

不同围护结构变形模式对坑内土体位移影响

喻军¹, 尚安峰¹, 蔡益丰¹, 李元海²

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014;

2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 对杭州地区深基坑开挖全过程中内支撑式地下连续墙支护结构和坑内土体位移进行了监测, 归纳为4种变形破坏模式: 悬臂、踢脚、内凸、复合。采用现场监测数据统计和数值分析相结合的方法研究了4种典型变形模式下坑内不同位置土体和支护结构的位移特点, 结果表明, 即使围护结构最大水平位移相同, 由于变形模式不同, 坑内土体位移也各不相同, 破坏模式也各异, 反之亦然; 坑内深层土体变形区域可分为3个: 隆起区、过渡区、稳定区; 比较4种变形模式, 围护结构踢脚变形模式对坑内土体变形影响最大, 引起较大的深层土体水平位移和隆起。因此, 在实际工程中不但要控制坑内土体的最大位移量, 而且应注意围护结构的变形模式的影响, 以防止发生连续倒塌的基坑破坏。

关键词: 深基坑; 变形模式; 土体位移; 对比分析; 监测分析; 数值模拟; 耦合

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)04-0346-08

Analysis of different deformation modes of retaining wall on soil displacement in foundation pit

YU Jun¹, SHANG An-feng¹, CAI Yi-feng¹, LI Yuan-hai²

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: The displacement of retaining structure and soil was monitored during the excavation of deep foundation pit. The results show that the deformation modes of retaining diaphragm wall with inner support at different zones are different, and the parts with the largest displacement are also different. There are four deformation modes of retaining diaphragm walls, namely cantilever, skirting, inward bulge, compound type. The characteristics of soil in the pit with the above four displacement modes of the wall were studied through site monitoring and numerical simulation. The study find that even if the largest horizontal displacement of the wall is similar, the soil displacement in the pit is different with different deformation modes of the wall, vice versa. It is divided into three regions in the pit according to the soil displacement, namely upheaval area, transition area, stable area. The skirting mode will cause the largest displacement, including upheaval and horizontal displacement. Therefore, in engineering practice, not only the largest displacement of the soil in the pit must be controlled, but also the influence of the deformation mode of the retaining structure should be paid attention to prevent the foundation pit from progressive collapses.

Key words: deep foundation pit; deformation mode; ground displacement; comparative analysis; monitoring analysis; numerical simulation; coupling

0 引言

围护结构在坑内外水土压力和支撑力下发生变形, 进而围护结构的变形又影响着土体的位移, 引起基坑失稳, 甚至造成围护结构连续倒塌, 破坏

邻近建筑物, 社会影响严重^[1-3]。因此, 在各类地铁车站、隧道、深基础施工过程中, 精细研究深基坑围护结构及内外土体的位移规律, 对于在复杂环境下深基坑变形控制有着重要的意义^[4-7]。

关于基坑底部隆起研究重点仍主要集中在坑

收稿日期: 2022-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(51174197); 国家重点基础研究发展计划973项目(2014CB046905); 浙江省教育厅项目(Y201941075)。

作者简介: 喻军(1978—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 主要从事隧道及基坑工程施工环境效应研究。E-mail: yujunsunny@163.com。

底表面隆起量和形状方面,提出了一些预测曲线、经验公式、以及隆起量与地表沉降和围护结构变形三者的关系^[8-11]。而对于基坑底部深层土体隆起和水平位移与围护结构变形模式的关系研究甚少。实际随着距离和埋深的不同,基坑底部土体变形特点和扰动程度不同,也跟围护结构的变形模式有关,如龚晓南等^[12]将围护结构变形分为悬臂、踢脚、内凸和复合4种模式。

目前,关于基坑的变形控制,在规范中主要针对对隆起量进行控制,在现场监测中发现围护结构变形模式与基坑底部深层土体变形关系甚密,它们之间存在相互耦合的关系,其机理尚未清楚。本文针对实际工程围护结构不同变形模式下的坑内土体变形进行了实测,分析了土体变形预警值与围护结构破坏模式的关系,对不同变形模式下深基坑底部土体变形进行精细化描述,为复杂环境下深基坑精细化设计和施工提供依据。

1 工程概况及实测数据

1.1 工程概况

中信银行杭州分行新大楼位于杭州市钱江新城,北东侧为解放东路,西南侧为五星路,北西侧紧临浙江移动杭州分公司综合楼。建筑高度99 m,地上21层,地下3层,埋置深度约17.4 m,±0.00地坪标高相当于85国家高程基准7.40 m。主体结构采用钢结构,结构体系为内外2个折面支撑筒组

成的空间结构体系,设计单柱荷载为42 000 kN。

基坑开挖深度为19.7 m,局部电梯井超过20 m,边长为50 m×207 m,采用4道水平支撑(-1.0 m, -7.0 m, -13.0 m, -17.0 m),开挖面积为1 300 m²,为杭州钱塘江区域典型的砂土-粉土地质,见表1。地下水位较高(-2.0 m),距离钱塘江近。附近有新建高楼,基坑变形控制要求严格,坑内采用井点降水,坑内水位低于开挖面3.0 m,坑外采用降水和回灌技术相结合控制影响范围。经过论证,采用地下连续墙+混凝土内支撑围护结构体系,内设4道支撑。

图1中规则排列的是降水井,间隔4.0 m,基坑中央支撑区域靠右边的监测点采用磁力环测定不同深度区域隆起量随开挖深度的变化,对应两侧为坑外土体位移监测点,并且在同一断面的地下连续墙内,布有测斜管监测地下连续墙的变形,以及接头处有钢筋计测定该处的压力。根据变形特点,此基坑变形为内凸模式,特征为上部围护结构刚度较大,土压力较小,围护结构变形小,随着深度增加,土压力增加,内支撑施工滞后,中部变形较大,而基坑底部增加了水泥搅拌加固,支护刚度增加,围护结构变形减小,也不会出现踢脚破坏。

1.2 实测数据分析

地下连续墙的水平位移采用测斜仪测定,选取CX1和CX2测点分析地下连续墙的变位,最大位移为15 mm,位于第四道支撑与基坑底面之间,在地下连续墙顶部有向基坑外位移,最大位移达13 mm,如图2所示。

表1 场地土层划分

Table 1 Stratigraphic profile of the foundation

层号	土层名称	层厚/m	顶板标高/m	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
① ₁	灰杂色杂填土	4.30~8.00	4.80~9.32	—	—	—
② ₁	灰黄、灰色粉砂(砂质粉土)	1.90~3.40	0.40~3.20	19.44	7.3	23.4
② ₂	黄灰色砂质粉土	2.20~5.80	-2.76~-0.59	19.31	8.0	23.1
③ ₁	灰绿色粉砂夹粉土	3.40~8.10	-6.80~-3.32	19.81	8.7	23.8
③ ₂	灰色砂质粉土	0.50~3.60	-12.70~-9.06	19.90	8.8	24.6
④ ₁	灰色淤泥质粉质黏土	2.50~4.90	-14.70~-12.40	18.65	10.5	22.5
④ ₂	兰灰色、黄灰色粉质黏土	0.80~3.80	-17.30~-15.68	18.67	10.9	22.8
⑤ ₁	灰黄、褐黄色粉质黏土	3.00~7.70	-20.80~-17.40	18.79	10.2	22.1
⑤ ₂	灰黄色粉质黏土夹粉砂	0.90~3.30	-26.40~-21.65	19.37	10.8	22.2
⑥ ₁	黄灰色粉质黏土	1.00~3.40	-25.16~-23.51	19.41	11.6	22.1
⑥ ₂	灰黄色细砂	0.60~2.50	-28.00~-24.49	17.90	7.6	20.0
⑦ ₁	灰黄色圆砾	1.50~5.70	-30.00~-26.29	17.67	6.8	19.7
⑦ ₂	灰黄色、灰色卵石	21.00~26.20	-32.50~-28.60	17.80	7.3	20.3
⑦ ₂ '	灰色粉砂	2.00~2.20	-42.20~-40.95	18.65	8.5	20.8
⑧	紫红色强风化泥质粉砂岩	揭露 3.80	-54.80~50.95	22.40	—	—

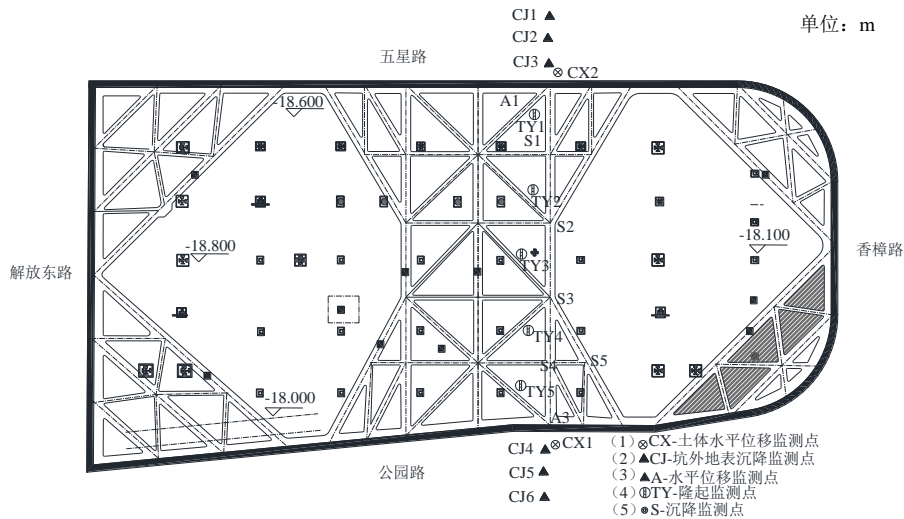
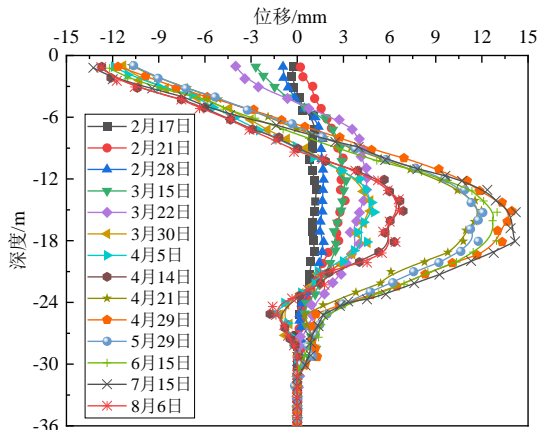
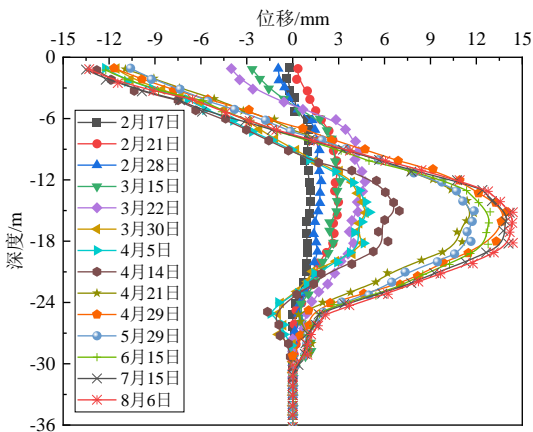


图1 中信银行大厦监测点平面布置图

Fig. 1 Layout plan of monitoring points of China CITIC Bank Building



(a) CX1号测斜管位移图



(b) CX2号测斜管位移图

图2 地下连续墙水平位移随时间变化曲线图

Fig. 2 Temporal evolution of horizontal displacement of diaphragm wall

在2个测斜监测点之间均匀布置了5个深层土体位移测点(监测点的标高为18.5 m、19.5 m、20.5 m、24.5 m、27.5 m,包括竖向和水平向位移),基坑采用分层分块分区开挖,先开挖靠解放路的左

侧,后开挖靠五星路一侧,然后中间区域,且每次开挖不超过1 m深度,如此循环直至开挖结束。开挖时间为2012年3月30日—2012年4月24日,由于监测滞后,因此得到部分土体变形监测数据,竖向位移如图3~7,水平位移如图8~12。

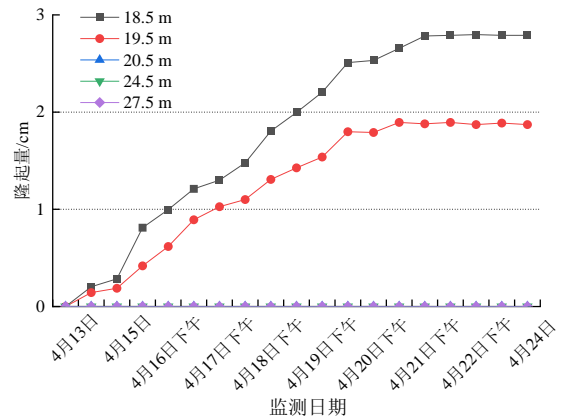


图3 TY1点隆起随时间的变化曲线

Fig. 3 Temporal evolution of TY1 upheaval

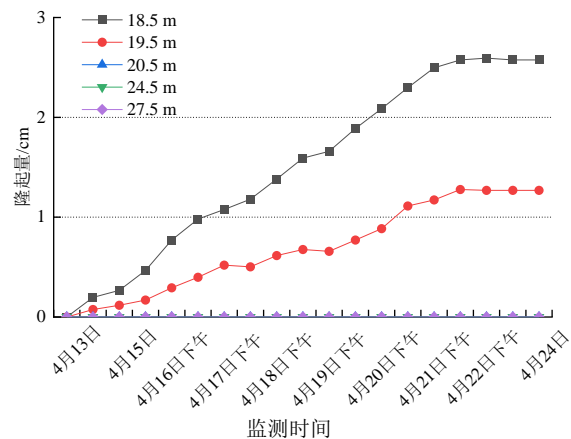


图4 TY2点隆起随时间的变化曲线

Fig. 4 Temporal evolution of TY2 upheaval

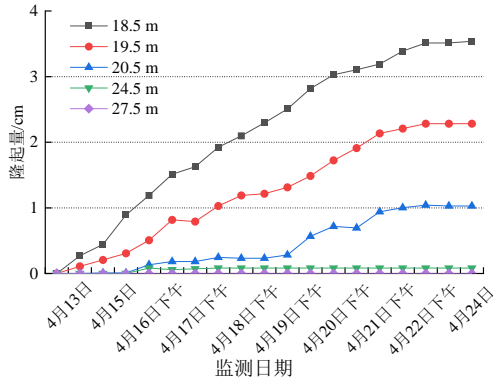


图 5 TY3 点隆起随时间的变化曲线
Fig. 5 Temporal evolution of TY3 upheaval

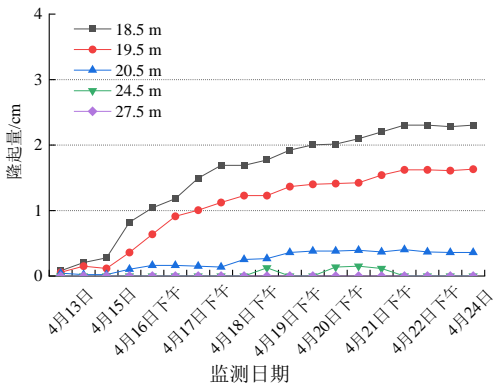


图 6 TY4 点隆起随时间的变化曲线
Fig. 6 Temporal evolution of TY4 upheaval

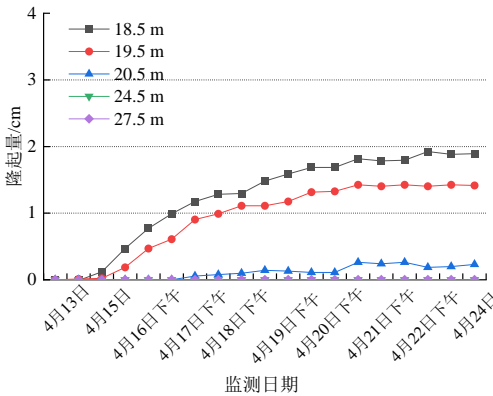


图 7 TY5 点隆起随时间的变化曲线
Fig. 7 Temporal evolution of TY5 upheaval

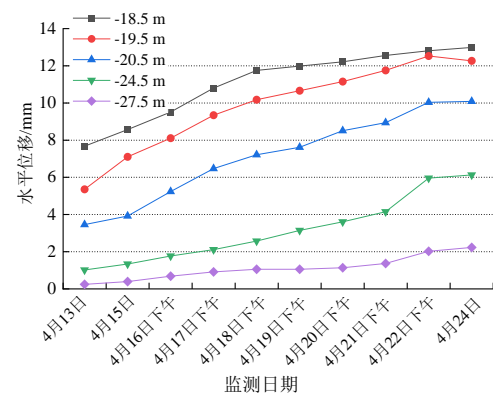


图 8 TY1 点水平位移随时间的变化曲线
Fig. 8 Temporal evolution of TY1 horizontal displacement

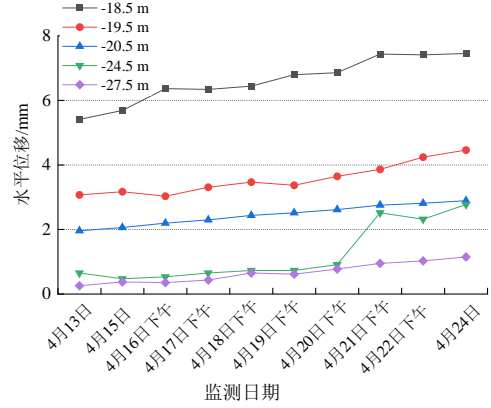


图 9 TY2 点水平位移随时间的变化曲线
Fig. 9 Temporal evolution of TY2 horizontal displacement

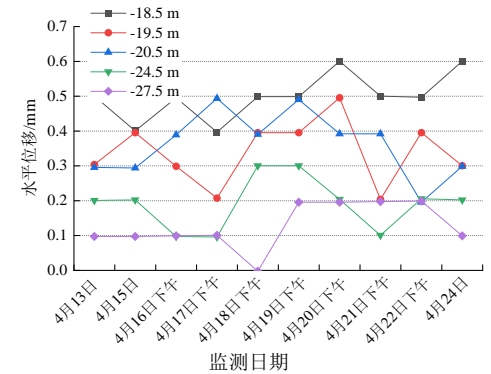


图 10 TY3 点水平位移随时间的变化曲线
Fig. 10 Temporal evolution of TY3 horizontal displacement

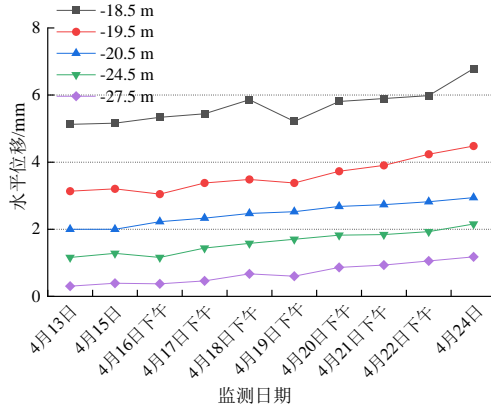


图 11 TY4 点水平位移随时间的变化曲线
Fig. 11 Temporal evolution of TY4 horizontal displacement

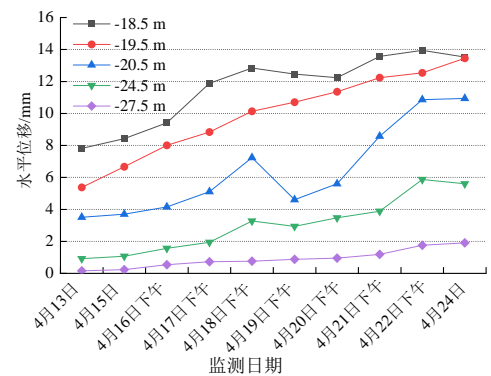


图 12 TY5 点水平位移随时间的变化曲线
Fig. 12 Temporal evolution of TY5 horizontal displacement

随着测点深度的增加,隆起量减小,在基坑底部以下 2.0 m, 基坑隆起接近于 0; 随着开挖深度的增加, 沿竖向从上往下, 隆起量减小, 位于标高 -18.5 m, 最大达 3.5 cm, 说明随着基坑开挖卸荷的增加, 最上面应力释放越大, 变形越大, 向下逐渐减小, 在基坑上部开挖时, 可以把地下连续墙下端看作固定点, 产生向上隆起, 地下连续墙产生水平方向变形, 竖向基本不变。此外从基坑边缘向中心看, 边缘隆起量小, 最小的约为 2.0 cm, 而位于中间的 TY3 点, 隆起量最大, 达 3.5 cm, 此基坑底部隆起的形状是两边低, 中间高, TY3 点波动较大, 是由于该点有挖机施工扰动。土体变形模式同窄基坑变形。基坑隆起的速率是先减小后增大再减小, 然后趋于稳定, 见图 2~7。深基坑水平位移较小, 累计最大位移为 1.4 cm, 不到竖向位移的一半, 主要是因为地下连续墙和内支撑刚度较大, 以及地下连续墙插入深度较大, 减小了围护结构变形和底部土体的变形。总之, 围护结构坑底处变形较大, 被动土压力减小, 容易出现踢脚破坏, 见图 8~12。

2 数值模拟及结果分析

2.1 数值模拟

采用 Plaxis 有限元软件建模, 基坑开挖深度为 20 m, 长为 207 m×50 m, 为了减少计算时间, 取对称性基坑一半尺寸, 模型边界上边自由, 向下 80 m, 宽度方向取 100 m, 长度方向取 400 m (图 13), 基本满足模型边界基坑变形无影响, 采用小应变硬化模型 (HSS 模型) [11] 上。

模拟坑内土体上凸位移及地下连续墙内凸变形模式, 再模拟围护结构踢脚、悬臂变形模式。

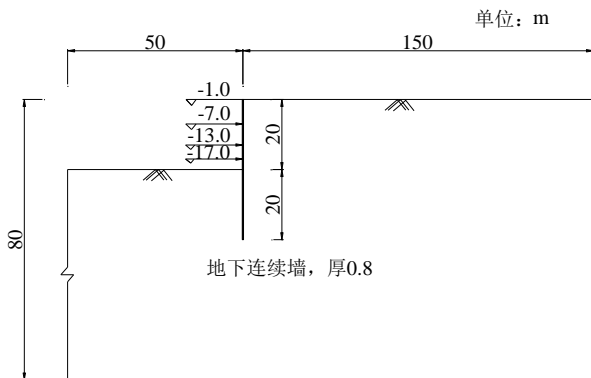


图 13 模型尺寸示意图

Fig. 13 Sketch of model dimension

围护结构及内支撑参数见表 2, 采用小应变硬

化模型, 为了使计算简便, 在相同条件下寻求统一的变形规律, 对于同一层土性参数按照厚度加权平均, 共有 7 层土, 见表 1。小应变初始剪切刚度 $G=150\ 000\ \text{kPa}$, 剪切应变水平参数 $\gamma_0=0.2\times 10^{-3}$, 模拟工况下深层土体变形: (1) 生成初始应力场; (2) 清零初始位移场并设置围护结构; (3) 开挖至 -1 m, 降水至 6 m, 设置围护结构和内支撑; (4) 重复以上步骤, 直至开挖结束。

表 2 围护结构及内支撑参数

Table 2 Parameters of retaining structure and inner support

序号	尺寸/ (m×m)	密度/ (kg/m ³)	弹性模 量/GPa	抗压强 度/MPa
地下连续墙	0.8×20	2 400	20	40
水平内支撑	0.5×0.4	2 400	20	40
竖向钢支撑	0.2×0.2	7 800	30	—

根据以上的基坑开挖顺序、模型尺寸和土性参数, 随着开挖深度的增加, 基坑底部变形慢慢增大, 呈马鞍形状, 跟现场监测数据吻合, 其中计算围护结构内凸式变形对应的坑内地表变形, 坑底隆起最大值为 3.5 cm, 距离围护结构 50 cm 处, 最大竖向位移为 1.3 cm, 位于围护结构与坑内地表交接处, 变形呈对称分布。总之, 数值模拟结果与现场监测结果无论在变形规律还是变化量值上都较吻合, 如图 14 所示。

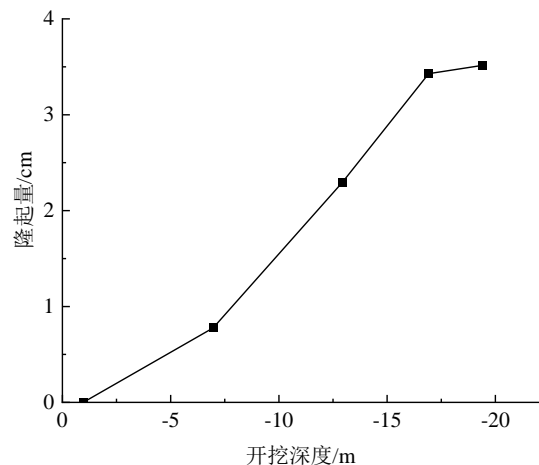


图 14 坑底隆起随开挖深度的变化曲线

Fig. 14 Curves of bottom heave with excavation depth

2.2 坑内地表变形

在基坑中心处地表变形主要是卸荷引起的隆起。在实际工程中, 往往重视基坑底部隆起而忽略基坑底部水平变形, 即土体被水平向压密, 容易造成围护结构水平变形过大被折断, 在施工中应引起

注意,如杭州地铁1号线湘湖路车站,就是这种破坏模式。

2.3 坑内深层土体变形

从现场监测和数值模拟可知,随着开挖深度增加,土体变形的影响深度也增加,影响程度减小,因为卸荷比差异以及受围护结构的影响不同,接近基坑底部围护结构变形大,接近最大值,越接近基坑地表土体隆起量越大,土体水平变形量也越大。

隆起影响区域可分为3个:隆起区、过渡区、影响较小区域,如图15所示。

(1)隆起区:在卸荷回弹和围护结构变形影响下,靠近围护结构附近的土体隆起量比较大,从围护结构向基坑内看,隆起量先增加后减小,由于土体受围护结构摩擦作用,靠近围护结构的土体隆起小,向里逐渐增大,当达到0.5倍开挖深度时,隆起量为最大,然后逐渐减小,因为受围护结构的影响减小。

(2)过渡区:当到达1倍开挖深度时,土体隆起量减小,但受到其附近隆起的牵引作用,仍然有一定隆起,向里减小。

(3)影响较小区域:位于基坑中央附近,受围护结构变形影响很小,隆起小,隆起量等于卸荷引起的回弹量。随着基坑宽度增加,这个区域面积增加,对于狭长基坑,由于两侧围护结构对中央区都有影响,产生影响区域重叠,中部隆起量最大,基坑底部变形呈倒锅底形状。

水平变形区域也可分为3个:隆起区、过渡区、影响较小区域,如图16所示。

(1)隆起区:水平方向变形主要由于围护结构向基坑内变位引起,土体在水平力作用下,产生挤密、旋转等变形,其变形大小与围护结构变位大小成比例,从水平方向看,土体变形类似悬臂受分布力作用的变形,在基坑底部以下0.8倍区域内有变形,再向下无变形,最大变形接近于围护结构变形,为1.3 cm,越向下变形越小。

(2)过渡区:由于受围护结构变形影响减小,基坑向里,水平变形逐渐减小,但受到附近土体挤压作用,仍然有一定变形,变形量较小。

(3)影响较小区域:接近基坑中央,土体水平向变形接近于0,几乎不受基坑围护结构的影响。但对于狭长基坑,两侧围护结构变位对中央土体都有影响,产生影响区重叠,为较大压密。

在基坑底部变形分区方面,有许多学者进行了研究,根据基坑宽度不同有不同的分区,如杜磊等^[13]结合某基坑工程,根据坑底回弹现场数据,进行地表和坑内曲线拟合,提出宽基坑定义和回弹深度的分区,提出了基坑开挖过程中自由地表的沉降方程以及坑底隆起与开挖深度之间的指数关系。

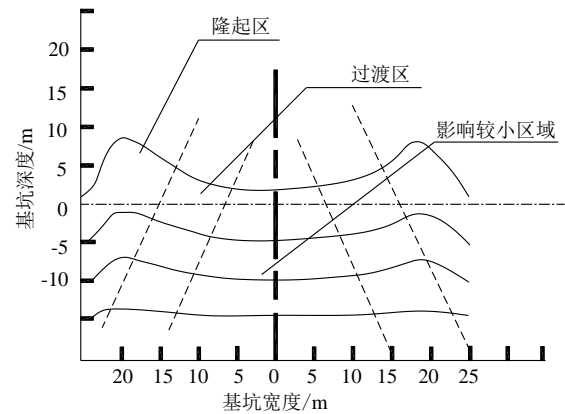


图15 基坑深层隆起变形分区

Fig. 15 Upheaval deformation zones of foundation pits

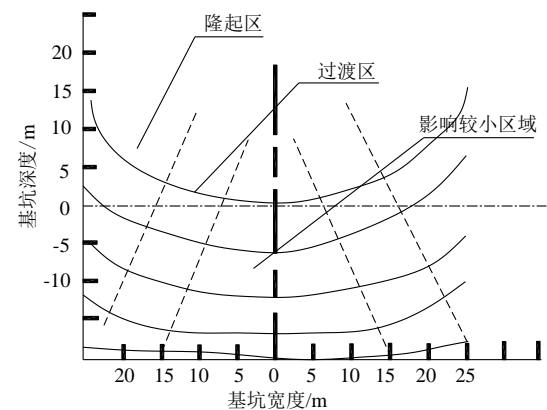


图16 基坑深层水平变形分区

Fig. 16 Horizontal deformation zones of foundation pits

2.4 另3种变形模式下的基坑内土体变形

由于篇幅原因,不能一一列举所有的变形模式案例。

悬臂型:悬臂型坑内土体变形同样分为3个区域,其变形幅度较内凸型大,影响区域也大,是由于悬臂结构固定端反力较大,此类变形模式引起土体变形主要在坑外土体,相对坑内土体变形较小,但围护结构必须有足够深度,否则坑内土体变形仍然较大,甚至引起坑内土体失稳,当地表有浅基础建筑时,应特别注意此类变形模式的破坏,如参考文献[14]。

踢脚型:坑内土体变形分为3个区域,变形区

域集中在围护结构附近,变形幅度大,影响区域小,由于围护结构下部向坑内位移量大,尤其是水平变形明显,大于其他3种模式的水平位移,当周围存在管线或地铁隧道时,应特别注意此类变位引起的结构破坏和土体失稳,如参考文献[15]。

复合型:坑内土体变形同样分为3个区域,其变形幅度较内凸型大,影响区域也大,但较悬臂型变形小,由于允许围护结构顶部有位移,结构有向坑内倾覆的趋势,隆起量小,水平位移大,当周围存在敏感建筑物和隧道等时,应注意此类变形模式造成的破坏,如参考文献[14]。

3 结 论

(1) 实测数据表明,随着基坑的开挖,底面隆起量越来越大,最后趋于稳定,说明开挖扰动区域集中在某一范围内,也就是施工关注的区域,应考虑地基加固或利用工程桩的有利作用。

(2) 在基坑开挖过程中不同的围护结构变形模式不同,其基坑内部土体变形规律也各异,尤其水平变形差异会引起围护结构较大的剪应力差,引起工程事故。

(3) 围护结构为内凸变形模式时,可将土体变形区域分为3个:隆起区(压密区)、过渡区、影响较小区域,其他3种变形模式类似。

(4) 除不同围护结构变形模式的影响外,基坑内深层土体变形还受到基坑开挖深度、宽度及土体性质和地下水的影响,在今后研究中将继续深入。针对具体基坑条件进行分析,判定土体的扰动程度和扰动范围,采取针对性的保护措施。

参考文献

- [1] 郑刚,邓旭,刘畅,等.不同围护结构变形模式对抗外深层土体位移场影响的对比分析[J].岩土工程学报,2014,36(2):273-285.
- ZHENG Gang, DENG Xu, LIU Chang, et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structure on deep soil displacement field outside of the excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 273-285.
- [2] 郑刚,李志伟.不同围护结构变形形式的基坑开挖对邻近建筑物的影响对比分析[J].岩土工程学报,2012,34(6):970-977.

- ZHENG Gang, LI Zhi-wei. Comparative analysis of responses of buildings adjacent to excavations with different deformation modes of retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 970-977.
- [3] 曹力桥,郑刚.坑内降水对软土地区深基坑坑底隆起影响有限元分析[J].岩土工程学报,2008,30(增刊1):332-337.
- CAO Li-qiao, ZHENG Gang. Effect of dewatering on bottom rebound due to excavation in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 332-337.
- [4] SCHUSTER M, KUNG G T C, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1823-1835.
- [5] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].第2版.北京:中国建筑工业出版社,2009.
- LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation Engineering Manual[M]. Second Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [6] 徐中华,王卫东,王建华.上海软土地区上海银行大厦深基坑工程的实测与分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(增刊1):4639-4644.
- XU Zhong-hua, WANG Wei-dong, WANG Jian-hua. Monitoring and analysis of the deep foundation pit of Shanghai Bank Building in soft soil ground in Shanghai[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4639-4644.
- [7] 喻军,龚晓南,李元海.基于海量数据的深基坑本体变形特征研究[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2):319-324.
- YU Jun, GONG Xiao-nan, LI Yuan-hai. Deformation characteristics of deep excavations based on mass data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 319-324.
- [8] 喻军,鲁嘉,龚晓南.考虑围护结构位移的非对称基坑土压力分析[J].岩土工程学报,2012,34(增刊1):24-27.
- YU Jun, LU Jia, GONG Xiao-nan. Earth pressure on supporting structures of asymmetric excavations considering their displacement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 24-27.

- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120 — 2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [10] 天津市城乡建设和交通委员会. 建筑基坑工程技术规程: DB29—202—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Tianjin Urban Rural Development and Transportation Commission. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavation: DB29—202—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258-265.
- XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258-265.
- [12] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程施工设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- GONG Xiao-nan, GAO You-chao. Construction and Design Manual of Deep Excavation Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.
- [13] 杜磊, 王育平. 软土地层深基坑隆起变形规律及其对周围建筑物的影响[J]. 施工技术, 2016, 45(15): 99-103.
- DU Lei, WANG Yu-ping. Soft soil foundation excavation uplift deformation law and its impact on surrounding buildings[J]. Construction Technology, 2016, 45(15): 99-103.
- [14] 高月红. 杭州地区深基坑围护结构合理型式的选用[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- GAO Yue-hong. Selection of suitable structures of deep excavations in Hangzhou district[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [15] 徐方京, 谭敬慧. 地下连续墙深基坑开挖综合特性研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(6): 28-33.
- XU Fang-jing, TAN Jing-hui. General behaviors of deep excavation with diaphragm wall as retaining wall in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(6): 28-33.