

紧邻运营地铁进行基坑施工的影响因素研究

张治国^{1,2}, 徐 晨¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 重庆交通大学 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地, 重庆 400074)

摘要: 基于上海地区某深基坑工程施工方案, 建立了紧邻运营地铁隧道的基坑开挖变形影响的有限元数值模型, 重点分析了基坑围护支撑的数量和位置、基坑土体加固、地铁隧道位置、隧道下卧层土体和地下连续墙刚度对基坑周边地层以及隧道变形的影响。结果表明: 基坑围护支撑数目及位置的选择对周边地层和隧道变形产生影响较大; 隧道的存在对土体沉降具有“遮拦效应”, 在一定程度上能够减少坑外土体沉降; 增加下卧层土体模量和地下连续墙的刚度可减少坑外地表沉降, 有效控制地铁隧道的变形。

关键词: 基坑开挖; 支撑数量和位置; 隧道位置; 土体模量; 地下墙刚度; 影响因素

中图分类号: TU 452 **文献标志码:** A

Influencing Factors of Foundation Pit Excavation Adjacent to Operating Metro Tunnel

ZHANG Zhiguo^{1,2}, XU Chen¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on a deep foundation pit engineering construction scheme in Shanghai, a finite element model was established to study the deformation effect of excavation on operating metro tunnels. The factors, including the number and position of foundation pit supports, foundation pit reinforcement, position of tunnels, sub-layer soil stiffness and the diaphragm wall stiffness, were focused to analyze their effects on surrounding strata and tunnel deformation. The results show that the number and position of supports have a significant impact on the surrounding strata and tunnel deformation. The existence of tunnels may have a “sheltering effect” on soil settlements and thereafter reduce the settlements of ground outside the foundation pit. The increase of sub-layer soil modulus and stiffness of diaphragm wall can reduce the settlements of ground outside the foundation pit and effectively control the tunnel deformation.

Keywords: foundation pit excavation; number and position of supports; tunnel position; soil modulus; diaphragm wall stiffness; influencing factors

收稿日期: 2014-12-21

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(15ZR1429400); 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地开放基金资助项目(CQSLBF-Y15-1)

第一作者: 张治国(1976-), 男, 副教授. 研究方向: 隧道及地下建筑工程. E-mail: zgzhang@usst.edu.cn

近年来,随着我国城市地下工程的迅猛发展,越来越多的大型深基坑工程紧邻运营地铁隧道施工.基坑开挖卸荷会使周围地层产生差异沉降,尤其会使邻近地铁隧道受到基坑施工的影响,如果施工不当,变形控制措施不及时,会造成地面建筑物开裂、地铁隧道渗水等问题,严重时会造成生命财产损失.所以,在基坑设计过程中,如何预估地表沉降、围护结构以及临近隧道的变形是设计中的关键问题之一.

目前,一些学者针对这一问题进行了广泛的研究,主要方法包括两阶段解析法^[1-2]、有限元数值模拟法^[3-6]、室内试验和现场监测法^[7-8],以及基于监测数据的反分析法^[9].Doležalová^[3]利用二维有限元分析方法模拟了紧邻地铁隧道的深基坑施工的整个过程以及坑内堆载情况,分析了基坑开挖引起的周围土体和隧道衬砌的位移和应力改变.曾亚武等^[4]采用FLAC 3D软件对深基坑开挖引起的坑底隆起及地表变形进行了数值模拟.唐卫平等^[5]以地下车站深基坑工程为依托,运用有限元软件PLAXIS对围护结构的深层水平位移、坑底土体隆起、周边地层变形和支撑轴力变化进行了研究.李四维等^[6]利用有限元数值模拟方法分析了基坑开挖过程中围护桩体和桩顶的位移及基坑周围土体地表沉降变化规律.饶平平等^[7]以上海市黄浦区洛克外滩源深基坑工程为背景,结合大量现场实测数据,系统地分析了基坑开挖过程中围护结构变形、地表沉降以及邻近建筑物的变形规律.周奎等^[8]结合萧山北干山永久路新开隧道下穿人防工程监测项目,研究了隧道施工对邻近既有工程影响的监测方法.木林隆等^[9]基于实测数据,利用反分析法研究了基坑开挖引起的土体位移.

加固基坑周边土体往往可以较好地控制基坑施工引起的变形,起到保护作用.针对基坑加固对周边土工环境产生的影响,一些学者也进行了研究.侯新宇等^[10]借助有限元工具分析了被动区土体加固对地铁换乘站深基坑变形的影响.郑俊杰等^[11]、马邸等^[12]和张志伟等^[13]都针对基坑开挖段被动区不同加固方式的加固效果进行了分析.刘溢等^[14]分析了被动区加固对超大深基坑变形的影响.俞缙等^[15]采用三维有限元数值模拟方法对比分析了基坑坑内未经加固和加固两种工况对邻近既有地铁盾构隧道变形的影响.裴行凯等^[16]通过有限元模拟对比分析了地铁保护方案.詹祥元等^[17]通过数值模拟方法分析了不同加固方案下基坑开挖引起的围护结构及周边

地表变形规律.

然而,现有研究成果较少涉及到支撑位置和数量的选择对基坑施工的影响,特别是对紧邻隧道变形的影响研究较少.考虑到这一点,本文结合上海某深基坑工程,借助二维有限元软件对施工过程进行了完整的模拟,针对施工过程中支撑数目和位置的选择对周边环境的影响进行了分析.此外,本文还针对基坑加固、地铁隧道位置以及下卧层土体和地下连续墙的刚度等因素着重分析了周边地层变形、围护结构侧移以及邻近地铁隧道的位移.研究结果可为正确选择基坑设计和施工方案提供一定的理论依据.

1 工程概况

上海交响乐团迁建工程位于上海徐汇区复兴中路1380号,场地南侧为复兴中路,其正下方为轨道交通10号线,基坑东西向长约170 m,南北向最宽处约66 m,基坑面积约为9 788 m².一道分隔墙将基坑分成东西两部分,东区开挖深度为11.7 m,西北角凸出区域开挖深度为11.7 m,中间区域开挖深度为15 m.开挖深度内深坑4道环撑、浅坑3道环撑.图1为基坑的平面布置图.

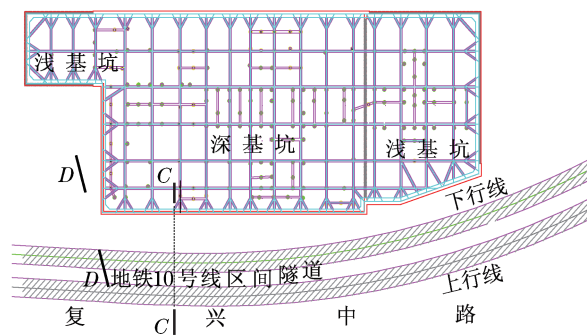


图1 基坑平面布置图

Fig.1 Plane view of the foundation pit project

根据勘探时现场土层鉴别、原位测试和土工试验成果综合分析,场地地基土80 m深度范围内的地层形成于第四纪全新世至上更新世,主要有粘性土、粉性土和砂土组成.按地层沉积时代、成因类型及其物理力学性质指标的差异可划分为10层.场地的土层分布及物理力学参数如表1所示.表1中, d 为土层厚度, γ 为土体自然重度, c 为粘聚力, φ 为内摩擦角, E 为压缩模量.潜水平平均地下水位在0.5~0.7 m,水位呈季节性波动,勘察期间的水位埋深为1.10~1.68 m.本基坑设计采用地下水位埋深为

0.5 m.

表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical-mechanical parameters of soil

土层名称	d/m	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c/kPa	$\varphi/^\circ$	E/MPa
① ₁ 杂填土	1.2	18.0	0	20	2.53
① ₂ 素填土	1.1	18.0	0	20	2.55
② 褐黄色粉质粘土	1.6	18.4	19	19	4.48
③ 灰色淤泥质粉质粘土	4.7	17.6	11	16	2.54
④ 灰色淤泥质粘土	7.3	16.8	10	12	2.09
⑤ _{1a} 灰色粘土	3.5	17.5	13	13.5	3.36
⑤ _{1b} 灰色粉质粘土	13.2	18.1	15	18	4.66
⑥ 暗绿色粉质粘土	3	19.6	40	25	7.99
⑦-1 砂质粘土	4	19.6	4	35	6.58
⑦-2 粉砂	4	19.6	3	36	6.58

为了控制地下连续墙和坑外地铁隧道的变形,基坑采用盆式开挖施工方案.围护结构主要采用地下连续墙形式,深基坑地下连续墙厚 1.0 m,墙深 35 m,浅基坑地下连续墙厚 0.8 m,墙深 28 m,地下墙内外两侧采用 SMW(soil mixing wall)槽壁加固.深坑采用 4 道钢筋混凝土支撑,浅坑采用 3 道钢筋混凝土支撑,并在基坑周边进行坑内加固.当地下墙位移过大时,采用在垫层内加设型钢支撑的应急预案,同时加强对周围地层、地铁隧道及基坑地下墙的监测,通过监测数据反馈指导施工.本文重点针对 $C-C$ 和 $D-D$ 截面进行分析,截面位置如图 1

所示.

在 $C-C$ 与 $D-D$ 截面中,地铁 10 号线隧道下行线轴线至连续墙外线水平距离分别为 17.1 m 和 14.6 m,上、下行线轴线水平间距为 11 m,隧道轴线埋深为 10.4~13.4 m.基坑的第一道支撑中心线距地表 0.6 m,第二道支撑中心线距第一道支撑中心线 4.0 m,第三道支撑中心线距第二道支撑中心线 3.8 m.其中, $D-D$ 截面为浅基坑截面,该截面底板底部距第三道支撑中心线 3.7 m. $C-C$ 截面为深基坑截面,该截面有 4 道钢筋混凝土支撑,第四道支撑中心线距第三道支撑中心线 3.6 m, $C-C$ 截面底板顶部距第四道支撑中心线 3.4 m.基坑坑内均采用 SMW 搅拌桩墩式加固及 SMW 搅拌桩抽条加固.墩式加固深度范围为第三道支撑底至底板顶部;抽条加固深度范围为深坑底至深坑底以下 6 m.

2 基坑施工的有限元模型

在有限元数值模拟中,将基坑简化为平面应变问题进行分析.由于地铁 10 号线在基坑开挖前已存在,故在模拟基坑开挖之前要模拟开挖地铁隧道并添加衬砌,同时在开挖基坑时消除此过程产生的位移场.以基坑 $D-D$ 截面为例,不同工况下基坑施工有限元模型的网格划分如图 2 所示.

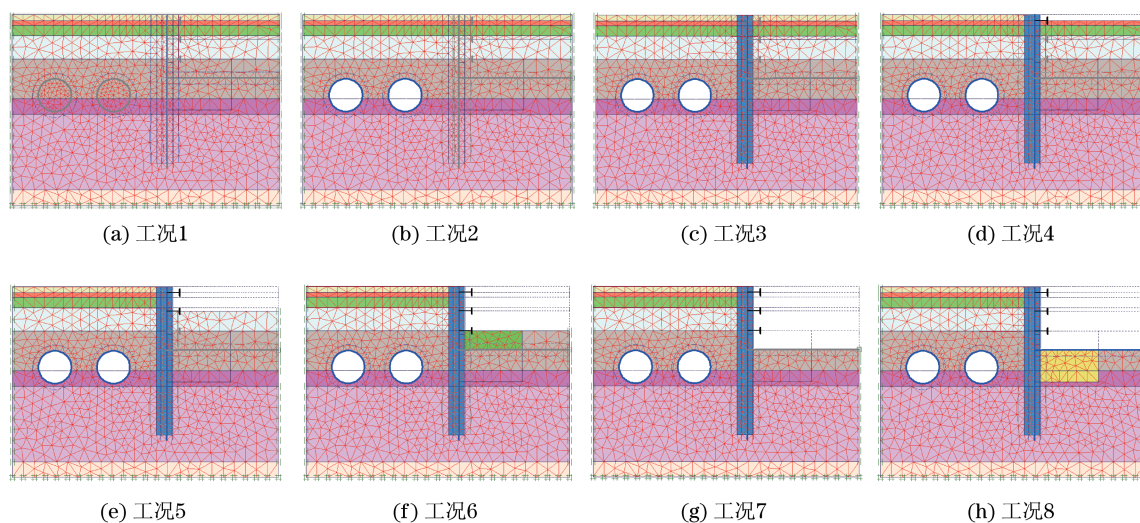


图 2 基坑施工过程有限元模拟

Fig.2 Finite element simulation on the process of foundation pit excavation

图 3(见下页)为基坑开挖至坑底时坑外地表沉降和地下连续墙水平位移的有限元模拟值与现场监测值对比. 尽管深度大于 10 m 时,地下墙水平位移

有限元模拟值与实测数据存在一定的差异,但基坑周边地表沉降和地下墙水平位移曲线总体趋势与实测数据基本吻合.

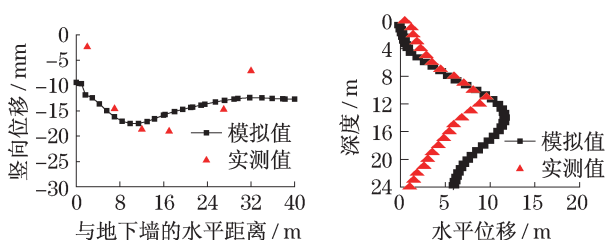


图3 有限元模拟值与实测值比较

Fig.3 Comparisons between simulation results and measured data

3 基坑施工影响因素分析

3.1 支撑数量及位置对基坑施工的影响

以基坑 $C-C$ 截面为例,有限元模型水平和竖向长度分别取 60.0、43.6 m. 隧道取圆形外径为 6.2 m, 衬砌厚度为 0.35 m, 地下连续墙深度为

35 m, 墙厚为 1.0 m. 地下连续墙截面抗弯刚度和抗压刚度分别取 $EA = 3.02 \times 10^6$ kN/m, $EI = 2.52 \times 10^5$ kN·m²/m; 底板的截面抗弯刚度和截面抗压刚度分别取 $EA = 9.06 \times 10^5$ kN/m, $EI = 6.80 \times 10^4$ kN·m²/m; 衬砌的截面抗弯刚度和截面抗压刚度分别取 $EA = 2.00 \times 10^6$ kN/m, $EI = 2.04 \times 10^4$ kN·m²/m.

在基坑施工中由于环境条件或施工等因素的影响,需要调整支撑的位置和数量,本文采用有限元数值方法分别选取 4 种工况针对支撑的数量及支撑位置的选取对围护结构变形的影响进行对比分析,工况 1,仅加第 1,2 道混凝土支撑,不加第 3,4 道支撑;工况 2,仅加第 3,4 道混凝土支撑,不加第 1,2 道支撑;工况 3,仅加第 1,3 道混凝土支撑,不加第 2,4 道支撑;工况 4,加第 1,2,3,4 道支撑.有限元计算模型如图 4 所示.

图4 支撑数量及位置对基坑施工影响有限元计算模型

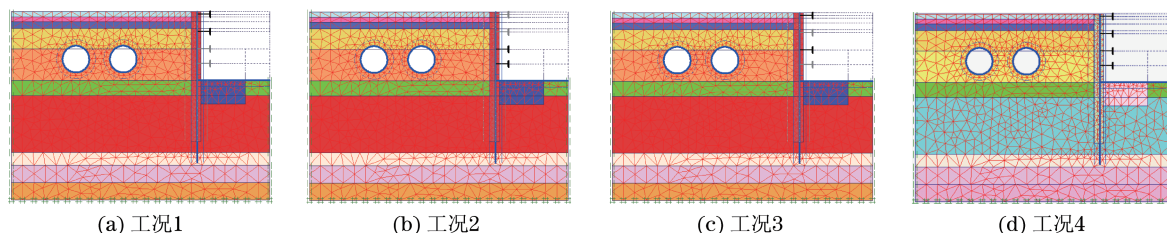


Fig.4 Finite element model for analyzing the effect of supports number and position on foundation pit excavation

图 5 为施工结束时 4 种工况的坑外地表沉降及地下墙水平侧移的对比. 由图 5(a)可知,坑外地表沉降对支撑的数量和位置较敏感,尤其是第 3,4 道支撑对基坑施工影响很大. 相对于工况 4,移除第 1,2 道支撑,仅加第 3,4 道支撑,坑外地表最大沉降值由 17.54 mm 增至 22.97 mm,增幅约为 31 %,特别是在距离地下连续墙较近的地方沉降变化较明显;而如果只加第 1,2 道支撑,不加第 3,4 道支撑,坑外

地表沉降则相当大,最大沉降值可达 104.27 mm,约为工况 4 中最大沉降值的 6 倍.

由图 5(b)可知,随着支撑数目和位置的变化,地下墙水平侧移分布形态和数值都有一定程度的改变. 相比而言,第 3,4 道支撑对地下墙水平侧移影响较大,特别是在第 2 道支撑以下,工况 1 中地下墙水平位移增长显著. 而工况 2 中由于没有加第 1,2 道支撑,其地下墙上部的水平侧移较大.

表 2 给出了施工至坑底时 4 种工况下的隧道位移值. 其中,测点 I, J, K, L 分布于上行线隧道衬砌横截面的上、下、左、右 4 个位置,测点 E, F, G, H 分布于下行线隧道衬砌的相应位置处. 从表 2 中的数据可知,支撑的数量和位置的选择会影响到临近地铁隧道上、下行线的变形,而距离基坑较近的下行线隧道变形对支撑的数量和位置尤为敏感. 工况 1 (只加第 1,2 道支撑)中下行线隧道的水平和竖向位移值约为工况 4 中的 4~5 倍.

3.2 基坑加固对基坑施工的影响

本工程基坑地下连续墙内外两侧采用 SMW 槽

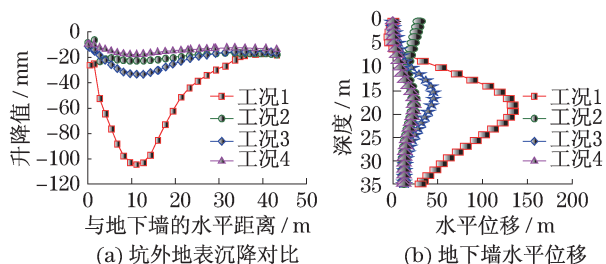


图5 支撑数量及位置对地表沉降及地下墙水平侧移的影响

Fig.5 Effect of the supports number and position on ground settlement and diaphragm wall lateral displacement

表2 支撑数量及位置对隧道变形影响

Tab.2 Effect of the supports number and position on tunnel deformation

mm

工况	上行线测点				下行线测点			
	<i>I</i>		<i>L</i>		<i>E</i>		<i>H</i>	
	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向
1	4.62	-15.25	2.15	-17.80	29.85	-46.72	24.38	-52.31
2	5.56	-10.60	5.22	-10.96	11.00	-12.28	10.34	-12.95
3	4.47	-11.23	3.65	-12.10	11.24	-18.10	9.81	-19.59
4	3.62	-9.41	3.49	-9.57	6.17	-11.40	6.07	-11.53

壁加固,坑内采用 SMW 搅拌桩墩式加固及 SMW 搅拌桩抽条加固.为研究槽壁加固和坑内加固对基坑施工的影响,以基坑 *C-C* 截面为例,选取 3 种工况进行分析.工况 1,地下连续墙内外两侧不采用 SMW 槽壁加固,仅对坑内进行加固;工况 2,地下连续墙内外两侧采用 SMW 槽壁加固,仅对坑内进行 SMW 搅拌桩墩式加固,不采用 SMW 搅拌桩抽条加固;工况 3,地下连续墙内外两侧采用 SMW 槽壁加固,同时对坑内进行 SMW 搅拌桩墩式加固及 SMW 搅拌桩抽条加固.3 种工况的有限元网格图如图 6 所示.

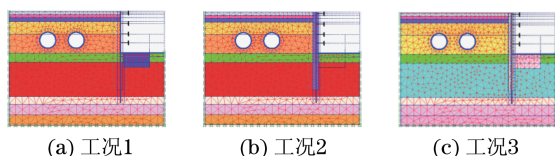


图6 基坑加固对施工影响的有限元计算模型

Fig.6 Finite element model for analyzing the effect of soil reinforcement on foundation pit excavation

图 7 给出了基坑施工至坑底时 3 种工况下坑外地表沉降和地下连续墙水平侧移.由图 7 可知,基坑坑内加固对坑外地表沉降和地下墙水平侧移影响较小;而连续墙内外两侧的 SMW 槽壁加固对其水平侧移和地表沉降影响较大.

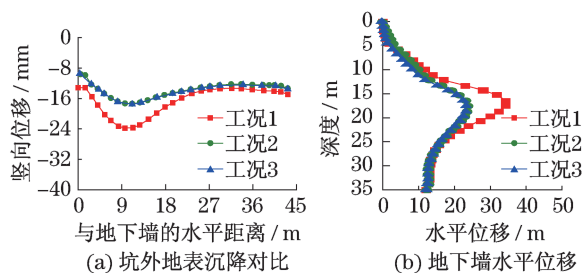


图7 基坑加固对地表沉降及地下墙水平侧移的影响

Fig.7 Effect of the foundation pit reinforcement on ground settlement and diaphragm wall lateral displacement

3.3 隧道位置对基坑施工影响

以基坑 *D-D* 截面为例,研究隧道位置对基坑

施工的影响,分 3 种工况进行讨论,如图 8 所示.工况 1,2,3 中的基坑外边缘与地铁隧道最近距离分别为 3.2,6.4,12.8 m.3 种工况中除隧道与基坑间的水平距离不同外,其余参数均相同.通过对这 3 种工况基坑施工的有限元模拟计算来分析周边土环境的影响.

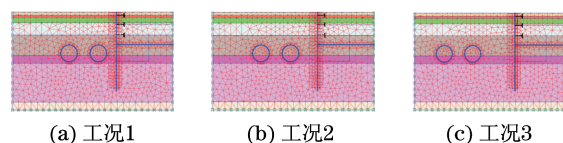


图8 隧道位置对基坑施工影响有限元计算模型

Fig.8 Finite element model for analyzing the effect of tunnels position on foundation pit excavation

取坑外一深层土体水平截面进行分析,该水平截面位于地表以下 8.8 m.图 9(见下页)为 3 种工况下该截面沉降值的对比.由图 9 可知,隧道与基坑之间距离的变化对深层土体的沉降值影响较明显:工况 1 中的下行线隧道位置为距离地下墙中心线 3.2~9.4 m 处,在此范围内工况 1 中该截面沉降值有所降低;同样,工况 2 和工况 3 中的下行线隧道位置分别为距离地下墙中心线 6.4~12.6 m 及 12.8~19.0 m 处,在此范围内该截面沉降值也均有所降低.

由以上分析可知,基坑施工时,地铁隧道的存在在一定程度上减少了坑外土体沉降,特别是隧道附近的土体沉降.隧道的存在对土体沉降具有“遮拦效应”.这是因为隧道衬砌的模量比土体模量大,在一定程度上可以起到“加固土体”的作用,可减少土体的压缩变形,从而在数值上表现为沉降值降低.隧道距离地下墙越近,这种“遮拦效应”就越明显.

3.4 下卧层土体模量对基坑施工的影响

以基坑 *D-D* 截面为例,建立 3 个有限元模型来模拟 3 种工况下的基坑施工并对模拟的结果进行分析.在工况 1 中将第④层和第⑤_{1a}层土体的模量减少一半,工况 2 中土体的模量则为现场实测模量,

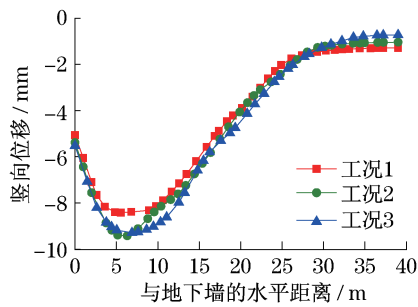


图 9 隧道位置对深层土体沉降的影响
Fig.9 Effect of the tunnels position on section sub-layer soil settlement

而在工况 3 中则将第④层和第⑤_{1a}层土体的模量增加 1 倍,其余参数均相同。

图 10 为基坑施工结束后 3 种工况下地表沉降及地下墙水平侧移的对比.如图 10 所示,3 种工况下坑外地表沉降最大值分别为 11.12,9.01,7.70 mm,地下连续墙水平侧移最大值分别为 13.31,10.69,8.64 mm,地下墙最大水平侧移处均位于地表以下 15.4 m.随着地铁隧道下卧层土体模量的不断增大,地表沉降值与地下连续墙的水平侧移值越来越小.由此可见,增大地铁隧道下卧层土体模量可以有效地控制地表沉降和地下连续墙的水平侧移。

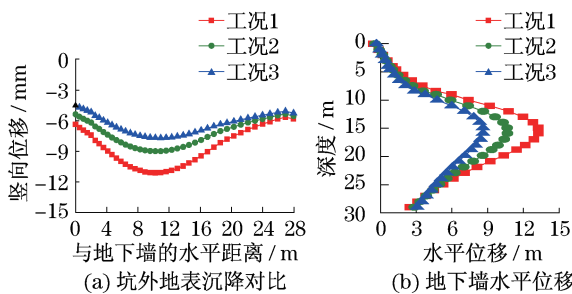


图 10 下卧层土体模量对地表沉降及地下墙水平侧移的影响
Fig.10 Effect of the sub-layer soil modulus on ground settlement and diaphragm wall lateral displacement

图 11 为基坑施工结束后 3 种工况的上、下行线隧道变形矢量图.表 3 和表 4 给出了施工至坑底时 3 种工况中上、下行线隧道 8 个测点的变形值.其中,测点 I' , J' , K' , L' 分布于上行线隧道衬砌横截面的上、下、左、右 4 个位置,测点 E' , F' , G' , H' 分布于下行线隧道衬砌的相应位置处.以监测点 L' 为例,3 种工况下测点 L' 水平位移值分别为 8.58, 7.22, 6.57 mm.其他测点的水平位移值也均为在工况 1 中最大,在工况 3 中最小.由此可见,增加

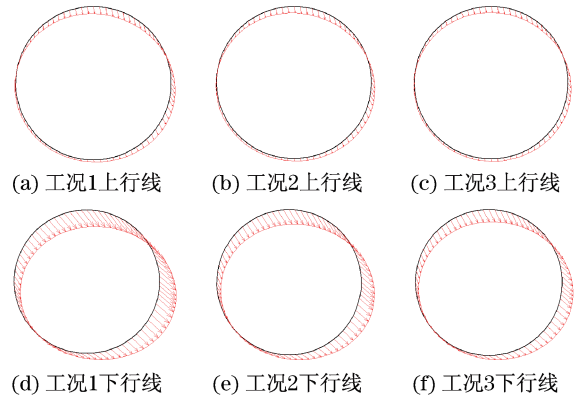


图 11 下卧层土体模量对隧道变形的影响

Fig.11 Effect of the sub-layer soil modulus on tunnel deformation

隧道下卧层的土体模量可以有效控制和减小地铁隧道的水平向侧移.隧道的沉降值变化也呈现出同样的规律.以 I' 点为例,测点 I' 在 3 种工况下的沉降值分别为 8.95, 7.92, 7.51 mm.由此可见,增加隧道下卧层的土体模量可以有效控制和减小地铁隧道的变形。

表 3 下卧层土体模量对上行线隧道变形的影响

Tab.3 Effect of the supports number and position on up-line tunnel deformation mm

工况	I'		J'		K'		L'	
	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向
1	6.59	-8.95	5.31	-3.47	3.43	-5.24	8.58	-7.55
2	4.95	-7.92	4.62	-2.93	2.52	-4.77	7.22	-6.36
3	3.97	-7.51	4.17	-2.23	1.83	-4.36	6.57	-5.46

表 4 下卧层土体模量对下行线隧道变形的影响

Tab.4 Effect of the sub-layer soil modulus on down-line tunnel deformation mm

工况	E'		F'		G'		H'	
	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向	水平	竖向
1	0.96	-3.89	0.61	-1.28	-0.28	-2.09	2.19	-3.32
2	1.00	-3.77	0.50	-1.34	-0.23	-2.01	2.09	-3.27
3	0.97	-4.24	0.33	-1.05	-0.56	-1.98	2.18	-3.31

3.5 地下连续墙刚度对基坑施工影响

以基坑 $D-D$ 截面为例,通过建立 3 种有限元计算工况来研究地下连续墙刚度对基坑施工影响.工况 1 中将地下连续墙刚度减少为实际刚度的一半,工况 2 中地下连续墙的刚度为实际刚度,工况 3 中将地下连续墙的刚度增大为实际刚度的 2 倍.其余结构的参数均未变化。

图 12 为基坑施工结束后 3 种工况下地表沉降及地下墙水平侧移的对比,由图 12 可知,地下连续

墙刚度的变化对地表沉降影响较大.坑外地表最大沉降点与地下墙中心线的距离均为10.58 m,3种工况下的坑外地表沉降最大值分别为9.64,9.01,8.41 mm.地下连续墙最大水平侧移量分别为11.77,10.69,9.46 mm,最大位移点所在的深度分别为15.17,15.41,15.90 m.随着地下连续墙刚度的增加,坑外地表沉降和连续墙的水平位移逐渐减小,地下连续墙最大水平侧移点所在的位置也逐渐下移.由此可见,增加地下连续墙的刚度可以较好地控制坑外地表沉降和地下连续墙最大水平侧移.

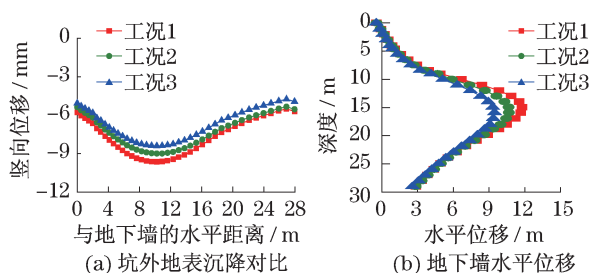


图12 地下墙刚度对地表沉降及地下墙水平侧移的影响

Fig.12 Effect of the diaphragm wall modulus on ground settlement and diaphragm wall lateral displacement

4 结 论

以上海交响乐团迁建工程在建深基坑为背景,采用大型有限元数值软件模拟了基坑施工的整个过程,并针对基坑开挖影响因素进行了研究,重点分析了支撑数量和位置、基坑加固方案的选择、地铁隧道位置、下卧层土体和地下连续墙的刚度对周边地层、地铁隧道和地下连续墙变形的影响,得出以下结论:

a. 支撑数目及位置的选择对深基坑施工影响较大,尤其是靠近坑底的支撑,其位置的变化会对周边地层、隧道及支护结构的变形产生显著的影响.

b. 连续墙内外两侧的SMW槽壁加固对抗外地表沉降、连续墙及隧道的水平侧移影响较大.

c. 隧道的存在对土体沉降具有“遮拦效应”,能够减少坑外土体沉降,特别是隧道附近的土体沉降.

d. 增加下卧层土体模量和地下连续墙的刚度可以减少坑外地表沉降、减少地下连续墙的水平侧移,有效控制地铁隧道的沉降.

参考文献:

[1] Vorster T E, Klar A, Soga K, et al. Estimating the

effects of tunneling on existing pipelines[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1399 - 1410.

[2] 张治国,黄茂松,王卫东.邻近开挖对既有软土隧道的影 响[J].岩土力学,2009,30(5):1373 - 1380.

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

[4] 曾亚武,刘继国,蔡元奇.深基坑开挖引起的土体变形 模拟[J].武汉大学学报(工学版),2006,39(5):53 - 56.

[5] 唐卫平,李得喜,盛小龙.软土地区某深基坑变形规律 有限元模拟研究[J].武汉理工大学学报,2012,34 (2):101 - 104.

[6] 李四维,高华东,杨铁灯.深基坑开挖现场监测与数值 模拟分析[J].岩土工程学报,2011,33(S1):248 - 291.

[7] 饶平平,陈尚荣,崔纪飞,等.黄浦区洛克外滩源深基 坑监测研究[J].上海理工大学学报,2014,36(3): 227 - 233.

[8] 周奎,刘奕斌,余金鑫.隧道开挖对近接既有人防工程 影响的监测方法[J].上海理工大学学报,2013,35 (1):91 - 96.

[9] 木林隆,黄茂松,吴世明.基于反分析法的基坑开挖引 起的土体位移分析[J].岩土工程学报,2012,34(S1): 60 - 64.

[10] 侯新宇,刘松玉,童立元.被动区深搅桩加固对地铁深 基坑变形的影响[J].东南大学学报(自然科学版), 2010,40(1):180 - 184.

[11] 郑俊杰,章荣军,丁烈云,等.基坑被动区加固的位移 控制效果及参数分析[J].岩石力学与工程学报, 2010,29(5):1042 - 1051.

[12] 马郎,屈若枫,周兴涛,等.基坑被动区加固参数对支 护结构位移影响分析[J].岩土工程学报,2012,34 (S1):190 - 196.

[13] 张志伟,侯伟生,叶爱丽,等.深基坑开挖段被动区加 固的位移控制效果分析[J].岩土工程学报,2012,34 (S1):621 - 627.

[14] 刘溢,李镜培,陈伟.被动区深层搅拌桩加固对超大深 基坑变形的影响[J].岩土工程学报,2012,34(S1): 465 - 469.

[15] 俞缙,许琼鹤,邢巍巍,等.基坑工程下地铁隧道隆起 位移数值模拟分析[J].岩土力学,2007,28(S1): 653 - 657.

[16] 裴行凯,倪小东.深基坑开挖对临近既有地铁隧道的 影响分析与对策[J].水利与建筑工程学报,2013,11 (3):45 - 48.

[17] 詹祥元,马能先.超深基坑开挖辅助措施研究[J].建 筑科学,2012,28(9):104 - 108.

(编辑:石 瑛)