

地下增层工程中既有结构变形控制技术研究

文颖文¹, 刘松玉¹, 胡明亮², 张国柱¹

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏建筑科学研究院有限公司, 江苏 南京 210096)

摘要: 既有建筑物地下室增设工程中, 施工会造成既有结构不均匀沉降、倾斜、甚至产生裂缝, 影响既有结构的安全和正常使用。针对中国工商银行某办公楼地下增层这一工程案例, 结合对既有建筑结构形式、现场周边环境、施工条件以及作业空间的调研, 提出了锚杆静压桩托换变形控制技术。为了确保在地下增层过程中既有建筑的安全性, 采用考虑桩-土-结构共同作用的分析方法, 对施工过程进行三维数值模拟分析, 确定合理的托换桩长和桩截面。现场监测结果表明, 施工过程中既有结构的沉降变形与计算结果吻合较好, 说明本工程的变形控制技术制定合理、施工措施得当, 结构处于安全范围之内。

关键词: 既有结构; 变形控制; 地下增层; 锚杆静压桩; 桩-土-结构共同作用; 数值模拟

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)10-1914-08

作者简介: 文颖文(1986-), 男, 江苏淮安人, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: wenyingwen1986@163.com。

Deformation control techniques for existing buildings during construction process of basement

WEN Ying-wen¹, LIU Song-yu¹, HU Ming-liang², ZHANG Guo-zhu¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Research Institute of Building Science Co., Ltd., Nanjing 210096, China)

Abstract: During the construction process of basement beneath the existing buildings, no matter what kind of construction method is applied, it is inevitable to induce the subsidence, sloping and even crack of the existing buildings on the ground, and it will influence the safety and routine use of the existing buildings. With regard to the construction characteristics of basement beneath the office building project of China Industrial and Commercial Bank and based on the investigations into the existing building structures, surrounding environment, construction conditions and operating space, the static bolt-pile deformation control technique is proposed. In order to ensure the safety of the upper structures, and considering the pile-soil-structure interaction, a 3-D numerical analysis is conducted in order to determine the reasonable pile-length and pile-section. The monitoring results show that the settlement of the structures during the construction process is in good accordance with the calculated results. The deformation control technique is reasonable, the construction measures are appropriate, and the structures are in the range of allowable safety.

Key words: existing building; deformation control; basement construction; static bolt-pile; pile-soil-structure interaction; numerical simulation

0 引言

运用基础托换实现既有建筑地下室增设, 对既有建筑的地下空间进行二次开发, 是解决城市停车难的有效方法之一^[1-4]。然而, 既有建筑地下室增设工程, 大都处于高楼林立的市中心, 施工受到既有结构和周围环境的制约, 在施工过程中常出现意想不到的问题: 如: ①扰动土体, 造成地表沉降, 道路、管线开裂; ②上部既有结构不均匀沉降、倾斜、甚至产生裂缝; ③引起周围结构物的变形, 裂缝等。尤其是问题②,

成为制约既有建筑物增设地下空间在我国广泛应用的关键因素。

针对上述问题, 本文以中国工商银行某办公楼地下室增设工程为例, 考虑桩-土-结构相互作用^[5-7]影响, 运用数值模拟和现场监测, 开展地下增层工程中既有结构变形控制技术的研究, 并以期为类似工程的设计和施工提供参考。

1 工程概况

1.1 建筑结构概况

中国工商银行某办公楼地下空间开发利用项目为在原辅楼下增设一层地下室。该建筑建成于1997年,主楼27层,辅楼为3层框架结构(局部4层),建筑面积5360 m²,一层层高为3.6 m。辅楼原基础为柱下锥形钢筋混凝土独立基础,埋深在-2.2~ -3.5 m之间,基础厚度200~250 mm,基础底面积也有所不同。拟建地下室面积1800 m²,新增80个停车位,增设地下室部分示意图如图1所示。

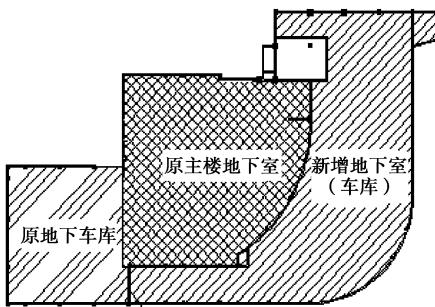


图1 地下室增设工程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basement construction

1.2 工程地质条件

场地勘探深度范围内所揭示的岩土层划分为4层,自上而下描述如下:①层为素填土,层厚1.4~2.9 m,主要为综合楼施工回填土,填土时间约为13年左右;②层为粉土,稍密—中密状态,层厚1.5~3.4 m,力学强度中等,地基承载力特征值 $f_{ak}=150$ kPa,静力触探比贯入阻力 $P_s=6.42$ MPa;③层为粉砂,中密—密实状态,层厚6.4~10.0 m,力学强度较高, $f_{ak}=180$ kPa, $P_s=10$ MPa;④层为黏土,勘测未揭穿该层,最大揭示厚度14.20 m,力学强度高, $f_{ak}=350$ kPa, $P_s=4.94$ MPa。地下水位在-1.5 m左右。场地各层土的物理力学性指标采用室内土工试验并结合现场原位测试方法确定,如表1所示。

2 地下增层工程既有结构变形控制技术

2.1 方案选定

本工程施工难点归纳起来主要有以下几点:首先,既有建筑物为框架结构,一楼建筑高度不足4 m,故既有结构托换施工作业空间有限,不适合大型机械施工;其次,③层粉砂为中密—密实状态,力学强度较高,会对托换桩沉桩造成很大困难,而且柱下独立基础较小较薄,沉桩将导致基础冲切破坏;再次,根据地质勘查报告和现场调查,发现地下水位较高,而周围建筑密集、地下管线众多,降水开挖势必会影响周围环境。

针对上述施工难点,考虑到既有建筑物、土层地质条件以及施工场地状况,经过综合比选,提出采用锚杆静压桩托换方案来控制既有结构的变形。

锚杆静压桩是锚杆和静力压桩结合形成的一种桩基施工工艺。它通过在基础上埋设锚杆固定压桩架,以既有结构的自重作为压桩反力,用千斤顶将桩段从基础中开凿的压桩孔内逐段压入土中,然后封桩帽将锚杆静压桩与既有结构基础连结在一起,从而达到控制上部结构沉降的目的。锚杆静压桩托换示意图如图2所示。工程实践表明,锚杆静压桩有明显的优点:①沉桩不需大型施工机械,施工不受空间限制;②相比人工挖孔桩,锚杆静压桩可直接沉桩,不需降水,对土体竖向位移和周围环境影响较小;③施工扰动小,无震动、无噪音、无污染,对既有结构、周围环境影响小。为了解决③层粉砂中无法沉桩的施工难题,采用引孔施工工艺;为了确保在沉桩过程中,既有结构基础不发生冲切破坏,采用植筋技术加固了既有结构独立基础。

实现地下增层后,由于场地地下水位较高,还需考虑既有结构的抗浮方案。地下室层高4 m,辅楼为3层框架结构,而作为办公楼的辅楼2,3层混凝土砌块隔墙较多,经过计算上部结构荷载能够抵抗浮力。而在施工完成后,地下室底板下尚有一定数量的锚杆静压桩,可提供抵抗浮力的安全储备。

2.2 具体施工技术

(1) 基坑变形控制方案

众所周知,地下连续墙对土体水平变形的控制效果最好。然而,数值计算结果表明^[8-9],对比厚0.8 m地下连续墙和Φ1 m@1.2 m钻孔灌注桩两种基坑围护方案,地下连续墙成槽引起的土体最大侧向变形为钻孔

表1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil strata

土层名称	层号	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	孔隙比	含水率/%
人工填土	1	17.1	12.0	15.4	2.03	1.425	43.4
粉土	2	18.7	6.0	24.9	11.71	0.808	27.9
粉砂	3	18.9	4.4	27.0	17.25	0.757	26.5
黏土	4	19.8	38.4	14.2	9.32	0.682	24.0

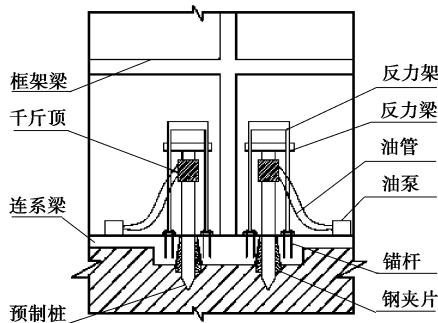


图 2 锚杆静压桩托换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of static bolt-pile

灌注桩成桩施工引起的土体最大侧向变形的 7.4 倍。而且成槽机械在开挖过程中，其抓斗或铣槽机铣削轮对槽壁的碰撞和扰动却比钻孔灌注桩钻机造成的孔壁扰动大得多。综合考虑两种围护结构施工中对土体变形控制和既有结构保护的有效性以及围护结构施工的难易性，基坑最终采用钻孔灌注桩结合搅拌桩止水的基坑围护及止水方案来控制基坑土体变形。

为了防止钻孔灌注桩施工对既有基础产生破坏并为地下室施工创造出足够的空间，桩与原基础边缘距离不得小于 1.5 m。在钻孔时，控制钻速，加大泥浆比重以增强护壁的效果，防止塌孔引起土体位移以及既有结构变形。加大了桩顶冠梁的尺寸，采用 $\Phi 1\text{m}@1.2\text{ m}$ ，深 10 m 灌注桩围护结构，以减小基坑开挖后的水平位移，降低基坑开挖对既有结构的影响。

(2) 锚杆静压桩结合同步注浆技术

采用锚杆静压桩结合同步注浆技术控制既有结构变形。为了在③层中密—密实的粉砂层中沉桩，采取了引孔—泥浆护壁工法。为了保证锚杆静压桩的承载力，控制上部结构的变形，对桩身周围土体进行压密注浆。注浆改善了土的物理力学性能，提高了桩—土摩擦力，增大了托换桩的承载力，减小托换引起的既有结构沉降。锚杆静压桩压桩如图 3 所示。



图 3 锚杆静压桩施工

Fig. 3 construction of static bolt-pile

(3) 不卸荷封桩技术

工程运用不卸荷封桩技术控制了土体开挖引起的锚杆静压桩上抬变形。首先，在千斤顶和既有基础之

间布置压板，在压板和桩之间布置垫块。利用千斤顶把压力传向压板、垫块和静压桩，当压板向下位移时，压力达到设计值时固定压板，给静压桩施加下压力，限制静压桩向上位移，保证封桩时静压桩和原独立基础连成一体，使得静压桩在封桩时受到稳定的下压力。然后卸除千斤顶和反力架，清理压桩孔内杂物，排掉积水和浮浆，采用高强灌浆料进行封桩。

(4) 土体开挖

上部结构的荷载随着土体的开挖逐步转移至锚杆静压桩，土体开挖的方式对既有结构的变形有很大的影响。如图 4 所示，为了控制上部结构的均匀沉降、沉降差，采用分层、分块、对称、先外后内的开挖方式。



图 4 原有基础下部土方开挖

Fig. 4 Excavation of soils beneath foundation

(5) 锚杆静压桩屈曲变形控制方案

桩基在施工过程中，基坑开挖使其产生了临空面，桩基有发生屈曲破坏的可能性^[10-11]。通过有限元计算得到的桩基屈曲荷载小于桩基承载力，限于篇幅，在此不详述。因此在施工过程中，若不采取措施桩基将发生屈曲破坏。如图 5 所示，为了控制桩基的屈曲变形，采用角钢+缀板格构式钢连梁将各桩连成整体，对单桩进行侧向约束，减小单桩的稳定计算长度^[10]，控制桩基的屈曲变形。



图 5 锚杆静压桩屈曲变形控制

Fig. 5 Bulking control of static bolt-pile

(6) 原独立基础植筋加固

对原独立基础调查研究发现，原锥形独立基础厚度在 200~250 mm 之间，部分基础厚度较小，抗冲切承载力不足，锚杆静压桩施工将导致基础发生冲切破

坏。

通过计算, 基础上部加厚 150 mm, 为了加强新旧混凝土表面的结合, 除在原基础表面凿毛外, 还在基础四周开挖深 50 mm 的沟槽。植筋植入原基础表面内 25 d, 基础加厚植筋示意图如图 6 所示。

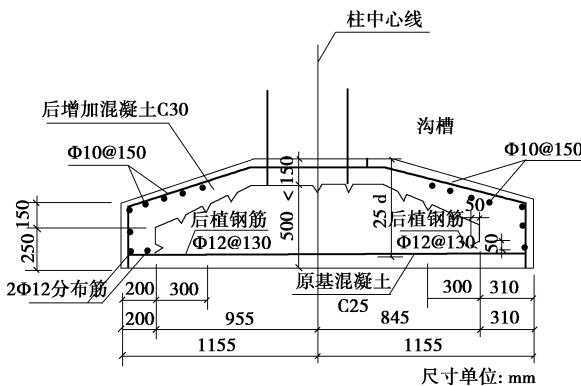


图 6 加固后独立基础

Fig. 6 Section of strengthened independent foundation

3 考虑桩 - 土 - 结构相互作用的三维数值模拟

在上述变形控制方案中, 涉及到上部结构、基坑、桩和土之间的相互作用。为了顺利完成既有结构桩基托换, 保证上部结构的安全可靠性, 就必须保证上部结构在静压桩施工、基坑开挖过程中不至于产生过大的变形和较大的应力。为此对上述施工过程进行了三维数值模拟, 并据此对桩 - 土 - 结构相互作用机理、上部结构变形与既有结构附加应力加以分析研究, 通过计算确定重要设计参数——桩长和桩截面尺寸。

3.1 基本原理

既有建筑物的地下增设工程, 首先要考虑托换沉降变形对上部结构的影响。桩基托换后, 土体沉降量计算应考虑以下 3 方面的因素:

(1) 托换桩置换土体后, 重力荷载作用产生附加应力

$$\sigma_z = (\gamma_c - \gamma_0)l = \Delta\gamma l \quad (1)$$

式中 σ_z 为桩置换土体后, 重力荷载作用产生的附加应力 (kPa); γ_0 为土的重度 (kN/m^3); γ_c 为混凝土的重度 (kN/m^3); l 为桩长 (m)。

(2) 托换桩桩顶集中力产生的附加应力

采用 Mindlin 公式可对桩端和桩侧阻力所产生的附加应力计算。上部建筑物的荷载, 经托换后, 成为作用在桩顶的集中力。

(3) 开挖地下室土体, 使下部地基土附加应力减少

三部分附加应力叠加后, 运用分层总和法可计算

出桩基沉降量。

上部结构、托换构件和地基土相互作用下的框架柱脚处的沉降量可按下式计算:

$$\{[K_d] + [K_j] + [K_s]\} \cdot \{\Delta\} = \{P\} \quad (2)$$

式中 $\{\Delta\}$ 为框架柱脚处的沉降量矩阵; $\{P\}$ 为竖向荷载作用矩阵; $[K_d]$ 为地基刚度矩阵; $[K_j]$ 为托换构件刚度矩阵; $[K_s]$ 为上部结构刚度矩阵。

3.2 三维有限元模型

(1) 计算参数

根据工程地质勘察报告, 土层参数见表 1, 泊松比由《工程地质手册》的经验值确定: 土层 1 为 0.35, 土层 2 为 0.3, 土层 3 为 0.28, 土层 4 为 0.25。

基坑围护结构、楼板、桩基、柱、梁等计算参数见表 2。

表 2 楼板、桩、柱、梁计算参数

Table 2 Parameters of floor, pile, column and beam

名称	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
楼板、桩基、柱、梁	25	30000	0.17

(2) 模型建立

钢筋混凝土楼板、基坑围护结构、锚杆静压桩以及柱、梁均为线弹性体, 其中楼板和围护结构采用四节点四边形薄壳单元, 柱、梁、锚杆静压桩采用梁单元, 每根柱下的 4 根桩基础按外表面积相等原则合成一根桩。土体为连续的弹塑性体, 符合 D-P 条件, 考虑几何非线性和材料非线性, 采用八节点六面体实体单元。

(3) 模型尺寸及边界条件

有限元模型计算深度取 30 m, 水平方向的边界取 10 倍以上的基坑开挖深度 (有其他结构物的方向除外), 土体模型尺寸为 100 m × 100 m × 30 m。计算模型的约束条件为: 地表面为自由边界, 不受任何约束; 法线为 X 的方向的两侧 YZ 面边界分别受到 X 方向的位移约束; 法线为 Y 的方向的两侧 XZ 面边界分别受到 Y 方向的位移约束; 底部边界设为固定约束。网格划分时, 在高应力梯度区单元尽可能小, 在边界附近适当增大, 共划分 95262 单元和 102585 个节点。三维数值计算模型网格划分如图 7 所示, 上部结构和托换桩如图 8 所示, 基坑围护结构如图 9 所示。

(4) 施工工况

根据地下增层的实际施工过程, 分为以下工况: 工况①: 施工基坑围护结构; 工况②: 设置锚杆静压桩, 采用了 NUMMRG 命令将上部结构节点与桩基节点耦合, 完成对封桩的模拟; 工况③: 基坑土体开挖, 运用 kill 命令将承台以下、基础底板以上土方挖除, 模

拟基坑开挖过程。

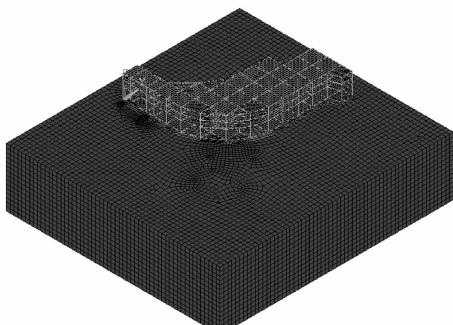


图 7 有限元整体模型

Fig. 7 Mesh of model

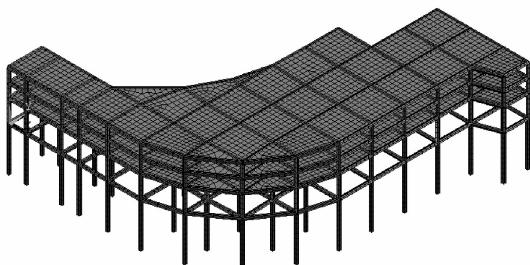


图 8 上部结构和托换桩基模型

Fig. 8 Mesh of upper structures and piles

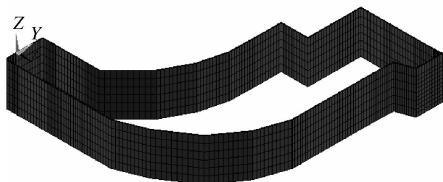


图 9 基坑围护结构模型

Fig. 9 Mesh of excavation

3.3 计算结果分析

(1) 桩长对既有结构沉降的影响

图10是上部结构轴线⑨(监测点Z45~Z32所在轴线,如图15所示)的沉降值随桩长变化的曲线,分析表明,桩的长度对结构位移的影响显著,随着桩长的增大,既有结构沉降、不均匀沉降显著减小;但是当桩长达到15 m后,桩长的变化对上部结构沉降影响较小,因此,桩的有效长度应该在15 m以内。

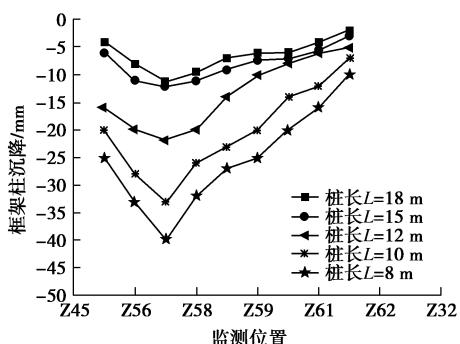


图 10 桩长对沉降的影响

Fig. 10 Effects of pile length on settlement

(2) 桩截面尺寸对既有结构沉降变形的影响

图11是上部结构⑨轴的沉降随桩截面尺寸变化的曲线,分析表明,桩的边长对结构位移的影响显著,随着桩边长的增大,既有结构沉降、不均匀沉降显著减小;但是当桩边长达到1500 mm后,桩边长的变化对上部结构沉降影响较小。可以认为桩基边长的有效值应在1500 mm以内。

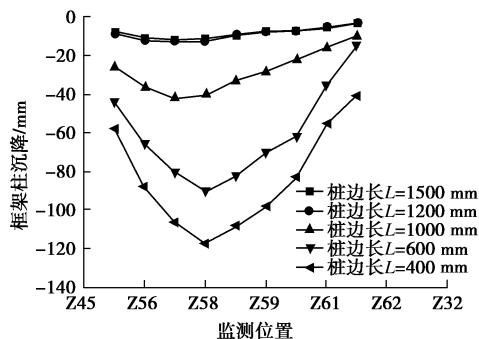


图 11 桩边长对沉降的影响

Fig. 11 Effects of pile diameter on settlement

(3) 上部结构变形控制方案的数值分析

为了确保既有结构沉降值、沉降差在《建筑地基基础设计规范》^[12]规定的允许值范围内,运用有限元软件进行了多次试算,综合考虑既有结构承台的尺寸和现场施工情况,最终方案为在每根柱下布置4根250×250 锚杆静压桩(等效为一根桩桩边长为1000 mm),桩长12 m。

数值分析结果显示,土体开挖后,结构荷载转移到桩基,由于托换桩与土体产生摩擦,刺入土体,上部结构产生了附加沉降,呈“盆式”沉降的规律,托换引起的结构框架柱沉降如图12所示,最大沉降量为15 mm。

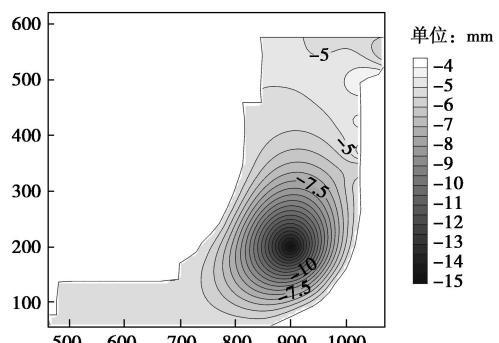


图 12 既有结构柱沉降

Fig. 12 Settlement of columns of existing structures

根据《建筑地基基础设计规范》^[12]的规定,建筑物的地基变形值,不应大于地基变形允许值。多层建筑框架结构,相邻柱基的沉降差允许值为0.005L(L为柱距)。结构的柱距为7.5 m,相邻柱基的沉降差允

许值为 3.75 cm。计算结果表明托换桩的设计方案是安全的, 能够保证既有结构的沉降差在规范规定的范围内, 保证了既有建筑的正常使用。

(4) 上部结构变形、附加应力研究

上部结构框架柱的沉降变形必然导致上部结构产生附近应力和变形。结构的附加应变如图 13 所示, 附加拉应力如图 14 所示。

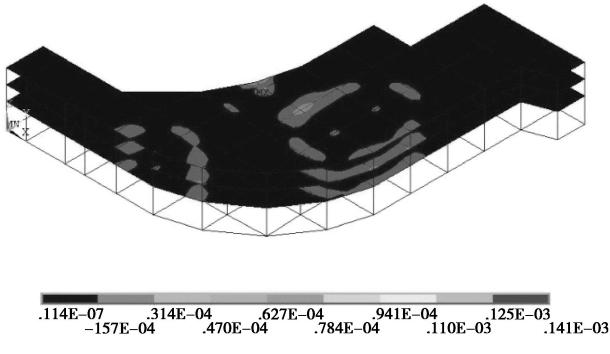


图 13 结构的附加应变

Fig. 13 Tensile strain of structures

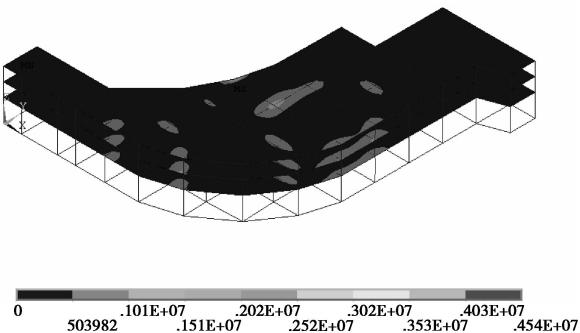


图 14 附加拉应力

Fig. 14 Tensile stress of structures

从计算结果可以看出: 施工引起的结构附加拉应力是比较小的, 在 1 MPa 以内, 没有达到混凝土的抗拉强度; 而结构的拉应变没有达到《混凝土结构设计规范》^[13]中 C30 混凝土的极限拉应变; 施工很好的保护了既有结构, 控制了大部分结构的内力和变形。

4 变形控制效果分析

为了评价变形控制效果, 指导锚杆静压桩托换施工, 对施工全程中框架柱的沉降、基坑围护结构水平位移进行了监测。图 15 为监测点平面布置图。

4.1 监测结果与分析

由图 16 可以看出: 灌注桩的侧向位移均较小, 所有测点都向坑内移动, 位移值在 1~6 mm 之间, 其中水平位移最大的点为监测点 5, 位于深度 5 m 处, 最大值为 5.22 mm。

根据《上海地铁基坑工程施工规程》^[14], 一级基

坑围护结构最大水平位移允许值为 $0.14\%H$ 。灌注桩的长度为 10 m, 最大水平位移允许值为 1.4 cm; 工程中围护结构最大水平位移允许值为 5.22 mm, 远小于规范的允许值。

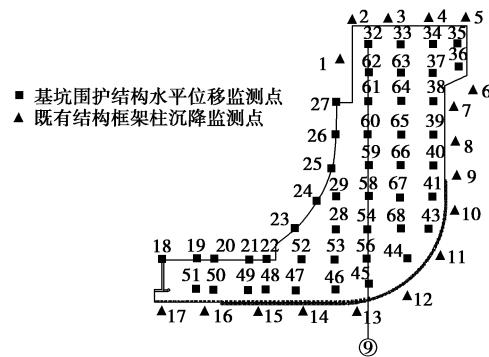


图 15 工程现场监测点平面布置图

Fig. 15 Arrangement of monitoring points

对围护结构的水平位移监测数据表明: 本工程很好的控制了基坑的水平位移。

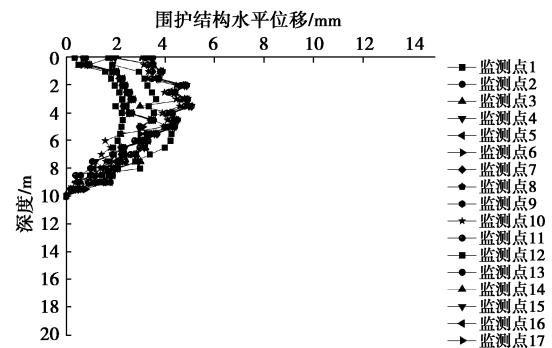


图 16 基坑围护结构水平位移

Fig. 16 Horizontal displacement of foundation pit

由图 17 可以看出: 框架柱的沉降均较小, 最大沉降值为 27 mm。根据《建筑地基基础设计规范》^[12]的规定, 建筑物的地基变形值, 不应大于地基变形允许值。多层建筑框架结构, 相邻柱基的沉降差允许值为 $0.005L$ (L 为柱距), 结构的柱距为 7.5 m, 相邻柱基沉降差允许值为 3.75 cm。相邻柱基之间的最大沉降差为 24 mm (Z46、Z45), 小于规范的允许值。

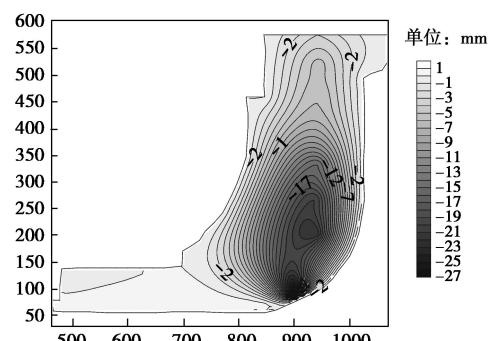


图 17 框架柱沉降

Fig. 17 Settlement of columns

4.2 计算位移与实测位移比较

从图18可以看出, 数值计算的框架柱沉降值与实测值所揭示的变形规律较为一致。从图19可以看出, 数值计算的基坑围护结构水平位移值与实测值较为吻合。比较图17和图12发现, 结构沉降计算值与实测值虽然在数量上不完全一致, 但是所揭示的变形规律较为一致, 均为中间大, 四周小的盆式沉降。

但是图17显示在结构下侧边界出现了较大的沉降值, 这与数值分析结果不符。初步分析这是由于这个区域是施工场地大门所在, 离城市道路距离最近, 受到较多的汽车荷载, 由于桩-土-结构的相互作用, 结构产生了较大的沉降。考虑桩-土-结构的相互作用, 研究车辆荷载对既有结构沉降的影响, 正是下一步需要开展的工作。

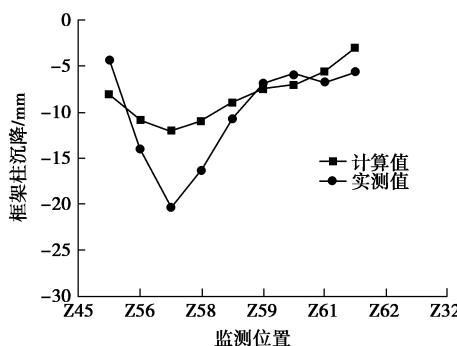


图 18 框架柱沉降计算值与实测值对比

Fig. 18 Comparison between calculated and measured settlements of columns

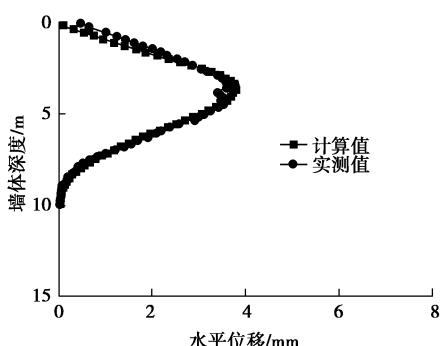


图 19 基坑围护结构变形计算值与实测值对比

Fig. 19 Comparison between calculated and measured horizontal displacements of foundation pit

5 结 论

本文针对中国工商银行某办公楼地下室增设工程, 根据现场调研, 结合三维数值分析和现场监测, 研究了锚杆静压桩既有结构变形控制技术, 主要结论如下:

(1)采用锚杆静压桩托换技术有效控制了本工程

既有结构变形, 保证了上部结构的安全; 钻孔灌注桩结合搅拌桩止水的基坑围护及止水方案, 对基坑土体的变形控制合理有效; 角钢+缀板格构式钢连梁技术加强了锚杆静压桩的整体性, 避免其产生屈曲破坏。

(2)建立了三维模型, 实现了考虑桩-土-结构相互作用的施工过程数值模拟; 分析了重要设计参数——桩长和桩径对沉降值的影响, 提出了合理的桩长和桩截面尺寸; 还计算了施工引起上部结构产生的附加拉应力、拉应变; 数值模拟结果表明: 锚杆静压桩技术能很好的控制既有结构变形。

(3)监测结果表明: 基坑围护结构的水平位移较小; 既有结构的框架柱沉降、沉降差较小, 处于规范规定范围内。变形监测值与计算结果所揭示的变形规律较为一致, 表明由于本工程方案制定合理、施工措施得当, 所以既有结构未产生较大沉降和变形。

参 考 文 献:

- [1] 徐前卫, 朱合华, 马险峰, 等. 地铁盾构隧道穿越桥梁下方群桩基础的托换与除桩技术研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1217 - 1226. (XU Qian-wei, ZHU He-hua, MA Xian-feng, et al. Pile underpinning and removing technology of shield tunnels crossing through group pile foundations of road bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1217 - 1226. (in Chinese))
- [2] 李 韶, 毕兆云, 高大钊. 按复合桩基设计锚杆静压桩处理地基[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1171 - 1174. (LI Tao, BI Zhao-yun, GAO Da-zhao. Foundation treatment using jacked anchor pile with composite pile design concept[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1171 - 1174. (in Chinese))
- [3] 贾 强, 应惠清, 张 鑫. 锚杆静压桩技术在既有建筑物增设地下空间中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2053 - 2057. (JIA Qiang, YING Hui-qing, ZHANG Xin. Numerical analysis of settlement difference for pile foundation underpinning for constructing underground space[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2053 - 2057 (in Chinese))
- [4] 吴勇华, 谢新宇, 叶 军, 等. 跨越地铁高层建筑桩筏基础数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 441 - 448. (WU Yong-hua, XIE Xin-yu, YE Jun, et al. Numerical simulation of piled raft foundation of super-tall buildings crossing metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 441 - 448. (in Chinese))
- [5] 廖雄华, 周 健, 张克绪, 等. 广义位移法在土-结构相互作用问题分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 672 - 678. (LIAO Xiong-hua, ZHOU Jian, ZHANG Ke-xu, et al. Application of generalized freedom method to the

- analysis of soil-structure interaction problems[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(6): 672 - 678. (in Chinese))
- [6] 丁智, 魏新江, 魏纲, 等. 邻近建筑物盾构施工地面沉降数值分析[J]. 岩土力学, 2004, **30**(增刊 2): 550 - 556. (DING Zhi, WEI Xin-Jiang, WEI Gang, et al. Numerical analysis of surface settlement induced by shield tunnel construction of adjacent structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **30**(S2): 550 - 556. (in Chinese))
- [7] 胡琦, 蒋军, 严细水. 软土地基上建筑物沉降的三维数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(12): 2015 - 2021. (HU Qi, JIANG Jun, YAN Xi-shui. Three-dimensional numerical simulation analysis of settlements of buildings on soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(12): 2015 - 2021 (in Chinese))
- [8] 丁勇春, 王建华. 深基坑施工对高架基础的变形影响及控制研究[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(7): 155 - 161. (DING Yong-chun, WANG Jian-hua. Influence of deep excavation on deformation of elevated bridge foundations and countermeasures[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(7): 155 - 161. (in Chinese))
- [9] DING Y C, WANG J H. Numerical modeling of ground response during diaphragm wall construction[J]. Journal of Shanghai JiaoTong University, 2008, **13**(4): 385 - 390.
- [10] 赵明华, 王季柏. 基桩计入摩阻力的屈曲分析[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(3): 87 - 90. (ZHAO Ming-Hua, WANG Ji-bo. Pile into account the buckling analysis of friction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 87 - 90. (in Chinese))
- [11] 张永兴, 陈林, 吴曙光. 基于 Wieghardt 地基桩基稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 9 - 12. (ZHANG Yong-xing, CHEN Lin, WU Shu-guang. Stability analysis of pile on a Wieghardt-type elastic foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 9 - 12. (in Chinese))
- [12] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))
- [13] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (GB50010—2010 Code for design of concrete structure[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))
- [14] SZ—09—2000 上海地铁基坑工程施工规程[S]. 上海: 上海市市政工程管理局, 2000. (SZ—09—2000 Specification for excavation in shanghai metro construction[S]. Shanghai: Shanghai Municipal Engineering Administration Bureau, 2000. (in Chinese))