

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201909012



相邻桩锚基坑开挖变形 相互影响数值分析

郭力群¹, 房敏安¹, 徐芳超², 黄晨亮³

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 沈阳中建东设岩土工程有限公司厦门分公司, 福建 厦门 361012;
3. 驻马店市科源建设工程质量检测有限公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 以两个相邻桩锚支护的基坑工程为实例, 基于小应变硬化土(HSS)模型, 通过 Z-Soil 岩土有限元分析软件建立数值计算模型, 分析相邻基坑开挖对基坑变形的影响. 分析结果表明: 相邻桩锚基坑开挖明显减小排桩桩顶水平位移、排桩深层水平位移、坑间土体深层水平位移和坡顶水平位移, 对于桩顶水平位移的影响最为显著; 相邻桩锚基坑开挖也增大坑间地表沉降, 产生的沉降接近两个单坑引起的沉降叠加, 最大沉降位置出现在两基坑的正中央; 相邻桩锚基坑的支护设计宜考虑相邻基坑开挖的影响, 宜以变形不超过单坑开挖产生的水平位移为控制基准.

关键词: 相邻基坑; 桩锚支护; 基坑变形; HSS 模型; Z-Soil 软件

中图分类号: TU 473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)06-0737-07

Numerical Analysis of Interaction of Adjacent Pile-Anchor Foundation Pits Excavation Deformation

GUO Liqun¹, FANG Min'an¹,
XU Fangchao², HUANG Chenliang³

- (1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Shenyang Zhongjian East Set in Geotechnical Engineering Limited Company Xiamen Branch, Xiamen 361012, China;
3. Zhumadian Keyuan Construction Engineering Quality Testing Limited Company, Zhumadian 463000, China)

Abstract: Taking two adjacent pile-anchor foundation pits with pile-anchor supporting as engineering examples, base on the hardening soil model with small strain model (HSS), the numerical calculation model is established using Z-Soil geotechnical finite element analysis software, and the influence of adjacent foundation pits excavation on deformation is analyzed. The analysis results show that the excavation of adjacent pile-anchor foundation pits significantly reduces the horizontal displacement of pile top, row-pile deep horizontal displacement, soil deep horizontal displacement between pits and slope top horizontal displacement, especially the effect of pile top horizontal displacement. The ground settlement between pits also increases, is approximately equal to the superposition of the two settlements due to single pits, and the maximum settlement position appears in the center of the two foundation pits. The influence of the adjacent foundation pits excavation would be considered in the design of supporting of the adjacent pile-anchor foundation pits, and the horizontal dis-

收稿日期: 2019-09-21

通信作者: 郭力群(1970-), 男, 副教授, 主要从事基坑工程及桩基工程的研究. E-mail: guoliquan@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778249)

placement due to the single pit excavation should be taken as the control value for the second foundation pit.

Keywords: adjacent foundation pits; pile-anchor support; deformation of foundation pit; HSS model; Z-Soil software

随着城市地下空间向综合化、规模化、集约化、深层化和一体化的方向发展,基坑工程日益趋向复杂化,对工期的要求也越来越严格,导致相邻基坑同步或相继施工的情况频繁出现^[1-4]. 相邻基坑的开挖卸载,使得基坑支护结构的受力变形、地表沉降及对周边管线的影响等与单独基坑有较大不同. 在实际工程中,相邻基坑交叉施工又使得工程安全风险显著增加,曾发生多起大型基坑坍塌的事故^[5-6]. 现有研究大多是针对单基坑施工^[7-11],对相邻基坑施工引起变形性状的研究并不多见,特别是针对桩锚支护形式的研究更是寥寥无几. 陈东杰^[12]对上海典型软土条件下两基坑施工的变形特性作了研究,提出近距离相邻基坑的变形影响为“近大远小”;郭力群等^[13]使用 Z-Soil 软件对不同间距的相邻基坑进行数值分析,提出当间距小于等于 4 倍基坑开挖深度时,相邻基坑与支护结构的变形明显相互影响;丁智等^[14]对杭州排桩加内支撑支护形式的相邻基坑进行了实测分析,深层土体水平位移总体表现为中间大、两端小的趋势.

现有研究未能确定两基坑明显相互影响的距离及开挖的深度,并且设计未考虑优化. 为此,本文建立相邻桩锚基坑二维平面模型,近距离研究相邻桩锚支护形式的基坑支护结构及坑间土体的变形趋势.

1 工程概况

间隔 30 m 的 A,B 基坑位于广东省深圳市某区,两侧基坑支护结构间距为 31 m. 相邻基坑间距小于 4 倍开挖深度,相互影响明显^[13]. 基坑的平面布置图,如图 1 所示. 图 1 中:C,D 为中间测点. 基坑支护结构剖面图,如图 2 所示. 图 2 中:L 为土钉长度,m; L_a 为锚索锚固长度,m; L_f 为锚索自由长度,m.

两基坑的开挖分布的土层自上而下为杂填土、粉质粘土、中砂及中风化石英长岩,小应变硬化土(HSS)本构模型计算

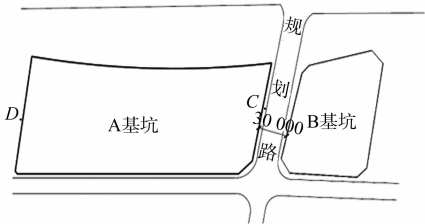


图 1 基坑的平面布置图(单位:mm)
Fig. 1 Plane layout diagram of foundation pits (unit: mm)

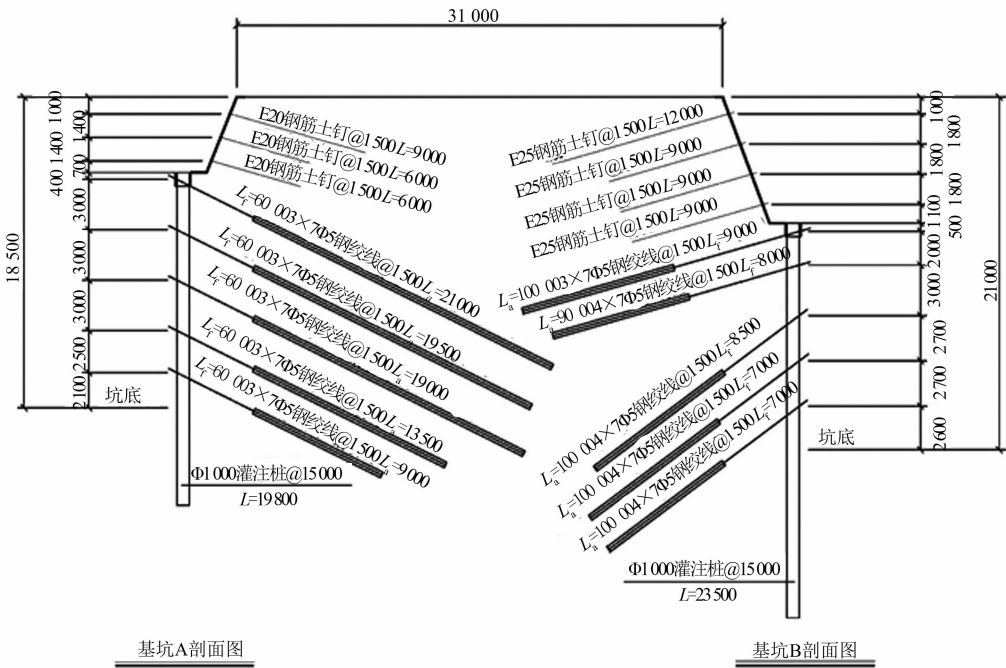


图 2 基坑支护结构剖面图(单位:mm)

Fig. 2 Section diagram of supporting structure of foundation pit (unit: mm)

参数,如表 1 所示. 表 1 中: d 为土层厚度; c 为粘聚力; γ 为重度; φ 为内摩擦角; $E_{\text{Oed}}^{\text{ref}}$ 为参考垂直应力 $\sigma_{\text{Oed}}^{\text{ref}}$

的切线侧限压缩模量参考值; E_{50}^{ref} 为排水三轴试验的割线杨氏模量参考值; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为基于参考应力 σ^{ref} 的加卸载杨氏模量参考值; E_0^{ref} 为小应变情况对应参考应力 σ^{ref} 的杨氏模量参考值.

表 1 HSS 本构模型计算参数
Tab. 1 Calculation parameters of HSS constitutive model

土层名称	d/m	c	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_0^{\text{ref}}/\text{kPa}$
杂填土	4.30	12	16.0	10	3 000	4 500	13 500	67 000
粉质粘土	3.57	25	19.5	16	6 500	6 500	19 500	97 500
中砂	5.94	5	21.7	30	13 500	13 500	40 500	202 500
中风化 石英长岩	53.00	45	22.4	35	45 000	45 000	135 000	675 000

A 基坑相邻侧开挖深度为 18.5 m, 基坑面积约为 23 430 m², 设置 3 层地下室. A 基坑支护结构采用的桩锚支护方案如下: 采用 $\Phi 1\,000$ mm 桩长为 19.8 m 的灌注桩, 上部设置 3 道水平间距为 1.5 m、长度为 6~9 m 的土钉, 下部打设 5 道水平间距为 1.5 m、长度为 15~27 m 的锚索. B 基坑相邻侧开挖深度为 21.0 m, 基坑面积约 8 635 m², 设置 3 层地下室. B 基坑支护结构采用的桩锚支护方案如下: 采用 $\Phi 1\,000$ mm 桩长为 23.5 m 的灌注桩, 上部设置 4 道水平间距为 1.5 m、长度为 9~12 m 的土钉, 下部打设 5 道水平间距为 1.5 m、长度为 16~19 m 的锚索.

2 有限元模型的建立

2.1 整体计算模型

由于相邻基坑都是桩锚的支护形式, 且 A、B 基坑的邻近距离固定, 为了简化计算模型, 取基坑的一半进行建模. 模型的二维尺寸为 130.0 m \times 80.0 m, A 基坑开挖深度为 18.5 m, B 基坑开挖深度为 21.0 m. 基坑整体的数值计算模型, 如图 3 所示.

2.2 计算参数及工况设置

建模选用软件内置的 HSS 模型作为本构模型, HSS 模型在描述土体剪切硬化、压缩硬化、加卸载、小应变等方面具有优势, 较常用本构模型更适合模拟基坑开挖问题^[15-16]. 模型中, 为模拟土体和支护结构的位移不连续, 土体采用连续体单元(Continuum), 排桩均采用梁单元(Beam), 在梁单元和土体单元之间设置接触单元(Contact), 锚索采用软件自带的 Anchor 单元进行模拟, 土钉采用软件自带的 Nail 单元进行模拟. 模型两侧的边界条件为限制侧向位移, 底部的边界条件为固定边界条件. 考虑土层均匀成层分布, 参考尹骥^[15]提出的 HSS 模型计算参数确定办法, 通过室内试验并结合地勘报告和工程经验确定计算参数(表 1).

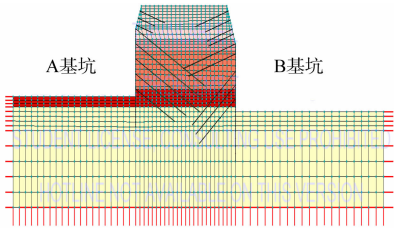


图 3 数值计算模型
Fig. 3 Numerical calculation model

为了模拟实际施工过程, 分析相邻基坑开挖对基坑及其坑间土体变形的影响, 计算相邻开挖和 A 基坑单独开挖两种工况. 相邻开挖的计算(工况 1)如下: 第 1 阶段, 同期进行 A、B 基坑排桩施工; 第 2 阶段, 安排 A 基坑的土钉墙施工(3 层土方开挖), 同时, 进行 B 基坑的土钉墙施工(4 层土方开挖); 第 3 阶段, 两基坑同步进行(6 层土方开挖)和逐步进行 5 道锚索的施工. A 基坑单独开挖的计算(工况 2)如下: A 基坑施工, B 基坑不施工, A 基坑工况参照上述执行.

3 计算结果分析

3.1 排桩桩顶水平位移

从排桩施工完成至坑底开挖完成, A 基坑排桩桩顶水平位移, 如图 4 所示. 图 4 中: t 为时间; s (水平) 为水平位移, 位移正值代表位移方向指向 A 基坑的坑内.

由图 4 可知: 随着基坑开挖深度的不断增大, 相邻开挖和单独开挖两个情况下的 A 基坑的排桩桩顶水平位移大体上均表现增大的趋势, 但相邻开挖的水平位移明显比单独开挖小; 相邻开挖的最大水平位移出现在第 37 天, 最大水平位移值约为 12.3 mm, 而单独开挖的最大水平位移出现在第 40 天, 最大

水平位移值约为 28.2 mm,相邻开挖的最大桩顶水平位移接近单独开挖情况下的 40%;相邻开挖的曲线在第 26,30,34,37 天前后水平位移呈现先增大后减小趋势,第 26 天进行了 A 基坑的土方开挖(工况 1),A 基坑被动土压力减小,排桩桩顶水平位移增大;第 27 天进行了 B 基坑的土方开挖,相当于 A 基坑主动区卸载,A 基坑主动土压力减小,排桩桩顶水平位移减小,第 30,34,37 天的情况与之类似;单独开挖的曲线随着开挖深度的增加,排桩桩顶水平位移呈现一种增长稳定,再增长再稳定的台阶状持续增大趋势,而相邻开挖则随着开挖深度的增加(伴随 B 基坑开挖深度的增加)而呈现一种增大回缩再增大再回缩的锯齿状增大趋势,当 B 基坑开挖到底部时,水平位移回缩最为明显,B 基坑的开挖明显抑制了 A 基坑支护桩的水平位移发展.

3.2 排桩深层水平位移

开挖至坑底后,A 基坑排桩深层水平位移,如图 5 所示. 图 5 中: h 为深度;水平位移负值代表水平位移方向朝向 A 基坑的坑内.

由图 5 可知:单独开挖与相邻开挖的排桩深层水平位移整体变化规律基本一致,随着深度的增加,均表现为先增大后减小,且出现最大水平位移的位置较为接近,但单独开挖的排桩深层水平位移明显大于相邻开挖的桩身,单独开挖的最大桩身水平位移值约为 39.3 mm,相邻开挖的最大桩身水平位移值为 28.2 mm,是单独开挖的 70%左右;坑底之上,相邻开挖与单独开挖的排桩桩身水平位移相差很大,在深度为 0 m 处(桩顶)差距最大,该深度处单独开挖的桩身水平位移值为 28.3 mm,相邻开挖的桩身水平位移值为 6.5 mm,是单独开挖的 20%左右;而坑底之下相邻开挖与单独开挖的排桩桩身水平位移则较为接近.

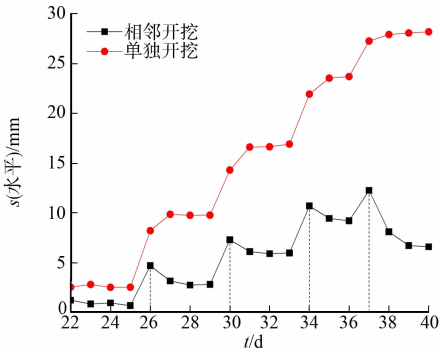


图 4 A 基坑排桩桩顶水平位移
Fig. 4 Horizontal displacement of row pile top in A foundation pit

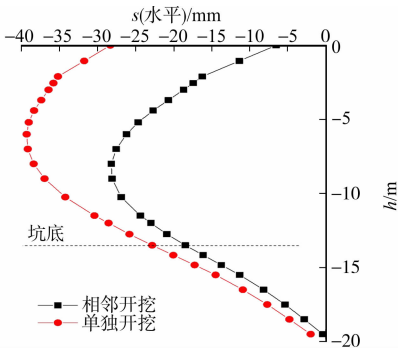


图 5 A 基坑排桩深层水平位移
Fig. 5 Deep horizontal displacement of row pile in A foundation pit

3.3 桩后地表沉降

开挖至坑底后,桩后地表沉降,如图 6 所示. 图 6 中: s (竖向)为竖向位移; d 为坑顶到基坑外地表的水平距离, d 为 0 m 表示 A 基坑坑边.

由图 6 可知:单独开挖与相邻开挖的地表沉降槽整体变化规律基本一致,随着沉降计算采集点与 A 基坑坑边的距离增加,采集点的沉降均呈现出先增大后减小的规律,但相邻开挖的沉降计算采集点地表沉降明显大于单独开挖的地表沉降,并且二者最大竖向位移出现的位置也有着很大差异,单独开挖的最大地表竖向位移约为 18.4 mm,出现在距 A 基坑坑边 10.5 m 处,而相邻开挖的最大地表竖向位移约为 38.4 mm,其是单独开挖的约 2 倍,位置在距 A 基坑坑边 16.5 m 处,近似位于坑间土体的正中央.B 基坑的开挖也使其坑外地表产生沉降,其沉降与 A 基坑开挖产生的沉降叠加,促使地表沉降进一步加大,同时,也导致最大沉降的位置向坑间中部偏移.

3.4 坑间土体深层水平位移

A 基坑开挖至坑底后,坑间土体深层水平位移,如图 7 所示. 图 7 中:水平位移为正值时,表明土体水平位移方向朝向 A 基坑的坑外;水平位移为负值时,土体水平位移方向朝向 A 基坑的坑内.

由图 7 可知:单独开挖与相邻开挖的土体水平位移沿深度变化规律基本一致,均随着深度的增加,水平位移先增大后减小;单独开挖的土体水平位移约为 32.0 mm,明显大于相邻开挖的土体水平位移

22.1 mm, 相邻开挖的水平位移是单独开挖的 70% 左右; 在 0~4.5 m 的深度范围, A 基坑采取放坡支护形式, 单独开挖的土体水平位移方向均朝向坑内, 并随着深度的增加而增大, 而相邻开挖的土体水平位移方向并不统一, 地表附近的土体水平位移方向朝向坑外, 随着深度的增加, 当土体水平位移逐渐减少至 0, 土体水平位移的方向朝向坑内, 随着深度的增加而增大。

由图 6, 7 可知: 相邻开挖坑间土体沉降较大, 从而导致地表浅层土体向沉降槽方向移动, 0~2.0 m 深度范围的土体水平位移朝向坑外。

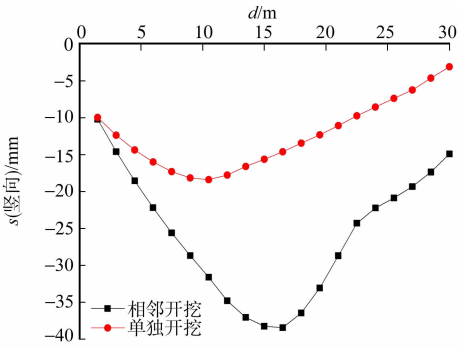


图 6 桩后地表沉降

Fig. 6 Surface settlement after pile

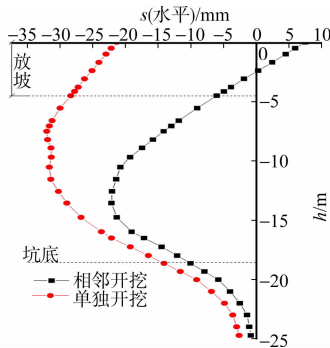


图 7 坑间土体深层水平位移

Fig. 7 Deep horizontal displacement of soil between pits

3.5 坡顶水平位移

从基坑开始施工至开挖到坑底这段时间内, A 基坑坡顶水平位移, 如图 8 所示. 由图 8 可知: 随着时间的增加, 相邻开挖的坡顶水平位移随着时间的增加大体上呈现增大的趋势, 坡顶水平位移方向朝向 A 基坑外, 最大坡顶水平位移出现在第 40 天, 最大坡顶水平位移值约为 7.3 mm, 是单独开挖的 30% 左右; 单独开挖的坡顶水平位移随着时间的增加大体上呈现增大的趋势, 但坡顶水平位移方向朝向 A 基坑坑内, 最大坡顶水平位移出现在第 40 天, 最大坡顶水平位移值约为 21.1 mm; 在第 15 天之前, 相邻开挖和单独开挖的坡顶水平位移变化趋势趋于一致, 显然从开始到第 15 天相邻开挖对坡顶水平位移基本上无影响。

由工况 1 计算可知, 从开始到第 15 天进行了 A, B 基坑的放坡与土钉施工, 在第 15 天 A 基坑的开挖深度为 4.5 m, B 基坑为 6.5 m, B 基坑开挖掉的 6.5 m 土层可视为 A 基坑主动区卸载, 较小的主动区卸载对 A 基坑坡顶水平位移的影响不大, 即相邻开挖对基坑坡顶水平位移的影响在开挖深度不大(此时基坑动态间距约为 $6H\sim7H$, H 为动态开挖深度)的情况下并不显著; 在第 15 天之后, 相邻开挖与单独开挖的坡顶水平位移变化趋势出现了明显的差异, 相邻开挖的坡顶水平位移方向朝向坑外, 而单独开挖的坡顶水平位移方向朝向坑内, 相邻开挖的坡顶水平位移在第 22, 26, 30, 34, 37 天(动态间距为 $3H, 2.5H, 2H, 1.6H$)前后出现了先减小后增大的情况, 其原因与排桩桩顶水平位移的情况相同, 在第 26 天, 动态间距为 $2.5H$ 时, 位移发展方向发生了反转, 相邻基坑变形相互影响作用显现。

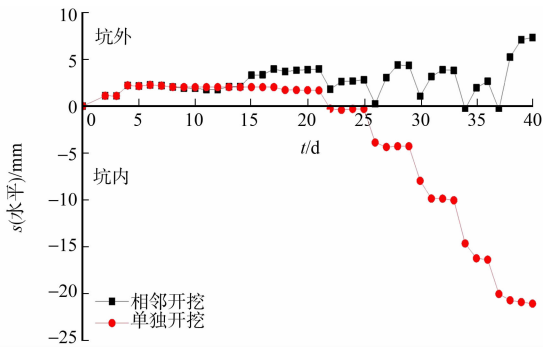


图 8 A 基坑坡顶水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of top in A foundation pit

4 施工监测及对比

4.1 实际施工工况

A 基坑于 2017 年 6 月 2 日进场施工, 2018 年 12 月 19 日完成验收工作; B 基坑于 2017 年 10 月 12 日进场施工, 2018 年 12 月 14 日完成验收工作. 在 A 基坑施工完土钉墙时, B 基坑开始施工土钉墙, 随后两个基坑开始一起施工。

4.2 监测点的布置

为研究相邻基坑一起开挖与单基坑开挖坑间土体深层水平位移的差异,选取 A 基坑东侧(相邻侧)的中间测点 C 点的监测数据代表相邻开挖的水平位移情况. 由于基坑长边为 110 m,可以认为西侧基坑侧壁不受 B 基坑开挖影响,故选取 A 基坑西侧(未邻侧,与东侧支护条件相同)的中间测点 D 点的监测数据代表单独开挖的水平位移情况. 在 C 点和 D 点分别布置了基坑顶部水平位移测点和测斜管(图 1).

4.3 实测排桩桩顶水平位移

A 基坑排桩桩顶实测水平位移,如图 9 所示. 由图 9 可知:随着时间增大,相邻开挖与单独开挖的排桩桩顶水平位移均表现出增大的趋势,但单独开挖排桩桩顶水平位移明显大于相邻开挖的排桩桩顶水平位移,与数值模拟的结果变形规律相同;单独开挖情况下排桩桩顶最大水平位移值为 38.0 mm,相邻开挖排桩桩顶最大水平位移值为 13.0 mm,是单独开挖的 30%左右,二者的差距与数值计算结果接近.

由图 4,9 可知:相邻开挖桩顶水平位移的数值模拟结果(图 4)在第 26,30,34,37 天前存在明显的先增大后减小的变化规律,而实测结果(图 9)并没有体现该种规律. 这是因为数值模拟按连续时间计算,可以捕捉到位移的连续变化,而实测数据仅在开挖卸载前后即时进行监测,其捕捉到的是土体位移间断的数值,但二者表现的总体趋势是一致的,都能反映变形随开挖增长的趋势.

4.4 坑间土体深层水平位移

测斜点位于 A 基坑排桩后侧、放坡坡底的施工平台. 坑间土体深层水平位移,如图 10 所示. 由图 10 可知:随着深度的增加,相邻开挖与单独开挖两种情况下土体的水平位移均呈现减小趋势,且最大水平位移值出现在桩顶处,但相邻开挖的土体水平位移在各个深度均小于单独开挖的土体水平位移,这与数值模拟的结果相同,单独开挖的土体最大水平位移值约为 19.0 mm,相邻开挖的土体最大水平位移值约为 14.0 mm,是单独开挖的 70%左右,二者的差距与数值计算结果接近;两种条件下土体最大水平位移发生在测斜管顶部,即放坡坡底的施工平台处,与数值模拟(图 7)最大位移在中部不同,这主要是数值计算的假设条件造成的差异.

数值计算时,考虑桩土变形协调,其桩顶位置的土体水平位移将受支护桩和冠梁的刚度约束,故桩顶处的计算位移不是最大的水平位移;然而,实际工程中支护桩与桩顶处土体变形存在不协调,土体与支护桩在桩顶处存在脱离现象,土体变形受支护桩和冠梁的约束弱于其下部土体,导致土体的最大水平位移发生在支护顶部;另外,由于测斜点位于放坡平台,故未取得放坡段水平位移监测数据,一般情况下放坡段承受的水平应力较小,可以肯定放坡段实测位移不会大于支护桩范围内的最大位移,且在未受支护约束情况下变形性状将与数值模拟计算位移变形规律相近.

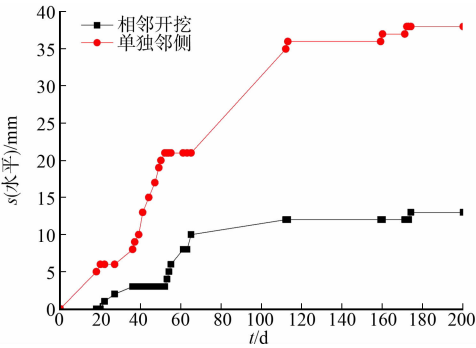


图 9 A 基坑排桩桩顶实测水平位移

Fig. 9 Measurement of horizontal displacement of row pile top in A foundation pit

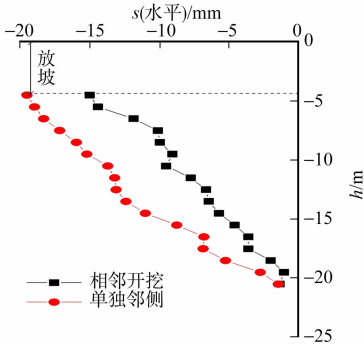


图 10 坑间土体深层水平位移

Fig. 10 Deep horizontal displacement of soil between pits

5 结论

使用 Z-Soil 软件,运用 HSS 模型,以相邻桩锚基坑开挖的工程实例进行二维数值分析,并与工程实测变形数据对比,得出以下 5 点结论.

1) 排桩桩顶水平位移、排桩深层水平位移、坑间土体深层水平位移和坡顶水平位移的数值模拟结

果表明:相邻桩锚基坑开挖明显减小了基坑水平位移,特别是对于桩顶水平位移的影响最为显著。

2) 数值模拟结果表明:相邻桩锚基坑开挖增大了坑间地表沉降,产生的沉降接近两个单坑引起的沉降叠加,从而导致了坑间地表沉降量增加,并且最大沉降位置出现在两基坑的正中间。

3) 开挖深度动态变化时,数值模拟结果表明:在相邻基坑间距小于等于 $2.5H$ 时,相邻基坑变形相互影响显现,基坑水平位移明显减小。相邻基坑侧最大桩顶水平位移仅为单坑开挖产生的桩顶水平位移的 40%,且最大深层水平位移仅为单坑开挖产生的最大深层水平位移的 70%。

4) 实测结果表明:单独开挖的排桩桩顶水平位移明显大于相邻开挖情况下的排桩桩顶水平位移,并且相邻开挖的土体水平位移在各个深度均小于单独开挖的土体水平位移,这与数值模拟的结果相同。

5) 在基坑间距小于等于 $2.5H$ 时,同步或陆续开挖的相邻桩锚基坑,其支护设计宜考虑相邻基坑开挖的影响。建议调整后续开挖基坑支护相邻侧支护结构设计计算工况,考虑基坑相邻侧最大桩顶水平位移按单坑的桩顶水平位移的 40%和最大深层水平位移按单坑位移的 70%为水平位移控制基准,对后续开挖基坑支护刚度适当弱化,以节约造价。

参考文献:

- [1] 叶建峰,林海,颜桂云. 相邻双基坑开挖相互影响二维性状分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2017,45(2):190-198. DOI:10.7631/issn.1000-2243.2017.02.0190.
- [2] 席鹏,曹得占. 大型基坑开挖对地铁车站基坑影响的数值仿真分析[J]. 土工基础,2017,31(2):183-187.
- [3] 黄振波. 毗邻异深异步基坑协调设计[J]. 土工基础,2019,33(4):398-401.
- [4] 林楠,刘发前. 填海区邻近基坑开挖施工相互影响研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(增刊1):278-285.
- [5] 钟国强,王浩,孔利,等. 基于 T-S 模糊故障树的地连墙+支撑支护基坑坍塌可能性评价[J]. 岩土力学,2019,40(4):1569-1576. DOI:10.16285/j.rsm.2017.2445.
- [6] 刘雪珠,张艳书,顾蒙娜,等. 坑底加固置换率对杭州地铁湘湖站深基坑安全的影响分析[J]. 岩土工程学报,2016,38(增刊2):136-142. DOI:10.11779/CJGE2016S2022.
- [7] 冯晓腊,熊宗海,莫云,等. 复杂条件下基坑开挖对周边环境变形影响的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(增刊2):330-336. DOI:10.11779/CJGE2014S2058.
- [8] 李琳,杨敏,熊巨华. 软土地区深基坑变形特性分析[J]. 土木工程学报,2007,40(4):66-72. DOI:10.3321/j.issn.1000-131X.2007.04.012.
- [9] 龚剑,王旭军,赵锡宏. 深大基坑首层盆式开挖对基坑变形影响分析[J]. 岩土工程研究,2013,34(2):439-448. DOI:10.16285/j.rsm.2013.02.041.
- [10] 刘红军,于雅琼,王秀海. 土岩组合地层旋喷桩止水桩锚支护基坑变形与受力数值分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(增刊1):297-302.
- [11] 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. DOI:10.11779/CJGE2014S2056.
- [12] 陈东杰. 上海铁路南站相邻基坑开挖变形影响研究[J]. 建筑科学,2005,21(6):59-63. DOI:10.3969/j.issn.1002-8528.2005.06.014.
- [13] 郭力群,程玉果,陈亚军. 不同间距下相邻基坑相互影响数值分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2014,35(1):92-96. DOI:10.11830/issn.1000-5013.2014.01.0092.
- [14] 丁智,王金艳,周勇,等. 邻近基坑同步施工相互影响实测分析[J]. 土木工程学报,2015,48(增刊2):124-130.
- [15] 尹骥. 小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报,2010,32(增刊1):166-172.
- [16] 陈少杰,顾晓强. 高广运土体小应变剪切模量的现场和室内试验对比及工程应用[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊2):133-136. DOI:10.11779/CJGE2019S2034.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)