

托换桩-土钉墙组合支护结构的工作机制初探

魏焕卫¹, 张 勇²

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101; 2. 山东省物化探勘查院, 济南 250014)

摘 要: 针对新型托换桩-土钉墙组合支护结构, 假定沉降大于托换桩沉降范围内的坡顶建筑物荷载全部转移至托换桩, 阐述托换桩-土钉墙组合支护的工作机制, 对支护结构的变形协调机制和荷载传递路径进行探讨, 提出支护结构侧向变形、坡顶沉降以及托换桩沉降及内力的计算方法。参数及对比分析表明, 相对传统的复合土钉墙支护, 新型托换桩-土钉墙组合支护结构可以很明显地减小支护结构的变形和内力, 随坡顶荷载的增加托换支护法中支护结构的内力和变形的增速明显小于复合土钉墙的内力和变形增速, 随微型桩水平间距的增加支护结构的变形和内力都增加, 微型桩嵌固深度的增加对支护结构的内力和变形影响较小。

关 键 词: 托换桩; 土钉墙; 侧向变形; 沉降; 变形协调

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

Study of working mechanism of composite supporting structure with underpinning piles and soil nailing

WEI Huan-wei¹, ZHANG Yong²

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Institute of Geophysical and Geochemical Prospecting, Jinan 250014, China)

Abstract: Underpinning pile-soil nailing (UPSN), a composite structure of underpinning piles and soil nailing, is a new retaining technology. Base on the hypothesis that the underpinning pile top load is equal to the upper structural load with its settlement greater than that of the underpinning pile top, the retaining characteristics of UPSN are analyzed; and its deformation coordination mechanism and load transfer path are discussed. The computing methods of lateral deformation, vertical settlement and inner force are proposed. Parametric analysis shows that UPSN can obviously reduce the deformation and internal force of supporting structure compared to conventional composite soil nailing; the deformation and internal force increases as the upper structural load and horizontal spacing of the micro-pile increases; less affect as the embedded depth of micro pile increases.

Key words: underpinning pile; soil nailing; lateral deformation; settlement; deformation coordination

1 引 言

由于现代城市建筑物密度较大, 基坑的开挖不可避免的遇到周围建筑物、管线等周边环境保护问题。基坑支护要考虑到的问题: (1) 控制基坑支挡结构侧向变形, 可以采取桩锚、内支撑等形式, 但费用都比较高; (2) 减小对周边环境的影响, 如基坑开挖可能造成周边建筑物或管线的沉降或不均匀沉降等, 进而引起建筑物的倾斜、墙体开裂、管道断裂。托换桩是进行地基基础加固的一种手段, 常用来控制既有建筑物基础的沉降, 土钉墙支护技术施工方便、经济高效, 但其对基坑侧向和坡顶竖向

变形很难控制, 其应用受到周边环境和支护深度的限制。将托换桩与土钉墙组合, 发展形成了托换桩-土钉墙组合支护结构 (简称“托换支护法”), 即应用托换桩直接限制临近建筑物竖向变形 (沉降), 同时与土钉墙一起限制基坑开挖土体的侧向变形。传统的支护方法都是通过限制基坑侧向变形间接保护已有建筑物, 见图 1(a), 属于被动的保护, 而托换支护法对临近建筑物基础的预防性托换则属于主动保护, 见图 1(b)。

将托换桩 (微型桩) 与土钉墙组合的托换桩-土钉墙新型基坑支护技术, 在构造上表现为水平向支护与竖向托换相结合的特点, 在作用原理上具有

收稿日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 41272281); 山东省自然科学基金资助 (No. ZR2012EEM016); 山东建筑大学博士基金资助 (No. XNBS1206)。

第一作者简介: 魏焕卫, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程共同作用和变形控制设计。E-mail: weihuanwei@sdjzu.edu.cn

主动支护和被动支护相结合的特征, 国内外对该组合支护体系的应用和研究做了初步的探索。Morgan 等^[1]通过微型桩托换和土钉支护完成了对某商场储藏室和地下通廊的扩建。Van 等^[2]利用托换技术成功保护了某煤矿巷道施工时其上地铁的安全。陈家琪等^[3]、魏焕卫等^[4]、刘湘宜^[5]、李欢秋等^[6]、肖春喜等^[7]在多个工程中成功利用托换支护法完成了对基坑邻近建筑物的保护。刘毓炘等^[8]借助有限元分析软件研究了托换支护法中托换结构对支护结构内力和变形的影响。本文从托换支护法各个构件的作用机制和荷载传递路径出发, 研究该新型支护法的变形控制原理。

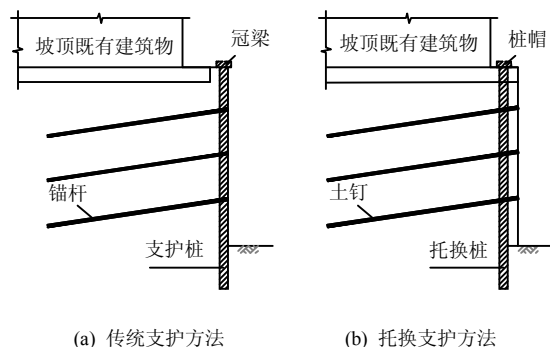


图 1 基坑支护示意图

Fig.1 Sketch of building foundation excavations

2 变形控制和荷载传递机制

2.1 变形控制基本原理

托换支护法通过托换桩限制邻近建筑物的竖向变形和承担一部分侧向土压力, 并通过土钉保持基坑的整体稳定性, 土钉在减小基坑侧壁的侧向变形的同时也可以减小坡顶沉降, 进而减小托换桩桩顶的竖向荷载。因此, 托换桩支护法是通过托换桩-土钉-上部结构-土体的协同作用达到减小基坑侧壁变形和坡顶沉降的目的。

托换支护法中托换桩和土钉墙在土压力作用下的受力机制不同, 托换桩为主动受荷构件, 而土钉墙为被动受荷构件。单纯的土钉墙侧向变形和坡顶建筑物基础沉降都较大, 见图 2(a), 单纯的托换桩则很难有效限制基坑侧向变形及保证边坡的整体稳定, 见图 2(b), 二者的结合则可以达到限制基坑侧向变形和坡顶建筑物基础沉降的双重目的, 见图 2(c)。无论土钉相对锚索还是托换桩相对灌注桩, 托换支护法所需的支护费用都大大降低。托换桩直接作用于邻近建筑物基础, 变形控制效果远好于传统基坑支护方法, 从而能够较好地保护周围环境。

该支护体系中的土钉和微型桩(托换桩)都具有经济、可靠、施工快速简便等优点。

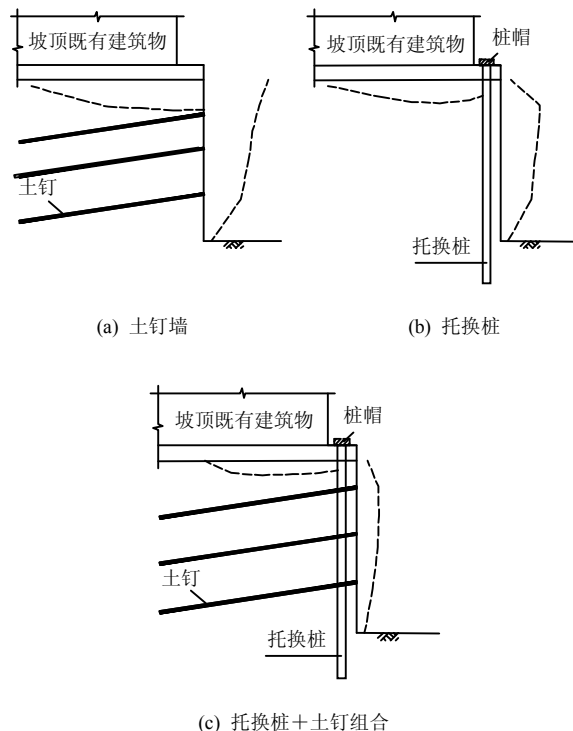


图 2 托换桩+土钉墙组合支护体系变形控制

Fig.2 Deformation control of UPSN

2.2 荷载传递路径

托换支护法首先施工托换桩, 然后分步开挖土体并施工水平土钉锚杆。随着基坑内土体的开挖, 上部建筑物荷载和土体卸载引起托换桩侧向受力, 见图 3(a), 托换桩在侧向力作用下产生侧向变形, 引起土钉受力, 土钉受力反过来限制基坑的侧向变形。基坑边坡的侧向变形引起坡顶建筑物基底下一一定范围内产生沉降, 而托换桩通过把局部建筑物上部荷载传递到深层土体阻止了建筑物基础的部分沉降, 也减小了基底压力, 进而减小了基坑侧壁土体的侧向变形及坡顶基底土体的沉降, 见图 3(b)。另外, 转移至托换桩的荷载会引起其发生沉降。该组合支护体系荷载传递, 使得坡顶建筑物基础沉降大于托换桩沉降部位的结构荷载转移至托换桩, 转移至托换桩上的荷载越多, 坡顶受到的荷载越小, 基坑边坡侧向变形越小, 坡顶沉降越小, 反过来使得转移至托换桩上的荷载越小。这一反复的过程也是托换桩-土钉墙荷载分配的过程和变形协调的过程, 不仅与桩的参数有关, 且与土层条件、土钉的参数有关。

托换桩-土钉墙组合支护结构的荷载传递机制与目前支护桩(桩锚支护)和复合土钉墙中荷载传

递机理相比,具有三方面的特点:(1)随着基坑内土体逐步开挖,托换桩的受力不断发生变化,坡顶建筑物基础沉降、基坑边坡侧壁的侧向变形和托换桩的桩顶沉降也不断发生变化,构成一种动态变化的变形协调过程;(2)在托换桩间设置土钉,使土体受力特性发生变化,托换桩和土钉对侧向变形的共同限制和共同分担侧向土压力,从而构成土钉-托换桩相互作用体系;(3)托换桩-土钉墙组合支护结构中的变形协调不仅影响到土压力的传递与分布,具有支护结构特征,形成托换桩-土钉-上部结构相互作用的支护体系。

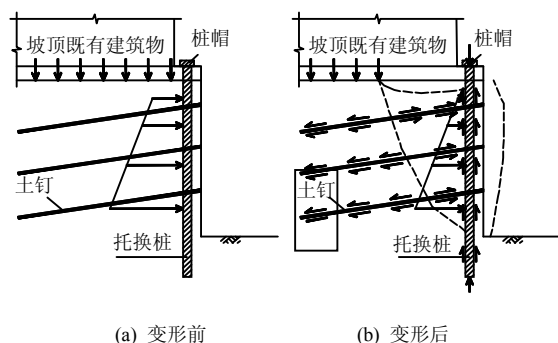


图3 托换桩+土钉墙组合支护体系荷载传递
Fig.3 Load transfer path of UPSN

3 内力和变形的计算方法

托换支护法的主要构件包括托换桩、土钉(锚杆)和上部建筑物基础三部分,支护的目的在于控制基坑开挖引起的坡顶建筑物基础的沉降,坡顶沉降与基坑侧向变形及托换桩的沉降有关,因此需要计算的内容包括基坑侧壁的侧向变形、基坑坡顶沉降和托换桩的沉降。

3.1 基坑侧壁的侧向变形

托换支护法与复合土钉墙的区别是微型桩(托换桩)的桩顶是否和坡顶建筑物基础连接,对于微型桩复合土钉墙的内力和变形计算目前采用桩锚支护计算模型和其他经验模型或公式^[9-11]。这些方法的共同特点都是最重采用杆系有限元进行微型桩的内力和变形的计算。在托换支护法顶部由于托换桩与上部建筑物基础连接在一起,上部结构的侧向刚度相对土体要大得多,所以基坑顶部的侧移几乎为零,具体计算时桩顶位置设置为等效铰支座(见图4),按照多跨梁计算。

计算土压力、等效土弹簧的地基土反力系数、等效土钉锚杆弹簧的刚度系数等按照《建筑基坑支护技术规程》^[12]的有关规定计算。

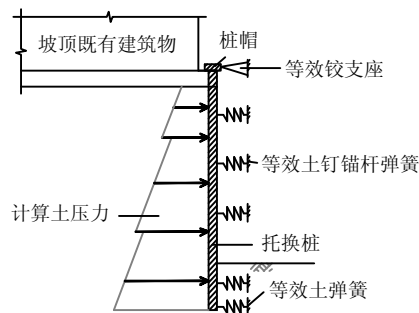


图4 托换桩+土钉墙组合支护体系计算模型
Fig.4 Computing model of UPSN

3.2 托换支护法的坡顶沉降

基坑开挖引起的坡顶土体沉降计算方法主要分为两种:(1)根据开挖深度和地层情况估算墙后最大地表沉降;(2)地层损失法计算地表沉降,即根据地下墙变形的包络面积来推算墙后的地表变形^[13]。主要有数值分析法和实测统计方法,如Peck方法、同济三角形和同济抛物线形^[13]等;李琳等^[14]和王保健等^[15]建立的不同围护结构变形形式与基坑墙后土体沉降之间的经验关系。Goldberg等^[16]把刚性围护结构墙体的侧向变形模式分为平动,如图5(a);绕墙趾向坑内转动,如图5(b)和墙体绕墙顶向坑内转动,如图5(c)共3种,把柔性围护结构的变形模式看做向坑内鼓胀(见图5(d))。杨敏等^[17]根据大量数值和实测结果的统计得到不同模式坡顶沉降的经验公式,其中墙体向坑内鼓胀时基坑侧移和坡顶沉降的经验公式为

$$\delta_{v\max} = 0.82\delta_{h\max} \quad (1)$$

$$\delta_v = \delta_{v\max} \exp[-0.25(x-0.93)^2] \quad (2)$$

式中: $\delta_{h\max}$ 为最大侧向位移(m),按照弹性地基梁法进行计算; $\delta_{v\max}$ 为坡顶最大地面沉降(m); x 为地面某点距坑壁的距离(m)。

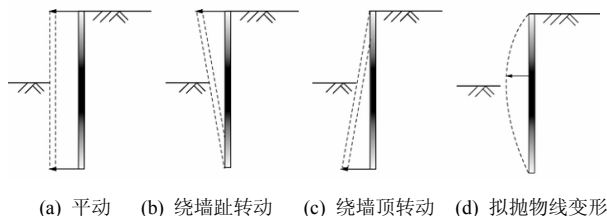


图5 基坑侧向变形模式^[17]
Fig.5 Lateral deformation models of building foundation excavations

由于托换支护法中的托换桩顶部受到坡顶建筑物基础的约束、底部受到土体的约束,且托换桩一般直径较小(200~300 mm),自身刚度较小,基

本属于柔性围护结构, 其变形模式与拟抛物线模式类似, 见图 5(d)。

3.3 托换桩的桩顶沉降

托换桩的桩间距一般在 $6d$ 桩径以上, 在上部荷载作用下的托换桩的桩顶沉降可以按照《建筑桩基技术规范》^[19]中的 MINDLIN 方法进行计算。由于在基坑开挖以上部分, 托换桩一侧受到土体约束, 另一侧受到喷射混凝土面层和土钉锚杆及腰梁的约束, 与完全埋入土层中的侧向阻力不同, 在沉降计算时可考虑对这部分侧阻进行适当折减, 没有经验情况下, 可以按照 50% 考虑。

3.4 变形协调的计算法

根据已有的实测数据、经验公式或理论公式首先假定基坑开挖时坡顶的沉降曲线, 见图 6。同时假定坡顶建筑物基础沉降大于托换桩桩顶沉降 S_2 的部分 (B_0 宽度范围内, 见图 6) 结构荷载转移至托换桩桩顶, 其余的结构荷载仍然通过基底压力转换为传递至基坑侧壁的土压力, 并由托换桩和土钉共同承担水平土压力。

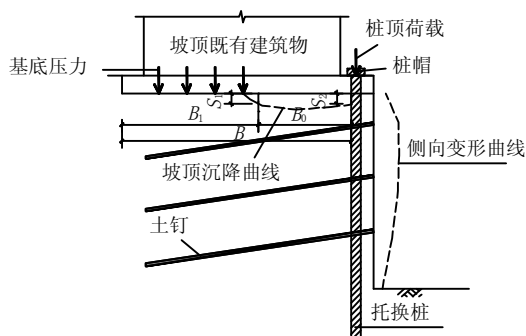


图 6 托换桩+土钉墙组合支护体系变形协调
Fig.6 Deformation coordination mechanism
model of UPSN

已知土层参数、坡顶荷载 p 、托换桩参数 (桩长、桩径和桩间距 S_{ph})、土钉参数 (位置、长度、竖向和水平间距), 计算时初步假定距基坑一定范围 B_0 内的上部荷载全部由托换桩承担 (见图 6), 据此可以计算得到托换桩所承受的荷载 $N = B_0 p S_{ph}$, 进而计算此时托换桩的桩顶变形 S_2 。根据坡顶沉降曲线得到 B_0 宽度内侧一端位置对应的坡顶沉降 S_1 。若 $S_1 > S_2$, 增加 B_0 , 则 S_1 减小, N 增加, 进而得到的调整后 S_2 。同时作用在坡顶的结构荷载减小, 由此引起的基坑侧向土压力减小, 基坑侧壁的侧向变形也减小, 相应的坡顶沉降也减小 (其坡顶沉降曲线也变化), 根据变化后坡顶沉降曲线得到调整后的 S_1 , 通过调整 B_0 反复迭代计算直至 $S_2 = S_1$ 。若 $S_1 < S_2$, 则减小 B_0 , 按照上述步骤反复迭代计算直

至 $S_2 = S_1$ (见图 7)。通过改变托换桩-土钉墙组合支护体系中的参数诸如桩长、桩间距、土钉长度及间距等, 可以使得计算得到的桩顶沉降不大于保证建筑物安全所要求的坡顶建筑物基础的最大沉降 S , 即 $S_2 = S_1 \leq S$, 相应的参数就是保证建筑物安全的设计参数。

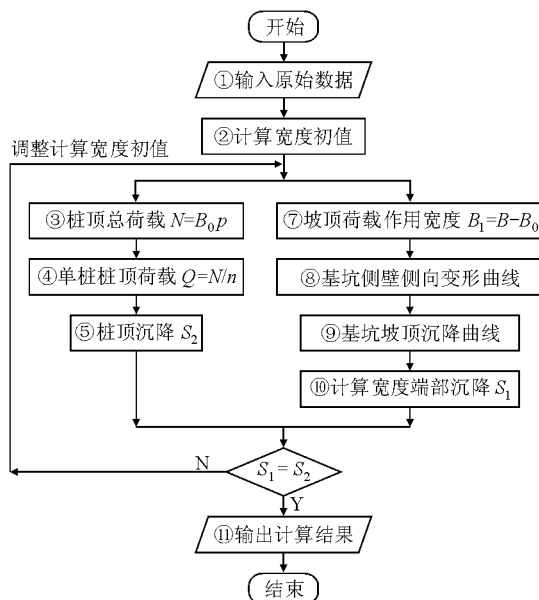


图 7 托换桩-土钉墙组合支护体系计算程序框图
Fig.7 Block diagram of computing program of UPSN

在具体的设计计算中, 需要根据《建筑地基基础设计规范》^[20]并结合建筑物自身结构特点和功能, 确定保证坡顶建筑物安全和正常使用需要的控制目标沉降限制 S 。

4 计算分析

4.1 基本计算参数

基坑开挖深度为 6 m, 坡顶建筑荷载为 60 kPa, 托换桩桩径为 220 mm, 桩长 8 m, 桩水平间距为 1 m。设置 2 道土钉锚杆 (长度都为 9 m, 施加 30 kN 的预加力)。按照均值土体考虑, 内摩擦角为 15° , 黏聚力 10 kPa, 压缩模量 5 MPa。为了对比分析托换支护法和复合土钉墙的受力和变形的区别, 托换支护法中微型桩为坡顶既有建筑物基础连接并设置桩帽, 见图 8(b), 复合土钉墙中微型桩上部在坡顶既有建筑物基础外侧并设置冠梁, 见图 8(a)。

4.2 内力和变形的基本规律对比分析

根据上述计算理论编制计算程序, 分别计算不同计算宽度 B 时坡顶沉降 S_1 和托换桩桩顶沉降 S_2 , 两根曲线交点位置 (见图 9, $B = B_0$) 即为经过变形协调后 $S_1 = S_2$ 的位置, 相应的托换桩桩顶荷载即为 $N = B_0 p S_{ph}$ 。

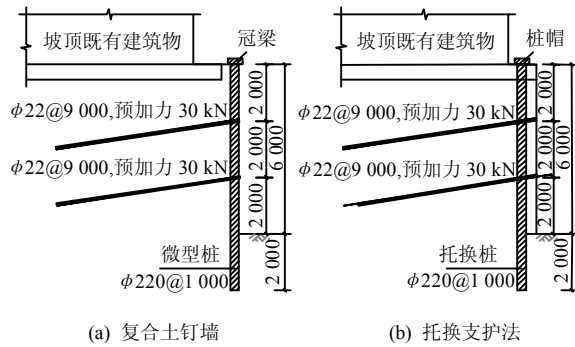


图 8 基坑支护剖面图 (单位: mm)

Fig.8 Retaining and protection section of building foundation excavations(unit: mm)

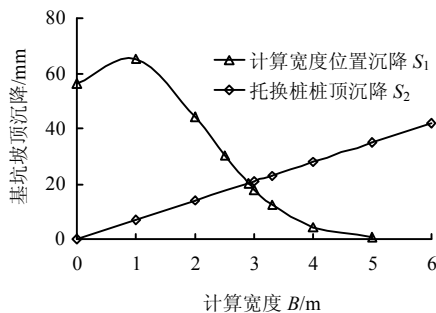


图 9 托换支护变形与计算宽度的关系

Fig.9 Deformation of underpinning pile and calculation widths

对比分析托换支护法和复合土钉墙在相同参数情况下的变形可以看出,托换支护法相对复合土钉墙可以大大减小基坑侧向变形和坡顶建筑物沉降(见图 10),同时也可以减小桩身弯矩和剪力(见图 11)。在复合土钉墙支护中微型桩上部处于悬臂状态(第 1 道土钉锚杆以上部分),在坡顶建筑物荷载作用下其顶部侧向变形较大,相应的坡顶沉降也较大,而在托换支护法中微型桩上部受到坡顶建筑物基础的约束作用,其顶部侧向变形为零,由于微型桩的托换作用相应的坡顶最大沉降也仅为托换桩的沉降,因此其坡顶沉降也较小。

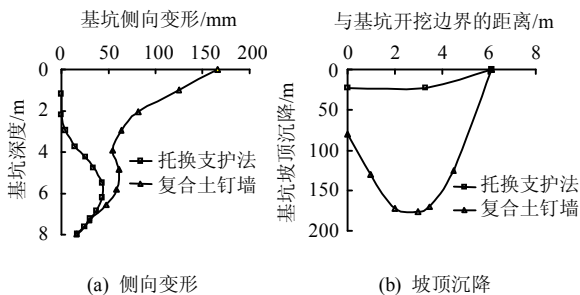


图 10 两种支护法的侧向和竖向变形

Fig.10 Lateral and vertical deformation of UPSN and complex soil nailing

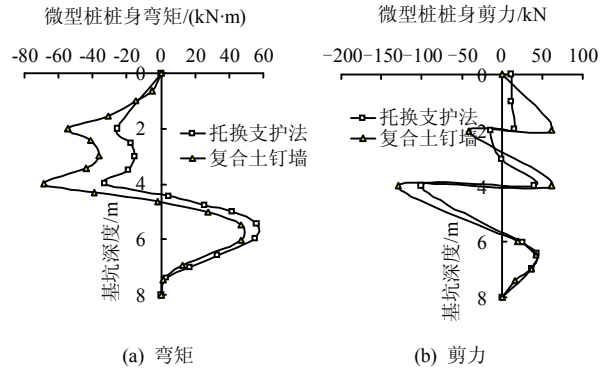


图 11 两种支护法的微型桩桩身内力

Fig.11 Inner forces of UPSN and complex soil nailing

基于同样的道理,由于托换桩通过托换作用把部分坡顶建筑物荷载转移至托换桩,使得原来作用于微型桩的部分侧向土压力转变为作用在托换桩桩顶的竖向荷载,侧向土压力减小,桩身的弯矩和剪力也相应减小。

4.3 坡顶结构荷载的影响

坡顶既有建筑物基底压力 P 在传统的复合土钉墙中直接转化为侧向土压力,直接引起微型桩的侧向变形;而在托换支护法中其则部分转化为侧向土压力引起托换桩的侧向变形,部分转化为托换桩的竖向桩顶荷载引起托换桩的沉降。所以,当 P 增加时,无论是托换支护法还是复合土钉墙,其内力和变形都增加(见图 12、13)。但由于托换桩竖向刚度大于其侧向刚度,当坡顶结构荷载增加时托换支护法中基坑的侧向变形、坡顶沉降、微型桩桩身弯矩及剪力的增幅都小于传统复合土钉墙中相应参数的增幅。

4.4 微型桩参数的影响

微型桩的嵌固深度 D 和水平桩间距 S 是影响托换支护法和复合土钉墙内力和变形的主要因素。当 D 增加时,基坑开挖面以下的微型桩抗力增加,但由于基坑被动区的抗力大小与相应位置微型桩的侧

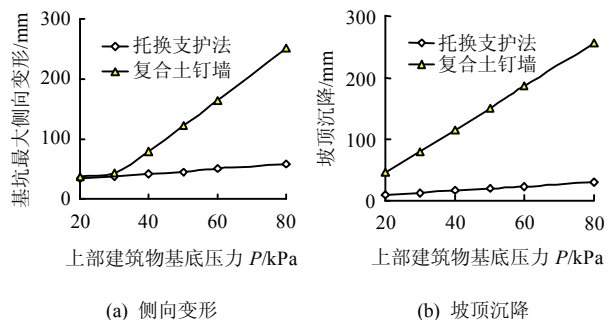


图 12 支护变形与上部建筑物基底压力的关系

Fig.12 Deformation of underpinning pile and presses of foundation

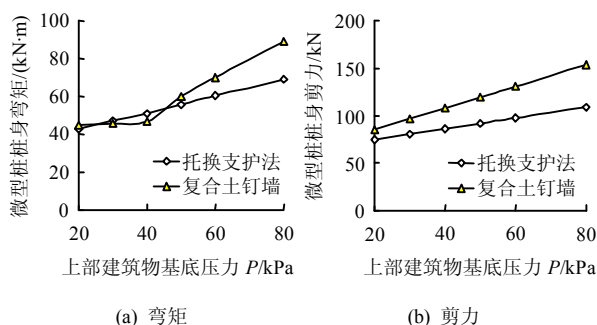


图 13 微型桩桩身内力与上部建筑物基底压力的关系

Fig.13 Inner forces of underpinning pile and presses of foundation

向变形有关。对于水平受荷桩存在一个临界嵌固长度 $D_{cr}^{[21]}$, 当 $D > D_{cr}$ 后再增加 D , 无论对于托换支护法还是复合土钉墙中微型桩的内力和变形基本不变, 如图 14 和图 15 所示。

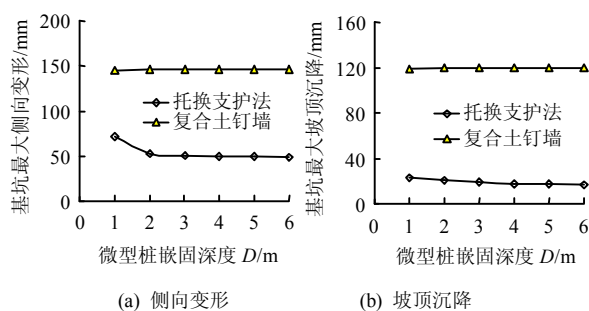


图 14 支护变形与微型桩嵌固深度的关系

Fig.14 Lateral deformation and embedded depths of micro-pile

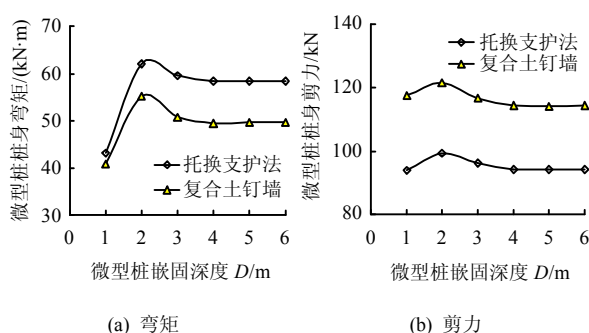


图 15 微型桩桩身内力与其嵌固深度的关系

Fig.15 Inner forces and embedded depths of micro-pile

当微型桩的桩间距 S 增加时, 在同样的坡顶荷载作用下, 单根微型桩所承担的水平荷载随之增加, 所以无论是托换支护法还是复合土钉墙, 其内力和变形都增加 (见图 16、17)。同样, 由于托换桩竖向刚度大于其侧向刚度, 基于与坡顶荷载增加时的同样原因, 托换支护法中基坑的变形和微型桩

的内力增幅都小于传统复合土钉墙中相应参数的增幅。

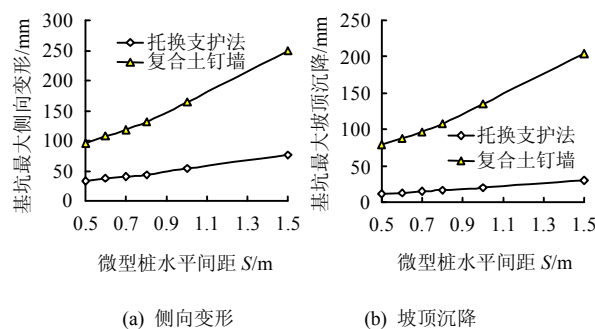


图 16 支护变形与微型桩水平间距的关系

Fig.16 Lateral deformation and horizontal spaces of micro-pile

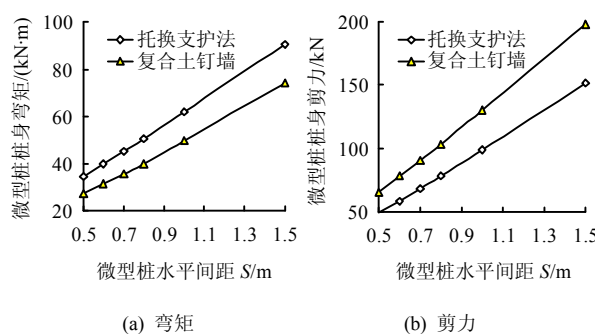


图 17 微型桩桩身内力与其水平间距的关系

Fig.17 Inner forces and horizontal space of micro-pile

5 结 语

托换支护法作为一种新型支护技术, 其通过既能承受竖向荷载又能承受水平荷载的托换桩的转换作用, 把部分坡顶建筑物荷载由坡顶转移至深部土体, 大大减小了坡顶荷载对基坑侧壁的影响, 同时通过托换桩与坡顶建筑物基础的连接, 发挥了坡顶建筑物主体结构对基坑侧壁变形的限制作用, 使得坡顶建筑物对基坑安全的不利影响部分转化为有利作用。

相对传统的复合土钉墙支护, 新型托换桩-土钉墙组合支护结构可以很明显的减小支护结构的变形和内力, 随坡顶荷载的增加托换支护法中支护结构的内力和变形的变形增速明显小于复合土钉墙的, 随微型桩水平间距的增加支护结构的变形和内力都增加, 微型桩嵌固深度的增加对支护结构的内力和变形影响较小。

本文只是对托换支护桩的作用机制进行初步的探索性的研究, 后续还需要通过更好的理论分析、现场试验和室内试验做更深一步的研究。

参考文献

- [1] MORGAN, RUSSELL J, JOHNSEN, LAWRENCE F, et al. Permanent excavation support and underpinning in sands[J]. **Geotechnical Special Publication**, 1992, 30(2): 778—790.
- [2] VAN R, DANIEL J, DILL, et al. Design and construction of a multiple-drift subway underpinning structure for Boston's central artery/tunnel project[C]//Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference. [S.l.]: [s.n.], 2001: 187—198.
- [3] 陈家琪, 褚既武. 浅谈超前托换对深基坑周边建筑物的保护[J]. 有色金属矿产与勘查, 1998, 7(3): 187—189. CHEN Jia-qi, ZHU Ji-wu. A discussion of pre-reinforcing for the protection of the surrounding constructions in the deep foundation pit[J]. **Geological Exploration for Non-Ferrous Metals**, 1998, 7(3): 187—189.
- [4] 魏焕卫, 孙剑平, 陈启辉, 等. 复杂条件下邻近建筑物的保护和基坑支护[J]. 施工技术, 2005, 34(6): 48—50. WEI Huan-wei, SUN Jian-ping, CHEN Qi-hui, et al. Adjacent building protection and foundation pit support under complicated conditions[J]. **Construction Technology**, 2005, 34(6): 48—50.
- [5] 刘相宜, 魏焕卫, 张鑫. 基于变形控制的基坑开挖和邻近建筑物保护技术[J]. 工业建筑, 2007, 37(1): 69—72. LIU Xiang-yi, WEI Huan-wei, ZHANG Xin. Support for foundation excavation and protection of adjacent building based on displacement control[J]. **Industrial Construction**, 2007, 37(1): 69—72.
- [6] 李欢秋, 吴祥云, 袁诚祥, 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 Xiang-yun, YUAN Cheng-xiang, 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.
- [7] 肖春喜, 张华, 刘泉声. 紧邻边坡建筑物基础软托换及边坡喷锚网加固技术[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 835—838. XIAO Chun-xi, ZHANG Hua, LIU Quan-sheng. Soft underpinning for buildings close to a slope and spray anchor network reinforcement of slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(5): 835—838.
- [8] 刘毓毓, 李协, 陈福全. 深基坑工程软托换技术影响因素分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1534—1539. LIU Yu-chuan, LI Xie, CHEN Fu-quan. Numerical analysis of effect of underpinning on excavation bracing[J]. **Soil and Rock Mechanics**, 2008, 29(6): 1534—1539.
- [9] 魏焕卫, 宋丰波, 杨敏, 等. 复合土钉墙变形的实用计算方法[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊 1): 156—162. WEI Huan-wei, SONG Feng-bo, YANG Min, et al. Simplified calculation method of composite soil nailing lateral displacement[J]. **Engineering Mechanics**, 2011, 28(Supp.1): 156—162.
- [10] 尹骥, 魏建华, 李象范. 计算复合土钉支护变形的增量方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 755—759. YIN Ji, WEI Jian-hua, LI Xiang-fan. Increment method to calculate displacement of composite soil nailed wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 755—759.
- [11] 魏有龙. 复合土钉墙的水平位移分析与预测[硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [12] 中国土木工程学会. JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [14] 李琳, 杨敏, 熊巨华. 软土地区深基坑变形特性分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4): 66—72. LI Lin, YANG Min, XIONG Ju-hua. Analysis of the deformation characteristics of deep excavations in soft clay[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(4): 66—72.
- [15] 王保建, 熊巨华, 朱碧堂. 基坑围护结构变形模式对地面沉降的影响[J]. 结构工程师, 2007, 23(3): 48—52. WANG Bao-jian, XIONG Ju-hua, ZHU Bi-tang. Influence of deformation mode of retaining structures on surface settlement[J]. **Structural Engineers**, 2007, 23(3): 48—52.
- [16] GOLDBERG D T, JAWORSKI W E, GORDON M D. Lateral support systems and underpinning(Vol.II): Design fundamentals[M]. [S.l.]: [s.n.], 1976: 6—27.
- [17] 杨敏, 卢俊义. 上海地区深基坑周围地面沉降特点及预测研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 待刊. YANG Min, LU Jun-yi. Characteristics and prediction of ground settlement around deep excavation in Shanghai[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, in press.
- [18] 中国建筑科学研究院. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [19] 中国建筑科学研究院. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [20] 魏焕卫, 杨敏. 大面积堆载情况下邻桩的有限元分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(8): 30—33. WEI Huan-wei, YANG Min. Finite element analysis of adjacent pile under extensive accumulation[J]. **Industrial Construction**, 2001, 31(8): 30—33.