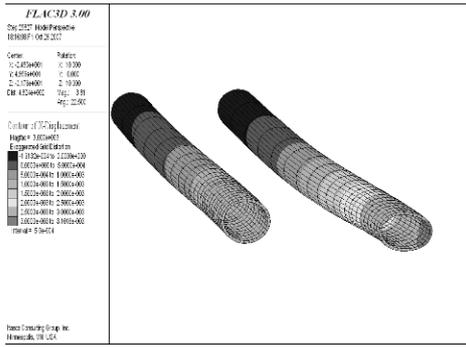


图 11 隧道 x 向位移云图

Fig. 11 Contours of x-displacement of the tunnel

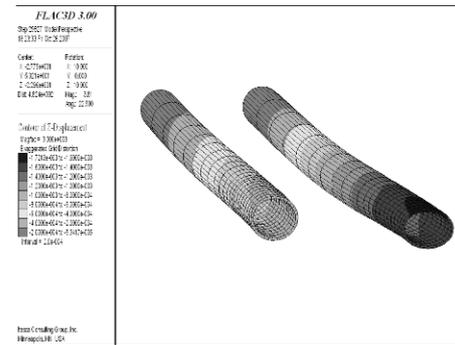


图 12 隧道 z 向位移云图

Fig. 12 Contours of z-displacement of the tunnel

2.3 不同施工方式的变形和受力分析

邻近地铁隧道基坑施工, 确保已有地铁隧道的安全和正常运行至关重要。设计和施工中提出了坑外二次加固的新工艺和逆作法施工等针对性的保护措施, 为分析这些措施对隧道的变形和受力性能, 对施工过程进行了数值模拟。

(1) 加固施工

坑外加固 6 m, 分两个阶段进行, 即先加固外排 3 m, 达到强度后, 施工地下连续墙, 当连续墙达到强度后再加固内排 3 m。这样可利用外排加固体的屏障作用, 减小由地下墙施工引起隧道的位移, 也可减小内排加固施工对隧道的扰动。图 13 和图 14 为坑外二次加固、一次加固及先施工地下墙后进行地基加固三种情况(除步骤 0 的施工顺序不同外, 其余步骤完全相同)下车站端头井施工完成时的隧道上行线水平位移与竖向位移对比。

由图 13 和图 14 可知, 二次加固的施工方式隧道产生的位移最小, 一次加固后施工地下墙次之, 先施工地下墙后加固隧道的位移最大。因为, 地下墙施工和内排加固引起周围土体的位移, 但由于外排加固体(刚度远大于土体)的存在限制了加固体外侧土体的位移, 使地下墙施工和内排加固引起的位移场间断, 即阻断了土体的位移传递, 从而起到减小隧道位移的作用。当然, 仅第二次内排加固时, 已施工的墙外加固体和地下墙为刚度远大于周围土体的“异质体”, 具

有减小位移的屏障作用。

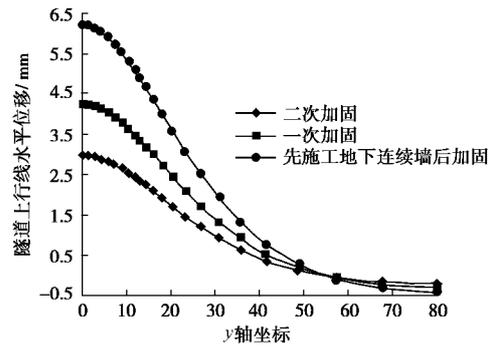


图 13 3 种施工方式隧道上行线 x 向位移计算值对比

Fig. 13 Comparison of computed displacements in x direction for up-going line among three kinds of construction methods

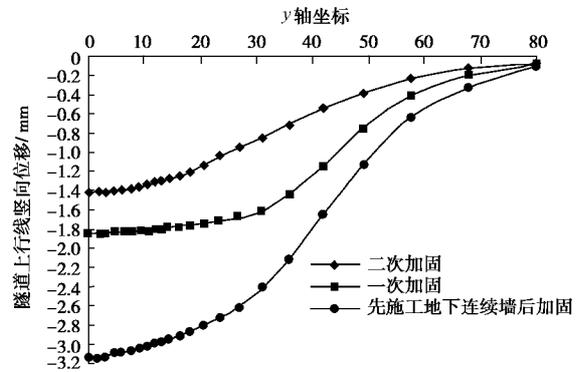


图 14 3 种施工方式隧道上行线 z 向位移计算值对比

Fig. 14 Comparison of computed displacements in z direction for up-going line among three kinds of construction methods

为分析加固体对隧道的保护效果, 对坑外加固(二次加固)和坑外无加固两种施工方式的基坑施工过程进行数值模拟。其中除有无加固外, 两种施工方式的施工步骤完全相同。图 15 和图 16 分别为两种施工方式下车站端头井施工完成后隧道上行线的水平位移和竖向位移对比。由图可知, 坑外加固对减小隧道位移效果较好, 相对与无加固情况, 水平位移和竖向位移分别减小了 73.6% 和 75.7%。

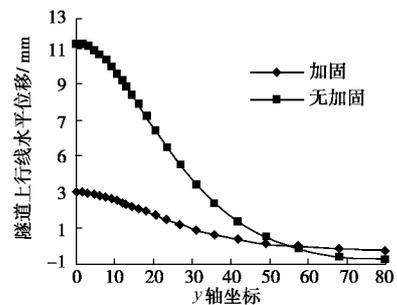


图 15 两种施工方式隧道上行线 x 向位移计算值的对比

Fig. 15 Comparison of computed displacements in x direction for up-going line between two construction methods

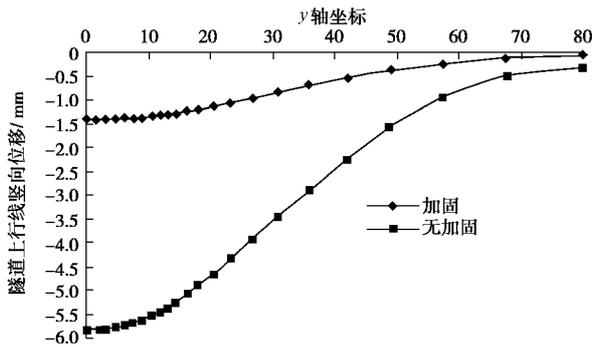


图 16 两种施工方式隧道上行线 z 向位移计算值的对比

Fig. 16 Comparison of computed displacements in z direction for up-going line between two kinds of construction methods

(2) 逆作施工

为分析逆作施工对隧道的保护效果, 对坑外二次加固逆作和坑外二次加固顺作两种施工过程进行数值模拟。坑外加固顺作施工步骤如下: ①地基加固和地下连续墙施工; ②开挖至-1.5 m; ③施工第一道支撑, 开挖至-5.5 m; ④施工第二道支撑, 开挖至-9.0 m; ⑤施工第三道支撑, 开挖至-13.0 m; ⑥施工第四道支撑, 开挖至-17.5 m; ⑦施工第五道支撑, 开挖至-20.0 m; ⑧施工第六道支撑, 开挖至-23.0 m; ⑨施工第七道支撑, 开挖至-25.0 m; ⑩施工底板和下三层内衬; ⑪拆除第五、六、七道支撑, 施工下二层板和下二层内衬; ⑫拆除第四道支撑, 施工下一层板和下一层内衬; ⑬拆除第一、二、三道支撑, 施工顶板。

图 17 和图 18 分别为两种施工方式隧道上行线的水平位移和竖向位移计算值, 有图可知, 逆作施工有效的控制了隧道的位移。逆作法在基坑开挖过程中进行结构施工, 增大了基坑的整体刚度, 使围护结构的变形减小, 限制了周围土体的运动, 从而控制隧道的位移。

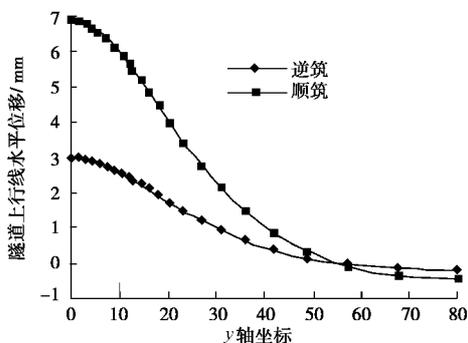


图 17 两种施工方式隧道上行线 x 向位移计算值

Fig. 17 Computed displacements in x direction for up-going line for two kinds of construction methods

(3) 分块施工

车站在施工过程中采取了分块施工的方案, 即在

北端头井与车站主体连接处增设一道封头槽壁, 使北端头井形成一个封闭空间, 进行相对独立施工, 待端头井施工完成后, 再由北向南依次进行车站主体的施工。根据本文提出的“地下异质体对位移传递具有阻断作用”, 北端头井结构完成后, 作为地下结构物对车站主体施工引起的位移传递有阻断作用, 从而可减少车站主体施工对隧道的影响, 起到保护隧道的目的。

文中图示隧道 x 方向和 z 方向位移均指 $y=0$ 平面上隧道拱顶的位移。 x 为正值表示向靠近基坑方向移动, x 为负值表示向远离基坑方向移动, z 为正值表示上抬, z 为负值表示下沉。

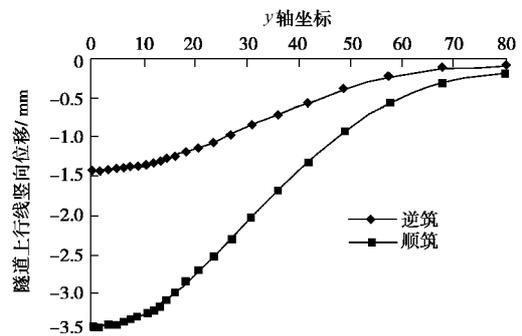


图 18 两种施工方式隧道上行线 z 向位移计算值

Fig. 18 Computed displacements in z direction for up-going line for two kinds of construction methods

3 结 论

基于 FLAC 软件, 建立模拟基坑开挖过程的三维模型, 分析了邻近运营地铁隧道基坑施工的工程实例, 模拟了主要施工方式及施工参数, 并进行对比分析。结论如下:

(1) 邻近运营地铁隧道单侧基坑开挖引起隧道的不对称变形, 表现为近基坑侧隧道位移大于远侧位移。

(2) 坑外地基二次加固新施工工艺流程, 可显著控制隧道的位移; 逆筑施工可有效的减小隧道水平和竖向位移。

(3) 地基加固体和地下结构物作为异质体(刚度远大于天然土体)具有减小位移的屏障作用, 对邻近基坑施工引起的位移传递具有阻断作用。

参考文献:

- [1] VILLY A. KONTOGIANNI, STATHIS C Stiros. Induced deformation during tunnel excavation: evidence from geodetic monitoring[J]. Engineering Geology, 2005, 79: 115 - 126.
- [2] 孙 钧. 城市地下工程活动的环境土工学问题(上)[J]. 地下工程与隧道, 1999(3): 2 - 6. (SUN Jun. Research on

- environment soil engineering works during underground construction activities in urban area[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 1999(3): 2 - 6. (in Chinese))
- [3] 孙 钧. 城市地下工程活动的环境土工学问题(下)[J]. *地下工程与隧道*, 2000(1): 2 - 7. (SUN Jun. Research on environment soil engineering works during underground construction activities in urban area[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2000(1): 2 - 7. (in Chinese))
- [4] KONTOGIANNI Villy A, TZORTZIS A, STATHIS C Stiros. Deformation and failure of the Tymfristos tunnel, Greece[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 2004, **130**(10): 1004 - 1013.
- [5] 刘纯洁. 地铁车站深基坑位移全过程控制与基坑邻近隧道保护[D]. 上海: 同济大学, 2000. (LIU Chun-jie. The whole stage control of the displacement of the deep excavation of metro tunnel station and protection of the adjacent metro tunnel station[D]. Shanghai: Tongji University, 2000. (in Chinese))
- [6] 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**(3): 202 - 207. (LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong, HOU Xue-yuan. The prediction and control of rebound deformation of the existed tunnels right under excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, **20**(3): 202 - 207. (in Chinese))
- [7] 程 斌, 刘国彬. 基坑工程施工对邻近建筑物及隧道的相互影响[J]. *工程力学*, 2000(A03): 486 - 491. (CHENG Bin, LIU Guo-bin. The effect to the adjacent building and tunnel due to excavation[J]. *Engineering Mechanics*, 2000(A03): 486 - 491. (in Chinese))
- [8] 吉茂杰, 刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J]. *同济大学学报*, 2001(5): 531 - 535. (JI Mao-jie, LIU Guo-bin. Prediction method of displacement due to excavation[J]. *Journal of Tongji University*, 2001(5): 531 - 535. (in Chinese))
- [9] 蒋洪胜, 侯学渊. 基坑开挖对临近软土地铁隧道的影响[J]. *工业建筑*, 2002(5): 53 - 56. (JIANG Hong-sheng, HOU Xu-yuan. The influence of deep excavation on adjacent metro tunnel in soft ground[J]. *Industrial Building*, 2002(5): 53 - 56. (in Chinese))
- [10] 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): 91 - 94. (CHEN Yu, LI Yong-sheng. Calculation of tunnel heaving due to unloading of pit excavation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005(1): 91 - 94. (in Chinese))
- [11] 刘 燕, 刘国彬, 刘 涛. 大型综合地铁换乘车站施工对周围环境影响分析[J]. *建筑结构*, 2008, **38**(4): 94 - 98. (LIU Yan, LIU Guo-bin, LIU Tao. Study on surround ground movement caused by deep excavation of exchanging subway station[J]. *Building Structures*, 2008, **38**(4): 94 - 98. (in Chinese))
- [12] 戚科骏, 王旭东, 蒋 刚, 等. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **11**(增 2): 5485 - 5488. (QI Ke-jun, WANG Xu-dong, JIANG Gang, et al. The prediction and control of rebound deformation of the existed tunnels right under excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **11**(S2): 5485 - 5488. (in Chinese))
- [13] 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 - 825. (KONG Xiang-peng, LIU Guo-bin, LIAO Shao-ming. 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 - 825. (in Chinese))
- [14] 邹瑞卿. 台北都会区超高层建筑深开挖角隅效应及潜变行为之数值分析[D]. 台北: 国立成功大学, 2002. (ZOU Rui-qing. A study on hardening/softening elasoplastic behavior and creep behavior of TIFC deep excavation[D]. Taipei: National Cheng Kung University, 2002. (in English))
- [15] 黄山寿. 微型桩于台北都会区超高层建筑之深开挖防护三维数值分析[D]. 台北: 国立成功大学, 2002. (HUANG Shan-shou. Three-dimensional analysis of the effect of micropile protection on deep excavation of high-rise building in Taipei Metropolitan[D]. Taipei: National Cheng Kung University, 2002. (in English))