

不同间距下相邻基坑相互影响数值分析

郭力群, 程玉果, 陈亚军

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用小应变硬化土(HSS)土体本构模型,建立同步开挖间距为 1~8 倍基坑开挖深度的相邻基坑有限元模型.考虑固渗耦合,分析不同基坑间距对坑间土堤沉降、支护桩弯矩和位移的影响.分析结果表明:相邻基坑间距小于等于 4 倍基坑开挖深度时,相互影响较强,需考虑相邻基坑施工引起的共同沉降.可采用有限土压力理论来对支护结构进行受力变形分析,减小桩径和配筋;间距大于 4 倍基坑开挖深度时,相互影响较弱,坑间土堤变形接近独立基坑,对支护结构的内力及变形影响也较小.

关键词: 基坑;小应变硬化土模型;土体本构;开挖深度;支护结构;数值分析

中图分类号: TU 473 **文献标志码:** A

随着城市地下空间开发向着“综合化、规模化、集约化、深层次和一体化”发展^[1],为缩短项目工期,在有限空间内同时或相继开挖几个基坑的情况越来越多,时间的交错致使空间利用也出现交错的现象.从上海黄浦区 155 地块和轨道交通 10 号线南京东路站综合开发项目 10 个相邻基坑^[2]、上海外滩通道综合改造工程^[3]等相邻基坑工程的施工实践来看,相邻基坑在土体变形、支护结构内力及变形、降水措施安排,以及施工组织等方面都存在不可忽视的相互影响.相邻基坑相继或同步开挖的相互影响,国内外的研究较少.陈东杰^[4]分析了基坑间距、开挖顺序、开挖面大小、围护墙刚度、土体加固等因素对基坑变形的影响;王显星^[5]研究表明土体开挖卸载对拟建基坑的影响比对已建成的基坑的影响要大,且开挖卸载对内侧围护墙的受力更为有利.陈书申^[6]基于小变位土压力理论提出了考虑相邻基坑整体位移的稳定分析方法.本文对相邻基坑采用排桩支护同步降水开挖,并运用 Z-Soil 软件进行数值模拟分析.

1 相邻基坑数值模拟

1.1 相邻基坑沉降影响范围

1998 年, Hsieh 等^[7]根据大量基坑的实测资料,得出了基坑支护墙后地表沉降曲线,如图 1 所示.该沉降曲线表明:坑外 2H(H 为基坑开挖深度)范围内,为沉降强影响区;2H~4H 范围内,为沉降弱影响区;在坑外 4H 以外,地表沉降衰减到可以忽略的程度.

根据该沉降曲线,对不同间距下相邻基坑的沉降曲线进行叠加可得到相邻基坑坑间土堤的沉降曲线.若两相邻基坑尺寸相同、开挖深度相同、支护形式相同,且在两基坑同步开挖的前提下,绘制出间距为 1H~8H 的相邻基坑围护墙后,坑间土堤地表的理想预测沉降曲线如图 2 所示.为了对图 2 的预测曲线进行验证,采用岩土工程有限元软件 Z-Soil. PC 建立二维固渗耦合有限元模型,对不同间距下相邻基坑的变形性状进行分析.

1.2 相邻基坑模型概况

首先建立 1 个独立基坑开挖的数值模型,并在此基础上分别建立间距为 1H~8H(H 为基坑开挖

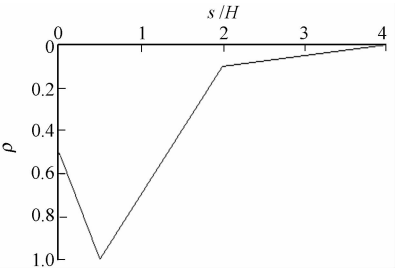


图 1 基坑围护桩(墙)后地表沉降曲线
Fig. 1 Curve of surface settlement behind wall

深度)的相邻基坑的数值模型. 基坑开挖深度均为 6 m, 基坑的宽度均为 60 m, 采用直径 1 m, 间距 1.5 m 的排桩支护. 根据基坑之间的间距不同, 坑间土堤的宽度为 6~48 m. 相邻基坑开挖边线距离模型边界为 40 m, 约为 6 倍基坑开挖深度; 模型厚度为 34 m, 约为 5 倍基坑开挖深度, 根据经验, 可基本消除边界的影响. 模型两边的垂直边界限制模型边界的水平位移为 0, 并设定水力边界条件, 地下水位为地表下 1 m; 模型底部同时设置水平和竖位移为 0. 其中, 间距为 $4H$ 的相邻基坑的模型, 如图 3 所示.

1.3 计算工况

计算工况设计为两个基坑同时降水开挖, 采用 Biot 固结理论进行固渗耦合分析. 1) 工况 0, 计算初始地应力场,

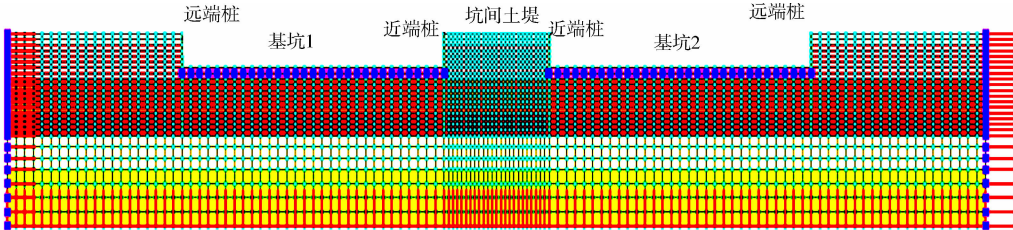


图 3 间距为 $4H$ 相邻基坑数值模型

Fig. 3 Numerical model of adjacent pit of space $4H$

并将位移清零; 2) 工况 1, 同时施工两个基坑的排桩; 3) 工况 2, 将两个基坑的坑内地下水降至坑底 1 m; 4) 工况 3, 两个基坑开挖到底.

1.4 单元本构及计算参数

排桩采用线弹性的梁单元模拟, 桩土间的接触采用接触单元模拟, 降水引起的基坑内地下水位降低采用渗流单元模拟, 土体采用连续体单元, 选用软件内置的小应变硬化土模型 (HSS 模型) 进行模拟. HSS 模型是由 HS 模型扩展而来的^[8-13], 在描述土体的剪切应变、压缩应变、小应变等方面具有优势.

在文献[14]数值模型参数室内试验的基础上, 结合《工程地质手册》^[15] 以及 Z-Soil 内置的 HSS 模型参数估算程序, 确定出土体的材料力学参数, 如表 1 所示. 表 1 中: h 为土层层厚; γ 为重度; e_0 为孔隙率; c 为粘聚力; φ 为内摩擦角; E_{ur}^{ref} 为卸载再加载模量; E_0^{ref} 为初始模量; E_{50}^{ref} 为割线模量; H 和 M 均为硬化参数.

表 1 土体的材料力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of soil

序号	土层	h/m	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	e_0	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	E_{ur}^{ref}/MPa	E_0^{ref}/GPa	E_{50}^{ref}/GPa	H	M
1	填土	2	17.2	0.80	10	15	30.0	0.150 0	6.0	16 368	0.91
2	软土	6	16.3	1.50	8	10	22.5	0.112 5	4.5	7 420	0.73
3	粘土	6	17.5	0.85	24	15	50.0	0.250 0	10.0	22 629	0.87
4	细砂	4	18.0	1.00	3	28	95.0	0.475 0	19.0	25 538	1.26
5	强风化岩	6	19.2	0.42	30	30	500.0	2.500 0	100.0	199 708	1.33
6	中风化岩	10	20.0	0.40	40	40	1 000.0	5.000 0	200.0	265 079	2.30

2 结果与讨论

2.1 相邻基坑土体变形分析

间距为 $4H$ 的相邻基坑同时开挖后, 其水平和竖向位移云图如图 4 所示. 从图 4 可知: 土体的水平位移和竖向位移均以坑间土堤中线为中心左右对称; 基坑外两侧土体及坑间土堤土体均表现为沉降, 坑底土体表现为隆起. 坑间土堤的变形同时受“基坑 1”和“基坑 2”的影响, 土体沉降和外侧坑边土体完全

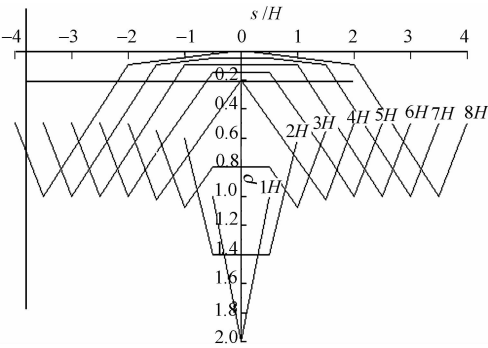


图 2 相邻基坑间土堤地表沉降预测曲线

Fig. 2 Prediction curve of embankment's surface settlement in adjacent pit

不同,坑间土堤土体的水平位移也比外侧坑边土体的水平位移小.

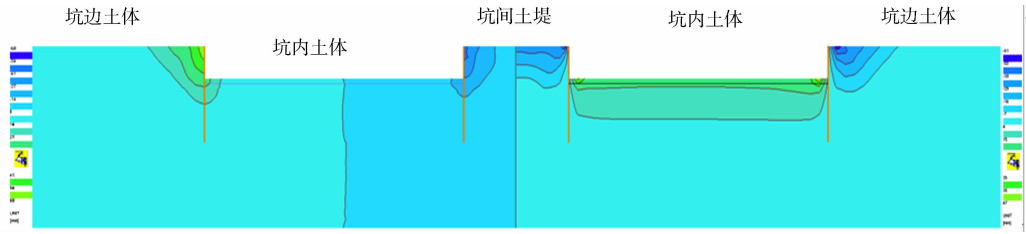


图 4 相邻基坑水平(左)与竖向(右)位移云图(4H)

Fig. 4 Horizontal (left) and vertical displacement (right) displacement contours of adjacent pit (4H)

2.2 相邻基坑沉降影响范围分析

从模拟结果中提取独立基坑及不同基坑间距下坑间土堤的地表沉降曲线,如图 5 所示.从图 5 可知:独立基坑开挖时,地表沉降曲线和图 1 给出的统计曲线基本吻合.相邻基坑开挖时,坑间土堤的沉降曲线以土堤中线为中心左右对称,基坑间距为 $1H, 2H$ 时,土堤沉降较大;基坑间距为 $3H$ 时,坑间土堤沉降较均匀,土堤大部分沉降约为最大沉降值的 0.8 倍;基坑间距为 $4H$ 时,坑间土堤沉降较均匀,大部分沉降值为最大沉降值的 0.6 倍;基坑间距为 $5H \sim 8H$ 时,坑间土堤最大沉降与独立基坑开挖的最大沉降值相等;土堤中线处沉降最小.

从图 5 可知:坑间土堤沉降最大处均出现在距离坑边约 $0.5H$ 范围内,这和单基坑模拟开挖的规律相符;当基坑间距大于 $4H$ 时,坑间土堤中段的沉降曲线几乎表现为上凸的抛物线;当基坑间距小于等于 $4H$ 时,坑间土堤中段的沉降曲线几乎为直线,说明沉降比较均匀.通过图 2 与图 5 对比可知:预测沉降曲线和计算沉降曲线差异较大.总体表现为预测值比模拟值大,基坑间距大于 $4H$ 的土堤沉降曲线相似,基坑间距为小于 $4H$ 的土堤沉降曲线差异大.这可能有如下 2 个主要原因.

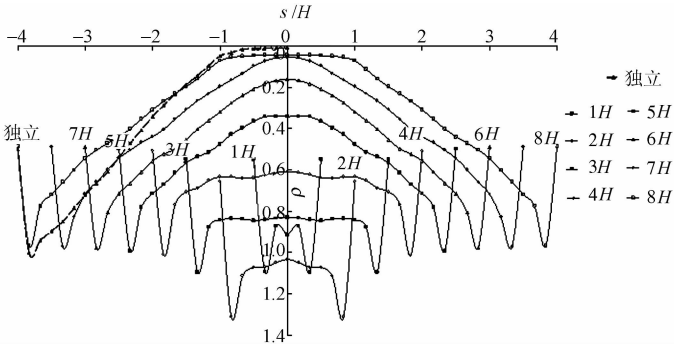


图 5 相邻基坑坑间土堤地表沉降计算曲线
Fig. 5 Calculation curve of embankment surface settlement in adjacent pit

1) 图 1 所示的沉降曲线为统计曲线,仅表示支护墙后土体沉降的总体趋势;图 2 的沉降预测曲线是在图 1 的基础上按照不同间距对土体沉降进行简单叠加.基坑变形受水文地质条件及周边环境的影响大,致使二者的沉降曲线产生明显差异.

2) 当相邻基坑距离较近时,坑间土堤的土体宽度有限,基坑支护结构所受到的主动土压力为有限土压力;而图 2 的沉降预测曲线是按照坑间土堤的主动土压力为经典土压力得出的.

2.3 基坑间距对支护桩的影响分析

为了进一步分析相邻基坑的影响范围,对图 3 所示“基坑 1”近端桩和远端桩进行受力和变形分析.提取出不同间距下桩所受的主动土压力分布图及桩的弯矩图,如图 6 所示.从图 6 可知:主动土压力的分布形态不同,远端桩的土压力大于近端桩的土压力;近端桩 $4H, 6H$ 土压力分布接近,而近端桩 $2H$ 不同,表现出有限土压力的特征,与之对应 $2H$ 情况下桩身弯矩也小.

提取出不同间距下桩的悬臂段和嵌固段的最大弯矩及桩顶的最大水平位移,如表 2 所示.表 2 中: $M_{\max}^{\text{悬臂}}$, $M_{\max}^{\text{嵌固段}}$ 分别为悬臂段和嵌固段最大弯矩; Δ 为桩顶水平位移.

从表 2 可知,近端桩悬臂段的最大弯矩比远端桩略小,这与独立基坑不同.随着基坑间距的增大,近端桩悬臂段的弯矩几乎没有变化.近端桩的嵌固段的最大弯矩和桩顶水平位移均比远端桩小.随着基坑间距的增大,远端桩的弯矩和桩顶位移均无变化,表现出独立基坑的性状;当基坑间距小于等于 $4H$ 时,近端桩嵌固段的弯矩随着距离的增大而增大,桩顶位移也随着距离的增大而增大;当基坑间距大于 $4H$ 时,近端桩嵌固段的弯矩随间距的变化极小,桩顶位移也几乎没有变化.

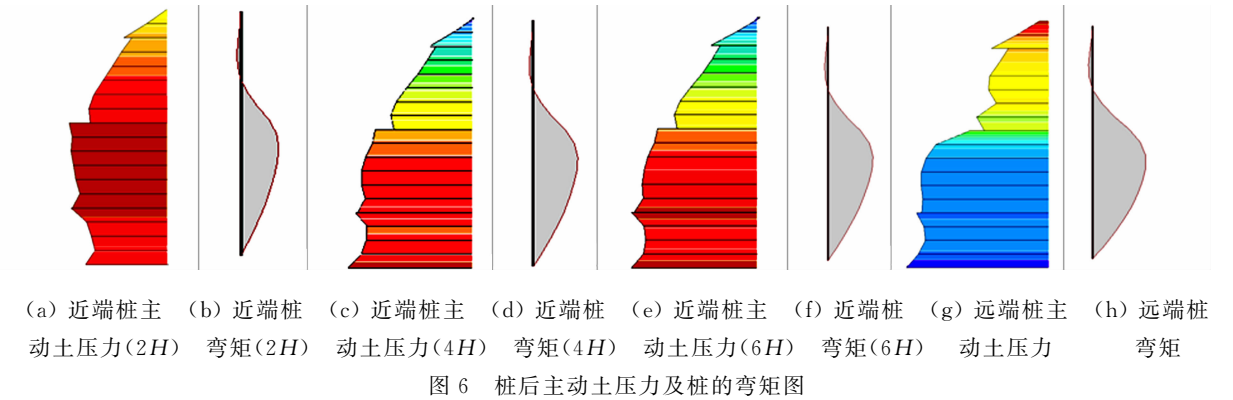


图 6 桩后主动土压力及桩的弯矩图

Fig. 6 Active soil pressure and the bending moment diagram of the piles

表 2 桩的最大弯矩值与桩顶水平位移值

Tab. 2 Maximum bending moment of piles and the horizontal displacement of pile top

参数	位置	基坑间距							
		1H	2H	3H	4H	5H	6H	7H	8H
$M_{\text{悬臂}}^{\text{max}}/\text{kN}$	远端桩	63	63	63	63	63	63	63	63
	近端桩	51	53	54	53	53	54	54	53
$M_{\text{嵌固段}}^{\text{max}}/\text{kN}$	远端桩	822	822	822	822	822	821	821	821
	近端桩	401	576	625	665	684	689	690	692
Δ/mm	远端桩	68	68	68	68	68	68	68	68
	近端桩	24	43	48	52	53	54	54	54

经归一化处理后,近端桩与远端桩在不同间距下的弯矩比和桩顶水平位移比,如图 7 所示.从图 7 可知:悬臂段的最大弯矩比接近于 1,嵌固段的最大弯矩比与桩顶水平位移比均小于 1,且二者变化趋势几乎相同,并随着基坑间距的增大,两个比值的增幅趋缓.

从表 2 及图 7 均可以看出:当基坑间距小于等于 $4H$ 时,近端桩嵌固段的弯矩及桩顶水平位移变化较大;当基坑间距大于 $4H$ 时,近端桩嵌固段的弯矩及桩顶水平位移变化均很小;悬臂段的弯矩则在整个过程相对稳定,说明基坑间距变化对其影响不大.

相邻基坑间距小于等于 $4H$ 时,相邻基坑对支护结构的内力和变形产生明显的相互影响,近端桩的内力和变形可按有限土压力理论进行分析,可减小桩身直径和配筋;而当间距大于 $4H$ 时,相邻基坑的相互影响较弱,近端桩的内力变形分析可按独立基坑处理.

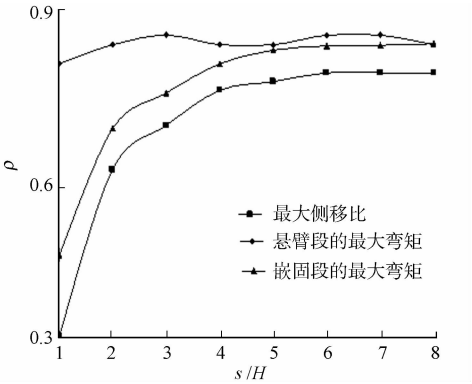


图 7 近端桩与远端桩的对比图

Fig. 7 Comparison between near pile and remote pile

3 结论

通过对不同间距下两个相邻基坑同步开挖的数值模拟,以及对坑间土堤地表沉降曲线的分析和对支护桩的弯矩和水平位移的对比分析,得出了如下 3 点结论.

- 1) 近端桩悬臂段的弯矩均比远端桩大,二者均不随着坑间距变化.近端桩嵌固段弯矩及桩顶水平位移均比远端桩小,且随着基坑间距的增大而增大,但二者随着基坑间距的增大,增幅均减小.
- 2) 相邻基坑间距小于等于 $4H$ 时,坑间土堤需考虑相邻基坑施工引起的共同沉降.进行支护结构受力分析及配筋时,可考虑采用有限土压力理论计算,减小桩径及配筋.相邻基坑间距大于 $4H$ 时,坑间土堤变形接近独立基坑,对支护结构的内力及变形影响较小.
- 3) 相邻基坑间距小于等于 $4H$ 时,相邻基坑的相互影响较强,可定义为强相互影响基坑;而间距大于 $4H$ 时,相邻基坑的相互影响较弱,可定义为弱相互影响基坑.

参考文献:

- [1] 钱七虎,陈晓强. 城市化发展呼吁积极和科学开发利用城市地下空间[J]. 科技导报, 2010, 28(10): 3.
- [2] 赵永光,耿进柱,赵兴波. 群坑开挖耦合效应及其对周边环境影响的数值分析[J]. 建筑施工, 2009, 31(3): 177-180.
- [3] 郑晏华. 上海外滩通道综合改造工程中群坑施工的综合组织策划与环境保护[J]. 建筑施工, 2010, 32(12): 1185-1186.
- [4] 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: 12-13.
- [5] 王显星. 开挖卸载对相邻基坑围护结构内力的影响[J]. 铁道建筑技术, 2005(2): 46-49.
- [6] 陈书申,詹素华. 开挖深度悬殊的相邻基坑的支护结构稳定分析[J]. 福建建筑高等专科学校学报, 2002, 4(2): 63-65.
- [7] HSIEH Pio-go, OU Chang-yu. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 35: 1004-1017.
- [8] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNINER P G. The hardening soil model; Formulation and verifacation[C]// Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Rotterdam: [s. n.], 1999: 281-297.
- [9] VERMEER P A. Double hardening model for sand[J]. Geotechnique, 1978, 28(4): 413-433.
- [10] OHDE J. Zur theorie der druckverteilung im baugrund[J]. Der Bauingenieur, 1939, 20: 451-459.
- [11] JANBU N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial test[C]// Proceedings of the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wiesbaden: [s. n.], 1963: 19-25.
- [12] BENZ T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006: 75-91.
- [13] MATSUOKA H, NAKAI T. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses[J]. Japan Society of Civil Engineers, 1974, 232: 59-70.
- [14] 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]. 泉州: 华侨大学, 2013: 40-43.
- [15] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 159-160.

Numerical Analysis on Interaction of Adjacent Foundation Pits under Different Space

GUO Li-qun, CHENG Yu-guo, CHEN Ya-jun

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Hardening soil model with small strain stiffness (HSS) soil constitutive model was used to establish the finite element model for synchronously excavated adjacent foundation pits spacing 1 to 8 times of the excavation depth of foundation pits. Considering the solid-infiltration coupling, the influence of spacing on the settlement curve of embankment between adjacent foundation pits, the bending moment and the displacement of the supporting piles were analyzed. The analysis results show that: when the spacing is less than or equal to 4 times of the excavation depth of foundation pits, the interaction is strong, the settlement caused by the construction of adjacent foundation pits should be considered, the force and deformation of the supporting structure would be analyzed by the finite earth pressure theory, the size of pile and reinforcement ratio would be reduced. When the spacing is greater than 4 times of the excavation depth of foundation pits, the interaction is weak. The deformation of the embankment between adjacent foundation pits is similar to independent pit. The impact to the deformation and stress is also weak.

Keywords: foundation pits; hardening soil model with small strain stiffness; soil constitutive model; excavation depth; supporting structure; numerical analysis

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)