

深基坑桩锚支护下桩后土体深部水平位移的研究分析

来庆专, 吴瑞刚, 陈 磊, 刘安宁, 荆周宝

(长安大学公路学院, 西安 710064)

摘 要:基坑工程中,桩后土体的变形是对支护结构产生作用力的原因,对桩后土体的实时监测,能够准确把握土体的变形规律,确保施工安全。依据某桩锚联合支护式深基坑桩后土体深部水平位移的实测资料,进行研究分析,得到土体深部水平位移分布图。研究表明:基坑开挖过程中,土体深部水平位移不断增加,沿深度方向呈现“中间大,上下小”的分布规律,最大值在测斜深度的上 1/3 处;开挖深度对土体深部水平位移最大值位置点影响显著;最大值位置处的位移呈现“阶梯状”增长规律。研究分析结果为支护桩受力及变形、桩后土压力的分析提供依据,对进一步施工提供指导。

关键词:深基坑;深部水平位移;开挖深度;最大位移位置

中图分类号:TU473

文献标志码:A

引 言

基坑工程作为临时性地下工程,有着与生俱来的不确定性与高风险性,出现突发性险情屡见不鲜^[1]。随着建筑地下空间的发展,城市深基坑开挖工程日渐剧增,同时受城市建设空间的限制,基坑周边的环境也趋于复杂化,基坑紧邻周边建筑物和道路,加之地层的复杂性,从而使得基坑开挖的风险及危害性加剧^[2]。基坑开挖卸载及降水措施会使土体产生竖向和水平向位移^[3],基坑开挖前的潜水降水导致坑内土体发生三向固结,维护墙体因而发生向坑内的侧向位移,坑内外墙、土压力发生重分布^[4]。

由于基坑开挖的过程是基坑开挖面以上土体卸载的过程,由于卸载而引起坑底土体产生向上为主的位移,同时也引起围护墙在两侧压力差的作用下而产生水平向位移和因此而产生的墙外侧的位移。因此,基坑开挖引起周边地层移动的主要原因为坑底的隆起和围护墙的位移^[5]。土体的深层水平位移可在一定程度上反应墙体深层水平位移;土体深层位移与墙体的深层位移密切相关,在条件允许的情况下,可用土体测斜替代墙

体测斜^[6]。

随着建筑物基坑开挖的深度和规模越来越大,基坑向着大深度、大面积方向发展,周边环境更加复杂,其他条件相同时,越宽大的基坑稳定性越差^[7],深基坑开挖与支护的难度愈来愈大。为保证深基坑开挖的安全,以及为基坑支护方案的选取提供基础资料,必须对基坑进行监测,并及时反馈监测数据,以便对基坑的变形性状加以研究,可以更好地指导实际工程中的设计与施工^[8],最终保证基坑和周边环境的安全。

本文以西安市高新技术产业开发区内某深基坑的支护桩后土体位移的实测数据为依托,结合理论对桩后土体深部位移在基坑施工过程中的变化规律进行了研究分析。

1 工程概况

1.1 基坑支护设计方案

该基坑位于西安市高新技术产业开发区,基坑平面形状近似为正方形,东西走向长度约为 133 m,南北走向宽度约为 132 m,基坑周长为 530 m,基坑开挖深度分为南区、中区和北区,其中北区开挖深度为 14.15 m,中区

开挖深度为 18.95 m,南区开挖深度为 19.45 m。基坑北侧、东侧为本项目 I 期已完工程;南侧为尚在施工中的基坑工程,其开挖深度为 11.36 m,距离本基坑支护桩和土钉墙的最近距离分别为 19.84 m、13.84 m;西侧距离 20 m 处为道路(非主干道);基坑支护及南侧土体深部位移监测点的平面布置如图 1 所示。

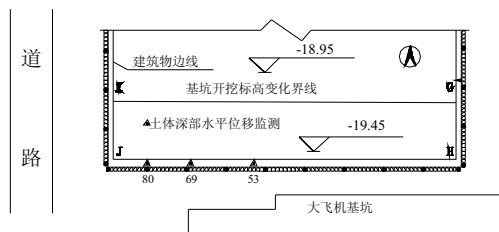


图 1 基坑支护及南侧土体深部位移测点平面布置图

基坑南侧采用土钉墙、围护桩及扩大头锚索围护方案:开挖深度 6 m 以上的边坡坡度为 1:0.5,采用土钉墙加固方案,土钉垂直方向分三排布置,土钉长度自上而下依次为 6 m、9 m 和 6 m,开挖深度 6.0 m 以下采用桩锚联合支护,支护桩长度为 22 m,桩径 0.8 m,桩间距为 1.5 m,桩身顶部设置冠梁,尺寸为 0.8 m × 0.8 m,桩身设置 5 道锚索,采用 1 桩 1 锚的方式,锚索的设计锁定力自上而下分别为 300 kN、380 kN、380 kN、300 kN 和 300 kN。

1.2 场地工程地质情况

拟建的场地呈东南低(开挖深度 4.5 ~ 7.0 m),地貌单元属皂河 I 级阶地。基坑支护设计影响范围内主要地层及性状依次为:(1)素填土(Q_4^{ml}):松散,以黏土为主,结构疏松,局部为杂填土。(2)黄土状粉质黏土(Q_4^{ml}):可塑,局部坚硬,具大孔、虫孔。(3)中砂(Q_4^{ml}):湿~饱和,中密,局部稍密,矿物成分以长石、石英为主,呈亚圆形,颗粒级配一般,含 5% 左右的黏土。(4)粉质黏土(Q_4^{ml}):可塑,局部硬塑,局部为黏土。(5)粉质粘土(Q_3^{ml})可塑,局部硬塑,该层底部钙质结核富集。(6)粗砂(Q_3^{ml}):饱和,密实,矿物成分以长石、石英为主,颗粒呈棱角状,颗粒级配不好,含 3% 左右的黏土。(7)粉质粘土(Q_3^{ml}):可塑,局部硬塑。土层的物理力学性质指标见表 1。

1.3 场地的水文地质条件

场地地下水类型属于孔隙潜水类。根据该地区地下水稳定水位的一般动态变化规律分析,勘察期间为平水时期,测得稳定水位深度 2.30 ~ 8.00 m,相应标高 402.94 ~ 403.36 m。根据区域资料,场地内地下水位年变化幅度大于 2 m。

表 1 土层的物理力学性质指标

| 层号 | 土类名称 | 层厚 /m | 重度/ (kN/m ³) | 浮重度/ (kN/m ³) | 粘聚力 /kPa | 内摩擦 角/度 |
|----|------|-------|-----------------------------|------------------------------|-------------|------------|
| 1 | 素填土 | 3.00 | 18.0 | ... | 10.00 | 15.00 |
| 2 | 粘性土 | 4.00 | 19.0 | ... | 21.00 | 16.30 |
| 3 | 中砂 | 0.00 | 21.0 | ... | 0.00 | 35.00 |
| 4 | 粘性土 | 12.00 | 19.6 | ... | 22.40 | 18.90 |
| 5 | 粘性土 | 4.00 | 20.1 | 10.1 | 23.80 | 20.50 |
| 6 | 粗砂 | 2.30 | 22.0 | 12.0 | ... | ... |
| 7 | 粘性土 | 20.00 | 20.0 | 10.0 | ... | ... |

2 土体位移监测概况

2.1 土体位移监测目的及监测内容

基坑工程监测的主要目的是:(1)使参建各方能够完全客观真实地把握工程质量,确保工程安全;(2)在施工过程中通过实测数据检验工程设计所采取的各种假设和参数的正确性;(3)对可能发生危及基坑工程本体和周围环境安全的隐患进行及时、准确的预报,确保基坑结构和相邻环境的安全;(4)积累工程经验,为提高基坑工程的设计和施工整体水平提供基础数据支持^[9]。

在基坑南侧设置土体深部位移监测点,对桩后土体的深部水平位移进行实时监测。

2.2 土体深部位移测斜原理

周围土体深层水平位移的监测是确定基坑围护体系变形和受力的最重要的观测手段,通常在土体中埋设测斜管,利用测斜手段进行监测。

滑动式测斜仪一般由测斜管、测量探头、传输电缆及读数仪组成。测斜的工作原理是利用重力摆锤始终保持铅直方向的性质,测得仪器中轴线与摆锤垂直线的倾角,从而可以知道被测方位的位移变化值。测斜孔底端假设为不动点,孔顶平面位移值作为测斜修正值的测斜方法,采用 0°、180°双向读数^[10]。

测斜仪按 0.5 m 点距,由下往上逐点读数,即将测斜仪分成了若干个测段,每个测段的长度 $L_i = 500 \text{ mm}$,在某一深度位置上所测得的两对导轮(500 mm)之间的倾角 θ_i ,通过计算可得到这一区段的变位 Δ_i ,如图 2 所示。

计算原理:

$$d_i = l \sin \theta_i \quad (1)$$

$$D_i = \sum d_i = \sum l \sin \theta_i \quad (2)$$

式中: l 为第 θ_i 量测段的长度,500 mm; θ_i 为第 d_i 量测段的相对倾角; d_i 为第 D_i 量测段的相对水平位移量; D_i 为第 n 量测段的水平位移总量^[11]。

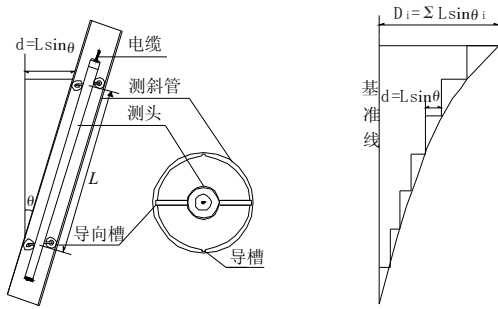
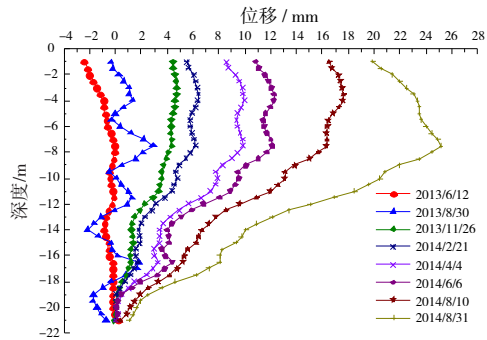


图 2 测斜原理图

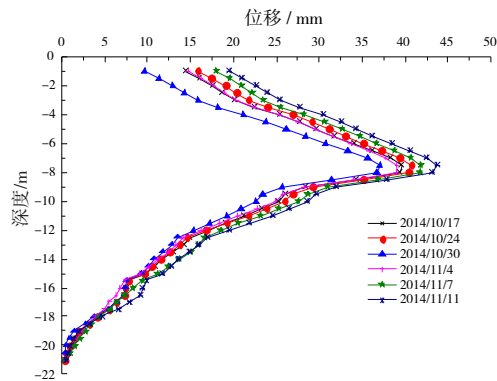
3 实测结果分析

3.1 土体累计位移分析

依据桩后土体位移的实测数据,选取监测数据完整且规律性较强的 80#、69#、53#(如测点平面布置图 1)桩后土体位移进行分析,其测斜深度均为 22 m,对监测数据处理后,分别绘制开挖阶段以及开挖完成后桩后土体位移—深度曲线,如图 3~图 5 所示,位移正值表示桩后土体向基坑方向移动,位移负值表示土体背离基坑方向偏移。



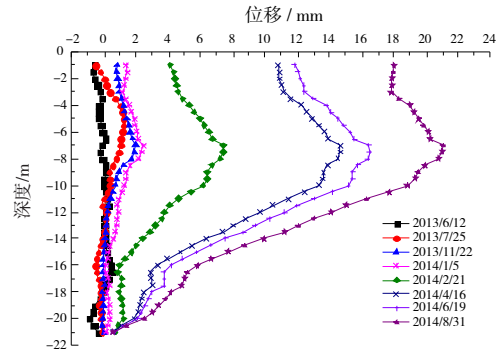
(a) 80#开挖阶段土体位移



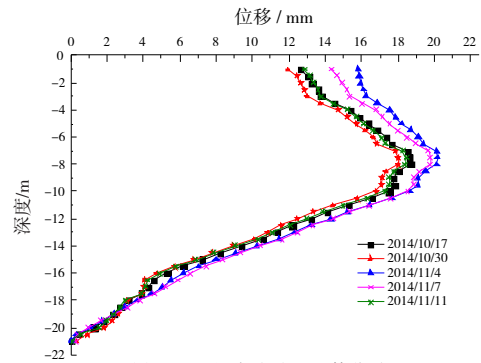
(b)80#开挖完成阶段土体位移

图 3 南侧 80#桩后土体位移—深度曲线

(1) 开挖阶段,80#桩后土体的最大位移为 25.17 mm,69#桩后土体的最大位移为 21.05 mm,53#桩后土体的最大位移为 30.19 mm;开挖完成后,80#桩后土

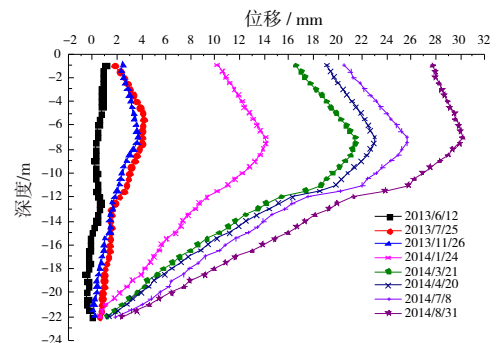


(a)69#开挖阶段土体位移

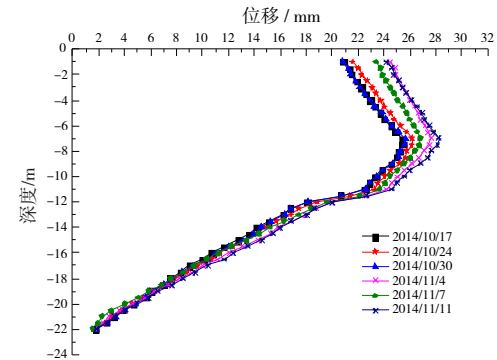


(b) 69#开挖完成阶段土体位移

图 4 南侧 69#桩后土体位移—深度曲线



(a) 53#开挖阶段土体位移



(b) 53#开挖完成阶段土体位移

图 5 南侧 53#桩后土体位移—深度曲线

体的最大位移为 43.72 mm,69#桩后土体的最大位移为 20.16 mm,53#桩后土体的最大位移为 28.22 mm。说明开挖完成后 80#桩后土体的位移在继续增长,最大增长

幅度为73.70%,而69#、53#桩后土体的位移都出现了明显的减小;基坑开挖是卸荷的过程,将引起基坑周边土体应力场变化及地面沉降,支护结构在两侧压力差的作用下产生水平向位移因而导致支护结构后面的土体产生位移,卸荷引起的坑底土体产生向上的位移也会导致支护结构后面的土体产生位移;为此应加大对桩后土体、支护结构以及坑底土体等变形的监测频率,并采取控制措施,控制土体位移的增长。

(2)随着基坑开挖的进行,桩后土体的位移沿深度方向上呈现“中间大,上下小”的规律,即沿深度方向桩后土体位移开始增长后减小,最大值出现在测斜深度的上1/3处。开挖初期,三个监测位置点的桩后土体位移都出现了负值,如图3~图5中(a)图的第一、二条深部位移分布曲线,说明桩后土体出现了不同程度的背离基坑方向的位移,可以认为是由于基坑内侧卸去原有土压力时,支护桩悬空部分受到主动土压力的作用,导致支护桩向基坑方向发生侧向位移,而在开挖面以下,支护桩的嵌固部分受到全部或部分被动土压力的作用,在此作用下,支护桩发生背离基坑方向的位移,从而对土体产生挤压作用,使得土体产生背离基坑方向的位移。随着基坑的开挖,测斜底端的位移大于零,如图3~图5中(a)图开挖后期以及(b)图开挖完成后的深部位移分布曲线,说明测斜底端附近的土体产生了面向基坑内侧方向的位移,可以认为存在两方面的原因:首先,测斜管的长度不够,由于基坑开挖面积大,而且南侧支护的长度长(图1),桩后土体移动范围在深度方向上大于测斜长度,虽然底端土体位移对支护桩受力及变形的影响不显著,但为准确测量土体的深部位移,现有的测斜管长度不够;其次,由于测斜管自身的变形所导致,测斜管埋设时,首先用钻机钻到设计的深度,随后下放测斜管,空隙采用水泥砂浆填充,由于钻孔深度大,不能保证空隙的填充度,受地下水的侵蚀,容易破坏砂浆的强度,测斜管自身具有一定的刚度,砂浆强度破坏后,测斜管将发生弯曲变形。

(3)基坑南侧开挖完成后,三个测斜位置点位移的变化趋势不尽相同,69#、53#测斜位置点土体位移整体减小,趋势明显,与开挖过程中最后一次测斜位移相比,最大减小幅度分别为4.23%、6.53%;80#测斜位置呈现另外一种分布规律,沿测斜深度方向顶部位移减小明显,下部位移变化不明显,上1/3处位移明显增长,并且有继续增长的趋势。基坑开挖完成后,进行基础底板的施工,桩后土体的位移增长受到限制,从69#、53#位置点土体位移的变化中可以反映出,80#位置附近土体位移

呈现增加的趋势,分析原因如下:首先,该位置临近降水井,开挖完成后出现了连续的降雨天气,为减弱水的作用对支护的影响,加深了地下降水水位,地下水位进一步降低,该测斜位置处孔隙水压力小于其它测斜位置,依据有效应力原理,该位置有效应力增加,土体变形出现增长趋势;此外,施工用水的管道接口位于该测斜位置上方,管道接口处出现了渗漏以及人为的浪费,使得该位置在开挖完成后长期处于水的渗漏作用下,破坏了测斜管周围填充的砂浆凝固强度,测斜管在本身的刚度下出现了回弹,也会出现测斜后土体位移增加的假象。

3.2 土体的最大位移位置点的分析

依据土体深部水平位移监测数据,做出最大位移位置点与时间的分布关系图(图6~图8),分析最大位移位置点的变化规律。

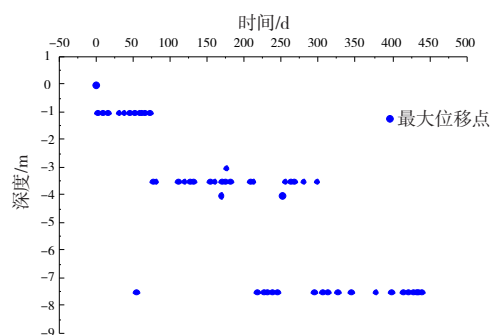


图6 80#桩后土体的最大位移位置—时间分布

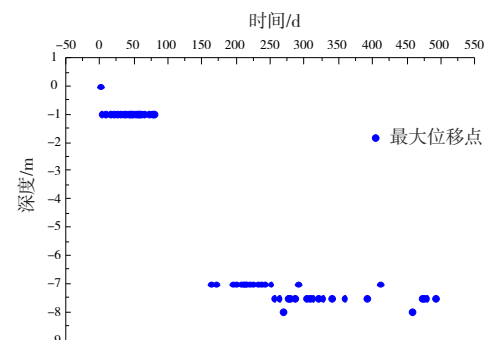


图7 69#桩后土体的最大位移位置—时间分布

(1)桩后土体的最大位移位置点随基坑开挖沿深度方向向下移动。基坑开挖初期,最大位移位置点位于测斜深度方向的上-1m处;随着基坑的开挖,最大位置点下移,80#测斜位置土体的最大位移位置点先是保持在-3.5m处,最后稳定在-7.5m位置处;69#测斜位置土体的最大位移位置点先是在-7.0m处,最后在-7.5m处稳定;53#测斜位置土体的最大位移位置点依次为-5.5m、-7.0m和-7.5m,最后稳定在-7.0m处。

(2)基坑开挖深度是影响土体的最大位移位置点的主要因素。基坑南侧的开挖深度为19.45m,三个测斜

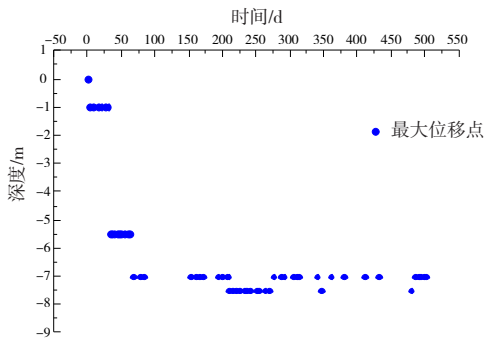


图 8 53#桩后土体的最大位移位置—时间分布

位置分别位于中间、端角以及两者之间的位置,空间效应明显,但从稳定时最大位移的位置看,三者相差不大,分别在 -7.5 m、-7.0 m 和 -7.0 m 处,因此可以认为最大位移位置点受空间效应的影响不显著,受开挖深度影响明显。

(3) 桩后土体的最大位移位置点并不是严格按照基坑开挖深度的增加依次向下移动,而是存在一定的跳跃性和不规则性,忽略测量误差的影响,这反映出基坑开挖过程中土体变形的复杂性。在每个最大位移位置点的稳定时间段内,最大位移的位置点会出现一定的跳跃,这与该段时间内的水文变化有关,受降水的影响,地下孔隙水产生变化,引起土体稳定性的变化,最大位移的位置会出现波动。

3.3 累计位移

依据已有的最大位移位置点的分布情况,选取开挖后期以及完成后的土体的最大位移位置的稳定点,做出该点处的累计位移曲线,分析累计位移变化规律,预测位移的发展趋势(图 9 ~ 图 11)。

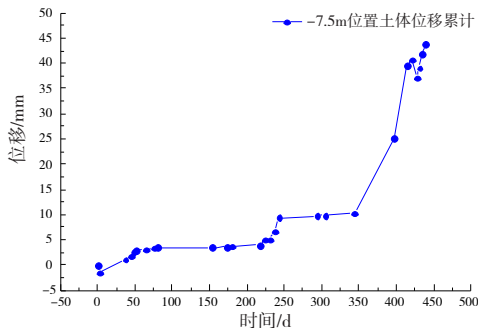


图 9 80#桩后土体 -7.5 m 深度位移累计

(1) 在基坑开挖过程中,累计位移呈现“阶梯状”的增长规律。由于基坑开挖面积较大,在实际施工过程中采用分段开挖,既保证了孔隙水压力的消散,使得土体有足够的时间变形稳定,也保证了施工效率。开挖初期,位移增长较缓慢,当基坑南侧开挖暂停后,土体位移没有出现明显的增长,再次进行开挖后,土体位移出现

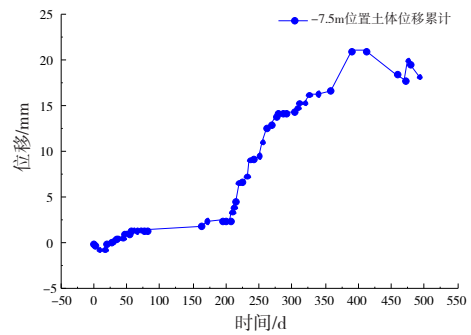


图 10 69#桩后土体 -7.5 m 深度位移累计

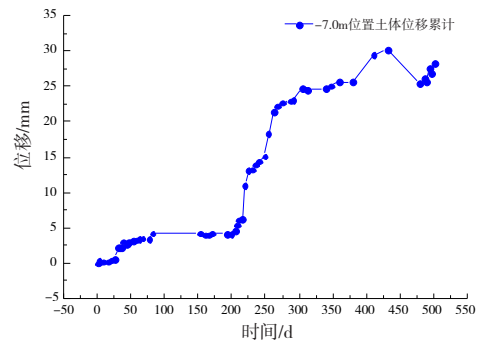


图 11 53#桩后土体 -7.0 m 深度位移累计

了快速的的增长,这说明在基坑开挖期,位移增长,施工间歇期,位移则会保持稳定,这是累计位移呈现“阶梯状”的原因。

(2) 从累计位移曲线分析,80#测斜位置点有两个明显的位移稳定期,69#、53#测斜位置只有一个明显的位移稳定期,这与施工次序有关。基坑南侧第一周期开挖完成后,即进行其他施工段的开挖,第二周期开挖先从中部开始,再进行两侧的开挖。此外,底板施工后,69#、53#测斜位置点的位移出现明显的减少,而 80#测斜位置点土体的位移则先减后增,增长幅度明显大于减小幅度,更直观的展现了位移变化的分析。

(3) 从位移发展趋势分析,80#测斜点 -7.5 m 处的位移仍有继续增长的趋势,且增长趋势明显;69#、53#测斜点分别在 -7.5 m 和 -7.0 m 处的位移增长趋势不明显,甚至呈现减小趋势;因此,应增加 80#测斜位置的监测频率,做好相关措施,控制土体位移的继续增长。

4 结 论

本文通过对桩后土体深部水平位移的实测数据进行整理分析,得到了基坑开挖阶段以及开挖完成后,桩后土体位移的变化特征,结论如下:

(1) 基坑开挖过程阶段,桩后土体的深部水平位移增长明显,并沿深度方向呈现“中间大,上下小”的分布

规律;此外,测斜点底端附近的土体,随着基坑的开挖产生了向基坑内侧方向的位移。开挖后期及开挖完成后,最大位移的位置稳定在测斜深度的上1/3处。

(2) 基坑的开挖深度是影响土体深部水平位移最大值位置的主要因素;此外,随着开挖深度的增加,土体位移最大值的位置沿深度方向向下移动,并存在一定的跳跃性和不规则性,反映出土体变形的复杂性。

(3) 在基坑开挖过程中,土体深部水平位移随时间呈现“阶梯状”的增长规律。

参考文献:

- [1] 付文光.从几次突发险情谈基坑工程应急抢险管理机制[J].岩土工程学报,2014(S1):165-174.
- [2] 张跃进,曾纪文.深厚淤泥层基坑开挖动态监测与应急处理[J].岩土工程学报,2014(S1):202-207.
- [3] 魏纲.基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J].岩土力学,2013(5):1421-1428.
- [4] 郑刚,曾超峰.基坑开挖前潜水降水引起的地下连续墙侧移研究[J].岩土工程学报,2013(12):2153-2163.
- [5] 徐伟,夏乔网,徐鹏飞,等.软土地基临江特大型相邻深基坑同期施工监测分析[J].岩石力学与工程学报,2013(S1):2676-2683.
- [6] 丁智,王达,虞兴福,等.杭州地铁新塘路、景芳路交叉口工程深基坑监测分析[J].岩土工程学报,2013(S2):445-451.
- [7] 朱炎兵,周小华,魏仕锋,等.临近既有地铁车站的基坑变形性状研究[J].岩土力学,2013(10):2997-3002.
- [8] 王洪新.考虑二维和三维尺寸效应的基坑抗隆起稳定安全系数[J].岩土工程学报,2013(11):2144-2152.
- [9] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [10] 郑刚,焦莹.深基坑工程实际理论及工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [11] 申屠南瑛.地下位移测量方法及理论研究[D].杭州:浙江大学,2013.

Research and Analysis on Deep Horizontal Displacement of Soil in Anchor-pile Bracing Structure for Deep Foundation Pit

LAI Qingzhan, WU Ruigang, CHEN Lei, LIU Anning, JING Zhoubao
(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In foundation pit engineering, the deformation of pile-soil is the most important reason for producing force on the supporting structure. The real-time monitoring of pile-soil can help accurately grasp the deformation law of soil and ensure construction safety. The measured data of deep horizontal displacement of soil in anchor-pile bracing structure for deep foundation pit is researched and analyzed, and the distribution diagram about deep displacement of soil is received. As a result, it is shown that the deep displacement of pile-soil increases constantly in the process of excavation, with the increase of excavation deep, the distribution law is that the value of middle is larger than others along the depth direction and the maximum displacement stabilize at 1/3 along the depth of lateral deformation. In addition, the depth of excavation has a significant effect on the maximum point of soil's deep displacement, and the displacement at the position of maximum value presents "stepladder" growth rule. The analysis results can provide guidance for the analysis of stress and deformation of support pile and the stress of pile-soil, it also provide guidance for next step in the foundation pit construction.

Key words: deep foundation pit; deep horizontal displacement; excavation depth; the position of maximum displacement