

# 内支撑基坑群开挖相互影响的三维数值分析

郭力群<sup>1</sup>, 程玉果<sup>1,2</sup>, 陈亚军<sup>1</sup>, 徐芳超<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 中国建筑东北设计研究院, 辽宁 沈阳 110006)

**摘要:** 通过 Z-Soil 岩土三维分析软件,以小应变硬化土(hardening soil model with small strain stiffness, HSS)模型为基础,建立地连墙与内支撑联合支护的群体基坑开挖的三维数值模型.对基坑土体的竖向位移以及地连墙的变形和受力进行了分析,讨论了基坑间距的影响.分析结果表明:临坑的开挖使紧邻的坑间土堤沉降增加约 1 倍,使群坑周边沉降增加约 10%;先开挖的基坑支护结构受力、变形增大,后续开挖的基坑的地连墙顶会向先开挖基坑方向产生整体侧移,基坑间距越近,影响越明显.

**关键词:** 群体基坑;相互影响;小应变硬化土模型;数值分析

**中图分类号:** TU 473

**文献标志码:** A

在城市交通枢纽,城市综合体地下室等地下空间开发项目中,不可避免地出现多个基坑同步或相继开挖的问题.群体基坑工程面临着施工环境复杂、工序交错、时间和空间难以协调等问题.目前对群体基坑的研究集中在施工技术方面:在上海虹桥交通枢纽工程中<sup>[1]</sup>,采用了多级支护和分区施工技术.在外滩交通枢纽与十六铺公共地下空间开发项目中<sup>[2-3]</sup>,采用了共墙设计、分幅施工技术.在天津于家堡金融起步区一期工程中<sup>[4]</sup>,采用了合并支护、灵活换撑和分阶段拆撑等方法来保证群体基坑的顺利施工.传统的基坑支护分析设计方法及软件难以考虑群体基坑开挖造成的相互影响,而数值分析方法由于能适应各种工况,在群体基坑工程的分析评价中起了重要的作用.赵永光<sup>[5]</sup>采用 Midas GTS 对上海南京东路地铁站与 155 地块综合开发项目群体基坑进行三维数值分析,评价了群体基坑开挖对邻近地铁隧道、车站的影响,以及群坑之间的相互影响.程玉果<sup>[6]</sup>采用 Z-Soil. PC 对不同基坑间距、不同开挖顺序下的放坡支护的群体浅基坑、排桩支护的群体基坑进行三维分析,评价了土质、基坑间距、基坑开挖顺序对群体基坑的影响.本文以地连墙和内支撑联合支护的群体基坑工程为背景,分析不同工况下土体及支护结构的受力变形特征,并讨论基坑间距对土体位移及支护结构的影响.

## 1 软件及土体模型选用

### 1.1 计算软件

数值分析采用岩土真三维有限元分析软件 Z-Soil. PC V2011,该软件内置了专为岩土分析开发的单元库和本构关系,优化了桩-土体-基础-上部结构共同作用,真实地反映岩土体和结构的应力应变关系,可用于基坑工程建设的全过程分析.排水三轴实验下土体的应力-应变曲线,如图 1 所示.

### 1.2 土体 HSS 本构模型

Schanz 等<sup>[7-8]</sup>在 Vermeer<sup>[9]</sup>的双硬化模型的基础上,通过标准三轴试验修正,提出了硬化土(hardening soil, HS)模型.该模型在  $p-q$  平面内,由一个双曲线的剪切屈服面和一个椭圆的盖帽屈服面组成,土体的屈服准则为摩尔-库伦屈服准则,土体剪切硬化的屈服面为六棱锥. Benz<sup>[10]</sup>在 HS 模型的基础上考虑了土体在小应变下的刚度非线性变化,提出 HSS 模型. HSS 模型改用松冈-中井屈服准则<sup>[11]</sup>,使

收稿日期: 2014-03-10

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: guoliqun@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208218)

得土体的屈服面比 HS 模型光滑,更有利于数值计算. HSS 模型反映的土体的工程性质较为全面,在描述土体的剪切应变、压缩硬化、循环荷载、滞回弹性以及小应变等方面具有优势. 因此, HSS 模型已内嵌入 Z-Soil. PC 软件中. 土体的 HS, HSS 模型屈服面, 如图 2 所示.

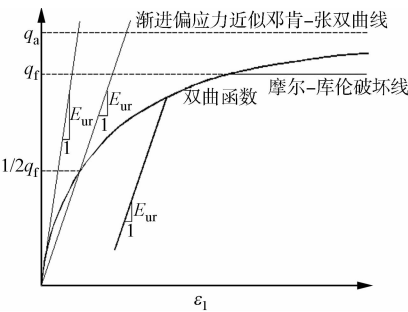


图 1 排水三轴实验下土体的应力-应变曲线

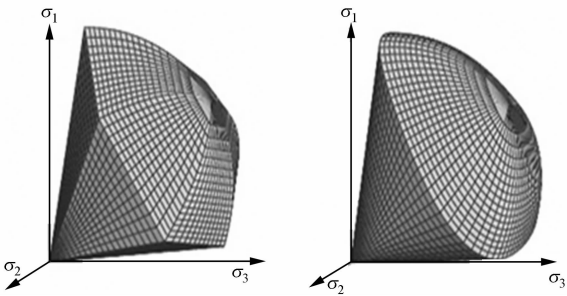


图 2 土体的 HS, HSS 模型屈服面

Fig. 1 Stress-strain curves of soil under drained triaxial test Fig. 2 Yield surfaces of HS model and HSS model

## 2 群体基坑数值建模分析

### 2.1 基坑工程概况

为了模拟不同开挖顺序下群体基坑开挖的相互影响,选取 3 个一字排开的相邻深基坑作为分析对象. 群体基坑的平面图,如图 3 所示. 图 3 中:左边为 1 号基坑,中间为 2 号基坑,右边为 3 号基坑;将 1 号基坑和 2 号基坑之间的土堤定义为土堤 1,将 2 号基坑和 3 号基坑之间的土堤定义为土堤 2;将基坑左右两边的地连墙分别定义为 a 和 b. 单个基坑长、宽均为 100 m,基坑开挖深度  $H$  均为 14 m;采用地下连续墙与两道圆环内支撑联合支护. 群体基坑的剖面图,如图 4 所示. 场地各土层的物理力学参数,如表 1 所示.

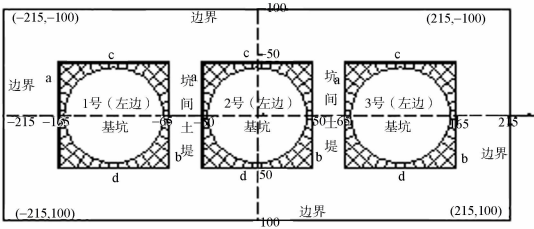


图 3 群体基坑平面图

Fig. 3 Plan of group foundation pits

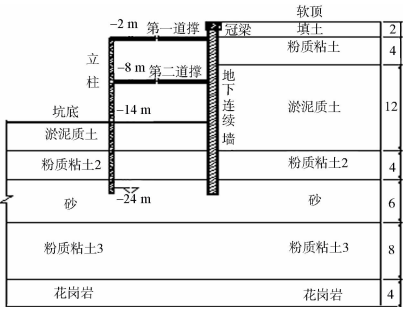


图 4 基坑支护结构剖面图

Fig. 4 Section of pit supporting structure

表 1 土体的物理力学参数及 HSS 模型参数

Tab. 1 Physical mechanical parameters and HSS model parameters of soil

层号	土层	层厚/m	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$e_0$	$K_0$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{GPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{GPa}$	$E_{90}^{\text{ref}}/\text{GPa}$	$H$	$M$
1	填土	2	17.0	0.80	0.50	10	15.0	22.500	112.500	4.500	3 538	0.78
2	粘土 1	4	18.5	0.88	0.48	22	18.5	31.950	159.750	6.390	12 937	1.10
3	淤泥	12	16.9	1.00	0.54	14	13.5	17.925	89.625	3.585	6 590	0.88
4	粘土 2	4	19.5	0.71	0.40	25	21.5	48.525	245.625	9.705	6 605	2.05
5	砂	6	18.8	0.81	0.36	1	33.0	96.375	481.875	19.275	13 108	1.30
6	粘土 3	8	19.2	0.45	0.45	26	21.5	55.950	279.750	11.190	7 876	1.51
7	花岗岩	4	20.0	0.20	0.40	30	30.0	120.000	600.000	24.000	19 571	1.64

### 2.2 计算模型

根据基坑间距的不同,将模型分为两种:基坑间距为  $1H$  时,模型的尺寸为  $430\text{ m}\times 200\text{ m}\times 40\text{ m}$ ; 基坑间距为  $2H$  时,模型的尺寸为  $460\text{ m}\times 200\text{ m}\times 40\text{ m}$ . 在建模过程中,考虑土层均匀成层分布,基坑开挖完成后的整体模型,如图 5 所示.

模型中土体采用连续体单元 (continuum), 选用 HSS 模型进行模拟, 具体参数见表 1. 地连墙采用无厚度的壳单元 (shell) 模型, 在壳体单元和土体单元之间设置接触单元 (contact), 用来模拟土体和支护结构的位移不连续. 支撑和立柱均采用梁单元 (Beam) 进行模拟.

2.3 计算工况

为了减轻工况交叉的影响, 计算时设定的施工工况为先开挖 2 号基坑, 然后开挖 1 号基坑, 最后开挖 3 号基坑. 基坑开挖的计算工况, 如表 2 所示, 在计算工况前要先计算初始地应力, 并将位移清 0.

表 2 计算工况  
Tab. 2 Calculation working condition

2 号基坑开挖		1 号基坑开挖		3 号基坑开挖	
工况	模拟内容	工况	模拟内容	工况	模拟内容
Stage 1	地连墙及立柱施工	Stage 8	地连墙及立柱施工	Stage 15	地连墙及立柱施工
Stage 2	开挖第 1 层土	Stage 9	开挖第 1 层土	Stage 16	开挖第 1 层土
Stage 3	冠梁施工	Stage 10	冠梁施工	Stage 17	冠梁施工
Stage 4	第 1 道支撑施工	Stage 11	第 1 道支撑施工	Stage 18	第 1 道支撑施工
Stage 5	开挖第 2 层土	Stage 12	开挖第 2 层土	Stage 19	开挖第 2 层土
Stage 6	第 2 道支撑施工	Stage 13	第 2 道支撑施工	Stage 20	第 2 道支撑施工
Stage 7	开挖第 3 层土	Stage 14	开挖第 3 层土	Stage 21	开挖第 3 层土

3 数值分析结果

3.1 土体竖向位移分析

所有基坑按表 2 工况均开挖完成后, 基坑外土体的沉降云图, 如图 6 所示. 土堤中部及群坑边缘的沉降剖面云图, 如图 7 所示. 坑内隆起云图, 如图 8 所示.

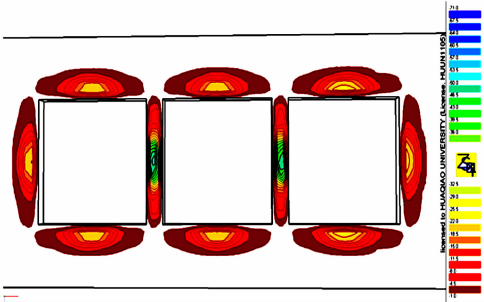


图 6 群体基坑开挖后土体整体沉降图

Fig. 6 Contours of settlement after group pits excavation

由图 6 可知: 1 号基坑开挖后, 土堤 1 出现了最大约 32 mm 的 2 次沉降, 最大值约为 53 mm, 2 号基坑周边出现了 1~7 mm 的 2 次沉降; 2 号基坑开挖后, 坑边沉降最大值约为 25 mm; 3 号基坑开挖后, 土堤 2 出现了最大约 25 mm 的 2 次沉降, 最大约 52 mm, 土堤 1 出现了最大约 3 mm 的 2 次沉降, 最大约 54 mm, 1 号基坑周边出现了 1~7 mm 的 2 次沉降, 而 2 号基坑周边几乎无 2 次沉降. 分析结果表明: 邻坑的开挖使紧邻的坑间土堤沉降约增加一倍, 而基坑群周边沉降增加较少, 约为 10%.

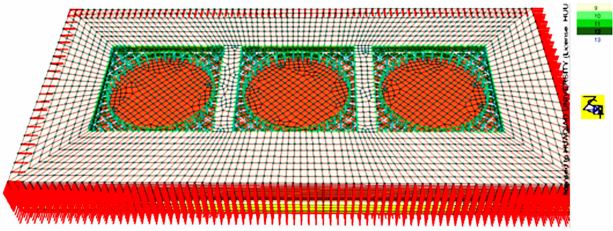


图 5 群体基坑有限元分析模型

Fig. 5 FEA model of group pits

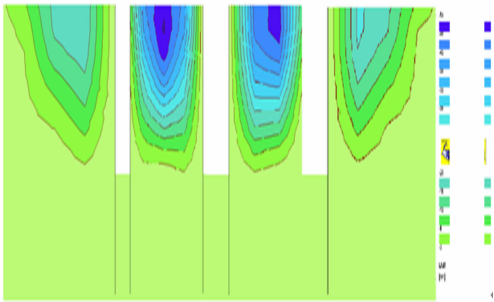


图 7 土体沉降剖面图

Fig. 7 Sections of the soil settlement

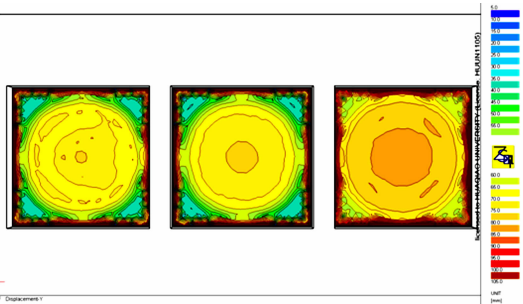


图 8 群体基坑开挖后坑底隆起图

Fig. 8 Contours of uplift at the bottom of group pits

由图 7 可知:所有基坑开挖后,坑边土体和土堤的沉降曲线并未表现为完全对称的情况;土堤 1 和土堤 2 相比,土堤 1 的最大沉降出现在土堤中间,土堤 2 的最大沉降出现在土堤中间偏 3 号基坑一侧;两侧的坑边土体沉降曲线几乎一致,但 3 号基坑右侧土体沉降稍大.

由图 8 可知:2 号基坑开挖后,坑底隆起最大约 85 mm,坑底中心约为 77 mm;1 号基坑开挖后,其坑底隆起最大约 90 mm,坑底中心约为 73 mm,2 号基坑坑底中央几乎不再变化,只有靠近地连墙部分有轻微 2 次隆起;3 号基坑开挖后,其坑底隆起最大约为 115 mm,坑底中心约为 80 mm,1,2 号基坑坑底几乎不受影响.

3.2 地连墙变形分析

待 3 号基坑开挖完后,提取出基坑群横向地连墙中间截面的侧向位移图,如图 9(a)所示.

由图 9(a)可知:3 号基坑开挖后,与 2 号基坑相邻的 1b 和 3a 地连墙顶端位移为负,表明所有地连墙变形均朝基坑群中心,1b 和 3a 地连墙的受拉方向不同于 1a 和 3b;其他 4 个地连墙墙顶位移由小变大的顺序为  $2b < 2a < 1a < 3b$ ,其中 2a 和 2b 墙顶位移几乎相等,1a 比 3b 的位移略小;墙中段最大位移由小变大的顺序为  $1a = 1b \approx 3a < 3b < 2a \approx 2b$ .

选取 2a 地连墙作为分析对象,提取不同基坑开挖后 2a 地连墙的侧向位移,如图 9(b)所示.

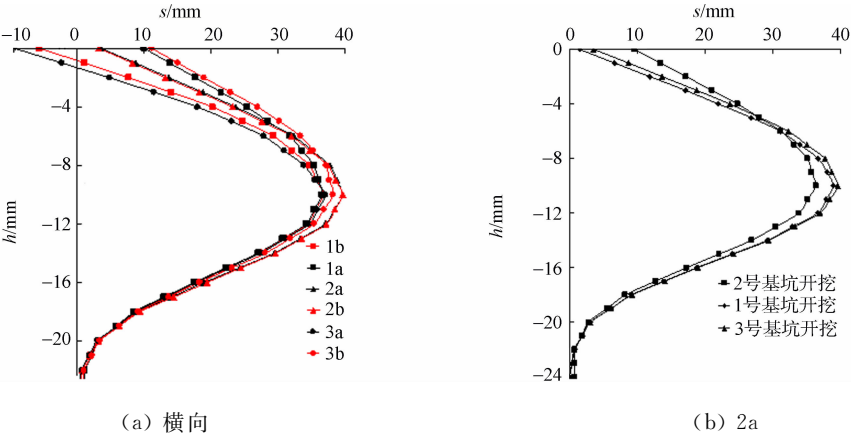


图 9 地连墙侧向位移图  
Fig. 9 Lateral displacement of diaphragm wall

由图 9(b)可知:2 号基坑开挖后,2a 墙顶位移约为 10 mm;1 号基坑开挖后,2a 墙顶位移受卸载的影响,减小为 2 mm;待 3 号基坑开挖后,2a 墙顶位移略有变大,约为 4 mm;但随着 1 号基坑和 3 号基坑的陆续开挖,2a 墙中段最大位移增大,1 号基坑的 a 墙位移增大幅度较大,3 号基坑的 2a 墙的位移增大幅度较小.

3.3 地连墙受力分析

以 2a,2b 地连墙为分析对象,不同基坑开挖后地连墙的 X 方向和 Y 方向的剪力最大增量和弯矩最大增量,如表 3,4 所示.

表 3 剪力增量表				
Tab. 3 Shear force incremental table $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$				
开挖工况	2a 地连墙		2b 地连墙	
	X	Y	X	Y
1 号基坑开挖	40	25	15	20
3 号基坑开挖	8	8	30	35

表 4 弯矩增量表				
Tab. 4 Moment incremental table $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$				
开挖工况	2a 地连墙		2b 地连墙	
	嵌固段	开挖段	嵌固段	开挖段
1 号基坑开挖	80	120	50	50
3 号基坑开挖	10	15	50	100

由表 3 可知:1 号基坑开挖对 2a 地连墙的影响远比 3 号基坑开挖对 2a 地连墙的影响大;对 2b 地连墙的影响则相反,表明地连墙剪力明显受近端开挖影响.

由表 4 可知:1 号基坑开挖对 2a 地连墙的影响比 3 号基坑开挖对 2a 地连墙的影响大;1 号基坑开挖对 2b 地连墙的影响比 3 号基坑对 2b 地连墙的影响小,对开挖段的影响比对嵌固段的影响大;连墙弯矩明显也受近端开挖影响.

对地连墙的受力分析可知,后续开挖的基坑与地连墙的距离越小,对其内力影响越大.

4 基坑间距的影响分析

4.1 基坑间距对土堤沉降的影响

分别提取出间距  $1H$  和间距  $2H$  的土堤 1 的沉降云图, 如图 10 所示.

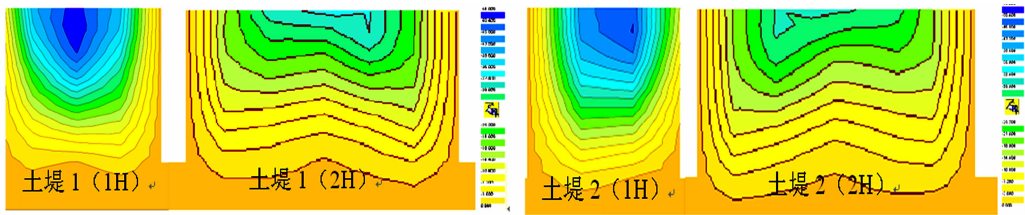


图 10 不同间距下土堤沉降云图

Fig. 10 Contours of settlement under different space

由图 10 可知: 不同间距下, 土堤的沉降差异较大; 间距为  $1H$  时, 土堤 1 的最大沉降出现在土堤中间略偏向 1 号基坑一侧, 最大值为  $54\text{ mm}$ ; 间距为  $2H$  时, 土堤 1 的最大沉降出现在土堤中间偏 2 号基坑一侧, 最大值为  $33\text{ mm}$ , 仅为间距为  $1H$  时的  $60\%$ ; 土堤 1 和土堤 2 的沉降也略有差别. 在间距相同时, 土堤 1 的沉降均略大于土堤 2, 且土堤最大沉降出现的位置均不同.

4.2 基坑间距对地连墙的影响

提取出不同间距下 2a 地连墙最终的弯矩, 和 2a 地连墙最终的水平位移, 如图 11, 12 所示.

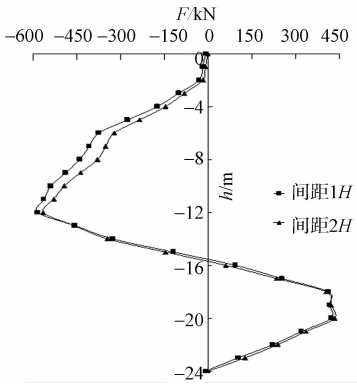


图 11 2a 地连墙弯矩图

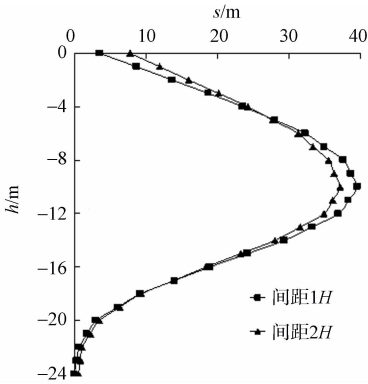


图 12 2a 地连墙侧向位移图

Fig. 11 Bending moment diagram of 2a diaphragm wall

Fig. 12 Lateral displacement of 2a diaphragm wall

由图 11 可知: 不同间距下, 2a 地连墙嵌固段的弯矩几乎无变化; 但间距为  $2H$  时, 开挖段的弯矩约为间距为  $1H$  的开挖段弯矩的  $85\%$  .

由图 12 可知: 不同间距下, 2a 地连墙嵌固段的侧向位移几乎相同; 间距为  $1H$  时, 开挖段的墙顶位移较小, 但开挖段的最大位移较大.

结果分析表明: 地连墙嵌固段的水平位移和弯矩受基坑间距的影响几乎可以忽略; 间距为  $2H$  时的开挖段弯矩约为间距为  $1H$  时的  $85\%$  .

5 结束语

对群体基坑在间隔开挖下的土体竖向位移以及地连墙的受力及变形进行了分析, 并讨论了基坑间距的影响. 分析结果表明:

- 1) 后续基坑开挖会引起先行开挖的基坑土体发生 2 次变形, 其中临坑的开挖使紧邻的坑间土堤沉降增加约 1 倍, 群坑周边沉降增加约  $10\%$ , 坑底隆起变化不明显;
- 2) 基坑之间的间距越大, 对抗间土堤沉降的影响越小, 间距为  $2H$  时最大沉降仅为  $1H$  时的  $60\%$ , 但间距不同, 坑间土堤的沉降性状不同, 最大沉降位置不同;
- 3) 后续开挖的基坑地连墙顶会向已经开挖基坑方向产生整体位移, 同时, 后续基坑的开挖会引起先行开挖基坑的地连墙受力变大、位移增大, 且距离越近, 变化越大;

4) 基坑群间距不同对地连墙嵌固段的水平位移和弯矩的影响几乎可以忽略,间距为  $2H$  时,开挖段的弯矩约为间距为  $1H$  时开挖段弯矩的 85%.

参考文献:

[1] 陶金. 超大型集群连体深基坑综合施工技术[J]. 建筑施工, 2010, 32(3): 187-190.  
[2] 孙巍, 范益群, 黄新刚. 外滩交通枢纽大型地下空间开发中几个关键问题研究[J]. 市政技术, 2009, 27(增刊 2): 3-9.  
[3] 郑晏华. 上海外滩通道综合改造工程中特大基坑的分幅施工技术[J]. 建筑施工, 2010, 32(12): 1187-1188.  
[4] 赵彤. 大型基坑群工程基坑支护方案分析与比选[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 319-322.  
[5] 赵永光. 群坑耦合效应及群坑开挖对周围环境影响的研究与分析[D]. 上海: 同济大学, 2009: 78-79.  
[6] 程玉果. 基于 HSS 模型的群体基坑开挖的性状及相互影响分析[D]. 厦门: 华侨大学, 2013: 123-124.  
[7] SCHANZ T, VERMEER P A. On the stiffness of sands[C]// Pre-Failure Deformation Behaviour of Geomaterials. London: Thomas Telford, 1998: 383-387.  
[8] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNINER P G. The hardening soil model: Formulation and Verifacation[C]// Beyond 2000 In Computational Geotechnics. Balkema: Rotterdam, 1999: 281-297.  
[9] VERMEER P A. Double hardening model for sand[J]. Geotechnique, 1978, 28(4): 413-433.  
[10] BENZ T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006: 147-149.  
[11] HAJIME M, TERUO N. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses[J]. Japan Society of Civil Engineers, 1974, 232(12): 59-70.

3D Numerical Analysis on the Interaction of Group Foundation Pits Supporting with Strut

GUO Li-qun<sup>1</sup>, CHENG Yu-guo<sup>1,2</sup>, CHEN Ya-jun<sup>1</sup>, XU Fang-chao<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. China Northeast Architectural Design and Research Institute, Shenyang 110006, China)

**Abstract:** The three-dimensional numerical model of lined up group foundation pits supported by diaphragm wall and internal strut system were built with Z-Soil geotechnical FEM software based on the hardening soil model with small strain stiffness (HSS) model. The vertical displacement of soil, deformation and stress of the diaphragm wall were analyzed. The impact of pit spacing was also discussed. The analysis results show that because of the excavation of nearby pits, the settlement of embankment between pits is doubled, the settlement increases by about 10% around the pits, and the stress and deformation of the supporting structure in the excavated pit is increase. The top of the diaphragm wall of the subsequent foundation pit move towards the direction of the excavated one. The closer pit spacing leads to the more significant the interactions.

**Keywords:** group foundation pits; interaction; hardening soil model with small strain stiffness model; numerical analysis

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)