

文章编号: 1000-7598-(2008)06-1535-05

# 深基坑工程软托换技术影响因素分析

刘毓胤, 李 协, 陈福全

(福州大学 土木工程学院, 福州 350002)

**摘 要:**“软托换”是近年来工程实践中总结出来的一种新概念,其工作原理是根据基坑与既有建筑物的相对位置(距离)、建筑物重量、基土工程性质、可能产生破坏的类型和破坏的范围,以荷载传递和应力转移的原理为指导思想,设计用更少量的托换结构构件来达到防倾、抗倾的目的。以深基坑软托换工程为研究对象,借助 Plaxis ver7.2 有限元分析软件,对既有建筑物情况下的深基坑开挖过程采用锚杆静压桩进行软托换设计,并进行有限元模拟,以此来研究软托换对支护结构内力和变形的影响。通过有限元分析可以看出:基坑离既有建筑物的距离、软弱层厚度是影响软托换效果的重要因素。

**关 键 词:** 软托换; 深基坑; 锚杆静压桩; 支护

中图分类号: TU443

文献标识码: A

## Numerical analysis of effect of underpinning on excavation bracing

LIU Yu-chuan, LI Xie, CHEN Fu-quan

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Underpinning is a new concept summed up from engineering practice in recent years; its principle is based on the relative position(distance) between the excavation and the existing buildings, the weight of buildings, soil engineering property, the probable destroy type and extension, with the load transfer and the stress transfer theory as the guiding ideology; designing to use less underpinning component to attain the purpose of anti-lean. The finite element analysis software package, Plaxis ver7.2, is used to study the underpinning excavation engineering. The anchor dead pressure piles are used to underpin the existing structure; and the finite element simulation is used to study the effect of underpinning on the force and deformation of the bracing structure. Through finite element analysis, it can be found that the distance between the excavation and the existing buildings and the thickness of the weak layer are important factor to underpinning.

**Key words:** underpinning; excavation; anchor; dead pressure pile; bracing

## 1 引 言

随着城市地下空间开发和高层建筑的建设,深基坑工程的规模不断扩大,特别是深度也不断增加。城市中的深基坑工程一般都处在密集的建筑群中,有些工程的基础紧邻既有建筑物或构筑物的基础。这类建筑物的基础会受到深基坑开挖的影响,而不能满足建筑物对地基的强度和变形要求。因此,需要针对不同的情况进行加固处理形成人工地基,才能满足已有建筑物对地基的要求。地基处理是否恰当,不仅影响既有建筑物的安全和使用,而且对建设速度、工程造价有不小的影响,有时候甚至成为工程建设中的关键问题。

武汉地区工程技术人员在多年的工程实践中总结出来的深基坑外既有建筑物的桩式软托换技术能够较好地解决基坑环境保护问题。它安全可靠、经济效益高,在缩短工期方面颇占优势,对邻房的防倾防裂起着重要作用<sup>[1]</sup>。

“软托换”是近年来工程实践中总结出来的一种新概念<sup>[1]</sup>,其工作原理是根据既有建筑物与坑壁的相对位置(距离)、建筑物重量、基土工程性质、可能产生破坏的类型和破坏的范围,以荷载传递和应力转移的原理为指导思想,设计用更少量的托换结构构件来达到防倾抗倾的目的。无论在何种环境变迁的条件下,必须使被托换的建筑物能相对地保持其沉降均匀性。

收稿日期: 2006-12-29

作者简介: 刘毓胤,男,1971年生,主要从事特殊土工程特性及灾害治理方面的研究。E-mail: liuyuchuan@fzu.edu.cn

2 软托换技术工程应用实例

锚杆静压桩软托换是补救性地基托换的一种，它采用静压方式沉桩，以建筑物自重做反力，用千斤顶将桩压入土中，桩-土共同作用来分担既有建筑物的荷载，从而对既有建筑物地基进行加固处理。近年来，锚杆静压桩托换技术在危房加固、房屋增层、柱基纠偏、深基坑软托换等方面得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。

某深基坑开挖深度为 10 m，宽度为 20 m。基坑东边 5 m 处有一栋 5 层高的建筑物，由于地下管线错综复杂。因此，施工时要严格控制基坑的受力变形，才能确保周围建筑物的安全。建筑物基础采用条形基础，该基坑采用地下连续墙支护，地下连续墙深度取为 15 m。根据地质条件选用锚杆静压桩进行托换，其剖面图如图 1 所示。

经勘测钻探揭示表明，地下水位位于地表以下

1 m 处，土层自上而下分为 3 层。分别为：黏土，层厚为 2.5~3.4 m；淤泥，层厚为 4.6~5.3 m；下面均为砂土，各土层物理力学参数见表 1。土体的  $c$ ， $\varphi$  值是通过试验室中的三轴试验获取； $E$ ， $\nu$  为土体的变形模量和泊松比，是由单向压缩试验求得，而确定渗透系数  $k_x$  和  $k_y$  的方法是室内的常水头法。

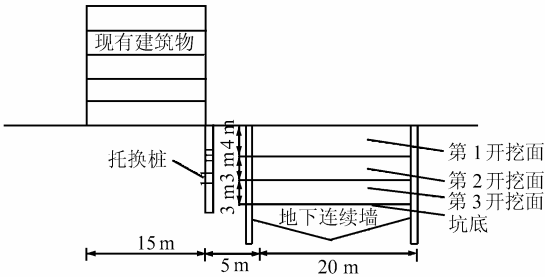


图 1 基坑剖面图

Fig.1 Profile of the excavation

表 1 土层物理力学性质指标  
Table 1 Physical properties of soil

| 土类 | 本构模型 | 干重度 $\gamma_{dry}$<br>/ $kN \cdot m^{-3}$ | 湿重度 $\gamma_{wet}$<br>/ $kN \cdot m^{-3}$ | 黏聚力<br>$c$ / kPa | 内摩擦角<br>$\varphi$ / (°) | 膨胀角<br>$\psi$ / (°) | 泊松比<br>$\nu$ | 弹性模量 $E$<br>/ MPa | 渗透系数 $k_x$<br>/ $m \cdot d^{-1}$ | 渗透系数 $k_y$<br>/ $m \cdot d^{-1}$ | 输入参数<br>$R_{inter}$ |
|----|------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|-------------------------|---------------------|--------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 黏土 | M-C  | 16                                        | 18                                        | 10               | 25                      | 0                   | 0.35         | 10                | 0.001                            | 0.001                            | 0.5                 |
| 淤泥 | M-C  | 14                                        | 18                                        | 10               | 15                      | 0                   | 0.25         | 5                 | 0.001                            | 0.001                            | 0.5                 |
| 砂土 | M-C  | 17                                        | 20                                        | 10               | 32                      | 2                   | 0.3          | 40                | 1                                | 1                                | 0.67                |

3 软托换技术理论分析

本文采用欧洲知名土工有限元软件 Plaxis ver7.2 进行分析。Plaxis 是土工专用的数值分析软件，它能够模拟各种复杂的土工问题，尤其适合于变形和稳定分析、土体固结问题及岩土工程施工问题，如开挖、填筑及材料置换等等。它的前后处理模块可视化强，网格生成高度自动化，基本上无需人工干预<sup>[3]</sup>。

在基坑的模拟分析中，支护结构与土体之间的接触行为需要用接触面来模拟，具体方法是：当  $|\tau| < \sigma_n \tan \varphi_i + c_i$  时，接触面处于弹性阶段；当  $|\tau| = \sigma_n \tan \varphi_i + c_i$  时，接触面进入塑性阶段。这里， $c_i$ ， $\varphi_i$  分别为第  $i$  层接触面的凝聚力和内摩擦角。这两个指标与每个土层的力学指标相联系，在程序中通过输入参数  $R_{inter}$  来进行计算。具体的计算方法如下： $c_i = R_{inter} c_{soil}$ ， $\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil}$ 。

本算例将基坑简化为平面应变问题进行有限元分析，选取 6 节点进行计算。计算剖面的范围：以基坑开挖的中心为原点，以 -50 m 为左边界，以 40 m 为右边界，下边界取在 -25 m 处。约束条件：

左右边界水平约束，下边界固定约束。

建筑物基础采用条形基础，该基坑采用地下连续墙支护，地下连续墙深度取为 15 m。根据地质条件选用 200 mm × 200 mm 的锚杆静压桩进行托换，锚杆静压桩托换的长度为 11 m，并将锚杆静压桩用梁单元 Beam 来模拟。支护结构参数见表 2，网格剖分如图 2 所示。

表 2 支护结构参数  
Table 2 Parameters of bracing structure

| 支护结构参数 | 抗压刚度<br>$EA$ / kN | 抗弯刚度 $EI$<br>/ $kN \cdot m^4$ | 弯矩 $W$<br>/ $kN \cdot m$ | 桩间距<br>$l_{spacing}$ / m |
|--------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 地下连续墙  | $7.5 \times 10^6$ | $4 \times 10^5$               | 10                       | /                        |
| 支撑     | $2 \times 10^6$   | /                             | /                        | 5                        |
| 托换桩    | $1.2 \times 10^9$ | $4 \times 10^6$               | /                        | /                        |

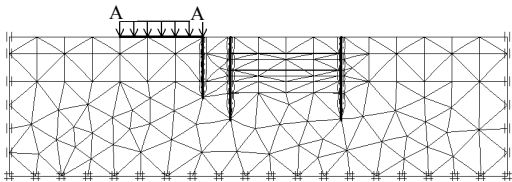


图 2 有限元网格剖分

Fig.2 Finite element meshes

计算中考虑分步开挖模拟工况如下:工况 1, 设置锚杆静压桩进行托换;工况 2, 设置地下连续墙, 并进行第 1 步开挖至地表下 4 m 处, 安装第 1 道支撑;工况 3, 继续挖土至地表下 7 m 处并降水, 施工第 2 道支撑;工况 4, 继续挖土至地表下 10 m 处并降水, 同时取既有建筑物的荷载为 15 kN/m。

在有限元模拟的过程中, 分别对有施加软托换的开挖过程和无施加软托换的开挖过程中的支护结构的位移和弯矩进行对比, 可以发现, 软托换构件直接影响到支护结构位移的发展及最大位移值, 未施加软托换的支护结构的最大位移值为 15.93 mm, 而施加软托换的支护结构的最大位移值为 14.85 mm, 减小幅度为 6.78 %, 在未施加软托换的最大弯矩值为 92.98 kN·m/m, 而施加软托换情况下的最大弯矩值为 84.11 kN·m/m, 减小幅度为 9.54 %, 两者的比较如图 3、图 4 所示。

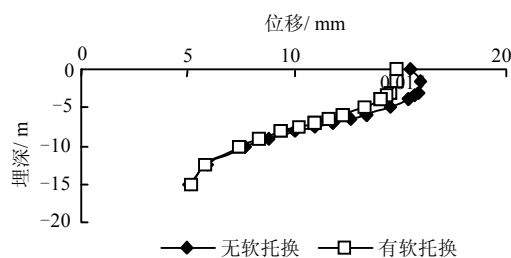


图 3 支护结构最大位移在有无采用软托换情况下的对比  
Fig.3 Comparison of maximum displacement in bracing structure with and without underpinning

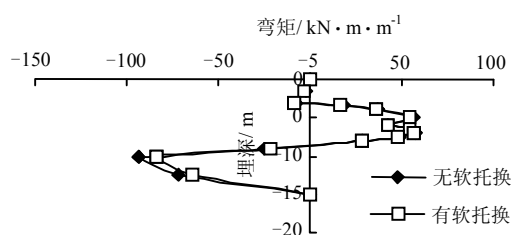


图 4 支护结构最大弯矩在有无采用软托换情况下的对比  
Fig.4 Comparison of maximum bending moment in bracing structure with and without underpinning

对条形基础弯矩分布的分析可以看出, 在施加了托换后, 靠近基坑的条形基础的弯矩值明显降低, 而且施加软托换后, 由于开挖所造成的基础沉降也得到了控制, 见图 5。从图 6、图 7 中无施加软托换和有施加软托换情况下基坑开挖的土体有效应力分布的对比中可以看出, 在施加托换情况下靠近建筑物一侧的地下连续墙墙背后的集中应力有所减小, 而且处于坑底位置的地下连续墙附近的部分应力也由锚杆静压桩传递到了基坑以下的土层中, 并且在一定程度上减小了坑底土体的隆起。可见, 采用托

换技术在一定程度上减小支护结构的变形和内力, 使开挖基坑周围土体的应力分布趋于合理。

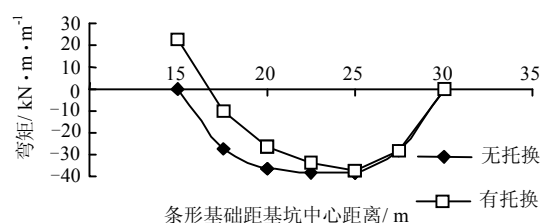


图 5 条形基础弯矩在有无采用软托换情况下的对比  
Fig.5 Comparison of maximum bending moment in strip footing with and without underpinning

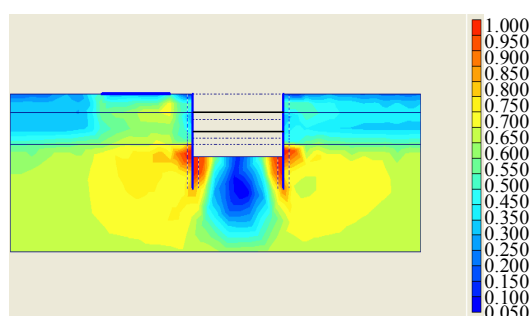


图 6 基坑未采用软托换时有效应力分布图  
Fig.6 effective stress distribution of excavation without underpinning (unit:kPa)

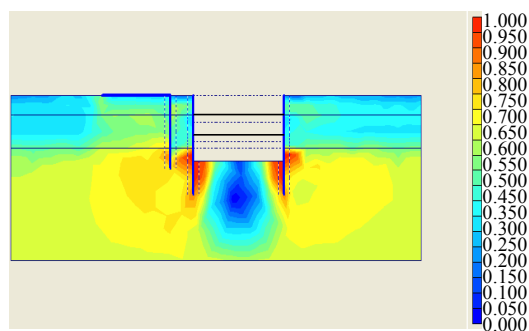


图 7 基坑采用软托换时有效应力分布图  
Fig.7 Effective stress distribution of excavation with underpinning (unit: kPa)

## 4 软托换技术影响因素分析

在知道了软托换可以减小基坑开挖时支护结构产生的变形和内力, 并减小基础的沉降后, 下面就哪些因素对托换效果会产生影响进行研究。本节将对开挖基坑离既有建筑物的距离、托换桩的桩身尺寸、长度和地基土层的工程性质等影响因素进行讨论。

### 4.1 开挖基坑离既有建筑物的距离

在该算例中, 开挖基坑离既有建筑物的距离是

不确定的。因此, 需要考虑开挖基坑位置对托换效果的影响。

图 8、图 9 分别列出了与建筑物不同距离的基坑(5, 10, 12, 15 m)在采用软托换情况下最大位移和最大弯矩的对比情况。从图中可以看出, 当开挖基坑离建筑物较近时, 施加软托换可以较大幅度地减小支护结构的位移, 软托换的效果较为显著; 当开挖基坑逐渐远离建筑物时, 软托换的效果就逐渐减弱。这是因为当开挖基坑离既有建筑物较近时, 其受到既有建筑物荷载的影响较大, 这时所施加的软托换可以较大幅度地发挥作用, 通过托换桩将既有建筑物所产生的荷载较多地传递到地下土层中去, 从而减小既有建筑物对开挖基坑的影响。

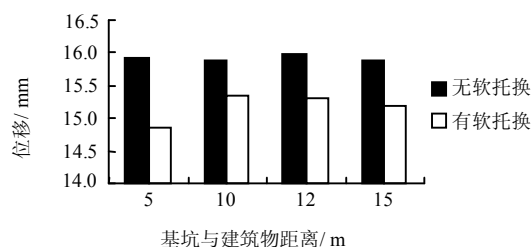


图 8 不同位置基坑有无采用软托换支护结构最大位移对比

Fig.8 Comparison of maximum displacement in bracing structure among different distance of excavation with and without underpinning

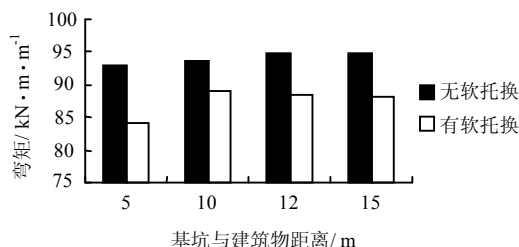


图 9 不同位置基坑有无采用软托换支护结构最大弯矩对比

Fig.9 Comparison of maximum bending moment in bracing structure among different distance of excavation with and without underpinning

#### 4.2 托换桩桩身长度

本文在计算过程中选择 4 个不同长度的托换桩(10, 11, 12, 13 m)来进行研究。

图 10、图 11 分别列出了不同长度的托换桩在托换后最大位移和弯矩的对比。从图中的对比可以看出: 当托换桩桩身长度为 10 m 时, 软托换的效果较为明显, 而当托换桩桩身长度逐渐增大时, 软托换的效果就逐渐减弱。这是因为该基坑开挖到砂土层, 而不是淤泥层, 因此, 只要将托换桩打入砂土层, 就能够起到软托换的作用, 但如果再去增加

桩长反而会使托换桩产生较大的变形和内力。

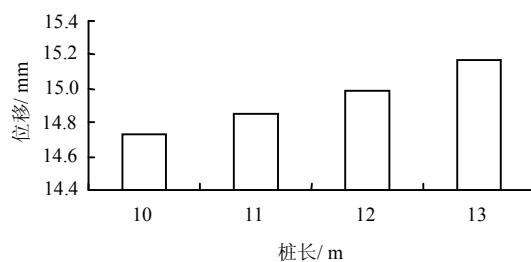


图 10 采用软托换不同桩长情况下支护结构最大位移对比  
Fig.10 Comparison of maximum displacement in bracing structure among different pile length with underpinning

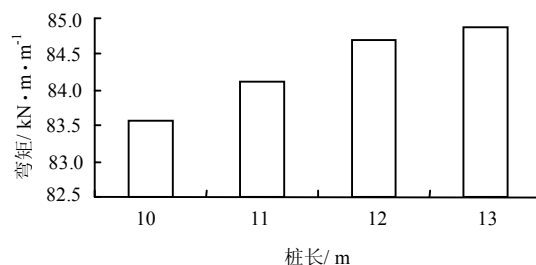


图 11 采用软托换不同桩长情况下支护结构最大弯矩对比  
Fig.11 Comparison of maximum bending moment in bracing structure among different pile length with underpinning

#### 4.3 托换桩截面尺寸

锚杆静压桩截面边长可为 180~300 mm。本文取 3 种截面分别为 200 mm×200 mm, 250 mm×250 mm, 300 mm×300 mm 的桩进行比较。

从图 12、图 13 的对比可以看出: 3 种截面尺寸的桩的托换效果相差不太明显。因此, 在设计时可以选择 200 mm×200 mm 尺寸的桩较为经济。这主要是由于托换桩在施工时所采用的材料是相同的, 因此, 弹性模量  $E$  是相等的, 所以桩的抗弯刚度  $EI$  和抗压刚度  $EA$  就只和桩截面尺寸有关了, 桩截面尺寸越大, 其抗弯刚度  $EI$  和抗压刚度  $EA$  也就越大, 所产生的变形也就越小。

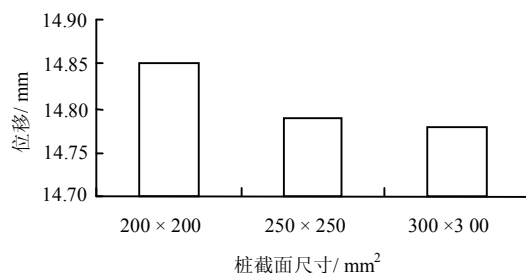


图 12 采用软托换不同桩截面情况下支护结构最大位移对比  
Fig.12 Comparison of maximum displacement in bracing structure among different pile section with underpinning

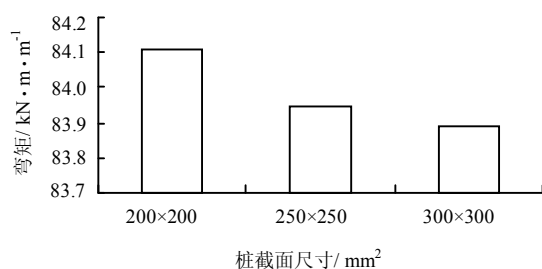


图13 采用软托换不同桩截面情况  
下支护结构最大弯矩对比

Fig.13 Comparison of maximum bending moment in bracing structure among different pile section with underpinning

#### 4.4 软弱层厚度

本文中选取了4个不同厚度（3, 4, 5, 6 m）的淤泥层（3, 4, 5, 6 m）进行分析。

通过比较图14、图15，可以看出：当淤泥层较薄时，软托换的效果较差，这主要是由于这时土

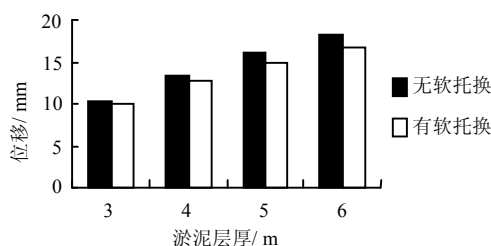


图14 不同淤泥层厚有无采用软托换  
支护结构最大位移对比

Fig.14 Comparison of maximum displacement in bracing structure among different thickness of silt with and without underpinning

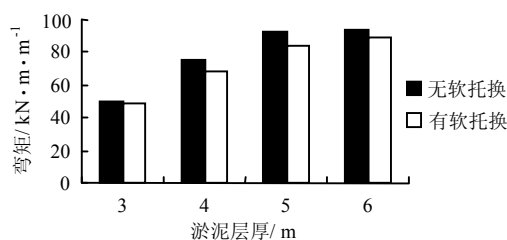


图15 不同淤泥层厚有无采用软托换  
支护结构最大弯矩对比

Fig.15 Comparison of maximum bending moment in bracing structure among different thickness of silt with and without underpinning

体本身的承载力就较高，可以承受由基坑开挖产生的大部分附加荷载。当淤泥层较厚时，软托换就开始发挥作用，能够较好地限制支护结构变形和内力，这主要是由于较厚的淤泥层的存在，降低了土层的承载能力，由于基坑开挖产生的附加荷载有一部分通过托换构件传递到位于基坑底部的土层去，从而减少了对支护结构的影响。

## 5 结 论

通过分析表明，有限元可以较好地分析托换桩结构对支护结构的影响，可为设计提供辅助分析，可得如下结论：

（1）开挖基坑离既有建筑物的距离是影响托换效果的一个重要因素。当开挖基坑离既有建筑物较近时托换效果才比较明显。

（2）托换桩的长度和截面尺寸在一定程度上也起到影响托换效果的作用，但是影响不太显著。

（3）软弱层厚度也是影响托换效果的一个重要因素。当软弱层较薄时，软托换的效果较差；当软弱层较厚时，软托换的效果就比较明显，能够较好地限制支护结构变形和内力。

（4）由于Plaxis ver7.2有限元分析软件的限制，无法进行三维分析。因此，本文对桩间距的影响进行有限元分析，无法了解其对托换效果的影响。该影响因素将在以后的研究中进行深入分析。

（5）由于Plaxis ver7.2有限元分析软件无法进行三维分析，这将可能造成托换的效果比实际情况有所增大。

## 参 考 文 献

- [1] 刘祖德. 纠偏防倾工程十五年[C]// 全国首届建筑物地基基础特殊技术研讨会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 叶书麟, 韩杰, 叶观宝. 地基处理与托换技术(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [3] BRINKGREVE R B J. Plaxis Manuals[M]. Netherlands: BALKEMA A A Publishers, 2002.