

临江基坑变形及受力性状三维数值分析

丁勇春¹, 程泽坤¹, 王建华², 李耀良³, 袁芬³

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240;
3. 上海市基础工程有限公司, 上海 200002)

摘要: 邻近江河深基坑由于受地下水渗流及潮位变化的影响, 相关的设计与计算方法更加复杂。采用 FLAC3D 对某紧邻黄浦江的狭长形超长深基坑进行三维数值模拟, 探讨基坑分区开挖、坑内地基加固、坑外潮位变化等施工条件对基坑变形及受力的影响, 并与实测数据进行对比分析。结果表明, 计算模型能够较好地预测不同施工条件下基坑的变形性状; 平均潮位下基坑支护结构处于对称平衡受力状态, 对维持基坑的整体稳定有利; 不同分区间间的封堵墙对基坑长边围护墙侧向变形的控制效果不明显; 潮位对临江侧基坑围护墙侧向变形的影响较大, 低潮位时墙顶会向坑外变形, 并影响第1道支撑的受力, 潮位变化较大的临江深基坑第1道支撑应采用与墙体整体现浇的钢筋混凝土支撑。

关键词: 基坑; FLAC3D; 数值模拟; 分区开挖; 地基加固; 潮位

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0243-05

作者简介: 丁勇春(1979-), 男, 江苏大丰人, 博士, 高级工程师, 主要从事基坑工程及港口岩土工程的设计与研究工作。E-mail: yeding@163.com。

Three-dimensional numerical analysis of deformation and mechanical behavior of deep excavations adjacent to river

DING Yong-chun¹, CHENG Ze-kun¹, WANG Jian-hua², LI Yao-liang³, YUAN Fen³

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: A three-dimensional numerical simulation based on FLAC3D is carried out to investigate the deformation and mechanical behavior of a deep excavation project adjacent to Huangpu River in Shanghai soft soil deposits, in which the impacts of zoned excavation, installation of partition wall, inside spaced strip and peripheral ground reclamation, and variation of outside tide level are considered and the comparison with in-situ monitoring data is conducted. The predicted lateral displacement of the retaining wall agrees well with the monitored value, consequently, the reliability of the numerical model is verified. The study shows that it is advantageous to the global stability of the retaining and propping structures with symmetric loading condition under the mean tidal level. The effect of the partition wall on deformation control of the retaining wall is not distinct; nevertheless, the influence of variation of tidal level on the lateral displacement of the top of the retaining wall is conspicuous, resulting in change of compression and tension state of the first level strut. Therefore, cast-in-place reinforced concrete beam is recommended for the first level strut to ensure effective connection between the strut and the retaining wall.

Key words: excavation; FLAC3D; numerical simulation; zoned excavation; ground reclamation; tidal level

0 引言

自20世纪90年代以来, 浦江两岸开发成为上海城市建设的新主题之一, 随之出现了众多的沿浦江两岸开发的大型项目。但受城市土地资源条件的限制, 项目开发的重点转向了地面以下^[1], 这些地下空间开发项目的共同特点是紧贴防汛墙、依江而建、环境条件复杂。黄浦江潮汐变化会使基坑支护结构处于动态的不对称受力状态, 场地潜水水位与江水存在直接水力联系。因而这类临江基坑的地下水渗流控制、稳定

与变形控制是基坑工程设计与施工的难题, 处理稍有不慎极有可能带来灾难性后果^[2], 甚至引起严重的城市地质灾害, 导致巨大的经济损失并产生恶劣的社会影响。

本文结合上海十六铺地区综合改造工程(一期)水上综合体临江狭长形超大基坑工程, 采用三维数值

基金项目: 国家自然科学基金项目(50679041); 上海市科学技术委员会项目(08201200903)

收稿日期: 2012-08-24

方法^[3-4]研究基坑在分区开挖、坑内地基加固、临江侧潮位变化等条件下支护结构的变形与受力性状,为相关工程的设计与施工提供参考。

1 工程简介

1.1 工程概况

上海十六铺地区综合改造工程(一期)位于黄浦区东门路轮渡站至新开河路延长线(与现外滩观光平台及防汛墙相接)之间的中山东二路东侧,工程场地东临黄浦江,并紧贴既有防汛墙。工程场地平面布置由北至南呈狭长形,沿黄浦江西岸全场长约612 m,其中陆域A~D区为综合空间及商业用房,为地下三层建筑物,主体结构地下室采用大底板桩基础,桩基采用钻孔灌注桩,地下室楼板和顶板采用钢筋混凝土梁板体系。非临江侧地下连续墙既作为基坑围护又作为地下室外墙(两墙合一),临江侧地下连续墙既作为基坑围护又作为地下室外墙和防汛墙(三墙合一)。

整个基坑采用水泥土搅拌桩封堵墙分割为5个分区,由北向南依次为A1-6区、A~D区。A1-6区位于规划越江隧道之上,开挖深度仅3.5 m,采用型钢水泥土搅拌桩(SMW工法)作为围护墙,设1道Ø609 mm×12 mm钢支撑(局部角撑为混凝土支撑)。A~D区基坑开挖深度均为13.45 m,采用800 mm厚地下连续墙作为基坑围护墙,设3道现浇钢筋混凝土支撑,支撑中心深度分别为-1.3 m、-6.1 m和-10.1 m。基坑平面及周边环境如图1所示。

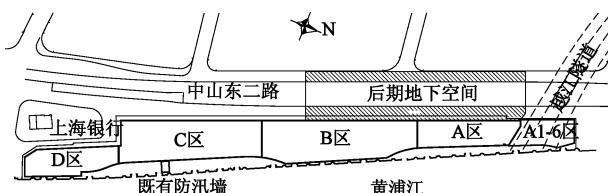


图1 基坑平面及周边环境

Fig. 1 Plan view of excavation and surroundings

考虑施工进度及场地条件的限制,首先进行A区土方的开挖及支护,然后由北向南依次开挖各区,施工流程为:A区→B区→C区→D区。沿基坑内侧设置高压旋喷桩配合双液注浆的贴边坑底加固,加固平面布置形式采用裙边配以少量抽条,加固范围为坑底以下4 m,加固宽度约5~6 m,同时每区设置1到2条4 m厚坑底抽条对撑加固体,坑内局部落深处采用双液注浆加固。

1.2 地质条件

本场地属滨海平原地貌类型,位于黄浦江段,为河床地貌。场地东部为水域,其岸线较直,但岸坡较

陡。场地陆域地势平坦,地面标高一般约为3.5~4.1 m。

场地陆域杂填土普遍较厚,且局部范围内尚有原十六铺客运码头建筑旧基础未清除。按土的沉积年代、成因类型及物理力学特性,自上而下共划分为7个主要土层:①杂填土、②0江滩土、④淤泥质黏土、⑤1粉质黏土、⑥粉质黏土、⑦1砂质粉土夹粉砂及⑦2粉细砂。各土层物理力学性质指标如表1所示。

表1 土层物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil strata

层号	厚度/m	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$E_{s0.1-0.2}$ /MPa	c/kPa	φ (°)	λ	κ
①	3.96	18.0	3.00	10	12	0.08	0.008
②0	7.25	19.1	7.50	7	28	0.11	0.011
④	7.25	17.2	2.28	15	12.5	0.14	0.014
⑤1	5.70	18.2	4.28	15	17.5	0.12	0.012
⑥	4.40	19.6	6.95	47	15	0.08	0.008
⑦1	7.70	19.1	11.56	8	33	0.07	0.007
⑦2	—	19.3	14.38	8	35	0.05	0.005

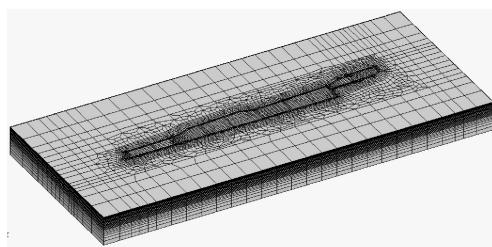
场地潜水水位一般位于地面以下0.5~0.7 m。在距黄浦江约10 m范围内,潜水水位与黄浦江水位有较密切的水力联系,潜水水位受黄浦江涨落潮影响较大,而在距黄浦江约18 m范围外,潜水水位与黄浦江水位联系不明显,水位较稳定。

根据邻近场地的黄埔公园水文站资料,其历史最高潮位5.72 m,历史最低潮位0.24 m,多年平均高潮位3.14 m,多年平均低潮位1.29 m,多年平均潮位2.22 m。

2 基坑开挖模拟

2.1 计算模型及参数

A1-6区开挖深度仅为3.5 m,模型中未考虑。模型考虑了A~D共4个分区的施工,基坑开挖深度均为13.45 m。基坑平面为狭长形非规则布置,基坑最大长度为547.5 m,最大宽度为48.5 m,考虑基坑开挖对土体的扰动和开挖的影响范围,三维模型尺寸取为810 m×350 m×60 m。模型上边界为自由边界,底部全约束,各侧面限制法向位移。计算模型网格如图2所示,实体单元数为14.4万,结构单元数为2.8万。



(a) 实体单元

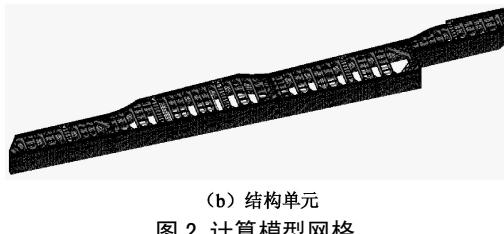


图 2 计算模型网格
(b) 结构单元

Fig. 2 Mesh of numerical model

土体和坑内加固体采用实体单元模拟, 基坑围护墙采用可考虑与土体脱开与滑移效应的衬砌结构单元模拟, 坑内 3 道水平支撑采用梁结构单元模拟, 施工栈台和基础底板采用壳结构单元模拟, 计算采用岩土工程有限差分程序 FLAC3D。

围护墙与混凝土支撑强度等级均为 C30, 考虑施工因素对混凝土强度的影响, 弹性模量取为 24 GPa, 泊松比取为 0.2, 重度取为 25 kN/m³。土体本构模型采用能够反映加载与卸载模量差异、反映土体静水压力屈服及应变硬化特性的修正剑桥模型, 并根据编写能够反映土体先期固结压力影响的修正剑桥模型子程序进行土体参数赋值^[4], 参数根据表 1 进行取用, 各土层均假定处于正常固结状态。不考虑地下水渗流的影响, 坑内水位每步开挖前降至开挖面以下 1 m, 坑外水位采用相应设计水位及潮位。坑内加固体本构模型采用莫尔-库仑模型^[5], 弹性模量取为 200 MPa, 泊松比取为 0.25, 重度取为 20 kN/m³, 黏聚力取为 0.2 MPa, 内摩擦角取为 25°。

2.2 计算工况

基坑由北向南分区开挖, 每区又分为 4 步, 每区主要计算步骤如表 2 所示。土体开挖采用“空单元”模拟, 结构单元的分步支护采用“单元钝化及激活”模拟。开挖计算遵循“先变位、后支撑”的原则, 即每步在开挖至相应支撑底面时, 基坑围护墙变位已经发生, 每道支撑在下一步开挖前激活并发挥其支撑刚度。

表 2 基坑施工主要计算步

Table 2 Main calculation steps of excavation construction

计算步	施工工况
0	考虑围护墙及地基加固的初始地应力平衡 (计算后位移清零)
1	降水并开挖至第 1 道支撑底面, 施工第 1 道支撑
2	降水并开挖至第 2 道支撑底面, 施工第 2 道支撑
3	降水并开挖至第 3 道支撑底面, 施工第 3 道支撑
4	降水并开挖至坑底, 浇筑基础底板

3 计算结果及讨论

3.1 基坑变形及支撑轴力

基坑开挖至坑底垂直于基坑长边方向 (y 向) 围护墙整体侧向位移如图 3 所示。临江侧围护墙最大侧向位移为 33.9 mm, 邻马路侧围护墙最大侧向位移为 34.1 mm, 基坑两侧长边围护墙的最大侧向位移差异较小, 表明基坑基本处于对称受力状态。从基坑整体稳定性考虑, 对称受力对于维持基坑支护结构的整体稳定是有利的。



图 3 围护墙侧向位移云图

Fig. 3 Lateral displacement contours of retaining wall

不同工况下 B 区基坑临江侧长边中点围护墙侧向位移计算值与实测值对比如图 4 所示。基坑开挖至坑底后围护墙最大侧向位移计算值为 31.5 mm, 最大侧向位移实测值为 28.2 mm。不同开挖阶段围护墙侧向位移计算值与实测值基本一致, 围护墙沿深度方向的整体变形形态也基本相近, 表明建立的三维整体计算模型能够较好地预测基坑围护墙变形性状。

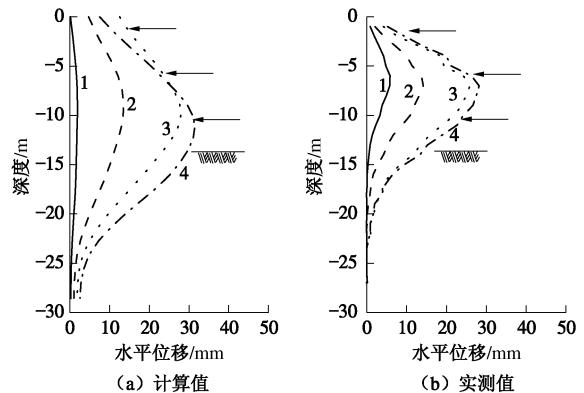


图 4 围护墙侧向位移曲线

Fig. 4 Lateral displacement curves of retaining wall

考虑分区封堵墙时 B 区基坑临江侧长边中点围护墙最大侧向位移为 31.5 mm, 不考虑封堵墙时最大侧向位移为 35.9 mm (图 5), 考虑封堵墙的刚度支撑作用使该断面围护墙最大侧向位移减小 12.3%。有学者将封堵墙称为地中壁 (Cross Wall) 工法^[6], 封堵墙的作用机理类似于基坑拐角处相互垂直的围护墙所具有的刚度强化效应。但地中壁工法必须满足一定的间距要求, 地中壁间距越小, 其发挥的刚度强化效应越显著。根据研究^[7], 基坑围护墙刚度强化效应有效距离一般为 15 m, 超过此距离封堵墙对基坑围护墙侧向变形的控制效果不明显。本工程采用 3 道封堵墙将整个

狭长形超长基坑分割为A~D共4个独立分区，3道封堵墙间距分别为174 m和156 m，已经远远超出有效距离，因此其主要作用是降低工程风险和方便分区施工，而不是依靠封堵墙来控制基坑变形。

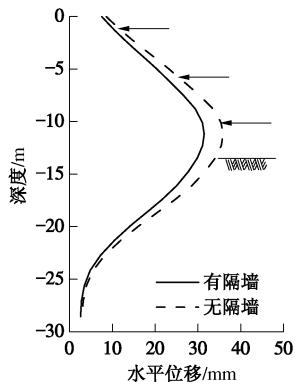


图5 隔墙对围护墙侧向位移的影响

Fig. 5 Influence of partition wall on lateral displacement of retaining wall

基坑开挖至坑底3道水平支撑(ZC1、ZC2及ZC3)最大压力分别为4308, 7115, 3000 kN。第1道支撑B区和C区支撑轴力明显大于A区和D区支撑轴力；3道支撑中第2道支撑承受的压力最大，但支撑各杆件轴力分布较为均匀；第3道支撑A区和D区支撑轴力明显大于B区和C区支撑轴力。

3.2 坑底加固对基坑变形及支撑轴力的影响

坑底加固前后基坑开挖至坑底各区基坑临江侧长边中点围护墙侧向位移对比如图6所示。以B区为例，加固前围护墙最大侧向位移为41.5 mm，加固后围护墙最大侧向位移减小至31.5 mm，加固后最大变形降低24.1%。可见，本工程采用的坑内裙边加固结合抽条加固对控制基坑围护墙变形是有效的。

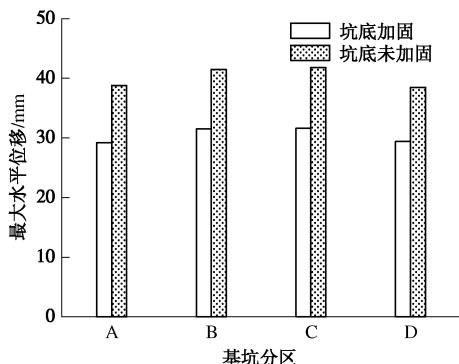


图6 坑底加固对围护墙侧向位移的影响

Fig. 6 Influence of ground reclamation on lateral displacement of retaining wall

坑底加固前后基坑开挖至坑底3道支撑最大轴力对比如图7所示。总体规律是由于坑底加固为基坑围护墙提供了“先行地中梁”，减小了基坑降水及开挖引起的卸荷变形，从而降低了支撑轴力。坑底加固后，

第3道支撑轴力减小35.3%，第2道支撑轴力减小17.6%，第1道支撑轴力仅减小1.0%。坑底加固对支撑轴力的影响可以从二者的位置关系进行分析，支撑距加固体越近，坑底加固对支撑轴力的影响越大。

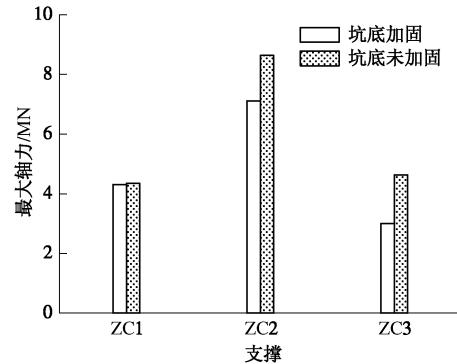


图7 坑底加固对支撑轴力的影响

Fig. 7 Influence of ground reclamation on axial force of strut

3.3 潮位对基坑变形及支撑轴力的影响

基坑开挖至坑底不同潮位条件下B区基坑临江侧和邻马路侧长边中点围护墙侧向位移曲线对比如图8所示。不同潮位两侧围护墙的整体侧向位移形态相似，但墙顶位移差异较大。高潮位、平均潮位及低潮位时临江侧围护墙最大侧向位移分别为35.3, 31.5, 24.1 mm，墙顶侧向位移分别为7.9, 7.5, -7.8 mm（负值表示向坑外变形）。而不同潮位邻马路侧围护墙最大侧向位移几乎没有变化，墙顶侧向位移分别为0.7, 7.7, 14.1 mm。

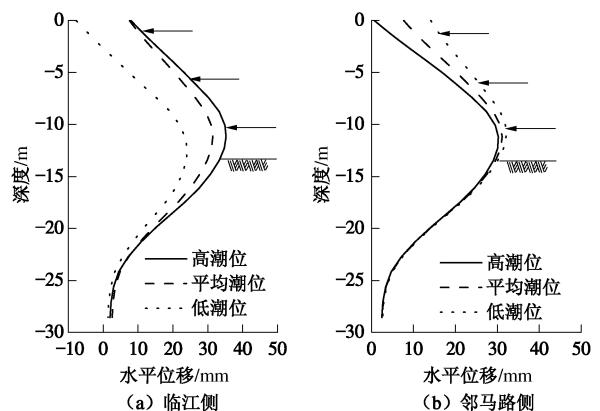


图8 潮位对围护墙侧向位移的影响

Fig. 8 Influence of tide on lateral displacement of retaining wall

随着潮位的下降，临江侧围护墙墙顶侧向位移不断减小，并逐步向坑外（江侧）变形，而邻马路侧围护墙墙顶在不同潮位下均向坑内变形，变形随潮位的下降而增大。墙顶侧向位移变化规律表明，临江侧潮位的下降导致了基坑围护结构的不平衡受力，其作用效果类似于在基坑围护墙上增加了向江侧的侧向推力，但墙底受周围土体嵌固作用的约束，几乎不受潮位影响，而墙顶受潮位变化的影响较大。

基坑临江侧潮位由高潮位变化至低潮位时，第1

道支撑可能从受压状态变成受拉状态, 此时第1道支撑如采用钢支撑, 则支撑与墙体连接部分可能发生滑脱, 引起支撑失效产生灾难性后果。因此, 对于紧邻江河的超大超长规模深基坑, 从维持基坑整体稳定考虑, 不应采用与围护墙连接性差的钢支撑, 而应采用与围护墙整体连接性能更好刚度更大的钢筋混凝土支撑。

4 结语

本文通过对临江狭长形超长深基坑进行数值模拟, 探讨了基坑分区开挖、坑内地基加固、坑外潮位变化等施工条件对基坑支护结构变形及受力的影响, 得到了以下3点结论。

(1)计算模型能够较好地预测不同施工条件及工况下基坑的变形及受力性态, 3道中间封堵墙对整个基坑围护墙侧向变形的控制效果并不明显, 其主要作用是降低工程风险和方便基坑的分区施工, 而不是依赖封堵墙来控制基坑变形。

(2)坑内地基加固可使基坑围护墙最大侧向变形降低24.1%, 坑内裙边加固结合抽条加固对基坑的变形控制是有效的。加固体与支撑的相对位置关系对支撑轴力的影响较大, 支撑距加固体越近, 支撑轴力的降低幅度越大。

(3)潮位变化对临江侧基坑围护墙侧向变形的影响较大, 同时也改变了围护墙墙顶侧向变形形态, 而潮位变化对邻马路侧围护墙侧向变形的影响较小。低潮位时临江侧围护墙墙顶会向坑外(江侧)变形, 从而使第1道支撑可能从受压状态变成受拉状态, 第1道支撑应采用连接性能更好刚度更大的钢筋混凝土支撑。

限于笔者水平及外部条件限制, 本文仅对邻近江河超大规模深基坑的变形与受力性状进行了初步的分析与探讨, 下阶段将结合相关工程进行更深入的分析研究。

参考文献:

- [1] 张铭. 紧挨浦江防汛墙的超大型深基坑施工[J]. 建筑施工, 2008, 28(8): 575 - 577. (ZHANG Ming. Construction of super large deep foundation pit close to flood protection wall of Huangpu River[J]. Building Construction, 2006, 28(8): 575 - 577. (in Chinese))
- [2] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Go-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [3] DING Y C, WANG J H. Numerical modeling of ground response during diaphragm wall construction[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2008, 13(4): 1 - 6.
- [4] 丁勇春, 王建华, 徐斌. 基于FLAC3D的基坑开挖与支护三维数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 976 - 800. (DING Yong-chun, WANG Jian-hua, XU bin. Three-dimensional numerical analysis of braced excavation based on FLAC3D[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(6): 976 - 800. (in Chinese))
- [5] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. Ground improvement manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [6] 欧章煜, 谢百钩. 深开挖邻产保护之探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊): 509 - 517. (OU Chang-yu, HSIEH pio-go. Building protection measures in deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S0): 509 - 517. (in Chinese))
- [7] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (DING Yong-chun. Excavation-induced deformation and control in soft deposits[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)