

地铁深基坑施工与邻近建筑的关联效应研究

李 兵¹,孙小飞¹,于忠诚²,李高科¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学后勤服务集团,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究地铁深基坑开挖对邻近建筑物的影响,分析造成建筑物产生沉降的不同因素,为类似地铁深基坑工程与对建筑物的保护提供可靠指导.方法 以岩土数字软件 MIDAS GTS NX 为基础,结合沈阳地铁十号线北大营街站深基坑工程,建立土体与基坑围护结构相互作用的三维整体计算模型,并将数值模拟值与实测数据进行比较,检验模型的适用性;根据模型分析有哪些因素在基坑开挖时对建筑物变形有影响.结果 距基坑边缘距离以及围护桩埋深度对建筑物沉降有较大影响,建筑物边缘距基坑边缘的距离为 6 m 时,基坑较为安全;基坑围护桩埋入土深度为 1.5 倍的基坑开挖深度时,可以较好地抑制相邻建筑的变形,超过这个临界点时抑制作用明显减小.结论 当类似工程如果建筑物距离基坑小于 6 m 时,可以提前采取一些加固措施,如设置隔断墙,在开挖前采取提高围护桩入土深度来减小基坑支护结构和邻近建筑物变形.

关键词 深基坑;建筑物;监测;数值分析

中图分类号 TU46⁺3;TV551.4⁺2

文献标志码 A

Analysis of Correlation Effect Between Deep Foundation Pit Construction of Subway and Adjacent Buildings

LI Bing¹, SUN Xiaofei¹, YU Zhongcheng², LI Gaoke¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Logistics Services Group, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the influence of deep excavation of subway on adjacent buildings, this paper analyzes the different factors causing settlement of buildings, and provides reliable guidance for the deep foundation pit engineering and the protection of buildings. This combination of Shenyang No. ten subway line Beidaying Street Station Deep Foundation Pit Engineering, geotechnical numerical software MIDAS GTS NX, considering the whole three-dimensional soil and retaining structure interaction model, the numerical value is compared with the measured data,

收稿日期:2018-12-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51738007);辽宁省科技厅项目(201602611);沈阳市科技局项目(Z3318003)

作者简介:李兵(1974—),男,教授,博士,主要从事城市地下轨道交通工程方面研究.

verified the applicability of the model. The distance from the edge of the foundation pit and the depth of the retaining pile is more obvious to the settlement of the building, and the safety distance between the building and the edge of the foundation pit is 6m; The excavation depth of foundation pit retaining piles is 1.5 times. When the depth of foundation pit is deep, the inhibition effect on adjacent buildings is better, and the inhibition effect is obviously reduced when the depth exceeds the critical point. Similar works If the building is less than 6m away from the foundation pit, some reinforcement measures can be taken in advance, such as setting the partition wall, and reducing the foundation pit support structure and adjacent building deformation by increasing the depth of the retaining pile before excavation.

Key words: deep foundation pit; building; monitor; numerical analysis

近年来,人们对深基坑施工对邻近建筑的影响研究一直处于高度关注中,而且其本身具有很重要实际意义,这是实际深基坑工程中常常需要面对的问题.国内外学者根据相关研究和试验在深基坑施工过程中周边建筑物变形研究方面取得了不凡的成果^[1-3],进行现场实践、监测、分析、模拟以及实验,得出了一些基坑开挖对邻近建筑影响的因素,还有一些预防方法,以及出现对建筑物有过大影响时的一些解决方法^[4-7]. Peck通过对实际工程监测数据的统计与总结,认为地表沉降与开挖深度有关,并提出了地表预测曲线,该曲线近似正态分布曲线,还提出了横向地表沉降公式,广泛应用于基坑施工过程中周边地表沉降的计算^[8]. E. J. Cording^[9]等研究发现,当建筑物基础为柔性地基时,基坑施工过程中产生的建筑物变形与变形角有直接联系,沉降曲线的斜率、变形角与基坑周边地表的水平应变有关.李坤等^[10]采用数值分析法研究了不同因素对软土地基基坑周边地表沉降最大值的影响,同时分析了在进行软土地基建筑物地基加固时,不同加固深度和宽度对基坑围护结构变形的影响.余阳^[11]应用有限元软件 MIDAS/GTS 构建计算模型并导入 FLAC3D 进行模拟分析了解放大路站开挖对交行联通大厦的影响.

地铁建设一般处于城市人口密集区,周边环境复杂,加大了施工难度,同时也给城市

居民的生活工作带来了不可避免的影响,在地铁深基坑施工过程中,基坑支护结构、周边土体与相邻近建筑物之间是相互影响的,基坑开挖会造成土体扰动,导致坑外土体发生竖向和水平位移,同时竖向和水平位移均与地质状况、围护结构设计、施工方法、与基坑相对距离紧密相关^[12]. 邻近建筑物不同位置处受到基坑开挖影响不同,所引起的变形程度也有所不同,建筑物内部也将产生额外的应力^[13],当附加应力过大时,建筑物将产生裂缝,影响建筑使用功能和舒适性,严重时可导致建筑结构破坏^[14]. 因此,国内外学者一直将建筑物变形作为研究深基坑变形的重难点,并且已取得大量研究成果,但深基坑安全问题时有发生,还需进一步深入探究.基于此,笔者研究地铁深基坑开挖时对邻近建筑的影响,进行现场监测数据的采集、处理,并根据现场实际情况建立模型进行模拟,将实测数据与模拟数据进行对比,得出基坑开挖时距离建筑物的最佳距离以及基坑围护桩入土的最佳深度.

1 工程概况

沈阳地铁北大营街站是地铁四号线与十号线的换乘站,位于北海街与合作街路口的西南方向;北海街道路红线的宽度约 60 m,合作街道路红线的宽度约 30 m. 北海街路上有高架桥,北海街和合作街路口为斜向相交,沈阳市大东区城市管理局第六环境卫生管理

所坐落于路口东南角,路口的南侧是一幢高层住宅小区,在路口的西南角有一个名为北海嘉园的小区,而沈阳市第十人民医院市胸科医院在其西北侧,其北侧是合作新村,建筑未退后道路红线,站点周边交通发达.十号线北大营街车站为地下两层双柱三跨岛式站台车站,有效平台宽度 14 m,车站长 189 m,标准段宽度为 22.7 m,盾构井段宽 26.5 m.

2 邻近建筑物监测结果分析

建筑物由于本身的结构形式和基础的存在,本身的刚度抑制了建筑本身的差异沉降,这有利于建筑物的保护^[15].根据施工现场的工程状况、工程监测等级、监测难度,对车站深基坑邻近建筑物进行了相应监测点的布置工作,其中在邻近建筑物北海嘉园附近埋设了 7 个监测点,编号为 JGC-1 ~ JGC-7,监测点的具体布置情况如图 1 所示.

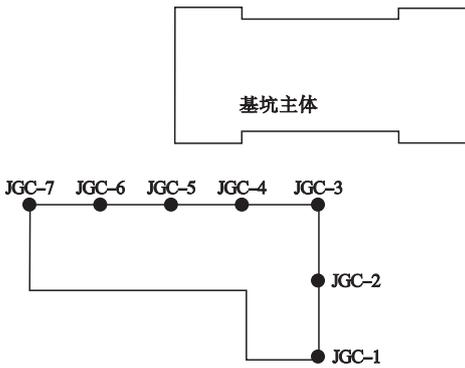


图 1 建筑物监测点平面布置图

Fig. 1 Floor plan of the building monitoring points

框架结构是由很多梁和柱组成用来承受荷载的框架,优点是自重很轻并且其构件相对标准,但其缺点是节点应力较为集中,侧向刚度较小,是一个相对柔性的超静定结构,对差异沉降反应敏锐,出现比较小的不均匀沉降就可能使得原结构的应力增长,从而导致内力重分布,如果差异沉降过大,有可能使结构产生裂缝、倒塌等问题^[16].此外,如果结构的差异沉降比较小但是它的绝对沉降较大,它还可能导致正常使用的建筑物附近的市政

工程或地下管网线路等设施的故障^[17].所以近邻建筑物的绝对沉降和差异沉降都是我们所要重点关注的.在研究基坑对邻近建筑物的差异沉降影响时,主要取决于建筑物的哪边方向与基坑平行.当考虑建筑短边方向的差异沉降的时候,此时建筑物长边方向需要与基坑平行;相反,则需要建筑物长边方向需要与基坑平行^[18].笔者所研究的情况是建筑物长边与基坑平行,因此需集中精力去考虑并观察建筑物短边方向的差异沉降.建筑物监测点 JGC-3、JGC-1 为建筑短边两端的监测点,监测点 JGC-3、JGC-7 为建筑长边两端的监测点.差异沉降指的是靠近基坑(监测点 JGC-3)绝对沉降与远离基坑(监测点 JGC-1 或 JGC-7)的绝对沉降之间的差值,绝对沉降曲线中负值表示沉降,正值表示上浮.当差异沉降值大于零时意味着柱基距离基坑较远的那一端沉降大,离基坑较近的一端沉降小,框架结构向远离基坑的方向倾斜.同理差异沉降量小于零则表示建筑物向基坑内倾斜.

对建筑物北海嘉园的所有监测点 JGC-1 ~ JGC-7 绝对沉降值以及建筑物短边和长边的差异沉降进行分析处理,每个工况下建筑物沉降值如表 1 所示,绝对沉降与差异沉降随着施工进行其变化曲线如图 2 所示.

表 1 建筑物沉降值

Table 1 Accumulated settlement value of building settlement

监测点 点号	沉降/mm				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
JGC-1	-0.62	-0.86	-0.91	-1.07	-1.21
JGC-2	-0.96	-1.38	-2.02	-2.98	-3.68
JGC-3	-1.07	-2.77	-3.75	-4.46	-4.97
JGC-4	-1.15	-1.86	-2.36	-2.99	-3.78
JGC-5	-1.04	-1.55	-2.08	-2.59	-3.14
JGC-6	-0.87	-1.33	-1.93	-2.21	-2.47
JGC-7	-0.77	-1.48	-1.79	-1.98	-2.31

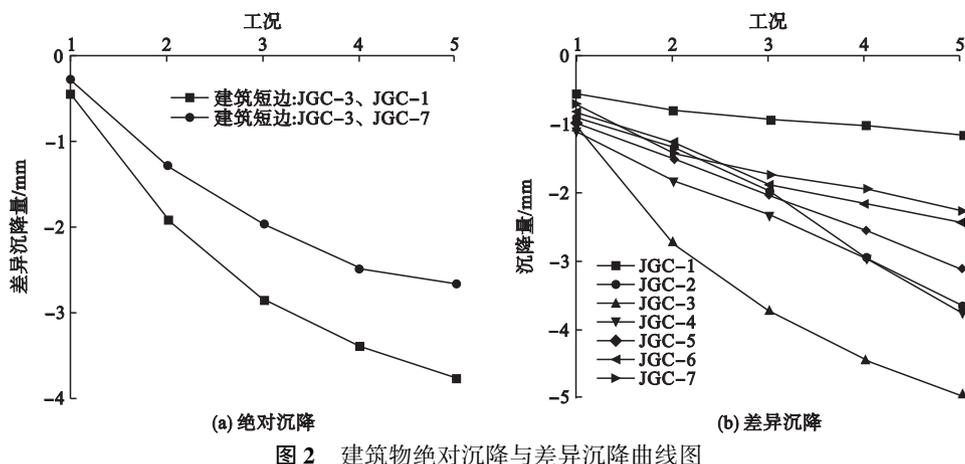


图2 建筑物绝对沉降与差异沉降曲线图

Fig. 2 Absolute settlement and differential settlement curves of buildings

根据图2可知:随着基坑开挖的进行,建筑物绝对沉降量越来越多,而且沉降差异比较明显.绝对沉降最大的是位于距离基坑较近的监测点JGC-3,位于建筑物长边与短边相连接的角落,绝对沉降较小的是位于建筑物短边的顶部的监测点JGC-1.建筑物差异沉降随着开挖的进行不断加大,且建筑物短边差异沉降明显大于长边差异沉降.说明同一建筑物不同测点发生了明显的差异沉降,且与建筑物与基坑相对位置有关,当进行监测时,应主要考虑建筑物与基坑之间在垂直方向上的差异沉降.根据设计规范文件及现场实际调查情况,经过分析辨识,基坑风险等级为一级,北海嘉园风险等级为一级,所以监测等级为一级,根据风险源等级制定风险源监控量测控制指标及监测频率.笔者监测项目中最大绝对沉降量为4.97 mm,小于控制值10 mm,不均匀沉降最大值为3.76 mm,小于控制值12 mm,由于开挖结束后周边土体已经发生了应力重分布,处于较稳定状态,对周围环境的影响较小,因此邻近建筑物结构和使用功能处于相对安全阶段.

3 邻近建筑物数值模拟分析

3.1 计算模型建立

沈阳地铁十号线北大营街站长为189 m,端头盾构井处宽为26.5 m,标准段处

宽为22.7 m.遵循圣维南原理并结合之前的施工经验可以知道,由于基坑开挖所引起的扰动范围可能是基坑开挖深度的3~4倍,影响深度大概是其开挖深度的2~4倍^[19].地铁十号线最大开挖深度为18.5 m,为简化计算,有限元模型取长度是80 m,宽度是80 m,深度是40 m.计算模型如图3所示.

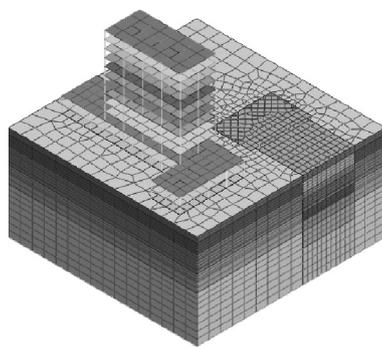


图3 整体模型图

Fig. 3 Overall model diagram

土体计算本构模型采用Mohr-Coulomb模型,建筑物、地连墙及内支撑采用弹性模型.土体计算的参数是依照地质勘察报告的结果得来,具体数值如表2所示,表3为围护结构参数,表4为建筑物控制值,其他构件的参数则采用实验室通用参数的结果.

3.2 计算结果分析

基坑开挖将造成周围土体扰动,对周边土壤的影响是显而易见的^[20],当基坑周边建筑物离基坑越近时,周边土体产生的位移给

表2 主要土层参数

Table 2 Main soil parameters

序号	地层名称	重力密度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模 量/MPa
1	杂填土	18.4	33.8	11.4	3.5
2	砾砂	17.4	0	23.5	11.0
3	圆砾	21.0	0	35.0	26.2
4	圆砾	21.8	0	36.4	32.2
5	砾砂	20.8	0	36.0	29.0

表3 围护结构设计参数

Table 3 Design parameters of enclosure structure

构件	重力密度/ (kN·m ⁻³)	泊松比	弹性模 量/MPa
钻孔灌注桩	20	0.17	30
混凝土支 撑与圈梁	25.5	0.20	32
钢支撑	79	0.30	210
钢围檩	78	0.20	200

表4 建筑物的控制值

Table 4 Control values of settlement of buildings

监测项目	控制值/mm	报警值/mm	变化速率/ (mm·d ⁻¹)
建筑物沉降	10	8	1.6

建筑物带来的影响也越大,建筑物产生的沉降趋势与基坑开挖深度成正比。通过数值模拟计算,得出基坑开挖后建筑物沉降云图,如图4所示。

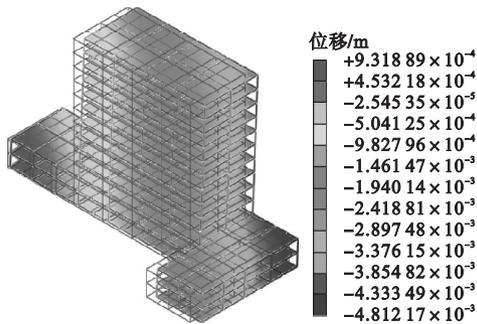


图4 基坑开挖后建筑累计沉降云图

Fig. 4 Settlement cloud of the building after excavation

笔者结合基坑邻近建筑物结构型式,重点分析典型监测点位的沉降。选取垂直基坑方向建筑物两监测点,对比他们的绝对沉降量实测值与模拟值,同时对比建筑物短边方向建筑物的差异沉降,分别如图5、图6所示。

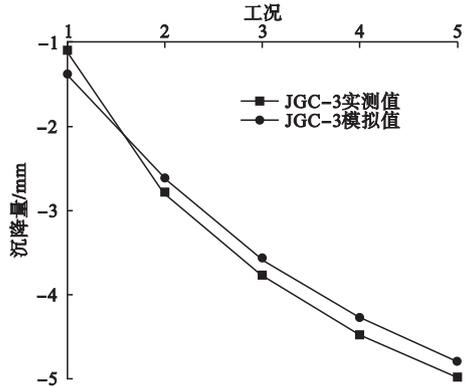


图5 建筑物绝对沉降模拟值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured values of absolute settlement of buildings

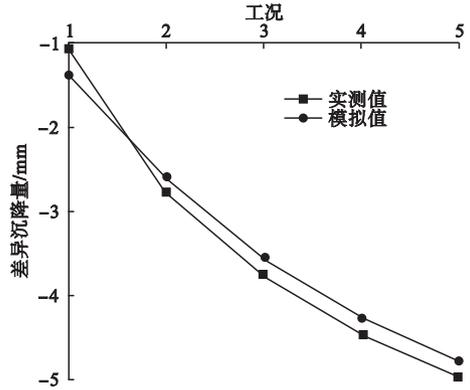


图6 建筑物差异沉降模拟值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of simulated and simulated values of differential settlement of buildings

从建筑物随基坑开挖沉降云图以及两监测点模拟值与实际值对比曲线来看,随着基坑开挖进行,各监测点的绝对沉降量与差异沉降慢慢开始增大,且建筑物有向坑内倾斜的趋势,当差异沉降比较大时候,会造成建筑物失稳或结构性破坏。从建筑物监测点JGC-3、JGC-1监测数据与模拟计算值的对比曲线以及差异沉降曲线对比可以看出,数值模拟曲线图与实测曲线图十分接近,所

得出的这个结果进一步的验证了计算模型的正确性和适用性,因此有限元分析模型可用于分析基坑周围的支护结构和周围建筑物的变形,并模拟基坑开挖过程的分析,可有效地指导现场施工,并及时进行监测。

4 深基坑施工中对周边建筑物的影响因素分析

4.1 距基坑边缘不同距离对建筑物沉降的影响

通过建立深基坑的开挖和相邻建筑物的模型,分别模拟出相邻建筑物边缘距基坑边缘的距离为 $D = 4\text{ m}$ 、 6 m 、 8 m 、 10 m 、 12 m 的五种情况下,分别模拟建筑物的最大沉降量,模拟出基坑与建筑物的安全距离,使施工单位可以在开挖前采取相应保护措施,减少基坑开挖时对邻近建筑物的影响,图 7 是建筑物边缘与基坑边缘距离不同时,建筑物所对应的基坑地下墙的水平位移图,图 8 是建筑物与基坑边缘距离不同时,建筑物的绝对沉降与差异沉降图。

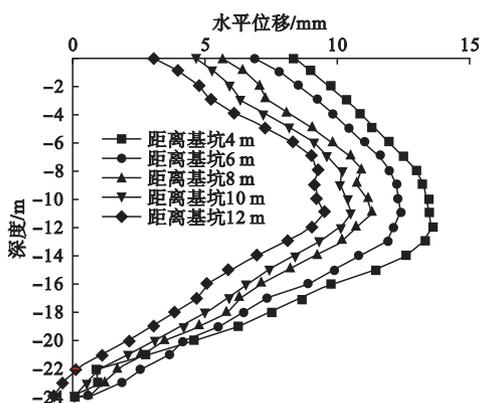


图 7 对应不同距离的地下连续墙水平位移

Fig. 7 Horizontal displacements of underground continuous wall corresponding to different distances

由图 7、图 8 可知,当建筑物距基坑的距离由 12 m 减小到 4 m 的过程中,建筑物绝对沉降和不均匀沉降均逐渐增大,围护墙水平位移与建筑物差异沉降最大值变化曲线较平坦,建筑物绝对沉降曲线图的斜率较大,说明建筑

物绝对沉降更容易受建筑物与基坑的距离的影响,对围护结构变形影响相对较小;地下连续墙深层水平位移最大值均未超过控制值,说明基坑围护结构处于安全范围内;当建筑物边缘与基坑边缘距离不大于 6 m 时,建筑物绝对沉降量已超过 10 mm 的控制值,此时建筑物存在较大风险,应采取相关措施进行控制。

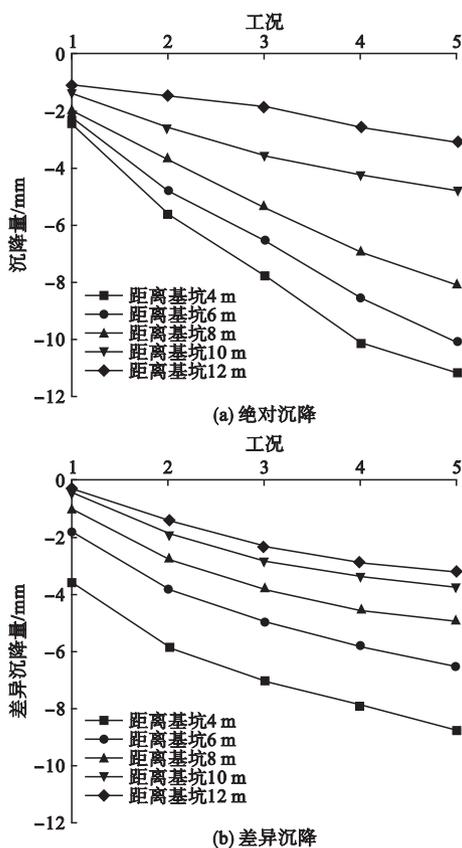


图 8 对应不同距离的建筑物绝对沉降与差异沉降

Fig. 8 Absolute settlement and differential settlement of buildings corresponding to different distances

4.2 深基坑围护桩埋入土的深度不同时对建筑物沉降的影响

为研究深基坑围护桩埋入土的深度对相邻建筑物变形的影响,通过建立基坑与建筑物一体模型,假设建筑物边缘距离基坑边缘 3 m ,按照围护桩入土深度 22.5 m 、 24.5 m 、 26.5 m 、 28.5 m 、 30.5 m 、 32.5 m 六种情况分别进行模拟计算,图 9 是与基坑边缘距离不同的建筑物所对应的基坑地下连续墙在围护桩

入土深度不同时的水平位移图,图 10 是与基坑边缘距离不同的建筑物在围护桩入土深度不同时的绝对沉降与差异沉降图。

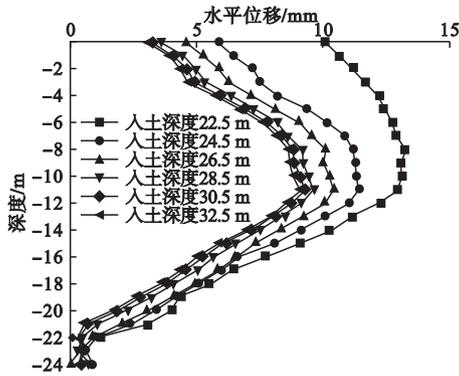


图 9 地下连续墙的水平位移对应不同围护桩埋入土深度

Fig. 9 Horizontal displacements of the underground continuous wall corresponding to different depths of the retaining pile

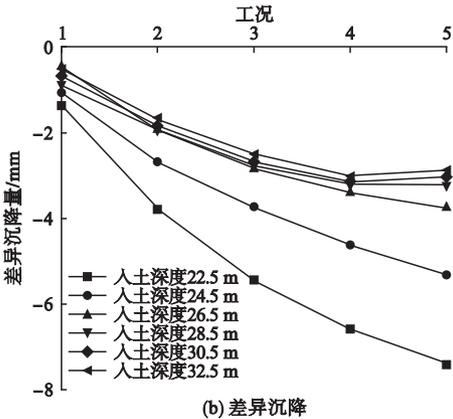
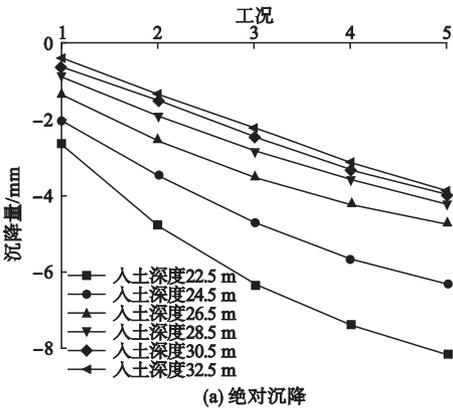


图 10 距离基坑不同的距离对应的建筑物绝对沉降与差异沉降

Fig. 10 Absolute settlement and differential settlement of buildings corresponding to different distances

由图 9、图 10 可知:随着围护桩入土深度的增大,地下连续墙深层水平位移、建筑物绝对沉降与差异沉降均在减小,当入土深度由 22.5 m 增大到 28.5 m 的过程中,建筑物的沉降与地下连续墙的水平位移大大降低,超过 28.5 m 后两者变化不明显,在考虑经济因素的情况下,基坑围护桩入土深度取 28.5 m 时支护作用最好,已知深度 18.25 m,围护桩深度约为深基坑深度 1.5 倍,超过这个临界点时抑制作用明显减小。

5 结论

(1)在基坑开挖过程中,造成土体扰动,土体卸荷造成导致了周边地表产生了不同程度的水平位移和竖向位移,当位移量过大时会导致基坑临近邻近建筑物产生变形或破坏。

(2)随着建筑物边缘距离基坑边缘越近,地下连续墙深层水平位移、建筑物绝对沉降和差异沉降也逐渐开始增加.当建筑物与基坑边缘距离小于 6 m 时,其绝对沉降量已达控制值,应采取相应保护措施。

(3)基坑地下连续墙水平位移和建筑物沉降与围护桩埋入土深度的成反比,当基坑围护桩埋入土深度约为 28.5 m 时,大概是基坑开挖深度的 1.5 倍,对基坑围护结构和建筑物变形有良好的抑制作用,超过这个临界点时抑制作用明显减小。

参考文献

[1] MACDONALD D H, SKEMPTON A W. The allowable settlements of buildings [J]. ICE proceedings; engineering divisions, 1956, 5 (6): 727 - 768.

[2] 王远征. 某基坑施工全过程邻近建筑物沉降控制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
(WANG Yuanzheng. Study on adjacent building settlement control to overall process of foundation excavation construction [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.)

[3] 赵延. 地铁车站深基坑开挖对邻近建筑物影响的监测及数值模拟研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
(ZHAO Yan. Study on monitoring and numerical simulation of near buildings in deep excavation

- of subway station[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2014.)
- [4] 薛莲,傅晏,刘新荣. 深基坑开挖对邻近建筑物的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(5): 847-851.
(XUE Lian, FU Wei, LIU Xinrong. Study on influence of foundation ditch excavation to adjacent building [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2008, 4(5): 847-851.)
- [5] 李昌宝. 深基坑开挖施工及对邻近建筑物的影响分析[D]. 南京: 南京工业大学, 2014.
(LI Changbao. Analysis of the deep excavation construction and the effect on adjacent buildings [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2014.)
- [6] BARRIOS P A, BARRIOS S J, GARCIA N J, et al. Study of the soil consolidation using reinforced jet grouting by geophysical and geotechnical techniques: "La Normal" building complex (Granada) [J]. Construction and building materials, 2009, 23: 1389-1400.
- [7] BRYSON L S. Performance of a stiff excavation support system in soft clay and the response of an adjacent building [D]. USA: Northwestern University, 2002.
- [8] SHALABI F L. Interaction of twin circular shallow tunnels in soils: parametric study [J]. Open journal of civil engineering, 2017, 7: 100-115.
- [9] SON M, CORDING E J. Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005, 131(2): 162-177.
- [10] 俞建霖, 赵荣欣, 龚晓南. 软土地基基坑开挖地表沉降量的数值研究 [J]. 浙江大学学报 (自然科学版), 1998, 32(1): 95-101.
(YU Jianlin, ZHAO Rongxin, GONG Xiaonan. Numerical study of the ground settlement caused by the excavation in soft soil [J]. Journal of Zhejiang university (natural science), 1998, 32(1): 95-101.)
- [11] 余阳. 长春地铁十字换乘站开挖对临近高层建筑影响的数值分析研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
(YU Yang. Numerical analysis study on influence of Chang Chun metro cross interchange transition station excavation to adjacent tall buildings [D]. Changchun: Jilin University, 2014.)
- [12] 丁勇春, 程泽坤, 王建华, 等. 深基坑施工对历史建筑的变形影响及控制研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊1): 644-648.
(DING Yongchun, CHENG Zekun, WANG Jianhua, et al. Influence of deep excavation on deformation and control of adjacent historical building [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S1): 644-648.)
- [13] 袁德浩. 青岛地铁隧道开挖引起的地表沉降变形规律研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
(YUAN Dehao. Research on the evaluation characteristics and instability criterion of debris landslides displacement τ/s fractal parameter [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2012.)
- [14] 张效智. 明光路车站基坑开挖对周边环境的影响分析 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2015.
(ZHANG Xiaozhi. Analysis of influence on the surrounding environment near excavation in ming guang road station [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2015.)
- [15] 华正阳. 深基坑开挖对近距离建筑的安全影响研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
(HUA Zhengyang. A study on the influence of deep foundation pit excavation upon adjacent building safety [D]. Changsha: Central South University, 2014.)
- [16] 郭景全, 李文华. 深基坑开挖施工监测技术 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(12): 71-74.
(GUO Jingchuan, LI Wenhua. Discussion on monitoring technology for deep foundation pit excavation [J]. Road machinery & construction mechanization, 2015, 32(12): 71-74.)
- [17] 吴明亮. 深基坑开挖对相邻浅基础框架结构的影响分析与研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
(WU Mingliang. Analysis and research of deep foundation excavation's influence on the adjacent frame structure with shallow foundation [D]. Changsha: Hunan University, 2012.)
- [18] 木林隆, 黄茂松. 基于小应变特性的基坑开挖对邻近桩基影响分析方法 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 304-310.
(MU Linlong, HUANG Maosong. Small-strain behavior-based method for effect of excavations on adjacent pile foundations [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(S2): 304-310.)
- [19] 于忠波, 任磊, 皮景坤, 等. 相邻深基坑开挖方式对地下管线的影响分析 [J]. 公路与汽运, 2012, 151(4): 239-241.
(YU Zhongbo, REN Lei, PE Jingkun, et al. The influence analysis based on the excavation method of adjacent deep foundation pit on underground pipeline [J]. Highways & automotive applications, 2012, 151(4): 239-241.)
- [20] HUANG L, DUAN S W, ZHU K M, et al. Study on deformation monitoring of subway station deep foundation construction [J]. Applied mechanics and materials, 2016, 847: 425-430.
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 刘永军)