

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.04.009

【工程应用】

# 软土地区相邻深大基坑同期施工的影响分析

陈文祥<sup>1</sup>, 王武杰<sup>1</sup>, 彭帆<sup>2</sup>

(1. 宏润建设集团股份有限公司, 浙江 杭州 310004; 2. 杭州天恒投资建设管理有限公司, 浙江 杭州 310004)

**摘要:** 两相邻基坑同期施工会对两基坑的变形产生影响, 阐述了两相邻基坑的围护结构设计及其工程地质概况, 并介绍了两相邻基坑各施工工况的交叉情况, 利用数值模拟软件 Plaxis 2D 建模分析了两相邻基坑同期施工时各工况下围护结构变形及坑外土体水平位移与沉降的发展规律, 研究表明: 土方的开挖不仅会影响自身基坑的变形, 对邻近基坑也存在一定影响; 邻近围护墙的存在可以限制基坑开挖引起的土体位移的进一步扩散; 远离邻近基坑一侧围护结构的变形要大于靠近邻近基坑一侧围护结构的变形; 两基坑间土体的开挖会增加远离留土一侧围护结构的变形。有限元计算结果与实测数据相比, 围护墙最大水平变形在整体变形趋势、变形增量及最终位移上均较为接近, 验证了数值模型的准确性。

**关键词:** 软土基坑; 数值模拟; 同期施工; 基坑变形; 相邻基坑

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)04-0329-07

## Influence of simultaneous construction on adjacent deep and large excavation in soft soil area

CHEN Wen-xiang<sup>1</sup>, WANG Wu-jie<sup>1</sup>, PENG Fan<sup>2</sup>

(1. Hongrun Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310004, Zhejiang, China;

2. Hangzhou Tianheng Investment Construction Management Co., Ltd., Hangzhou 310004, Zhejiang, China)

**Abstract:** The simultaneous construction of two adjacent foundation pits will affect the deformation of the two foundation pits. The design scheme of the enclosure structure and the engineering geology conditions of the two adjacent foundation pits are introduced. The intersection of each construction condition of two adjacent foundation pits is introduced. The numerical simulation software Plaxis 2D was used to establish a model, and the deformation development law of the enclosure structure and the settlement and horizontal displacement of the soil outside the pit was analyzed under various working conditions during the simultaneous construction of two adjacent foundation pits. The results show that the excavation of the soil will not only affect the deformation of its own foundation pit, but also have a certain impact on the adjacent foundation pit. The existence of adjacent retaining walls can limit the further diffusion of soil displacement caused by the excavation. The deformation of the enclosure structure on the side far from the adjacent foundation pit is greater than the deformation of the enclosure structure on the side near the adjacent foundation pit. The excavation of the soil between the two foundation pits will increase deformation of the envelope structure on the side away from the soil reserve. Compared with the measured data, the finite element method calculation results show that the maximum horizontal deformation of the retaining wall is relatively close in the overall deformation trend, deformation increment and final displacement, which verifies the accuracy of the numerical model.

**Key words:** excavation in soft soil; numerical simulation; simultaneous construction; excavation deformation; two adjacent foundation pits

## 0 引言

由于人口逐渐向城市聚集, 城市土地资源日益紧缺, 建筑愈发密集, 为缓解日益增长的交通拥堵

问题, 城市地铁网路规模不断扩大, 而地铁线路周边的商业价值显著, 越来越多的高层建筑在地铁沿线建设, 多个相邻基坑同期开挖的情况愈发常见。随着基坑工程的不断发展, 基坑工程呈现出规模更

收稿日期: 2022-03-29

作者简介: 陈文祥 (1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事市政工程施工技术管理工作。E-mail: 313788080@qq.com。

大,开挖深度更深,周边环境日趋复杂的趋势。不同于常规单一基坑,基坑群同期施工间的相互作用关系错综复杂<sup>[1]</sup>。

目前,已有不少学者针对基坑群开挖相互影响方面的问题开展了较多的研究<sup>[2-5]</sup>。胡敏云等<sup>[6]</sup>借助数值分析,得到了基坑变形受到相邻基坑开挖的叠加影响的结论。陈东杰<sup>[7]</sup>通过有限元计算分析,指出两基坑的间距是影响围护结构变形的主要因素,通过对相邻基坑间土体及被动区土体进行加固均能较好地控制围护结构的变形。戴斌等<sup>[1]</sup>建立相邻基坑相互影响的数值模型,认为基坑间预留一定宽度的留土可以起到一定的缓冲作用,并给出了合理的缓冲区宽度。丁智等<sup>[8]</sup>通过现场实测分析认为相邻基坑施工与单一基坑施工相比,深层土体位移变化规律有明显不同,且后基坑的开挖会降低前基坑的支撑轴力。徐良仲等<sup>[9]</sup>根据施工工程中的监测数据反演数值模型参数,并进一步分析了后续施工工况对邻近地铁车站的影响。

因此,相邻基坑的同期施工与单一基坑施工引起的基坑变形有着较大的差异。本文以杭州两相邻软土基坑施工为背景,介绍了基坑围护结构的设计方案,并通过有限元建模分析了相邻基坑同期开挖不同工况下的相互影响。

### 1 工程概况

杭州某基坑工程开挖面积约 13 200 m<sup>2</sup>, 下设 3 层地下室, 开挖深度为 15.4~16.3 m, 基坑东侧及南侧均为空地, 基坑西侧埋设有地下管线, 距基坑边最小净距为 6.6 m, 基坑北侧为在建地铁车站基坑, 距基坑边最小净距仅为 1 m, 地铁车站基坑主体长约 260 m, 基坑开挖深度约为 26.9~28.7 m,

围护结构采用地连墙结合内支撑的布置形式。两相邻基坑相对位置及周边环境见图 1。



图 1 基坑及周边环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foundation pit and surrounding environment

### 2 土层分布及水文地质

如图 2 所示为典型地质剖面, 所示开挖影响范围内主要土层物理力学性质指标见表 1。

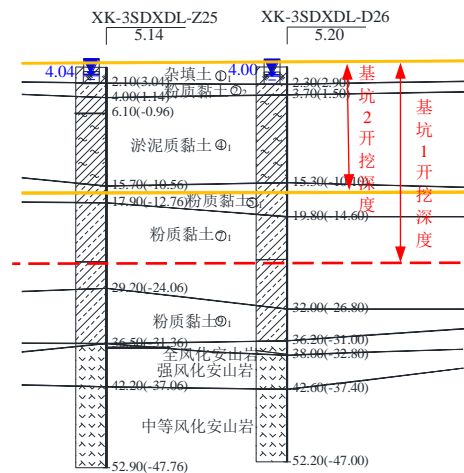


图 2 典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological profile

表 1 各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

层号	土层名称	w/%	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	地基承载力特征值/ 水平渗透系数/		固结快剪	
					kPa	(cm/s)	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
① <sub>1</sub>	杂填土	—	20.0	—	—	$3.0 \times 10^{-3}$	5.0	18.0
② <sub>1</sub>	黏质粉土	28.7	19.3	0.800	120	$5.5 \times 10^{-4}$	11.7	25.7
② <sub>2</sub>	粉质黏土	28.4	19.2	0.815	80	$6.4 \times 10^{-6}$	23.7	16.7
③ <sub>2</sub>	黏质粉土	33.6	18.6	0.938	120	$5.8 \times 10^{-4}$	11.1	26.0
④ <sub>1</sub>	淤泥质黏土	43.8	17.6	1.238	60	$6.3 \times 10^{-6}$	11.8	9.6
⑤ <sub>1</sub>	粉质黏土	27.2	19.3	0.786	165	$6.5 \times 10^{-6}$	37.1	20.4
⑤ <sub>2</sub>	粉质黏土夹粉土	31.9	18.6	0.923	140	$5.7 \times 10^{-6}$	27.0	20.4
⑦ <sub>1</sub>	粉质黏土	28.4	19.1	0.828	180	$4.4 \times 10^{-6}$	44.2	21.0
⑨ <sub>1</sub>	粉质黏土	26.6	19.5	0.770	200	$5.8 \times 10^{-6}$	39.9	20.4

由图2可知,基坑开挖范围内有深厚淤泥质土,该土层广泛分布于整个场地,坑底以下主要以粉质黏土为主,地铁车站基坑坑底位于⑦<sub>1</sub>层粉质黏土中。

孔隙潜水的稳定水位埋深为0.70~1.60 m,受大气降水竖向入渗补给及地表水体下渗补给为主,径流缓慢,水位随季节气候动态变化明显,与地表水体具有一定的水力联系,地下水位埋深和变化幅度受季节和大气降水的影响,动态变化大,水位变幅一般在1.0~2.0 m。

### 3 围护设计方案及施工优化

#### 3.1 围护体系设计方案

考虑到基坑开挖深度较大,且开挖深度范围内分布有深厚淤泥质土,力学性质较差,基坑(基坑2)北侧有地铁车站基坑(基坑1),变形控制要求较高,因此,基坑2围护结构设计如下:基坑整体上分为南侧大基坑(南坑)及北侧小基坑(北坑),南坑采用4个大角撑+边桁架的支撑平面布置形式,较大的施工空间方便了土方的开挖;北坑采用角撑+对撑的支撑平面布置形式。南坑与北坑采用1 000 mm厚地连墙分隔,基坑2东西两侧主要采用 $\Phi 1\ 100@1\ 200/1\ 250$  mm 钻孔灌注桩作挡土结构,基坑2南侧为 $\Phi 1\ 000@1\ 200$  mm 钻孔灌注桩。地连墙与钻孔灌注桩外均设单排 $\Phi 850@600$  三轴水泥搅拌桩作为止水帷幕,采用套接一孔的形式以加强止水效果。为控制基坑2开挖对邻近基坑1的影响,坑内采用 $\Phi 850@600$  三轴水泥搅拌桩进行被动区加固以改善土体性质。基坑1采用1 000 mm厚地连墙结合内支撑作为围护结构,总计6道支撑,其中第一、四道为混凝土支撑,其余为钢支撑,钢支撑与混凝土支撑相比,可大大节约混凝土养护时间,加快施工进度。基坑典型剖面图见图3。

#### 3.2 土方开挖顺序

前述研究表明,相邻基坑间的留土可作为缓冲区,降低基坑开挖对邻近基坑的影响,因此基坑2先行开挖南坑,北坑作为南坑及基坑1间的缓冲区,缓冲区宽度范围约为0.7~1.2倍的基坑开挖深度。待南坑完成地下室结构施工后再分层分块开挖北坑。

基坑1首先开挖东坑(图1),而后开挖西坑端头井部位,再开挖与基坑2相邻部分基坑,最后开挖西坑剩余部分。

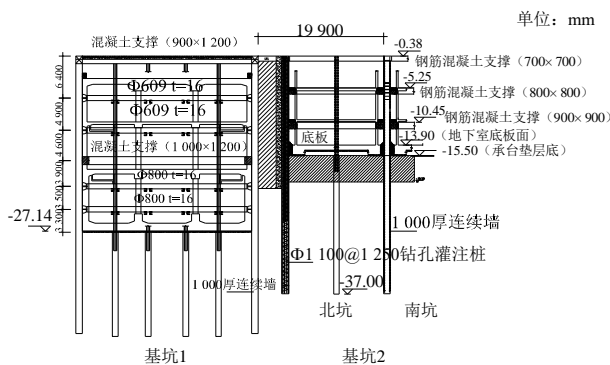


图3 典型基坑支护结构剖面图

Fig. 3 Cross-section of typical foundation pit support structure

### 4 相邻基坑开挖相互影响分析

#### 4.1 数值模拟分析

有限元模拟软件可以模拟复杂的工程地质条件,并能较高地还原实际施工工况。采用Plaxis 2D数值模拟软件对两相邻基坑进行建模分析,见图4。

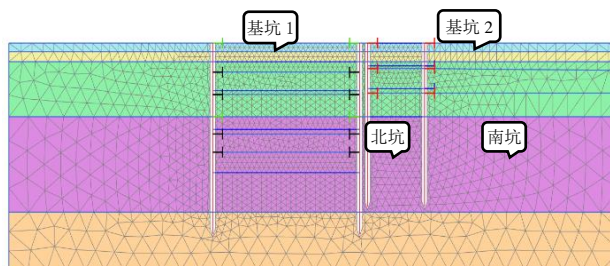


图4 两相邻基坑模型

Fig. 4 Model of two adjacent foundation pits

模型尺寸为:150 m×50 m,土体本构模型采用HSS模型,可以考虑土体的剪切硬化、压缩硬化和小应变刚度特性,该模型主要包含以下参数:三轴排水剪切试验割线模量 $E_{50}^{ref}$ ,固结试验的主加载切线模量 $E_{oed}^{ref}$ ,三轴固结排水卸载再加载试验的参考模量 $E_{ur}^{ref}$ ,小应变参数 $G_0^{ref}$ 及 $\gamma_{0.7}$ 分别为动剪切初始模量与割线剪切模量衰减到初始剪切模量70%时所对应的剪应变,根据地勘报告及现有研究成果<sup>[10]</sup>,土体基本参数取值见表2。围护墙采用板单元模拟,支撑采用锚定杆单元模拟,结构尺寸均按实际取值,混凝土模量统一取为30 GPa,泊松比为0.15,钢支撑弹性模量取为210 GPa,泊松比为0.25。

结合两相邻基坑实际开挖顺序,有限元分析施工工况见表3。

表2 HSS模型中土体基本参数  
Table 2 Parameters of soil in HSS model

层序	土体名称	$E_s/MPa$	$E_{50}/MPa$	$E_{ocd}/MPa$	$E_{ur}/MPa$	$\gamma_{0.7}$	$G_0^{ref}/MPa$
① <sub>1</sub>	杂填土	4.0	4.0	4.0	12.0	$1.5 \times 10^{-4}$	36.0
② <sub>2</sub>	粉质黏土	4.0	4.0	4.0	12.0	$1.5 \times 10^{-4}$	36.0
④ <sub>1</sub>	淤泥质黏土	2.5	2.5	2.5	7.5	$1.5 \times 10^{-4}$	22.5
⑦ <sub>1</sub>	粉质黏土	6.6	6.6	6.6	19.8	$1.5 \times 10^{-4}$	59.4
⑩ <sub>a2</sub>	凝灰岩	—	50.0	50.0	150.0	$1.5 \times 10^{-4}$	450.0

表3 施工工况  
Table 3 Construction conditions

施工工况	基坑2	基坑1中坑
初始阶段	自重应力场平衡	
工况一	围护墙施工	围护墙施工
工况二	架设第一道支撑	—
工况三	开挖到第二道支撑底	—
工况四	浇筑第二道支撑, 开挖到第三道支撑底	—
工况五	浇筑第三道支撑, 并开挖到基坑底	浇筑第一道支撑, 并开挖到第二道支撑底
工况六	浇筑底板	逐步开挖至第五道支撑底
工况七	拆除第三道支撑, 并完成负三层结构施工	开挖到第六道支撑底
工况八	拆除第二道支撑, 完成负二层结构施工	开挖至基坑底
工况九	拆除第一道支撑, 完成负一层结构施工	逐步拆撑并完成负二层结构施工
工况十	南侧地下室结构施工完成	地下室结构施工完成
工况十一	北侧基坑开挖到底	—
工况十二	北侧地下室结构施工完成	—

图5~6为基坑2开挖到第三道支撑底时土体水平位移及竖向位移的云图, 由图可知, 由于坑内土体的开挖, 坑外土体发生了一定的水平位移及竖向位移, 水平位移最大值发生在坑底以下, 由于邻近基坑1右侧(南侧)围护墙的存在, 约束了土体水平位移的进一步扩散; 土体沉降主要发生在北坑留土中, 最大沉降位于地表面, 同样的, 由于邻近基坑1右侧围护墙的存在, 限制了土体沉降的进一步传播, 但基坑1坑内土体还是产生了一定的位移。

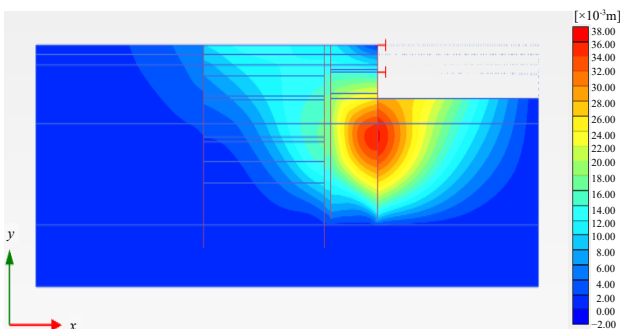


图5 土体水平位移云图(工况四)

Fig. 5 Horizontal displacement of soil under condition 4

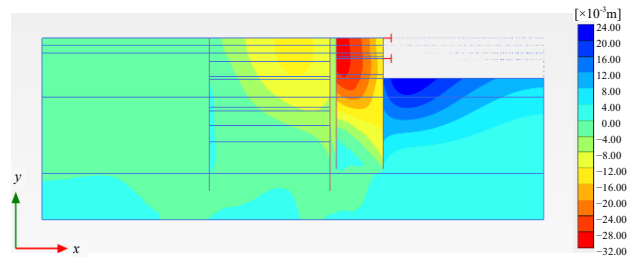


图6 土体竖向位移云图(工况四)

Fig. 6 Vertical displacement of soil under condition 4

图7~8为工况五时基坑的变形云图, 此时基坑2已开挖至基坑底, 邻近基坑1刚开挖至第二道支撑底, 由图可见, 由于基坑2的进一步开挖, 土体最大水平变形进一步增大, 且发生位置下移, 相较于坑底及基坑1左侧(北侧)的土体变形区域, 可以明显的看到北坑留土区域土体水平位移的影响范围更小。从邻近基坑1土体水平位移云图可以看出, 基坑1两侧围护墙均向基坑2方向发生位移, 但基坑1右侧围护墙水平变形更小, 表明右侧围护墙水平变形叠加了基坑1坑内土体挖除的影响及基坑2坑内土体开挖的影响, 影响叠加后右侧围护墙

仍表现为向坑外变形。从沉降云图中可以看出, 坑内土体的挖除进一步增加了中间留土的沉降, 但由于围护墙的遮拦效应, 对邻近基坑 1 坑内土体沉降的影响较小。

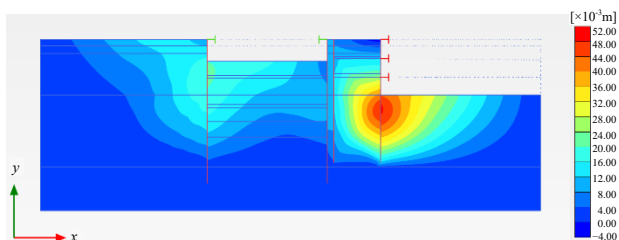


图 7 土体水平位移云图 (工况五)

Fig. 7 Horizontal displacement of soil under condition 5

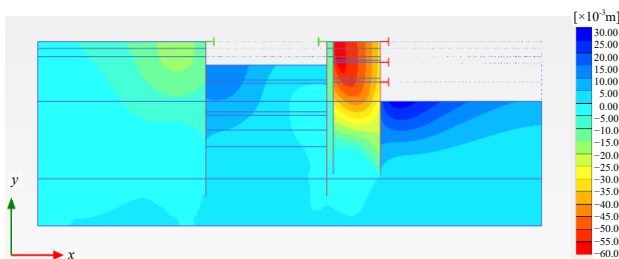


图 8 土体竖向位移云图 (工况五)

Fig. 8 Vertical displacement of soil under condition 5

图 9~10 为两相邻基坑都已完成开挖后土体的变形云图, 由图可见, 基坑 1 左侧围护墙水平变形随开挖逐渐增大, 影响范围也进一步扩大, 且最大值发生位置位于坑底附近, 而右侧围护墙受到邻近基坑 2 土体挖除的影响, 向坑内的变形较左侧更小。而基坑 2 由于邻近基坑 1 的开挖卸荷, 土体水平变形有减小的趋势。在土体沉降方面, 邻近基坑 1 的开挖使得沉降继续增加且影响范围更大更深。

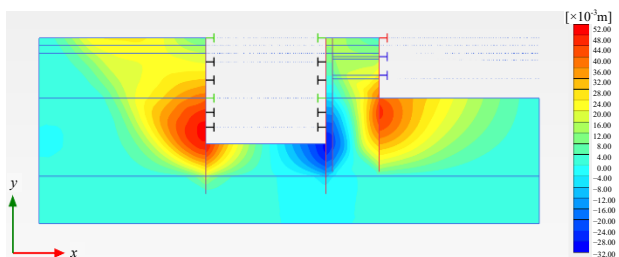


图 9 土体水平位移云图 (工况八)

Fig. 9 Horizontal displacement of soil under condition 8

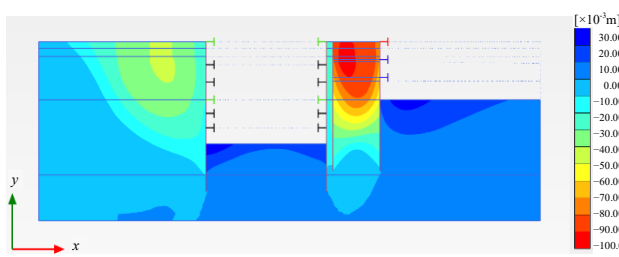


图 10 土体竖向位移云图 (工况八)

Fig. 10 Vertical displacement of soil under condition 8

图 11~12 为北坑坑内土体完全挖除时的土体变形云图, 由图可见, 基坑 1 左侧围护墙侧向变形进一步增大大约 10 mm。由于原有最大沉降发生于北坑土体, 此时, 由于此处土体挖除, 最大沉降发生于基坑 1 左侧, 距离围护墙约 0.5 倍开挖深度。由此可见, 中间留土的挖除会增加远离留土一侧围护墙的水平变形, 减小靠近留土一侧围护墙的水平变形, 但中间留土沉降变形较大, 应视保护对象及工程情况决定两基坑间是否留有一定的土体作缓冲带。

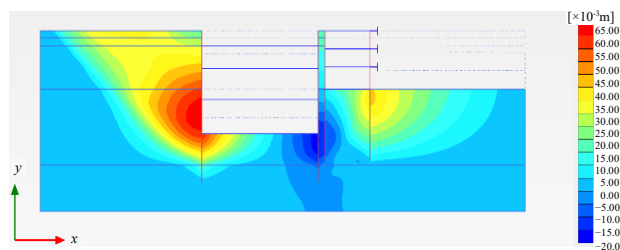


图 11 土体水平位移云图 (工况十二)

Fig. 11 Horizontal displacement of soil under condition 12

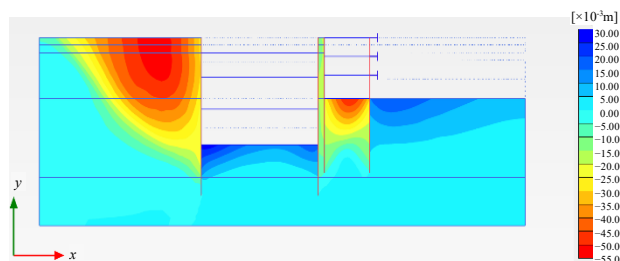


图 12 土体竖向位移云图 (工况十二)

Fig. 12 Vertical displacement of soil under condition 12

#### 4.2 实测数据分析

为及时发现问题, 在两相邻基坑开挖过程中, 对基坑变形进行了监测, 选取了基坑 1 围护墙水平位移的监测数据做进一步分析, 监测点位布设见图 13。

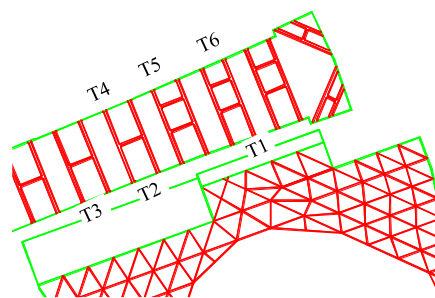


图 13 基坑监测点位布设图

Fig. 13 Layout of monitoring points of foundation pit

图 14 为整个开挖阶段各测点围护墙最大变形的实测变形规律, 围护墙水平变形整体上呈现上升

趋势,但在不同工况下,围护墙水平变形表现不同。在工况四阶段,由于基坑2的开挖,基坑1围护墙水平变形略微减小,但最终位移方向指向坑内,与有限元计算结果不同,这是由于地铁车站东侧端头井部位先期开挖,使得东侧围护墙在基坑2开挖前即有指向坑内的变形。在工况五阶段,由于两侧基坑同期开挖,基坑2右侧围护墙水平变形变化较小,而基坑1左侧围护墙由于两基坑的同时卸荷,围护墙水平变形迅速变大。在工况八基坑1开挖到底阶段,两侧围护墙水平变形持续增大,但基坑1左侧围护墙水平变形增幅要大于右侧。在北坑开挖阶段,基坑1左侧围护墙水平变形继续增大,右侧围护墙水平变形略微减小。

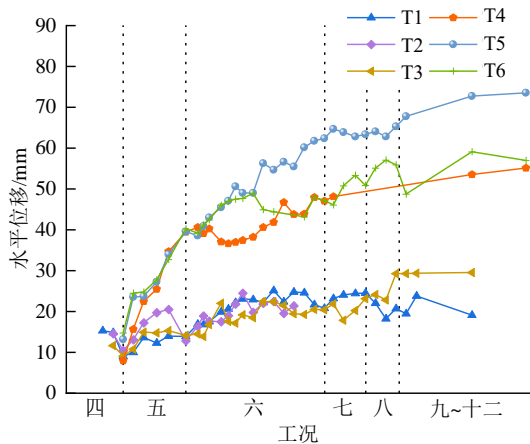


图 14 实测围护墙水平位移

Fig. 14 Measurements of horizontal displacement of diaphragm wall

图 15 为有限元计算的基坑 1 两侧的围护墙最大水平变形,如图所示,基坑 1 北侧围护墙在开挖阶段变形不断增加,在拆撑阶段,变形基本保持不变,最后北坑的开挖进一步增加了围护墙水平变形。而基坑 1 南侧围护墙在工况六之前,由于基坑 2 的开挖,南侧围护墙发生指向坑外的位移,因此表现为负数,而且发生于围护墙顶。随着基坑 1 的逐渐开挖,围护墙最大变形逐渐增大,在工况六时围护墙最大变形发生了较大的突变,这是由于此时围护墙最大变形指向坑内,且发生于基坑开挖面附近。随后,在拆撑阶段,变形基本保持不变。基坑 2 北坑的开挖,使得南侧围护墙最大变形略微减小。有限元计算结果与实测结果相比,整体趋势及变形增量均较为接近。

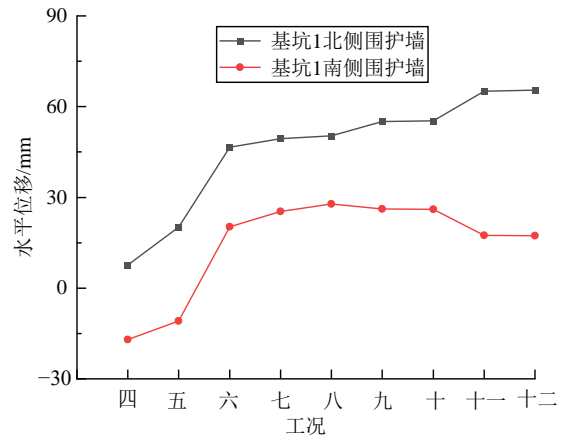


图 15 数值模拟围护墙水平位移

Fig. 15 Numerical simulation of horizontal displacement of diaphragm wall

## 5 结 论

以杭州两相邻软土基坑同期开挖为研究对象,利用有限元进行建模分析并结合实测数据,得出以下结论:

(1) 相邻基坑的同期开挖与单一基坑开挖不同,相邻基坑土体的开挖不仅对自身基坑变形有影响,对邻近基坑也存在一定的影响。

(2) 围护墙可以限制由邻近基坑开挖引起的土体位移的进一步扩散。

(3) 远离邻近基坑一侧围护结构的变形要大于靠近邻近基坑一侧围护结构的变形。

(4) 两基坑间土体的开挖会增加远离留土一侧围护结构的变形。

## 参考文献

- [1] 戴斌, 胡耘, 王惠生. 上海地区相邻基坑同步开挖影响分析与实践[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 2): 129-132.  
DAI Bin, HU Yun, WANG Hui-sheng. Analysis and practice of influence of synchronous excavation of adjacent foundation pits in Shanghai Area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 129-132.
- [2] 邵鹏, 朱春柏, 潘静杰, 等. 基坑群间有限土压力及支护结构相互作用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 1): 187-195.  
SHAO Peng, ZHU Chun-bai, PAN Jing-jie, et al. Study on the interaction of limited earth pressure and supporting structure between deep foundation pits[J]. Chinese Journal

- of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 187–195.
- [3] 范凡, 章红兵, 王建华, 等. 软土地区分隔型基坑群变形特性实测分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(2): 133–140.  
FAN Fan, ZHANG Hong-bing, WANG Jian-hua, et al. Deformation characteristic of divided excavation groups in soft soil[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52(2): 133–140.
- [4] 郭力群, 程玉果, 陈亚军, 等. 内支撑基坑群开挖相互影响的三维数值分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2014, 35(6): 711–716.  
GUO Li-qun, CHENG Yu-guo, CHEN Ya-jun, et al. 3D numerical analysis on the interaction of group foundation pits supporting with strut[J]. Journal of Huaqiao University, 2014, 35(6): 711–716.
- [5] 陈湘桂, 张雪松, 黄林冲. 连续基坑群开挖的影响效应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(1): 87–92.  
CHEN Xiang-gui, ZHANG Xue-song, HUANG Lin-chong. Effect study on group foundation pits excavation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(1): 87–92.
- [6] 胡敏云, 寿树德, 袁静, 等. 软土相邻基坑支护结构受力影响特征及机理研究[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(1): 111–118.  
HU Min-yun, SHOU Shu-de, YUAN Jing, et al. Study on influence of excavation process of adjacent foundation pits[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(1): 111–118.
- [7] 陈东杰. 上海铁路南站相邻基坑施工技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.  
CHEN Dong-jie. Research on construction technology of adjacent foundation pit of Shanghai South Railway Station [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [8] 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.  
DING Zhi, WANG Jin-yan, ZHOU Yong, et al. Monitoring analysis of the interrelationship of synchronous construction in adjacent foundation pit[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 124–130.
- [9] 徐良仲, 赖小勇, 李慧慧. 基于已有实测数据的深基坑开挖对邻近地铁车站影响的实例简析[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 238–245.  
XU Liang-zhong, LAI Xiao-yong, LI Hui-hui. Case study on impact of deep excavation on adjacent subway tunnels based on the existing measured data[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 238–245.
- [10] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
ZHOU En-ping. Application of hardening soil model with small-strain in deformation analysis for foundation pit[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.