

文章编号:1006-2467(2018)11-1437-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.11.004

基坑开挖对临近明挖暗埋隧道竖向变形的影响机理

肖 潇, 李明广, 夏小和, 王建华

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要: 结合上海地区某邻近明挖暗埋隧道基坑工程案例, 采用数值方法模拟了深基坑开挖的过程, 并通过与实测数据进行对比验证了模型的合理性. 针对隧道与基坑之间的连接墙进行对比分析, 揭示了连接墙所起的作用. 通过分析相邻地连墙竖向位移以及其两侧土体位移, 得出地连墙与隧道之间以及墙土之间的相互影响规律. 根据地连墙墙体轴力分布, 研究墙体在开挖过程中的受力形态, 揭示临近基坑开挖对地下结构(明挖暗埋隧道)的影响机理. 结果表明, 对于明挖隧道与基坑共墙的情况, 隧道的隆起主要由地连墙以及连接墙的共同影响所致. 明挖隧道受到基坑地连墙变形的影响明显大于受周围土体位移的影响. 地连墙发生竖向隆起的原因因为坑内土体提供的摩擦力大于坑外土体提供的摩擦力.

关键词: 基坑; 隧道; 地下连续墙; 竖向位移; 轴力; 摩阻力

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

Mechanism Analysis of Influence of Deep Excavation on Deformation of Nearby Cut-and-cover Tunnel

XIAO Xiao, LI Mingguang, XIA Xiaohe, WANG Jianhua

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A practical numerical example is used to simulate the excavation process of a deep foundation pit in Shanghai, and the rationality of the model is verified by comparing with the measured data. The cross wall between tunnel and diaphragm wall is studied and the influence of cross wall is discussed. By analyzing the vertical displacement of adjacent walls and the displacement of soil on both sides of diaphragm walls, the interaction principle between diaphragm wall and tunnel or diaphragm wall and soil is obtained. The force distribution of the wall in the excavation process is used to reveal the influence principle of adjacent deep excavation on underground structure (cut-and-cover tunnel). The results show that the uplift of the tunnel is mainly caused by the uplift of the nearby diaphragm wall. The influence of the diaphragm wall on the cut-and-cover tunnel is obviously greater than that of the surrounding soil. Under the influence of deep excavation, the reason for the diaphragm wall uplifting is that the friction force in the foundation pit is larger than that of outside the pit.

Key words: foundation pit; tunnel; diaphragm wall; vertical displacement; axial force; friction

收稿日期:2017-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41330633, 51678360, 41602283)

作者简介:肖 潇(1985-), 男, 江西省南昌市人, 博士生, 研究方向为深基坑工程. E-mail: xiaoxiao8808@163.com.

通信作者:李明广, 男, 助理研究员, E-mail: lmg20066028@sjtu.edu.cn.

目前,由于城市人口急剧增长,人们出行需求越来越高,导致交通压力日益增加,所以,地铁的开发成为城市建设中必不可少的一部分.而城市中因土地资源的紧缺,在已有地铁隧道旁边新建基坑将会成为一个很普遍的现象.在基坑开挖过程中,由于挖去部分土体将导致周围土体中的应力发生变化,所以不可避免地会对周围地下结构物造成影响.为了确保正在运营的地下结构物的安全,许多学者针对基坑开挖对周围环境的影响进行了研究^[1-3].

在深基坑开挖过程中,不同形式的地下结构受到的影响不同.对于传统的盾构隧道,由于其与周围地下结构相互独立,所以变形与周围土体变形相一致.针对此类隧道,已有许多研究.Sharma等^[4]研究了新加坡MRT隧道受侧上方大面积开挖所产生的影响.Chang等^[5]研究了侧面开挖条件下,盾构隧道的变形特征.张晓清等^[6]分析了多线叠交盾构隧道在各穿越阶段下因地层损失和开挖卸荷引起的地表沉降以及既有隧道纵向变形规律.张俊峰等^[7]针对跨越运营地铁隧道的超大面积深基坑建立了大型三维有限元模型,并对基坑开挖引起的周边环境和隧道变形进行分析.对于明挖暗埋隧道,其结构相对复杂,往往会出现隧道与基坑共墙的情况.在此条件下,基坑开挖对隧道的影响方式将不同于盾构隧道,需要分析地连墙在整个过程中的变形状态以及受力情况.目前,有很多学者开展了有关基坑开挖过程中地连墙的变形及受力性状的研究.罗耀武等^[8]采用有限元模型,分析了环形基坑空间效应以及水土压力模式对围护结构受力变形特性的影响.丁勇春等^[9]采用FLAC3D软件对某紧邻黄浦江的狭长形超长深基坑进行三维数值模拟,探讨了基坑分区开挖等施工条件对基坑变形及受力的影响.高文华^[10]建立软土深基坑围护结构变形的三维有限元分析模型,对某基坑地下连续墙的位移和内力进行了分析.刘明虎^[11]针对某圆形地下连续墙工程,分析了影响结构受力的因素及其敏感程度.以上研究主要针对基坑开挖过程中地连墙的变形与受力形态,对于地连墙与其他地下结构物的影响机理则没有进行深入研究.

本文结合上海地区的具体工程,采用准三维的数值方法,模拟了整个基坑施工的过程.针对数值模拟的结果进行了验证,并详细分析了基坑开挖对地下连续墙的影响机理,揭示隧道发生隆起变形的根本原因.本文的研究结果对已有共墙地下结构旁有深基坑开挖的工程案例具有一定的参考意义,在设计开挖方案的过程中能够更好地保证地下结构的

安全.

1 工程背景介绍

1.1 工程概况

浦东世纪大都会基坑围护工程位于上海市浦东新区陆家嘴金融贸易区,紧靠世纪大道、张杨路和福山路,呈三角形,基坑南侧紧邻世纪大道枢纽站,且该枢纽站的地铁6号线区间将本工程平面分割成2个三角形,其平面面积约为1.33和1.72万 m^2 .基地面积约3万 m^2 ,地下室深度约14.75~22.8 m.本工程以6号线为界,通过设置分隔墙将本工程分为2个大区域以及若干个小区域.工程的平面图如图1所示.

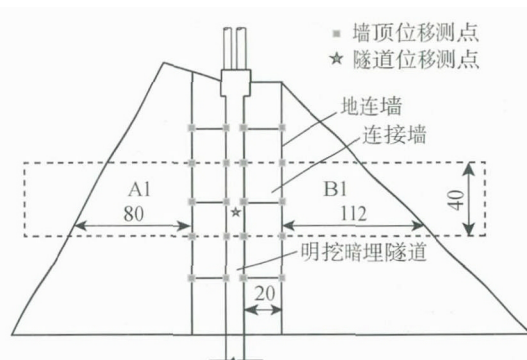


图1 基坑与隧道的平面布置图(m)

Fig. 1 Plan view of cut-and-cover tunnel and foundation pit (m)

拟建场地地基土分布主要有以下特点:浅部第①层杂填土,成分复杂,其组成成分主要为混凝土土块、碎石和砖块等;第②层黄色粉质黏土,在拟建场地其层面埋深和厚度有一定的变化,且在本场地内局部缺失;第③和④层灰色淤泥质土,土质较软,具有高压缩性、高灵敏度和低强度的特性;第⑤层灰色粉质黏土,分布较稳定,该层局部夹黏土;第⑥层硬土层分布较稳定,层顶埋深一般为23.70~25.90 m,厚度约为2.40~4.80 m;第⑦层根据土性分为第⑦₁层草黄至灰黄色粉砂夹砂质粉土和第⑦₂层灰黄色粉细砂2个亚层.

1.2 开挖工况

整个基坑开挖采用顺作法,即每一层土体开挖后安装支撑,并且在开挖到最底层时安装底板.在开挖之前先建设地连墙以及各种分隔墙.地连墙的厚度为1 m,深度为50 m,并且作为隧道以及基坑的围护墙.开挖过程分为5层,总开挖深度约为22.8 m.每一层的支撑在这一层的土体开挖结束之后再行安装,当最底层开挖完成之后,完成混凝土底板的施工.

2 数值模型

由于模型尺寸较大,采用三维有限元方法分析时单元较多,效率低下,不利于多参数分析,而采用平面有限元模型来模拟时,其平面应变假设导致无法考虑横向隔墙的作用,与实际情况不符.因此,本文采用准三维的数值方法来研究在已建隧道旁开挖深基坑时,隧道以及其他地下结构的变形规律.模型选取的范围如图 1 中的虚线所示.由图可见,隧道穿过整个开挖区域,并将其分为左右 2 个大区.在隧道的左边,长隔墙将其分为 A1 区和小基坑区,短隔墙将小基坑区分为若干个隔室(同样的分区方法也用在隧道右侧).隧道的地连墙以及隔墙顶部布置了竖向位移测点,隧道内部的轨道上布置了位移监测点.

本文采用三维有限差分软件 FLAC 3D 作为研究手段,对深基坑开挖影响下隧道的响应问题进行分析.模型尺寸:以工程案例为本文的基本模型,根据实际的参数,设定基坑开挖深度 H 为 22 m,地下连续墙深度 H_0 为 50 m,隔墙深度 45 m,隧道顶部与地表的距离 D 为 2 m,底部距地表 8 m,宽度为 12 m.由于模型两侧具有一定的对称性,所以本文的研究主要集中在隧道一侧的区域开挖对周围地下结构所造成的影响.开挖右侧基坑的宽度为 112 m,各地下连续墙的厚度均设为 1 m.整个模型的宽度为 404 m,深度为 80 m.模型网格图如图 2 所示.边界条件:

模型左侧和右侧竖向边界采用水平方向约束,底部水平边界采用位移全约束,地表面为自由面.结构边界条件约束: $Y=0$ 和 $Y=40$ 这 2 个平面的 Y 方向位移,以及 X 和 Z 轴的转角.本构关系:采用 Mohr-Coulomb 准则的弹塑性土体本构模型来模拟土的力学行为.而弹性模量可近似取为 $E=2\beta(1+\mu)G_0$,其中: β 为衰减系数,参考取值为 0.5; μ 为泊松比; G_0 为动剪切模量, $G_0=\rho v_s^2$, ρ 为土体密度, v_s 为剪切波速.结构模拟:地下结构采用线弹性模型进行模拟,包括矩形隧道、地下连续墙、隔墙、底板、临时支撑和立柱.线性单元用来模拟地连墙、隔墙和底板等混凝土结构,而梁单元用来模拟临时支撑以及立柱.具体参数值如表 1 所示.表中: w 为含水量; γ 为重度; e 为孔隙比; c 为黏聚力; φ 为摩擦角度; E 为弹性模量.接触方案:墙体与土体之间的接触采用摩擦模型.法向刚度和切向刚度采用 10 倍的相邻单元的等效刚度.参考 FLAC 3D 帮助手册^[12].

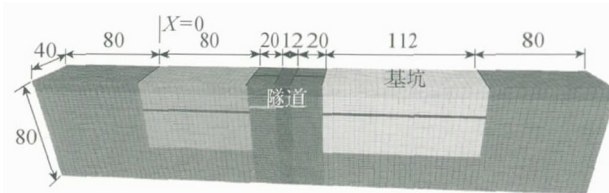


图 2 模型网格图(m)

Fig. 2 Mesh of numerical model (m)

表 1 土层物理力学特性与计算参数

Tab. 1 Soil properties and calculation parameters

层号	名称	$w/\%$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^3)$	e	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/MPa
①	填土						20.0
②	粉质黏土	27.4	18.0	0.94	17	24.0	38.5
③	粉质黏土	34.7	17.2	1.18	17	24.0	40.0
④	淤泥质粘土	48.6	17.0	1.43	14	12.5	71.0
⑤	粉质黏土	34.2	18.2	1.03	17	18.5	99.0
⑥	粉质黏土	22.5	19.9	0.71	57	17.5	139.0
⑦ ₁	粉细沙	29.9	18.9	0.84	0	35.5	203.0
⑦ ₂	粉细沙	27.1	19.1	0.76	25	37.5	282.0
⑨ ₁	粉细沙	25.9	19.7	0.68	25	37.5	357.0

3 模型验证

由于模型两侧具有一定的对称性,本文的研究主要集中在隧道一侧的大区域开挖对周围地下结构所造成的影响.为了验证模型以及土体本构的合理性,选取了地连墙的侧向变形以及竖向变形进行验

证.图 3 所示为基坑与隧道以及地连墙的位置关系.图中,基坑右侧为单一地连墙,左侧为 2 条平行的地连墙,两墙通过短隔墙连接.为了便于分析,将地连墙进行编号.基坑左侧的地连墙为墙 1,与隧道共用的墙为墙 2,基坑右侧的地连墙为墙 3,连接墙 1 和墙 2 的短隔墙为墙 4.

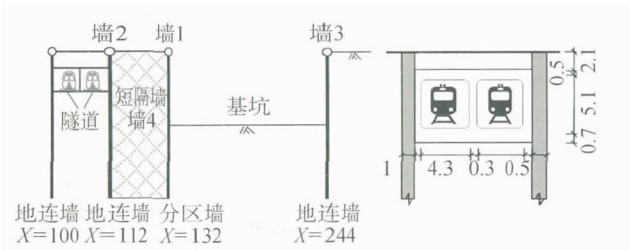


图 3 基坑位置关系示意图(m)

Fig. 3 Cut plan of foundation pit (m)

受基坑开挖的影响,地连墙将不可避免地发生变形,通过对地连墙的变形进行对比验证能够反映出模型参数取值的合理性.图 4 所示为基坑开挖结束后地连墙的侧向变形曲线.由图可见,两者的曲线形式一致,数值模拟最大值发生在开挖面附近,符合基坑开挖所造成的墙体变形规律,而且墙体侧向变形最大值与监测结果也比较接近.

图 5 所示为墙体竖向位移曲线图.由图可见,墙 1 的监测值和计算值比较接近,从整体上看监测值略大于计算值,第 5 层开挖完成时,两者分别达到 15.1 和 13.2 mm,最大差异不超过 2 mm;而墙 2 的监测值与计算值也非常接近,最大差异不超过 2

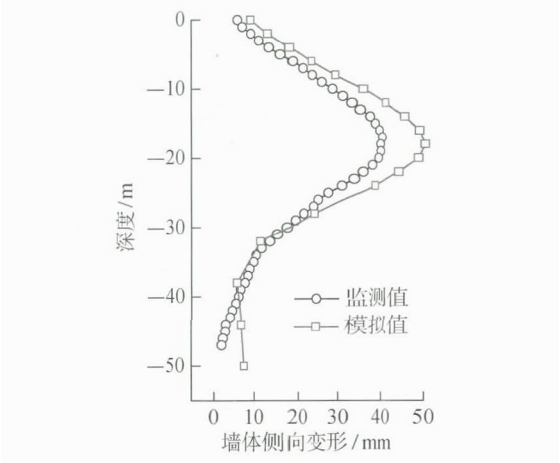


图 4 地连墙测斜曲线

Fig. 4 Curves of lateral wall displacement

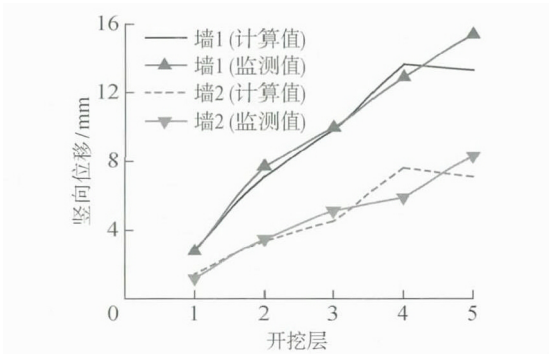


图 5 地连墙竖向位移

Fig. 5 Vertical displacement of diaphragm walls

mm. 计算得到的结果比较符合实际情况.因此,可以认为本文所采用的模型是合理的,并可用于进一步的分析.

4 结果与分析

为了了解临近基坑开挖对周围地下连续墙和隧道所造成的影响,以及墙体与周围土体的相互影响规律,选取了地连墙的竖向位移以及土体的竖向位移进行分析.另外,通过分析地连墙的轴力,详细解释其产生竖向变形的原因.

临近基坑开挖对明挖暗埋隧道的影响规律要比对盾构隧道的影响规律复杂,特别是当基坑与明挖暗埋隧道之间有地连墙(墙 4)相连时,隧道的变形将不再是受到单一土体位移的影响.为了了解基坑与隧道之间的连接墙所起的作用,采用了 2 个模型进行分析.其中:一个是与工程案例相似的模型,此模型中包含了连接墙(模型 1);另一个为不包含连接墙的模型(模型 2).表 2 所示为 2 个模型中隧道和墙体竖向位移的对比情况.由表可见,有连接墙的模型中,隧道以及墙 2 的竖向位移要大于没有连接墙的模型,这说明在临近基坑开挖过程中,连接墙的存在对于隧道的变形有一定的影响.

图 6 所示为明挖暗埋隧道以及地连墙竖向位移

表 2 明挖暗埋隧道以及地连墙竖向位移

Tab. 2 Vertical displacements of cut-and-cover tunnel and diaphragm walls

模型	开挖层	竖向位移/mm		模型	开挖层	竖向位移/mm	
		隧道	墙 2			隧道	墙 2
1	1	1.25	1.70	2	1	1.00	1.30
	2	2.95	3.20		2	2.45	2.60
	3	3.96	4.50		3	3.30	3.70
	4	6.10	6.40		4	5.20	5.70
	5	6.60	6.92		5	5.60	6.13

图. 图中:隧道位于横坐标 106 m 处;墙 2 位于横坐标 112 m 处;墙 1 位于横坐标 132 m 处. 由图 6 可见:① 隧道以及墙 1 和 2 在开挖的过程中,出现隆起的趋势. 这与一些盾构隧道在基坑开挖后发生沉降的案例不同. 造成这些差别的原因主要是隧道受到临近基坑开挖影响的机理发生变化. 由于本案例中,隧道采用明挖暗埋法,其外墙与地连墙合并为一堵墙,并且通过一道连接墙(墙 4)与基坑的地连墙直接相连,这会导致隧道的变形不仅受到土体位移的影响,而且还很大程度地受到地连墙变形的影响. ② 靠近隧道的墙 2 其竖向变形要小于靠近基坑的墙 1 竖向变形,这说明墙 1 在基坑开挖后发生隆起,然后通过墙 4 影响墙 2 使其也发生隆起变形,最终导致隧道上抬. 结合表 2 以及图 6 的内容,可以得出结论:在相邻基坑开挖的过程中,墙 1 直接受到土体卸荷的影响而发生位移,之后墙 1 的变形将影响连接墙(墙 4),使其发生位移. 而墙 4 的另一端与墙 2 以及隧道相连,这也最终导致明挖隧道发生变形.

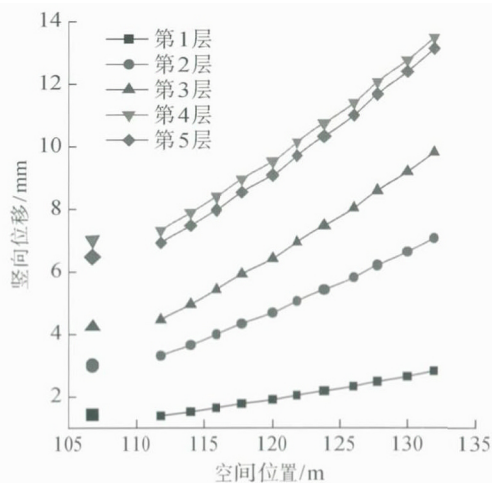


图 6 明挖暗埋隧道以及地连墙竖向位移图

Fig. 6 Vertical displacements of cut-and-cover tunnel and diaphragm walls

为了更详细地研究这一问题,提取了墙体自身以及其两侧的土体竖向位移进行研究,同时为了分析墙体变形趋势,提取了部分墙体的轴力进行分析. 在开挖过程中,左右两侧墙体的形式不同. 大基坑的右侧墙体为单一的地下连续墙. 大基坑左侧墙体与隧道间接相连,这使得基坑左侧的环境变得非常复杂. 为了了解隧道在基坑开挖过程中的竖向变形,需要关注与隧道直接相连的地连墙的竖向位移. 由于基坑左侧的结构形式复杂,墙体之间接触较多,受力分析比较麻烦,所以有必要先分析简单单一的地连墙 3 的变形以及受力状态.

图 7 所示为基坑开挖完成时其右侧墙 3 以及墙 3 两侧土体的竖向位移曲线. 图中:墙顶位置为 0 m;墙底位置为 -50 m. 由图可见,在墙底以上的范围内,基坑右侧坑内的土体其竖向位移要明显大于墙体竖向位移,而基坑坑外土体的位移比墙体位移要小. 这说明随着基坑的开挖,在墙底以上的范围内,坑内土体相对于地连墙发生向上的相对滑动,坑外土体相对于地连墙发生向下的相对滑动. 地连墙受到坑内土体提供的向上的摩阻力,同时受到坑外土体提供的向下的摩阻力.

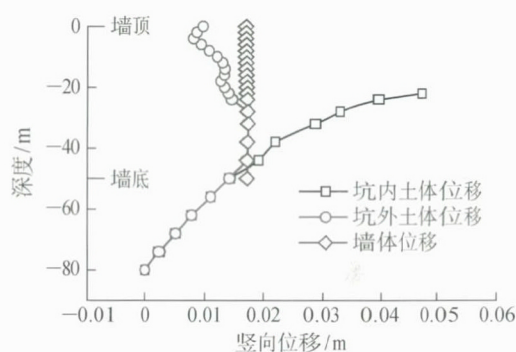


图 7 墙 3 和土体竖向位移

Fig. 7 Vertical displacement of diaphragm wall 3 and soil

图 8 所示为基坑右侧墙 3 的轴力图. 图中:正值表示墙身受拉;负值表示墙身受压. 由图可见,在开挖面以下的墙体受力要明显大于开挖面以上的墙体,说明开挖面以下墙体的变形是整个墙体变形的主要原因. 在开挖 1~4 层时,开挖面以下墙体受到拉力作用,这说明坑内土体提供的向上的摩阻力要明显大于坑外土体提供的摩阻力,墙体发生向上的相对位移. 对比墙底的轴力与最大轴力可以发现墙底的轴力相对于墙身的轴力较小,墙体主要受到侧

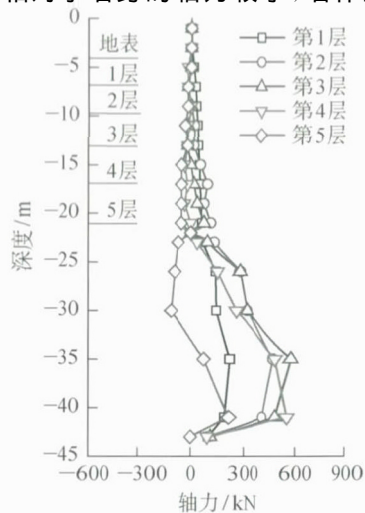


图 8 墙 3 的轴力随开挖深度的变化

Fig. 8 Axial force of wall 3 affected by digging

面的摩阻力影响.

由图6中可以看出,隧道发生的是隆起变形,而导致隧道变形的主要原因是墙体1在基坑开挖过程中发生了变形,然后荷载通过其他地连墙传递到隧道结构上,导致隧道也发生了变形.因此,有必要分析墙1的受力状态.图9所示为基坑左侧墙1以及两侧土体的竖向位移曲线.由图可见,坑内的土体在墙底以上的范围内,其竖向位移要大于墙体竖向位移.此时,墙体受到向上的摩擦力.而坑外土体的位移和墙体位移非常接近.这说明在开挖过程中,墙1主要受到了坑内土体隆起所产生的向上的摩阻力.

图10所示为基坑左侧墙1的轴力图.由图可见,开挖1~4层时,开挖面以下的墙体主要受拉力.这说明坑内隆起的土体对墙体施加了向上的摩阻力,这个摩阻力大于坑外的摩阻力,使得墙体发生向上的隆起.此外,对比墙底的轴力与最大轴力可以发

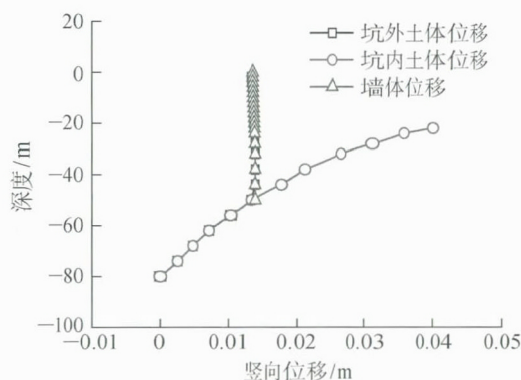


图9 墙1竖向位移

Fig. 9 Vertical displacement of wall 1

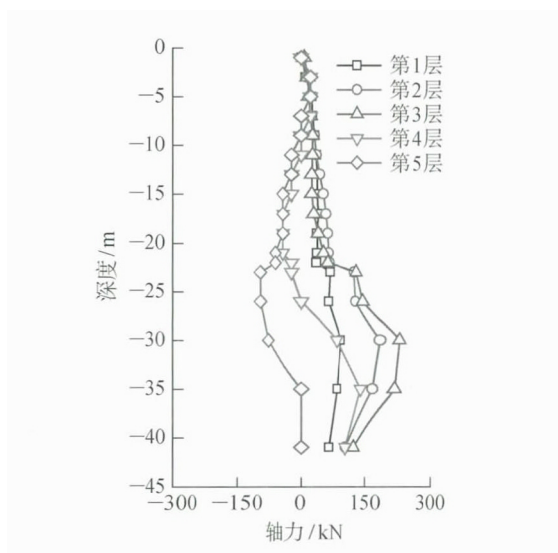


图10 墙1的轴力随开挖深度的变化

Fig. 10 Axial force of wall 1 affected by digging

现墙底的轴力起到的影响较小,墙体的位移主要由墙体侧面的摩阻力所影响.因此,在临近基坑开挖过程中,基坑的地连墙受摩擦力影响后将发生竖向变形,然后通过连接墙进一步影响明挖暗埋隧道的变形.

5 结论

结合上海地区的具体工程,对深基坑开挖过程中造成已有共墙地下结构(隧道)发生隆起变形的原因进行分析,研究了不同形式的地下连续墙变形特性以及受力状态,得到的结论如下:

(1) 对于明挖暗埋隧道与基坑共墙的情况,临近基坑开挖过程中隧道的隆起主要由地连墙变形所致.由于隧道通过连接墙与基坑的地连墙相连后,影响其变形的机理发生变化,故隧道周围的土体隆起或沉降所带来的影响将小于相邻地连墙对隧道产生的影响.

(2) 在基坑开挖的条件下,地连墙发生竖向隆起的原因是坑内土体提供的摩擦力要大于坑外土体提供的摩擦力.在开挖面以上,墙体主要受压;开挖面以下,墙底主要受拉.

(3) 在开挖过程中,地连墙的变形主要受到两侧摩阻力的影响,受端部阻力的影响相对较小.由墙体两侧土体提供的侧摩阻力在开挖过程中一直在增大,端阻力增加的程度比较小,而且墙体底端的轴力要明显小于墙身的轴力.

参考文献:

- [1] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in shanghai soft soils[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(7): 985-994.
- [2] TAN Y, LI X, KANG Z, *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*, 2014, 29(6): 04014158.
- [3] 张抗寒, 陈锦剑, 王建华, 等. 紧邻基坑同步施工下坑间隧道的变形特性[J]. *上海交通大学学报*, 2013, 47(10): 1537-1541.
ZHANG Kanghan, CHEN Jinjian, WANG Jianhua, *et al.* Movement of tunnel between two adjacent concurrent excavation[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2013, 47(10): 1537-1541.
- [4] SHARMA J S, HEFNY A M, ZHAO J, *et al.* Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(2): 93-98.

- [5] CHANG C T, SUN C W, DUANN S W, *et al.* Response of a taipei rapid transit system (TRTS) tunnel to adjacent excavation[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2001, 16(3): 151-158.
- [6] 张晓清, 张孟喜, 吴应明, 等. 多线叠交盾构隧道近接施工模型试验[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 1040-1045.
ZHANG Xiaoqing, ZHANG Mengxi, WU Yingming, *et al.* Model test on approaching construction of multi-line overlapped shield tunneling[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2015, 49(7): 1040-1045.
- [7] 张俊峰, 王建华, 陈锦剑, 等. 跨越运营地铁隧道超大基坑开挖的土体参数反分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(1): 42-46.
ZHANG Junfeng, WANG Jianhua, CHEN Jingjian, *et al.* 3-D FEM back-analysis of an over size and deep excavation[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2012, 46(1): 42-46.
- [8] 罗耀武, 凌道盛, 陈云敏, 等. 环形超深基坑围护结构受力变形特性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 617-622.
LUO Yaowu, LING Daosheng, CHEN Yunmin, *et al.* Mechanical and deformation characteristics of enclosure structure for annular extra-deep excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 617-622.
- [9] 丁勇春, 程泽坤, 王建华, 等. 临江基坑变形及受力性状三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(s1): 243-247.
DING Yongchen, CHENG Zekun, WANG Jianhua, *et al.* Three-dimensional numerical analysis of deformation and mechanical behavior of deep excavations adjacent to river[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(s1): 243-247.
- [10] 高文华. 深基坑支护墙体受力变形分析的粘弹性地基厚板理论[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 718-719.
GAO Wenhua. Thick plate analysis on viscoelastic foundation for the retaining wall of deep foundation pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 718-719.
- [11] 刘明虎. 圆形地下连续墙支护深基坑结构受力特点及对比分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 96-99.
LIU Minghu. Structural performance of the deep foundation pit bracing with circular diaphragm wall[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2005, 22(11): 96-99.
- [12] Itasca Consulting Group, Inc. Fast Lagrangian analysis of continua in three dimensions: Theory and background[M]. Minneapolis: Itasca, 2006: 2-1-2-5.