

DOI: 10.11779/CJGE2017S2039

基础托换对基坑周边建筑物变形控制作用的 三维有限元分析

李 靖^{1, 2}, 徐中华^{1, 2}, 王卫东^{1, 2}

(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 200002; 2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心, 上海 200002)

摘要: 鼎鼎外滩深基坑工程紧邻上海市历史保护建筑, 由于基坑挖深很大且建筑物距离基坑很近, 采用锚杆静压桩基础托换技术对邻近的浅基础保护建筑进行了加固处理。采用 Plaxis3D 软件建立基坑及邻近建筑物的三维有限元模型, 土体采用 HS-small 小应变本构模型, 对基坑开挖过程进行了模拟。数值分析及与实测数据的对比表明: 基于 HS-small 本构模型的三维有限元分析能较好地模拟基坑的变形和对邻近建筑物的影响, 基础托换能够显著减小基坑开挖对周边浅基础建筑物的影响。

关键词: 基坑工程; 基础托换; 变形控制; 三维有限元模拟; HS-small 模型

中图分类号: TU476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)S2-0157-05

作者简介: 李 靖, 男, 辽宁锦州人, 硕士, 从事基坑工程研究。E-mail: jing_li4@arcplus.com.cn。

Three-dimensional finite element analysis of effects of foundation underpinning on deformation control of existing buildings adjacent to a deep excavation

LI Jing^{1, 2}, XU Zhong-hua^{1, 2}, WANG Wei-dong^{1, 2}

(1. Shanghai Underground Space Engineering Design & Research Institute, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd.,
Shanghai 200002, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations,
Shanghai 200002, China)

Abstract: The excavation of Dingding Bund is adjacent to an existing heritage architecture. As the pit is as deep as 20 m and the heritage architecture is only about 3 m away from the excavation, foundation underpinning is adopted in order to minimize the influences of the excavation on the buildings. To investigate the effects of foundation underpinning on the deformation control of the existing buildings, a series of three-dimensional finite element analyses are carried out by using Plaxis 3D. The soils are modeled by using the HS-small model. By comparing the field monitoring and numerical results, it is shown that the three-dimensional finite element analyses based on the HS-small model can give fairly reasonable predictions of the excavation deformations and the settlements of the adjacent building. The foundation underpinning can effectively reduce the settlements of the additional building induced by the adjacent excavation.

Key words: excavation; foundation underpinning; deformation control; 3D FEM; HS-small model

0 引言

当基坑与邻近建筑距离过小时, 基坑开挖易造成既有建筑产生较大的沉降变形, 从而使上部结构开裂损坏而影响正常使用。托换法^[1]是为了降低邻近地下工程建设对既有建筑物的影响或解决既有建筑物改建、增层和纠偏, 在既有建筑物下方进行的基础增强和替换的技术。该方法虽然施工难度大、费用高, 但提高既有建筑物抵抗变形的能力效果显著, 目前在保护基坑周边建筑物方面已有一些成功案例^[2~3]。托换前, 采用有关方法分析建筑物基础托换对变形控制的作用, 对于指导托换设计具有重要作用。由于问题的

复杂性, 有限元方法成为设计过程中一种不可或缺的分析手段^[4]。但目前采用有限元方法分析基础托换对基坑周边建筑物变形控制作用的研究还较少, 基础托换的设计分析方法还是值得深入研究的课题。

本文结合上海鼎鼎外滩基坑工程, 采用有限元软件 Plaxis3D 并基于小应变土体本构模型分析了基坑开挖过程对邻近建筑物变形的影响。针对邻近历史保护建筑分别按原有浅基础形式和实际托换后的桩基础形式建模, 从而对比分析基础托换对控制邻近建筑沉降

基金项目: 上海市浦江人才计划项目 (15P51433500)

收稿日期: 2017-08-02

变形的效果，并与实测结果进行了对比。

1 工程简介

1.1 工程概况

上海鼎鼎外滩项目位于上海市中心繁华地段（图1），基坑面积约 20000 m^2 ，开挖深度20 m。基坑东北角为上海工业基金会大楼，建于1906年，是上海市优秀历史保护建筑，西侧距离基坑约3 m，南侧距离基坑约7 m。该大楼由三部分组成，其中北楼和东楼均为5层砖混结构，采用柱下独立基础和墙下条形基础；南楼为4层框架结构，采用筏板基础。北楼和东楼整体性较差，抗不均匀沉降能力差，南楼整体性稍好，抵抗不均匀沉降能力较强。

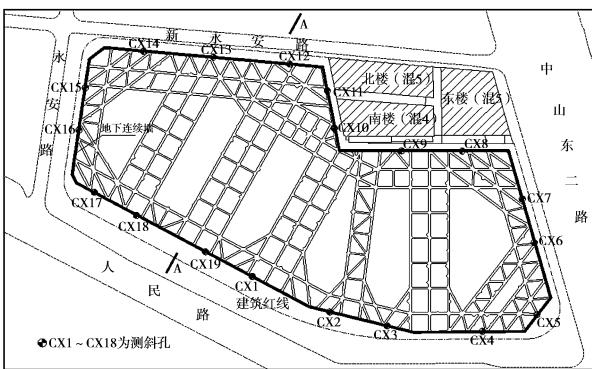


图1 基坑平面布置图

Fig. 1 Plane view of foundation pit

1.2 工程地质概况

场地处于长江三角洲滨海平原。基坑挖深范围内土层主要为软塑—流塑黏性土（土层层序详见图2），含水量和压缩性均较大，力学性质相对较差。场地潜水主要补给来源为大气降水，水位埋深一般为0.3~1.5 m。⑦层粉性土、砂土层和⑨层粉砂层为承压含水层，其水位埋深一般为3.0~11.0 m。

1.3 基坑支护方案

基坑采用顺作法方案，周边围护结构采用两墙合一地下连续墙，普遍区域厚1.0 m，东北角邻近保护建筑侧厚1.2 m。基坑竖向设置5道钢筋混凝土支撑（平面布置如图1），基坑围护剖面如图2所示。

1.4 邻近工业基金会大楼基础托换

基坑开挖前对大楼基础进行了托换加固。首先在底板上开凿压桩孔并埋设锚杆，然后分段压入φ219 mm×7钢管，待到达设计深度时，向钢管内充填C20砼，随压随灌，压桩结束后桩孔采用C35微膨胀砼封桩，并设置桩帽梁。大楼共打入263根30 m长的锚杆静压桩，桩尖进入⑤₃层（图2）。

2 基坑对基础托换建筑物影响的三维有限元模拟

2.1 三维有限元模型

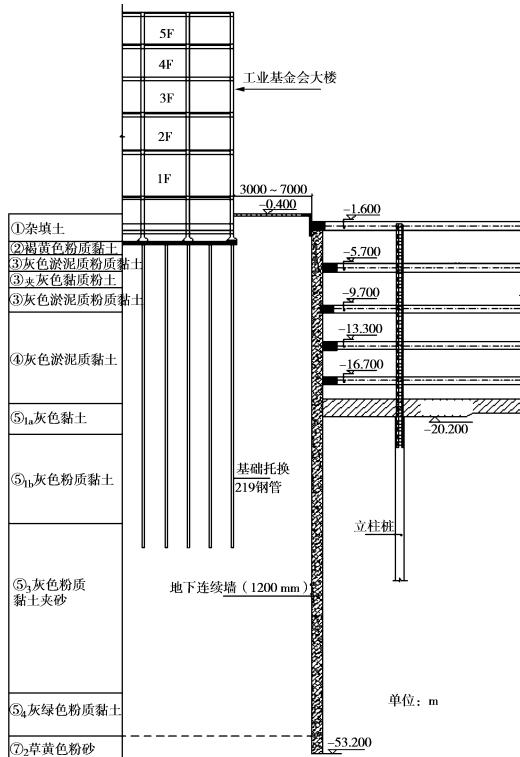


图2 支护结构剖面图

Fig. 2 Profile of supporting system

为分析基础托换在基坑开挖过程中对于邻近建筑的保护作用，采用Plaxis3D有限元软件对采用锚杆静压桩基础托换后的基坑开挖进行模拟。计算模型如图3所示，模型包括了土体、围护结构、水平支撑、邻近工业基金会大楼结构。模型侧边约束水平位移，底部同时约束水平和竖向位移。土体采用10节点楔形实体单元模拟，地下连续墙、保护建筑的楼板、墙体和基础采用6节点三角形板单元模拟，水平支撑、保护建筑的结构梁和柱采用3节点梁单元模拟。托换后的桩基用Embedded-pile桩单元模拟。根据房屋检测结果，该建筑混凝土达到C20等级，砖砌体达到MU7.5等级，各结构单元采用弹性模型模拟，材料属性如表1所示，各材料泊松比均取0.2。

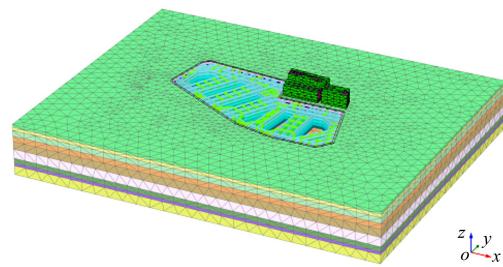


图3 三维有限元计算模型图

Fig. 3 Three-dimensional FEM model

2.2 土体本构模型的选择及计算参数

Clayton等^[5]、Whittle等^[6]的研究表明能考虑土体

小应变特性的模型在预测基坑及周边土体变形规律的研究中具有重要作用, 因此本文土体采用能考虑土体小应变特性的HS-Small模型^[7]进行分析。HS-small模型不仅继承了HS模型可以同时考虑剪切硬化和压缩硬化的特点而且可以考虑剪切模量在微小应变范围内随应变衰减的行为。王卫东等^[8]通过室内土工试验和基于工程实测数据的反演分析, 得到了上海典型土层HS-Small模型全套参数的确定方法。本工程土体参数(表2)即采用该方法确定。

表 1 单元材料属性表

Table 1 Information of material properties

结构构件	材料	弹性模量/MPa
基坑	地下连续墙	C30砼
	支撑	C35砼
邻近保 护建筑	楼板、柱、底板	C20砼
	墙体	MU7.5砖砌体
桩	MU7.5砖砌体	3000
	C20砼	25500

2.3 模拟工况

通过有限元软件“单元生死”功能模拟地下连续墙施工、土体的分层开挖以及各道支撑的施工过程。具体工况如下: Stage0, 初始地应力场计算; Stage1, 施工围护结构, 开挖至-2.1 m标高; Stage2, 施工第一道支撑, 开挖至-6.2 m; Stage3, 施工第二道支撑, 开挖至-10.2 m; Stage4, 施工第三道支撑, 开挖至-13.8 m; Stage5, 施工第四道支撑, 开挖至-17.2 m; Stage6, 施工第五道支撑, 开挖至基底。

3 计算结果分析及与实测数据对比

3.1 基坑周边土体变形

图4为开挖至基底阶段基坑及周围土体竖向变形云图。周边土体单元最大沉降约为91.8 mm, 与开挖深度的比值为0.46%, 最大变形发生在距坑边0.6倍开挖深度的位置。基坑对周围环境的影响范围约为3倍的基坑开挖深度。受空间效应的影响, 基坑长边方向的影响范围要明显大于短边方向。

3.2 围护结构变形

图5为地下连续墙各测斜孔实测变形和计算结果

的对比曲线(测斜孔的布置见图1)。可以看出, 各工况下各测孔的实测数据与计算结果均能很好的吻合, 实测最大侧移为102.1 mm, 与开挖深度的比值为0.51%。说明采用基于HS-small模型的三维有限元分析能够较好地分析和预测围护结构变形。

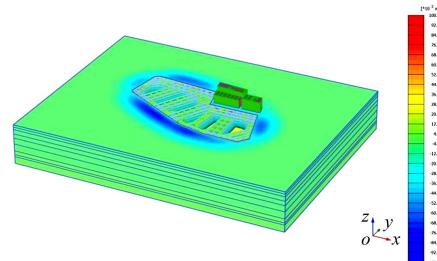


图 4 最终工况下基坑竖向变形云图

Fig. 4 Vertical deformations of foundation pit at final stage

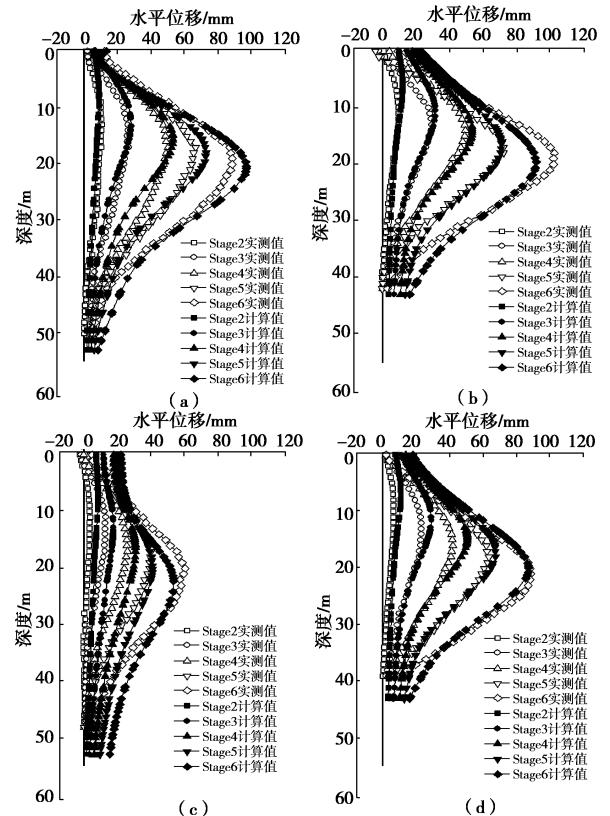


图 5 地下连续墙各阶段水平变形计算结果与实测数据

Fig. 5 Calculated and measured lateral displacements of diaphragm walls at each stage

表 2 土层参数信息表

Table 2 Parameters of soils

土层	重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	G_0^{ref} /MPa	c' /kPa	φ' ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	$\gamma_{0.7}$	v_{ur}	p^{ref} /kPa	m	R_f
②粉质黏土	18.2	3.4	4.1	23.7	94.8	6	28.3	0	2×10^{-4}	0.2	100	0.8	0.9
③淤泥质粉质黏土	17.5	2.8	3.4	19.8	79.1	0	26	0	2×10^{-4}	0.2	100	0.8	0.6
④淤泥质黏土	16.8	1.9	2.2	13	52.2	3	23.3	0	2×10^{-4}	0.2	100	0.8	0.6
⑤ _{1a} 黏土	17.5	3.1	3.7	21.4	85.7	5	21	0	2×10^{-4}	0.2	100	0.8	0.9
⑤ _{1b} 粉质黏土	18	4	4.8	28	111.9	6	28.7	0	2×10^{-4}	0.2	100	0.8	0.9
⑤ ₃ 黏土	18.1	4.9	5.9	34.6	138.3	5	30.5	0	2×10^{-4}	0.2	100	0.8	0.9
⑤ ₄ 粉质黏土	19.6	6.9	8.3	48.5	194	21	35.1	0	2×10^{-4}	0.2	100	0.8	0.9
⑦ ₁ 黏质粉土	19.2	10.5	10.5	42	209.8	7	33	3	2×10^{-4}	0.2	100	0.5	0.9

3.3 邻近保护建筑沉降

图6是工业基金会大楼基础沉降云图。沉降呈现出自西南侧向东北侧不断减小的趋势，沉降变形与到基坑的距离成反比，计算最大沉降为49.9 mm，远离基坑的北侧沉降较小，最小沉降为14.2 mm。

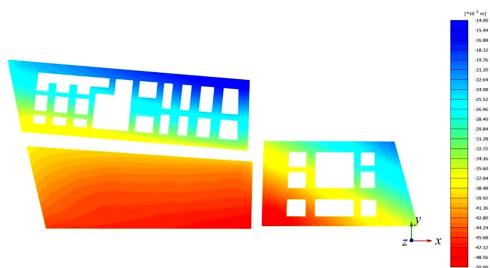


图6 计算得到的最终工况下工业基金会大楼基础沉降云图

Fig. 6 Calculated settlements of buildings at final stage

图7为基坑开挖至基底工况下工业基金大楼靠近基坑侧的沉降计算结果与实测数据的对比曲线，两条曲线能够较好地吻合。建筑物南侧基坑边长约约为西侧的两倍，受基坑空间效应影响，建筑物南侧最大沉降实测值（55 mm）也比西侧最大沉降值（49 mm）大。总体而言，基于HS-small模型的三维有限元分析能够较好地分析邻近建筑物的变形。

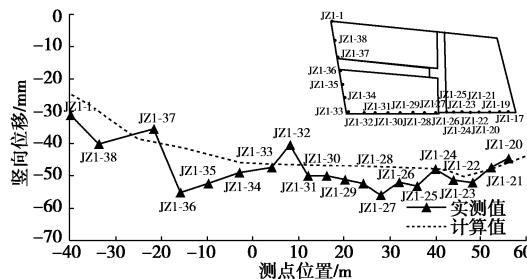


图7 开挖至基底工况下工业基金大楼沉降曲线

Fig. 7 Settlements at south side of buildings at final stage

4 基础托换对邻近建筑沉降影响分析

为深入研究基础托换对减小邻近建筑沉降的作用，本小节针对邻近工业基金会大楼按照原有的浅基础形式进行建模计算。计算结果表明，最大沉降发生在东楼的西南角位置，最大沉降为87.1 mm。托换和未托换沉降对比结果如表3所示，北楼和东楼由于原有基础为柱下独立基础及墙下条形基础，整体性较差，抵抗不均匀沉降能力弱，托换后沉降减小更明显，最大沉降量分别减小47.9%和42.7%。南楼为筏板基础，整体性相对较好，抵抗不均匀沉降能力较强，托换后沉降变化相对较小，最大沉降量减小38.8%。说明采用基础托换能显著减小因基坑开挖引起的邻近建筑物

沉降。

表3 沉降计算结果对比表

Table 3 Comparison of foundation settlement

位置	原有浅基础最大沉降 计算结果/mm	托换后最大沉降 计算结果/mm	沉降减小 百分比/%
A 区北楼	74.8	39.0	47.9
B 区东楼	87.1	49.9	42.7
C 区南楼	79.1	48.4	38.8

5 结 论

鼎鼎外滩基坑工程开挖深度20 m，工程紧邻上海市优秀历史保护建筑，基坑开挖前采用锚杆静压桩对保护建筑基础进行了托换加固。本文采用大型岩土工程有限元软件Plaxis 3D建立三维有限元模型，分析了基坑的变形及基础托换对于控制邻近建筑沉降变形的作用。主要结论如下：

(1) 采用三维有限元的分析方法能够反映空间效应对基坑变形的影响。基于HS-small土体本构模型的三维有限元分析结果和实测数据能够很好吻合，该方法能较好地预测基坑围护体的变形和邻近工业基金会大楼的沉降。

(2) 邻近三栋建筑分别按照原浅基础和实际托换后的桩基础建模分析，结果表明托换后基坑开挖完成时邻近三栋建筑沉降分别减小了47.9%、42.7%和38.8%，起到了很好的变形控制作用。基础托换能显著减小基坑开挖对周边浅基础建筑物影响。

参考文献：

- [1] CECS 295:2011 建(构)筑物托换技术规程[S]. 2011. (CECS 295:2011 Technical regulations for underpinning of buildings and structures[S]. 2011. (in Chinese))
- [2] 李欢秋, 吴祥云, 明治清, 等. 基坑附近楼房基础综合托换及边坡加固技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 153 - 156. (LI Huan-qiu, WU Xing-yun, MING Zhi-qing, et al. Combined reinforced technology for slope and building base near foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 153 - 156. (in Chinese))
- [3] 袁 健, 姜 峰, 蔡毅强, 等. 既有结构柱位于拟建建筑基坑内的托换施工技术[J]. 建筑施工, 2009, 31(3): 172 - 174. (YUANG Jian, JIANG Feng, CAI Yi-qiang, et al. Construction technology for foundation pit underpinned by existing structural columns[J]. Building Construction, 2009, 31(3): 172 - 174. (in Chinese))
- [4] 郑 刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 基坑开挖对临近桩基影响的

- 实测及有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 638 - 643. (ZHENG Gang, YAN Zhi-xiong, LEI Hua-yang, et al. Field observation and finite element numerical simulation analysis of effect on adjacent piles due to excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 638 - 643. (in Chinese))
- [5] CLAYTON C R I. Stiffness at small strain: Research and practice[J]. Géotechnique, 2011, 61(1): 5 - 37.
- [6] WHITTLE A J, HASHASH Y M A, WHITMAN R V. Analysis of deep excavation in Boston[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(1): 69 - 90.
- [7] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequence[D]. Stuttgart: Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, 2007.
- [8] 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]. 岩石力学, 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))

(本文责编 胡海霞)