

DOI: 10.11779/CJGE2021S2031

# 上海地区相邻基坑同步开挖影响分析与实践

戴斌<sup>1,2</sup>, 胡耘<sup>1,2</sup>, 王惠生<sup>1,2</sup>

(1. 华东建筑设计研究院有限公司上海地下空间与工程设计研究院, 上海 200011; 2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心, 上海 200011)

**摘要:** 现代城市地下空间的开发模式由空间独立、功能单一正在向区域连通的综合开发模式转变, 基坑工程在深度、面积增大的同时, 也越来越多呈现区域性集中开发的特点。受诸多条件限制, 很多大型项目通常采用分期分块实施, 形成基坑群工程。基坑群中, 相邻基坑同步开挖会大大节省工期, 且两侧基坑同步开挖卸载有利于围护体变形控制, 但需要在两基坑间设置一定宽度的留土(缓冲区)。采用数值模拟方法, 以背景工程为基础模型, 研究上海典型软土地区不同缓冲区宽度条件下, 围护墙后土压力分布规律, 提出了相邻基坑同步开挖合理的缓冲区宽度取值范围。同时结合工程实例, 对施工超载对相邻基坑同步开挖的影响情况进行了分析。

**关键词:** 相邻基坑; 同步开挖; 有限主动土压力

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0129-04

作者简介: 戴斌(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 现任华东建筑设计研究院有限公司上海地下空间与工程设计研究院副院长。E-mail: bin\_dai@arcplus.com.cn。

## Analysis and practice of influence of synchronous excavation of adjacent foundation pits in Shanghai area

DAI Bin<sup>1,2</sup>, HU Yun<sup>1,2</sup>, WANG Hui-sheng<sup>1,2</sup>

(1. Arcplus Group PLC, Shanghai 200011, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** The development mode of underground space in modern cities is changing from independent space and single function to a comprehensive one of regional connectivity. The depth and area of foundation pits increase, showing the characteristics of regional centralized development. Due to many conditions, many large-scale projects are usually implemented in phases and blocks. After setting up soil (buffer) between them, the adjacent foundation pits can be excavated simultaneously. The synchronous excavation will greatly save the construction period and facilitate the deformation control of the enclosure. Numerical simulation methods are mainly used, and the background engineering is used as the basic model to analyze the force and deformation trends of the enclosure with different buffer widths. On this basis, a reasonable buffer width range for the synchronous excavation of the adjacent foundation pits in Shanghai area is proposed. At the same time, combined with engineering examples, the influence of construction overload on the simultaneous excavation of adjacent foundation pits is analyzed.

**Key words:** adjacent foundation pit; synchronous excavation; active earth pressure

## 1 引言

### 1.1 研究背景

随着城市土地资源稀缺日益加剧, 城市用地尤其是核心区域的土地日益缺乏, 现代城市地下空间的开发模式由空间独立、功能单一向区域连通的综合开发模式转变。受基坑安全、环境保护、不同建筑单体进度差异、施工场地布置等影响, 往往采用分期分块实施, 带来大量的基坑群工程。

与常规单一基坑相比, 基坑群工程建设周期长、体量大、同步或先后实施基坑间的相互作用关系错综

复杂。本文结合上海地区实际工程, 以相邻的两个基坑作为研究单元, 着重对相邻基坑开挖带来的设计、施工问题展开研究。相邻基坑如需同步开挖, 需在两基坑邻近的围护体间设置一定宽度的留土起缓冲作用, 为便于描述, 下文将两个基坑围护体之间的区域称为缓冲区。理论上缓冲区宽度足够大后, 可以忽略了相邻基坑相互之间的影响, 但缓冲区宽度过大会造成建筑面积减小或分区增多, 引起造价或工程的增加。

基金项目: 上海市青年科技启明星计划(18QB1400300)

收稿日期: 2021-08-18

同时受场地范围等施工条件的局限, 不适当的施工超载也会对基坑安全性造成影响。故合理的缓冲区宽度和相关施工措施与基坑造价、工期和安全密切相关。

## 1.2 背景工程概况

背景工程地处上海黄浦区外滩区域, 基地中部被一条市政道路穿越, 分为南区和北区两个基坑同步实施, 南区基坑面积约 2.2 万  $m^2$ , 北区基坑面积约 1.7 万  $m^2$ , 两区基坑挖深均为 20.4 m, 两基坑间受地下室边线等限制, 缓冲区宽度约 26 m。

场地土层属上海正常地层分布区, 土层多黏性、粉性土和砂土。支护结构采用 1 m 厚地下连续墙结合坑内竖向 5 道钢筋混凝土水平支撑, 典型支护和土层剖面如图 1 所示。

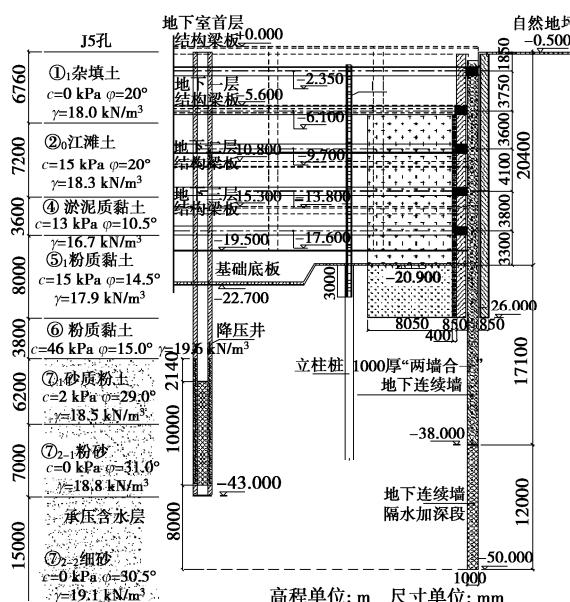


图 1 背景工程典型剖面

Fig. 1 Typical section of engineering example

## 2 相邻基坑同步开挖带来的工程问题

### 2.1 有限土压力计算

当前国内普遍采用的基坑设计计算方法均针对单个基坑的, 坑外通常按半无限土体考虑, 但相邻基坑间缓冲区宽度通常不会太宽, 此时再将坑外作为半无限土体考虑支护结构的受力变形与实际存在差异。

前人采用极限平衡法的滑楔体受力平衡原理<sup>[2-3]</sup>, 推导了很多有限土压力计算公式, 但精度受假设条件的限制, 且较难得到精确的土压力分布形式。另有学者<sup>[4]</sup>利用楔体土条的薄层微分单元的受力平衡, 求解得到更准确的有限土体土压力分布情况, 但该种方法通常没有考虑围护结构对土压力分布的影响。

有限元法不仅可以模拟复杂的工程环境还可以直观地反映基坑受力变形情况, 故后文主要采用有限元

法对相关问题进行研究。

### 2.2 缓冲区宽度的影响

相邻基坑同步开挖, 中部缓冲区留土向两侧均有变形, 模型简图如图 2 所示, 假定基坑 I 与基坑 II 挖深分别为  $H_1$ 、 $H_2$ , 两个滑动楔体滑裂角  $\theta$  相等, 把  $B = (H_1 + H_2) / \tan \theta$  定义为相邻基坑缓冲区土条临界宽度  $B_{cr}$ , 当  $B$  ( $B = B_1 + B_2$ )  $< B_{cr}$  时, 相邻基坑同步开挖到一定深度时, 常规土压力理论计算的土体滑裂面会交叉干扰, 这时缓冲区土条对围护结构的主动土压力计算, 需按照有限主动土压力考虑。项目的主体建筑结构方案确认后, 则基坑的挖深  $H$ 、土层的重度  $\gamma$ 、内摩擦角  $\phi$ 、黏聚力  $c$  和桩墙与土间摩擦角  $\delta$  均为定值, 邻近基坑间缓冲区土条宽度成为有限土条土压力分布的主要控制因素。

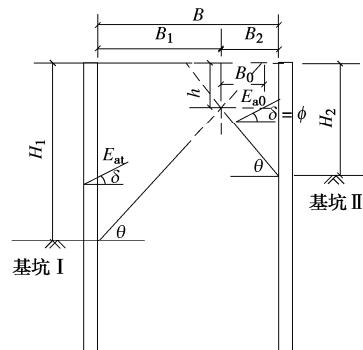


图 2 相邻基坑同步开挖模型

Fig. 2 Synchronous excavation model for adjacent foundation pits

## 3 不同缓冲区宽度的有限元模型分析

### 3.1 分析模型

为了方便比较不同缓冲区宽度的同步开挖基坑围护体上的土压力分布和变形规律, 采用有限元软件 Plaxis, 根据背景工程情况, 建立了相邻两基坑同步开挖的二维有限元计算模型 (图 3)。

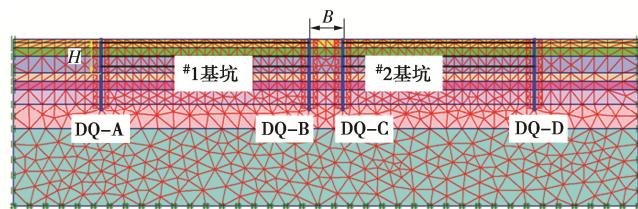


图 3 相邻基坑同步开挖分析模型

Fig. 3 Analysis model for synchronous excavation of adjacent foundation pits

两基坑挖深均为 20.5 m, 缓冲区宽度分别取  $B=0.2H$ ,  $0.4H$ ,  $0.6H$ ,  $0.8H$ ,  $H$ ,  $1.2H$ ,  $1.4H$ ,  $1.6H$ ,  $2H$ , 对不同缓冲区宽度下的围护体受力变形开展计算分析。由于模型的对称性, 选取图 3 中#2 基坑的围护墙进行变形分析, 其中 DQ-C 为靠近缓冲区的内侧围

护体, DQ-D 为远离缓冲区的外侧围护体。模型土层的  $\gamma$ 、 $\varphi$  和  $c$  取值参照实际地勘, 其余参数取值参考上海地区 HS 模型的取值经验<sup>[5]</sup>, 详见表 1。

表 1 模型参数汇总表

Table 1 Physical parameters of model soils

土层 编号	$E_{50}/\text{MPa}$	$E_{oed}/\text{MPa}$	$E_{ur}/\text{MPa}$	$m$	$r_{0.7}/10^{-4}$	$R_{\text{inter}}$
①1	8.4	4.2	42	0.8	1	0.75
②	14.0	7.0	70	0.8	1	0.75
④	5.2	2.6	26	0.8	1	0.75
⑤1	8.6	4.3	43	0.8	1	0.75
⑥	14.0	7.0	70	0.8	1	0.75
⑦1	20.2	10.1	101	0.8	1	0.75
⑦2	25.6	12.8	102	0.8	1	0.75

### 3.2 结果分析

图 4 为有限元模型和薄层单元法公式<sup>[4]</sup>计算的不同缓冲区宽度条件下, 围护墙后土压力分布与朗肯主动土压力的对比曲线, 因篇幅有限, 故只列出  $B/H$  比为 0.4 和 1.4 的对比曲线。

相邻基坑同步开挖, 当开挖深度较浅时, 缓冲区土条滑裂面没有受到交叉干扰, 故可按半无限土压力考虑, 故图 4 中所示的三种计算方法在浅层的土压力分布和大小基本一致。随着深度增加, 经验公式和有限元计算结果均小于相应深度处的朗肯土压力, 也验证了上文对有限土压力分布趋势的相关规律总结。有限元模型计算的围护体所受土压力小于经验公式, 这主要是因为薄层单元法仅考虑了支护桩与土的摩擦性质, 并未考虑支撑对围护体土压力分布造成的影响。

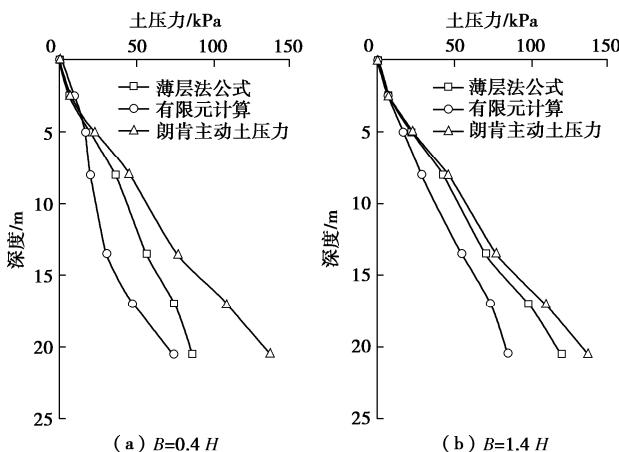


图 4 不同缓冲区宽度, 缓冲区侧围护体土压力分布

Fig. 4 Different buffer widths and distribution of earth pressure on side enclosure of buffer zone

图 5 为不同缓冲区宽度模型, 基坑开挖至基底时, 内外侧围护体的最大位移和最大弯矩曲线图。从图 5 可以看出, 相邻基坑同步开挖, 缓冲区宽度对于基坑内侧围护体的受力变形影响作用更强。当缓冲区宽度较小时, 内侧围护体的变形和最大弯矩均显著小于外侧围护体, 例如  $B/H=0.2$  时, 内侧围护体最大变形量

仅为 11 mm, 内外侧围护最大变形量差值为 51 mm, 围护体弯矩差值约 1950 kN·m/m。当  $0.2 < B/H < 1.4$ , 随着缓冲区宽度的变化, 内侧围护体的变形和弯矩响应明显, 均随缓冲区宽度增大而显著增大; 外侧围护体的变形和弯矩响应不明显, 变形随缓冲宽度增大略有减小, 弯矩变化相对不明显; 当  $B/H=1.4$  时, 内外侧围护体最大变形差值仅为 5 mm; 当  $B/H > 1.4$ , 内外侧围护体的受力变形增量较小, 且逐渐趋于一致。

对比水平位移和弯矩, 当  $B/H > 1.4$  时, 缓冲区两侧围护体变形差异逐渐不明显; 而对于弯矩来说, 当  $B/H > 1.0$  时, 两者差异逐渐不明显。故可以根据实际工程是环境变形控制还是围护体受力控制的不同目标来选取缓冲区宽度。

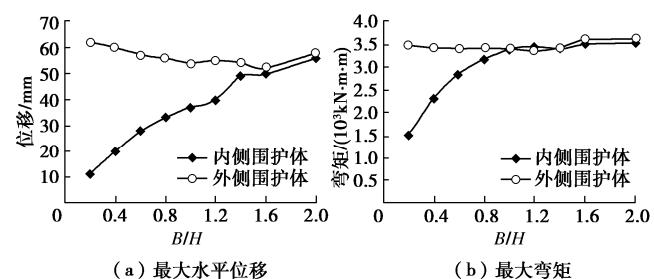


图 5 缓冲区宽度对内外侧围护体受力变形影响

Fig. 5 Influences of width of buffer zone on deformation of inner and outer enclosures

相邻基坑开挖缓冲区宽度小于临界值时, 土条滑裂面会互相干扰, 缓冲区侧围护上的所受土压力为有限主动土压力, 外侧围护体外为半无限土体, 土体滑裂面不受边界限制, 导致内外侧围护体受力失衡, 故缓冲区一侧围护体变形会小于外侧围护体,  $B/H$  越小, 内侧围护体受力越不平衡, 内外侧围护体变形量差值越大。

### 4 施工超载对相邻基坑同步开挖影响

背景工程基坑缓冲区宽度与挖深比  $B/H=1.3$ , 根据前文经验, 缓冲区侧围护体所受土压力为有限土压力, 理论上缓冲区内侧围护体变形会小于外侧围护体, 而实际上, 南北两区基坑开挖至基底时的内侧围护体的最大变形均大于外侧围护体, 与上文的理论分析不符。

根据现场情况推测, 缓冲区在施工阶段作为临时停车场和材料堆场是出现这种情况的主要的原因, 缓冲区土体有着较大施工超载, 因此导致内侧围护体变形较大。

在前文分析的基础上, 对背景工程考虑缓冲区与外侧超载的差异, 新建立两个模型, 分析缓冲区超载对于基坑围护体变形的影响趋势。模型一考虑缓冲区

和外围地面均正常布置 20 kPa 超载, 模型二考虑缓冲区作用超载 30 kPa, 外侧地面作用常规社会车辆荷载 5 kPa。图 6 为基坑开挖至基底时两个模型的围护体变形曲线, 模型一的内侧地墙最大变形约为外侧地墙的 0.76 (图 6 (a)); 考虑了缓冲区超载的模型二, 内侧地墙最大变形约为外侧地墙的 1.27 倍 (图 6 (b)), 虽然有限元模型计算的地墙变形小于实测数据, 这主要是因为有限元模型并未考虑水压力影响, 但有限元模型计算的内外侧地墙变形趋势规律与背景工程实测数据基本相符。说明背景工程缓冲区内侧围护体变形大于外侧围护体, 与缓冲区顶部频繁作用施工超载有关。

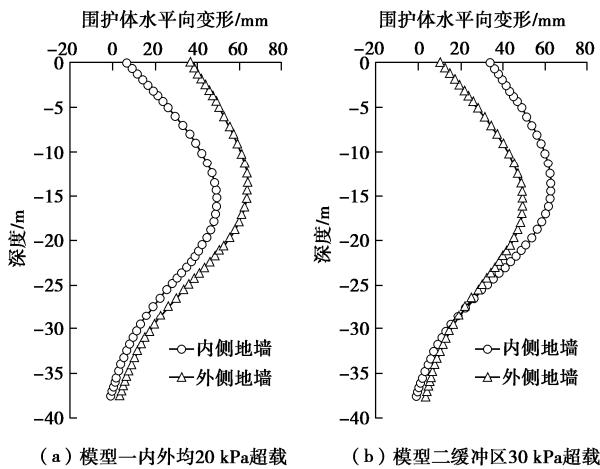


图 6 开挖至基底围护体的侧向位移

Fig. 6 Lateral displacements of enclosure after excavation to base

结合当前城市基坑群工程的实际项目情况, 通常基坑周边环境保护对象众多, 基坑边线紧邻地块红线, 中部缓冲区常作为该项目施工过程中的主要施工道路或材料堆场, 频繁作用施工荷载, 而外侧施工超载反而较小, 而且大部分设置缓冲区的工程均会类似利用该区域作为主要施工重载道路。因此在要同步开挖的相邻基坑的设计施工过程中, 除了合理设置缓冲区宽度, 还要充分考虑缓冲区施工超载的影响。

## 5 结 论

(1) 基坑群工程中, 相邻基坑间设置缓冲区是实现两个基坑的同步开挖的前提, 且两侧同步开挖卸载有利于围护体变形控制。缓冲区土条的土压力计算较为复杂, 受基坑开挖深度、缓冲区宽度、场地地质条件及地面荷载等条件影响。

(2) 缓冲区宽度与基坑挖深的比值  $B/H$  是基坑内侧和外侧围护体受力变形的首要影响因素, 根据文

中对背景工程的相关分析, 当  $B/H < 0.7$  时, 基坑缓冲区侧围护体所受土压力为有限主动土压力, 不可以按照传统土压力计算方法计算土压力, 需对其进行折减计算。因此上海软土地区类似工程中, 当缓冲区宽度  $B = (1.3 \sim 1.5) H$  时基坑受力变形可以得到较好的控制又不会造成太多的浪费。

(3) 在相邻基坑同步开挖的设计和施工阶段, 结合实际情况选择恰当的缓冲区宽度, 并充分考虑缓冲区超载对基坑的影响, 布置重载车道等合理措施, 可以有效控制基坑变形, 实现相邻基坑顺利同步开挖。

## 参 考 文 献:

- [1] 陈萍, 王卫东, 丁建峰. 相邻超大深基坑同步开挖的设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 555 - 558. (CHEN Ping, WANG Wei-dong, DING Jian-feng. Design and application of synchronous construction of two neighboring deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 555 - 558. (in Chinese))
- [2] 马平, 秦四清, 钱海涛. 有限土体主动土压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 3070 - 3074. (MA Ping, QIN Si-qing, QIAN Hai-tao. Calculation of active earth pressure for limited soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3070 - 3074. (in Chinese))
- [3] 金亚兵, 刘吉波. 相邻基坑土条土压力计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3759 - 3764. (JIN Ya-bing, LIU Ji-bo. Discussion on calculation method of earth pressure of earth-strip between neighbouring excavations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3759 - 3764. (in Chinese))
- [4] 岳树桥, 左人宇, 陆钊. 相邻基坑有限宽度土条主动土压力的计算[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2063 - 2069. (YUE Shu-qiao, ZUO Ren-yu, LU Zhao. A method for calculating active earth pressure of soil piece with a finite width between adjacent foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2063 - 2069. (in Chinese))
- [5] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283 - 2290. (WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283 - 2290. (in Chinese))

(编校: 明经平)