

群坑效应下已建地下结构对紧邻基坑开挖变形的影响

郭健^{1,2}, 刘国彬^{1,2}, 苏维捷^{1,2}, 李明宇³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要 目的 研究软土地区深基坑分区开挖时已建地下结构对紧邻基坑围护结构变形及其周边位移场的影响. 方法 采用三维数值模拟方法, 针对软土地区某“X”型地铁交叉换乘站工程, 分别建立后开挖基坑周边有无地下结构两种工况下的数值模型进行计算, 将所得计算结果与实测数据进行对比研究. 结果 已建地下结构对周边环境的主要影响范围为 $0.7 H_e \sim 1.0 H_e$ (紧邻基坑开挖深度); 相较基坑周边无地下结构条件下, 已建地下结构最大可减小 30% 紧邻基坑围护结构变形值与坑后地表沉降量, 但其对坑内基底隆起影响不大; 已建地下结构与紧邻基坑所夹角度对影响范围与影响效果也存在着显著的影响, 具体表现为处于相交成锐角区域的墙体变形和地表沉降较相交成钝角的区域减少 20%, 交接成锐角区的影响范围也较钝角区增加 50%. 结论 已建地下结构在一定影响范围内可以显著减少紧邻基坑围护结构的变形量及周围地表沉降量, 在实际施工中可以适当降低该区域内围护结构刚度以优化基坑设计.

关键词 基坑开挖; 已建地下结构; 影响规律; 数值模拟; 实测数据

中图分类号 TU47

文献标志码 A

Numerical Analysis about Influence from the Subsurface Structure on Adjacent Deep Excavation in Foundation Pit Group

GUO Jian^{1,2}, LIU Guobin^{1,2}, SU Weijie^{1,2}, LI Mingyu³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450002)

Abstract: To obtain the influence from the completed underground structure on the wall deflection and ground settlement of the adjacent deep excavation in soft clay, this paper conducted a series of complex numerical analysis. Based on an “X” shaped-large interchange station project in Shang-

收稿日期: 2018-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508520); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A560017)

作者简介: 郭健(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事基坑及地下工程等方面研究.

hai, the numerical models of the excavation with adjacent underground structure and the sole excavation without underground structure nearby were established. The computed results under such two conditions were compared and the mutual influence rule between deep excavation and the subsurface structure in soft clay was concluded. The computed results were also compared with the field data. The results showed that the subsurface structure can reduce the retaining wall deflection and ground settlement by 30% in a distance of $0.7 H_e \sim 1.0 H_e$ (excavation depth of the adjacent pit) but it has little effect on the basal heave inside the pit. The intersection angle between the excavation and the underground structure also has a significant influence on the excavation behaviors. The retaining wall deflection and ground subsidence behind the wall at acute intersection angle was 20% smaller than those at obtuse angle. The influence zone at acute intersection was also 50% wider than that at obtuse angle. The underground structure can reduce the retaining wall deflection and ground subsidence in a certain area, so the stiffness of the retaining wall within such region can be reduced to optimize the design of the pit.

Key words: deep excavation; subsurface structure; influence law; numerical simulation; field data

近年来随着地下工程建设的发展,基坑工程不仅数量增多,而且向着更大、更深的方向发展。随着现代化城市建设的快速发展,我国诸大城市纷纷兴起了大规模建设地下铁道的热潮^[1],大量的地铁站深基坑工程也随之出现。软土地区深基坑开挖不可避免地对周边环境产生影响,国内外众多学者针对基坑开挖引起的围护结构侧向变形,地表沉降等方面进行了大量的研究。R. B. Peck^[2], C. Y. Ou 等^[3]对台湾地区10个车站进行研究,得出了基坑开挖引起的两类墙后地表沉降分布形式并总结出墙体最大变形与开挖深度的关系。徐中华^[4]通过统计上海地区300个深基坑的监测数据,提出了上海地区深基坑开挖变形与坑外沉降的一般规律。谭勇等^[5]对上海某地铁风井深基坑进行分析,发现了该基坑开挖所造成的地表沉降和沉降影响范围都较小。Y. Tan 等^[6-7]对上海两个分别采用顺做法与逆做法的地铁站深基坑进行深入研究,得出了许多有价值的结论。刘燕^[8]基于上海地区某紧邻老车站的基坑开挖,探究老车站对基坑周围位移场的遮拦作用。C. T. Chang 等^[9]研究台北地区某邻近既有车站的基坑开挖相互影响规律,并提出相应的施工控制建议。M. G. Li 等^[10]和 J. J. Chen 等^[11]分别研究了大型基坑对周边临近

地铁车站以及临近隧道的影响,指出大型基坑开挖对周边环境影响很大。李兵等^[12]研究了盾构隧道与临近深基坑的相互影响规律。然而,上述研究大多针对形状规则或是开挖深度较浅的基坑,对于深度较大的异性基坑研究很少,尤其对于群坑效应下后开挖基坑与周边既有地下结构斜交时上述研究所得规律的适用性也有待进一步研究。

基于此,笔者以上海地区某“X”型地铁交叉换乘站为背景,通过对比后开挖基坑周边有无地下结构两工况下的数值模拟结果,探究群坑效应下先期已建地下结构对紧邻基坑的围护结构变形、地表沉降、坑底隆起等的影响效果与规律,并将模拟结果与实测数据进行对比,验证所得结果的可靠性。

1 工程背景

该“X”形地铁交叉换乘站基坑总面积 $9\,000\text{ m}^2$,开挖深度为 $24 \sim 30\text{ m}$ 。工程总平面图如图1所示。由于基坑开挖面积较大,深度较深,且周边环境较为复杂,为降低基坑开挖对周边环境的影响,该工程采用考虑时空效应的开挖方法^[13],交叉换乘站内部用多幅地连墙将基坑划分为四个区域。1区和4区开挖深度为 30 m ,车站主体外包长度为 206 m ,标准段宽度为 21 m ,采用 1.2 m 地下

墙作为围护结构,地连墙深度为56 m。2区和3区开挖深度24 m,车站主体外包长度189 m,标准段宽度为21 m,围护采用1.2 m地下墙,墙深为47 m。该工程所在区域为滨海平原地貌类型,地势平坦,开挖区域下存在很厚的第四纪松散沉积物。按设计方案与施工规划,1、2、3区先行开挖并待其地下结构修建完成后再进行4区的开挖。1、4区为地下五层结构,2、3区为地下四层结构。

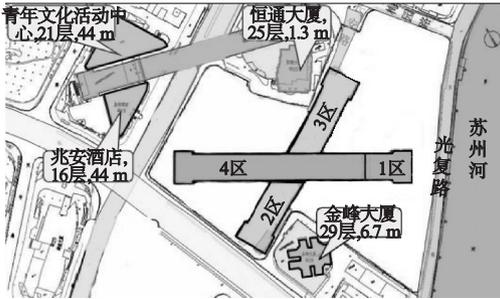


图1 工程平面图

Fig. 1 Plan view of the project

2 数值模型

2.1 模拟方案

本区域地基土在86 m深度范围内均为第四纪松散沉积物,属第四系滨海平原地基土沉积层,主要由砂质粉土、淤泥质黏土、粉质黏土、粉砂及黏土组成,具有成层分布特点。C. Y. Ou^[14]等学者通过三维有限元实例分析和现场实测结果的验证,指出修正剑桥模型属于弹塑性本构模型,能较好地模拟上海等软土地区的土体。因此,笔者采用修正剑桥模型模拟土体,土体参数如表1所示。由于本工程开挖深度深、面积大,基坑被动区多处采用了加固手段。因缺乏旋喷加固土体在修正剑桥模型中的参数研究,故对被动区加固土体采用摩尔库伦模型,加固土体参数见表2。

表1 土体计算参数

Table 1 Soil parameters in numerical simulation

层号	土层名称	层底标高/m	$\gamma /$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	C / kPa	$\varphi / (^{\circ})$	e	ν	λ	κ
1	砂质粉土	-10	18.5	6.1	16.7	0.921	0.32	0.123	0.015
2	淤泥质黏土	-19	16.8	11.2	13.1	1.302	0.37	0.186	0.025
3	黏土	-33	18.2	15.6	15.6	1.108	0.35	0.161	0.018
4	粉砂	-57	18.7	1.0	31.2	0.768	0.27	0.088	0.008
5	黏土	-86	18.1	18	17.3	0.811	0.28	0.054	0.004

注: γ 为土体重力密度; C 为土体黏聚力; φ 为内摩擦角; e 为土体孔隙比; ν 为泊松比; λ 为压缩指数; κ 为回弹指数。

表2 加固土体参数

Table 2 Reinforced soil parameters

E / MPa	$\gamma / (\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	C / kPa	$\varphi / (^{\circ})$	ν
200	20	200	25	0.2

依据丁勇春^[15]对上海软土地区深基坑的三维数值计算及现场实测结果,基坑开挖引起的水平影响范围一般为 $3.5 H_e$,深度方向上为 $2.5 H_e$,其中 H_e 为基坑开挖深度。因此在计算模型中,为消除模型边界对数值模拟的影响,整体模型长 \times 宽 \times 高为 $450 \text{ m} \times 360 \text{ m} \times 90 \text{ m}$,模型四周施加横向约束,底部同时施加横向与竖向约束,顶部为自由表面。

数值模型示意图如图2所示。地连墙采用实体单元模拟,内支撑采用杆单元模拟,内支撑参数见表3。

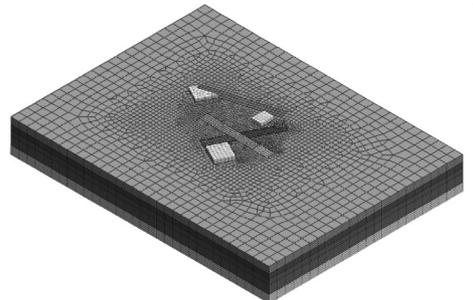


图2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

表3 支撑参数

Table 3 Supporting system parameters

序号	类别	标高/m	截面宽 × 高/mm	水平间距/m
1	砼支撑	0	1 000 × 800	7.5
2	钢支撑	-6	609 × 16	2.5
3	钢支撑	-10	609 × 16	2.5
4	砼支撑	-14	1 200 × 900	7.5
5	钢支撑	-18	609 × 16	2.5
6	砼支撑	-21.5	1 200 × 900	7.5
7	钢支撑	-24.5	609 × 16	2.5
8	钢支撑	-28	609 × 16	2.5

P. G. Hsieh^[16]在对台北地区深基坑进行模拟时,考虑到地下连续墙在现场施工时较差的工程环境以及墙体弯曲对刚度的影响,将地下连续墙的刚度进行一定程度折减.笔者采用类似方法,将地连墙弹性模量折减20%,取为24 GPa.模型沿2、3区轴线方向剖面示意图见图3.

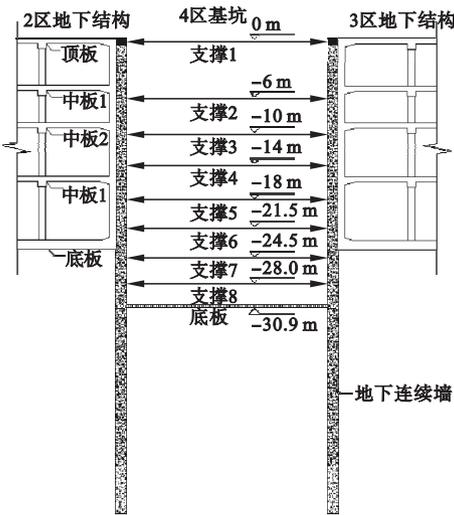


图3 地下建筑物与基坑开挖示意图

Fig. 3 Sectional view of excavation and subsurface structure

2.2 模型建立

笔者采用 ABAQUS 数值模拟软件,计算时不考虑地下水的影响,整体模型共 147 886 个单元.基坑开挖时采用“单元生死”法逐层开挖并依次激活各道内支撑.为了使模拟尽可能接近真实开挖工况,在模型计算中按实际施工顺序,使 1,2,3 区先行开挖完成并激

活相应地下结构后再进行 4 区基坑的开挖模拟.由于 1 区面积较小且位于 4 区基坑端部,因此笔者主要探究 2、3 区既有地下结构对紧邻 4 区基坑的影响.

为探究基坑周边存在已建地下结构时所受的影响,分别建立 4 区基坑周边存在 2、3 区地下结构(工况一)和周围无地下结构(工况二)的数值模型,将两种工况下的基坑开挖模拟结果进行对比分析.

3 结果分析

3.1 围护结构变形

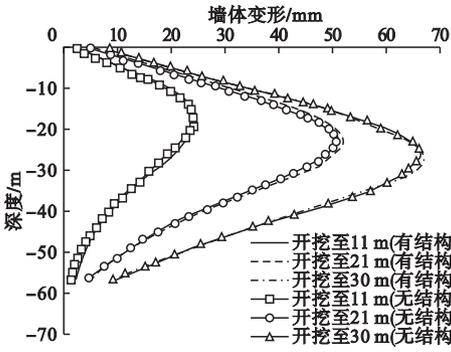
选取 CX1, CX2, CX3 三点计算结果进行对比分析.围护结构变形情况如图 4 所示,当基坑周围存在已修建的地下结构时,基坑围护结构会受到较为明显的影响,集中表现在距离已修建地下结构较近的地连墙变形较小,而距已建地下结构较远的地连墙变形较大.以 CX2 为例,当基坑周边存在已有地下结构时,与基坑周围不存在地下结构相比,该点墙体的最大变形值减少了 30%.随着 4 区基坑地连墙距已有地下结构的距离逐渐增加,两工况下的最大墙体变形逐渐趋于一致.在距已有地下结构 30 m 外时两工况下的墙体变形基本相等.既有地下结构对紧邻基坑围护结构变形的影响也与二者相交的角度有关,2 区、3 区地下结构与 4 区基坑分别在点 A、D 处交接形成钝角,在 B、C 处交接形成锐角. B、C 点附近 4 区基坑围护结构最大变形量分别比 A、D 处减小 6.1 mm 与 8.4 mm,减小幅度约为 20%,因此可认为既有地下结构与长条形基坑相接成锐角时,对基坑围护结构变形的限制作用高于相接成钝角的情况.而从交叉区域对紧邻基坑围护结构变形的影响范围来看,对于相接成钝角的 A、D 处,在离开交叉区域 $0.7 H_c$ (20 m) 后,工况一下的围护结构变形与工况二条件下基本一致;而对于相接成锐角的 B、C 点处,地下结构对后开挖基坑围护墙的影响范围更广,当

距离达到 $1.0 H_e$ (30 m) 后, 两工况下的地连墙最大变形趋于一致. 由于在该范围内 4 区基坑地连墙变形较小, 因此可适当减少围护结构刚度以优化基坑设计.

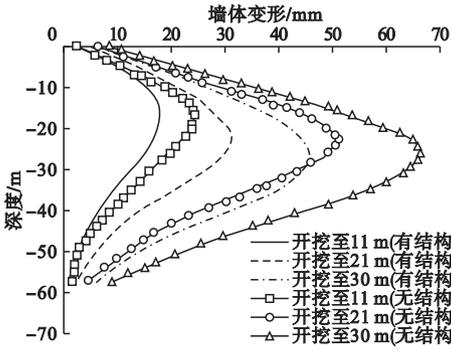
由图 4 还可发现, 当基坑周围存在地下结构时, 地连墙最大变形出现的位置相比周围无地下结构工况下也略有下降, 其位置下降约 2 ~ 4 m.

3.2 地表沉降

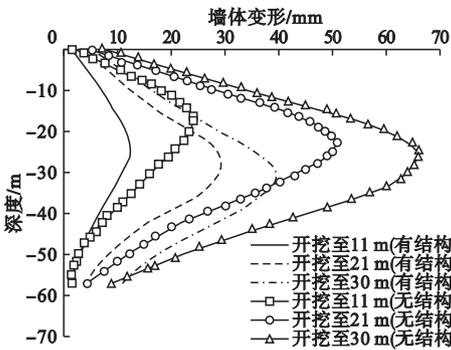
为了排除 1 区、2 区、3 区预先开挖对 4 区墙后地表沉降的影响, 在模拟时将 1 区、2 区、3 区基坑开挖完成后进行位移清零并激活相应地下结构后再进行 4 区基坑的开挖模拟, 因此工况一下的地表沉降可认为仅由于 4 区基坑开挖所引起的. 图 5 中两工况下最大地表沉降均出现在围护墙体后一定距离处, 与文献 [3] 所统计的地表沉降与墙体变形规律一致.



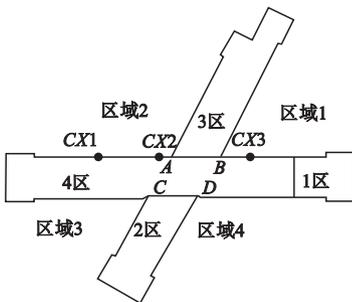
(a) CX1处地连墙变形



(b) CX2处地连墙变形

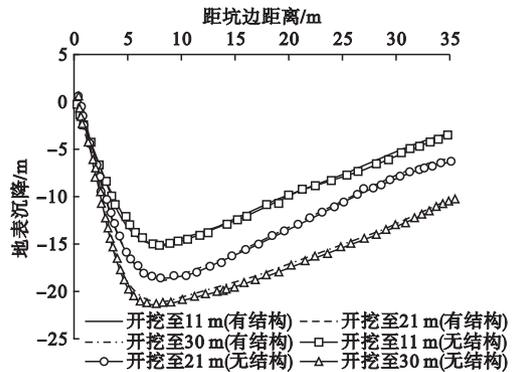


(c) CX3处地连墙变形

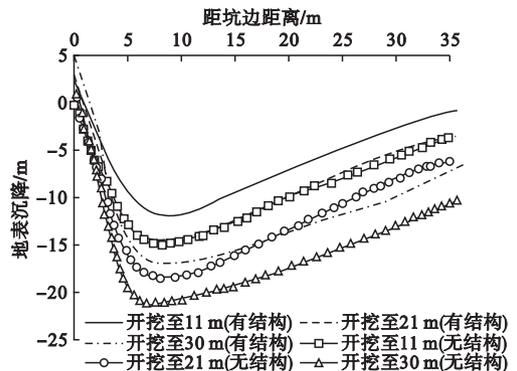


(d) 地连墙变形计算点示意图

图 4 围护结构变形

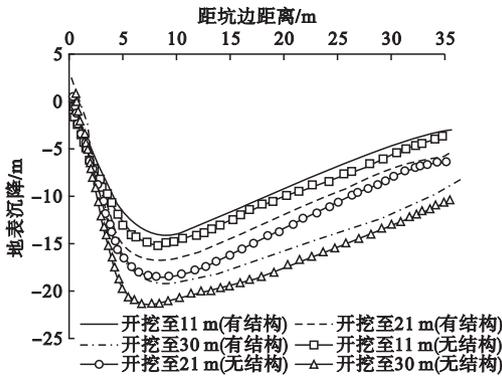


(a) D1处地表沉降

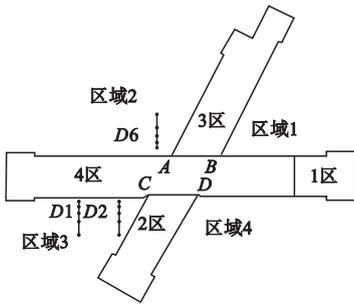


(b) D2处地表沉降

Fig. 4 Lateral wall deflection profiles at different depth



(c) D6处地表沉降



(d) 地表沉降计算点示意图

图5 地表沉降

Fig. 5 Ground settlement

地表沉降规律与围护墙水平位移规律是相似的,在靠近基坑与地下结构相接处,地表沉降受到了较大的限制.在测点 D6 处,工况一下的坑后地表沉降较工况二下减少了约 30%.而随着测点远离地下结构,地表沉降值与沉降范围显著增大,距离相交处 30 m 外两工况下的地表沉降曲线基本相同.除此以外,在基坑与既有地下结构交叉处,锐、钝角带来的差异更加显著.区域 1、3 处的最大地表沉降分别为 17.8 mm 与 18.6 mm,小于区域 2、4 处的地表沉降 21.3 mm 与 22.6 mm,减小幅度约为 20%.区域 1、3 靠近角点 B、C 处,墙后土体表现出明显的隆起,角点外约 12 m 范围内墙后土体均存在隆起现象,而区域 2、4 靠近角点 A、D 处墙后地表隆起范围仅有 7 m 左右.由此可见已建地下结构与紧邻基坑交接形成的锐角区域较钝角区域能明显地抑制坑外地表沉降.

3.3 坑内基底隆起

图 6 为 4 区基坑开挖完成时两工况下坑内基底隆起量示意图,可看出基坑周围存在已建地下结构时坑内隆起量与基坑周围不存在地下结构时差异不明显,两工况下最大基底隆起差异值仅为 4 mm.因此可认为坑外存在已建地下结构对坑内基底隆起量影响不大.

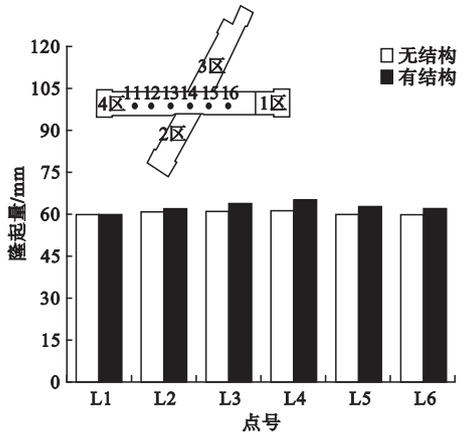


图6 坑内基底隆起

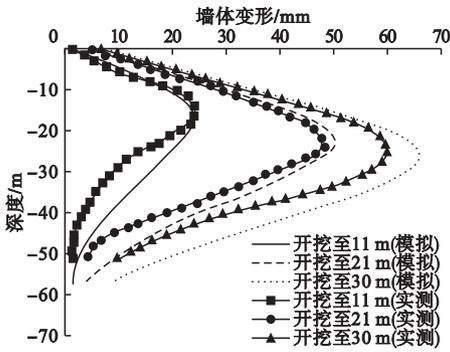
Fig. 6 Basal heave at different points

4 模拟结果与实测数据对比分析

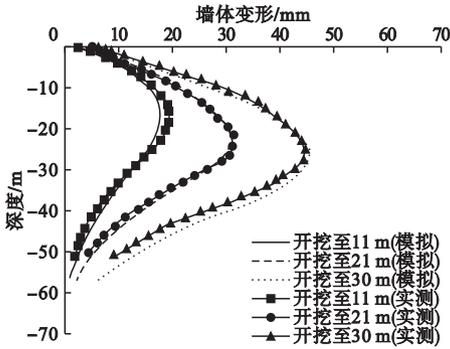
由于现场实测数据有限,因此只对比围护结构变形和地表沉降的模拟结果和实测数据.

4.1 围护结构变形

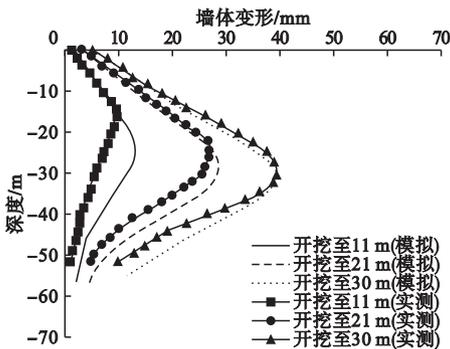
图 7 为测点 CX1, CX2, CX3 的墙体变形模拟结果与实测结果对比图.当测点逐渐远离交汇区时,地下连续墙的变形量逐渐增大,与数值模拟所得规律相同.各测点的计算值与工程实测值存在一定差距,但差别不大,以测点 CX1 为例,实测与模拟的地下连续墙最大水平变形分别为 62 mm 和 67 mm 左右,误差在 8% 以内,表明数值模型在一定程度上合理模拟了工程的实际情况.围护结构最大变形出现的位置位于开挖面附近,符合文献 [4-5] 中的统计规律.



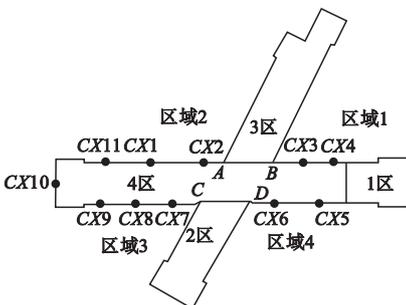
(a) CX1处变形对比



(b) CX2处变形对比



(c) CX3处变形对比



(d) 墙体测斜点分布图

图7 数值模拟与现场实测围护结构变形

Fig.7 Wall deflection for numerical simulation and field monitoring

由于各道内支撑的限制作用,现场实测数据与数值模拟计算值均体现出随着开挖的

加深,地连墙呈现出“凸肚状”的变形模式。然而在实测结果中,在基坑开挖面以下,墙体变形随着深度的增加急剧减小,而在模拟结果中开挖面以下墙体变形变化幅度相对较小,表明实际情况下被动区土体加固对维护结构的约束作用远大于数值模拟的结果。

图8 为本工程中4区实测地下连续墙最大水平位移与基坑开挖深度的关系,并将本基坑的实测数据与徐中华^[4]统计的94个地铁车站基坑实测围护结构变形数据对比。据徐中华^[4]的统计结果,长条形地铁车站基坑的地连墙水平位移为0.1% H_e ~ 1% H_e,平均变形值为0.417% H_e。本工程地下连续墙的最大水平位移均介于0.13% H_e ~ 0.23% H_e之间,小于上海地区大部分长条形地铁基坑围护结构变形量。

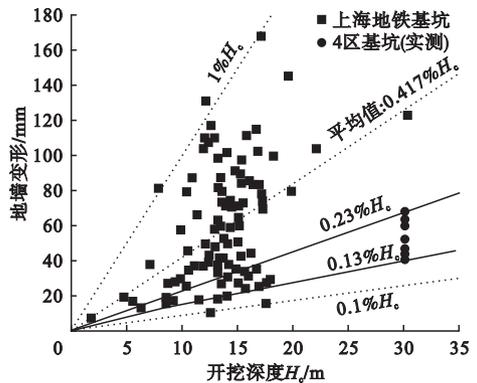


图8 地连墙最大侧移与开挖深度间的关系

Fig.8 Correlation between wall deflection and excavation depth

4.2 墙后地表沉降

数值模拟与现场实测地表沉降如图9所示。无论是按照实测数据的趋势,还是模拟的结果,坑外土体均以凹槽形沉降为基本形态,沉降量随着开挖深度的增加而上升。因此,大刚度的已建地下结构并不能改变位移场分布形式,只是减小了地表沉降的最大幅值和影响范围。靠近已建地下结构的4区墙后土体出现了不同程度的隆起,而远离地下结构的4区墙后土体隆起量较小直至无隆起产生。

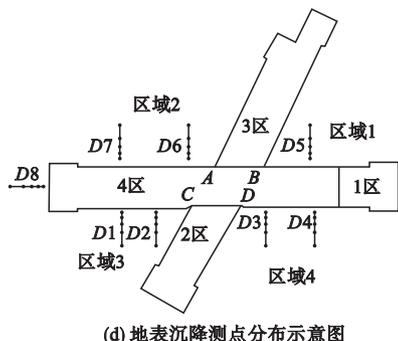
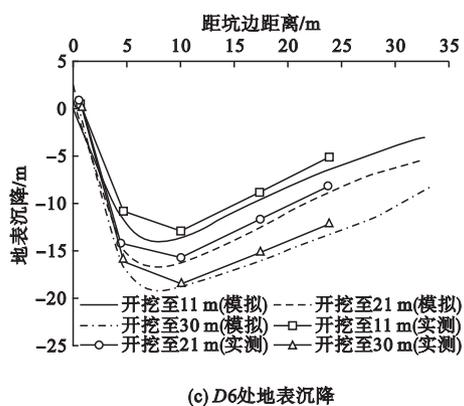
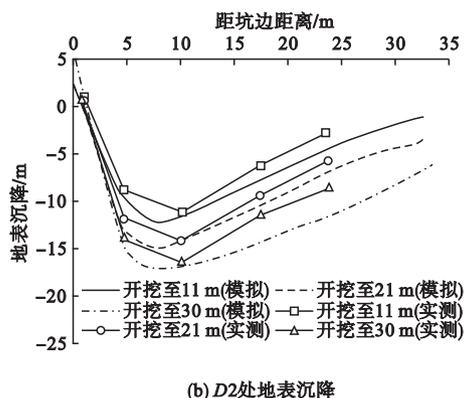
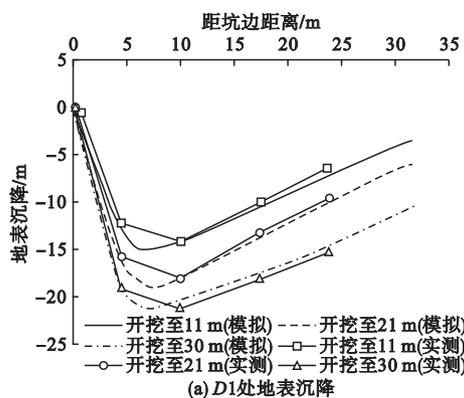


图9 数值模拟与现场实测地表沉降

Fig. 9 Ground settlement for numerical simulation and field monitoring

模拟结果的最大地表沉降值与实测值误差小于5%,实测地表沉降在11 m处达到峰值后迅速减少,模型地表沉降在7.5 m处达到峰值,模拟所得沉降曲线与实测值吻合较好,表明文中数值模拟具有较好的准确度与可靠性。

同4.1节分析相同,笔者将4区基坑的墙后地表沉降实测值与徐中华^[4]统计的72个地铁车站数据对比。坑后地表沉降与开挖深度的关系图10所示。由图可知:上海地铁车站基坑墙后地表沉降值与围护结构变形的统计结果相比,离散程度较大,说明基坑开挖引起的地表沉降更易受除开挖深度外的其他条件影响。尽管本工程4区的开挖深度很大,但其周边地表沉降很小,介于 $0.06\% H_e \sim 0.09\% H_e$ 。除了已建地下结构对地表沉降的约束作用外,较小的实测地表沉降还与4区坑内采用分区开挖,坑内土体加固与高强密支撑等措施有关。

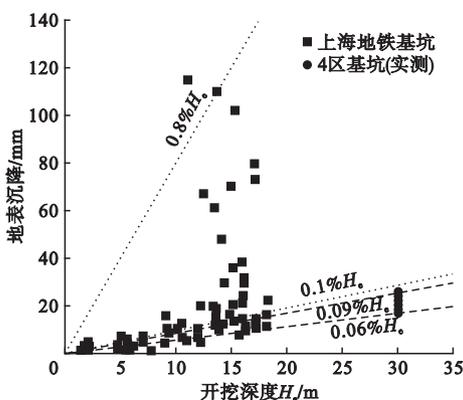


图10 坑后地表沉降与开挖深度的关系

Fig. 10 Correlation between ground settlement and excavation depth

5 结论

(1)已修建地下结构对紧邻开挖基坑的墙体变形和地表沉降在一定范围内均存在不容忽视的影响,墙体越靠近已修建地下结构,其变形越小,墙后的地表沉降也相应受到约束,对于该工程,已建地下结构对紧邻开挖基坑的主要影响范围为1倍开挖深度(30 m)。

由于在该范围内已建地下结构对紧邻基坑的约束效果较强,因此可适当降低围护结构刚度以优化基坑设计。

(2)已修建地下结构与后开挖基坑的相交角度对后开挖基坑有明显影响.集中表现在:二者相交成锐角区域内的围护结构变形与地表沉降较相交成钝角的区域减小约20%,影响范围也较相交成钝角区域增加50%.

(3)大刚度的已建地下结构不能改变位移场分布形式,而是减小了地表沉降的最大幅值和影响范围.该工程由于4区周围存在已建地下结构,并且采用坑内土体加固,高强度支撑等措施,围护结构变形和墙后沉降实测值均远远小于大部分上海地铁基坑变形实测值.

参考文献

- [1] 刘国彬,王卫东,刘建航,等.基坑工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2009.
(LIU Guobin, WANG Weidong, LIU Jianhang. Excavation engineering handbook [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.)
- [2] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]. Proceedings of the 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering. Mexico City: State of the-Art-Volume, 1969: 225 - 290.
- [3] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation [J]. Canadian geotechnical journal, 1993, 30(5): 758 - 767.
- [4] 徐中华.上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D].上海:上海交通大学,2007.
(XU Zhonghua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.)
- [5] 谭勇,康志军,卫彬,等.上海软土地区某地铁风井深基坑案例分析[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(6):1048 - 1055.
(TAN Yong, KANG Zhijun, WEI Bin, et al. Case study on deep excavation for metro ventilation shaft in Shanghai soft clay [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2016, 50(6): 1048 - 1055.)
- [6] TAN Y, WEI B. Observed behaviors of a long and deep excavation constructed by the cut-and-cover technique in Shanghai soft clay [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2012, 138(1): 69 - 88.
- [7] TAN Y, LI M W. Measured performance of a 26 m deep top-down in excavation in downtown Shanghai [J]. Canadian geotechnical journal, 2011, 48(5): 704 - 719.
- [8] 刘燕.地铁换乘枢纽后建车站施工影响研究[D].上海:同济大学,2007.
(LIU Yan. Research on the deep excavation effect of the influence the interchanging metro station [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.)
- [9] CHANG C T, SUN C W, DUAN S W, et al. Response of a Taipei rapid transit system (TRTS) tunnel to adjacent excavation [J]. Tunneling and underground space technology, 2001, 16(3): 151 - 158.
- [10] LI M G, WANG J H, CHEN J J, et al. Responses of a newly built metro line connected to deep excavations in soft clay [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2017, 31(6): 04017096.
- [11] CHEN J J, WANG J H, XIANG G W, et al. Numerical study on the movement of existing tunnel due to deep excavation in Shanghai [J]. Geotechnical engineering, 2011, 42(3): 30 - 40.
- [12] 李兵,嵇凤颖.盾构隧道施工对邻近深基坑的影响分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(4):639 - 644.
(LI Bing, JI Fengying. Influence of shield tunneling on adjacent deep foundation pit [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(4): 639 - 644.)
- [13] 范益群,钟万勰,刘建航.时空效应理论与软土基坑工程现代设计概念[J].清华大学学报(自然科学版),2000(增刊1):49 - 53.
(FAN Yiqun, ZHONG Wanxie, LIU Jianhang. Theory of time-space effect and modern design concepts in soft soil pit engineering [J]. Journal of tsinghua university (science & technology), 2000(S1): 49 - 53.)
- [14] OU C Y, LIAO J T, LIN H D. Performance of diaphragm wall constructed using the top-down method [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1998, 124(9): 798 - 808.
- [15] 丁勇春.软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D].上海:上海交通大学,2009.
(DING Yongchun. Excavation-induced deformation and control in soft deposits [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.)
- [16] HSIEH P G, OU C Y, SHIH C. A simplified plane strain analysis of lateral wall deflection for excavations with cross walls [J]. Canadian geotechnical journal, 2012, 49(10): 1134 - 1146.